

На правах рукописи



**Кривоногов Алексей Александрович**

**СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И  
ОПТИМИЗАЦИИ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТОДА ТРАНСФОРМАЦИИ СИГНАЛА**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2018

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель**

доктор технических наук, доцент  
Карташев Александр Леонидович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
профессор Ячиков Игорь Михайлович,  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»  
кафедра вычислительной техники и программирования, профессор;

кандидат технических наук,  
Салич Василий Леонидович,  
АО «Научно-исследовательский институт машиностроения»  
научно-исследовательский отдел перспективных разработок,  
ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»

Защита состоится 24 декабря 2018 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.298.14 при Южно-Уральском государственном университете, по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета, а также на сайте  
<https://www.susu.ru/dissertation/d212-298-14>

Автореферат разослан 21 октября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук, доцент



А.В. Келлер

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время системы компьютерного моделирования широко применяются в имитации различных гидрогазодинамических процессов. Однако моделирование течений жидкости и газа или Computation Fluid Dynamics (CFD) – вычислительная гидродинамика, является одним из наиболее сложных направлений в имитации физических процессов. Математическое моделирование вихревых потоков в природе и технике, в общем случае, проводится с помощью системы уравнений Навье – Стокса, вместе с тем решение данной системы прямыми численными методами по типу DNS применительно к промышленным задачам в настоящий момент не представляется возможным. Возникает потребность в высоком разрешении сеточной модели, с учетом малых вихрей Колмогоровского масштаба, существенно замедляющей процесс разработки новых продуктов, таких как: вихревые расходомеры, защитные гильзы датчиков температуры, запорная арматура и др. В современных реалиях глобальной рыночной экономики это является недопустимым условием. Поэтому актуальной тенденцией в развитии математического моделирования гидрогазодинамических течений является разработка разнообразных методов, позволяющих выполнять компьютерное моделирование на современном вычислительном оборудовании за приемлемое время, без потери точности получаемых результатов. Например, методы RANS, LES, DES и SAS SST, большинство из которых, реализованы в системах инженерного анализа (ANSYS CFX, ANSYS Fluent, STAR-CD, FLOWEFD, NUMECA, OpenFOAM, Phoenix и др.).

Исследованиями в данной области занимались А.В. Гарбарук, D.C. Wilcox<sup>1</sup>, П. Роуч, С. Патанкар, И.А. Белов, Р.А. Spalart, В.Л. Салич<sup>2</sup> и др., однако вопрос о длительном времени моделирования остается актуальным, в особенности при выполнении нестационарных расчетов турбулентных течений таких, как эффект периодического вихреобразования Кармана. В технике наиболее ярким примером применения течения Кармана служит проточная часть вихревого расходомера. При создании измерительной системы вихревого расходомера основной проблемой является обеспечение стабильности процесса вихреобразования в достаточно широком диапазоне скоростей. Достигается это за счет выбора оптимальной формы тела обтекания в проточной части. Вопросы вихреобразования подробно рассматривались в ряде работ V. Strouhal, J.W. Strutt 3<sup>rd</sup> Baron Rayleigh, T. Von Karman, R.C. Baker<sup>3</sup>, R.W. Miller, Л.Г. Лойцянского, П.П. Кремлевского и др. Наиболее распространенным подходом для определения оптимальной формы тела обтекания к настоящему моменту является эксперимент, но этот процесс требует много времени (2–3 года) и материальных затрат, что не позволяет оперативно проводить исследования большого числа возможных вариантов конструкций. Поэтому для имитации

---

<sup>1</sup> Wilcox, D.C. Turbulence Modeling for CFD / D.C. Wilcox. – La Canada, California: DCW Industries Inc., 1998. – 477 p.

<sup>2</sup> Салич, В.Л. Численное исследование рабочего процесса в камере ракетного двигателя малой тяги на кислородно-водородном топливе / В.Л. Салич // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 187-195.

<sup>3</sup> Baker, R.C. Flow measurement handbook: handbook. / R.C. Baker. – New York: Cambridge University Press, 2000. – 524 p.

процесса нестационарного вихреобразования в проточной части вихревого расходомера, все чаще применяется компьютерное моделирование в трехмерной постановке, так как течение является пространственным. Трехмерное моделирование, как мощное средство расчета пространственного вихревого течения в расходомере, обладает существенным недостатком – значительным временем вычислений. Больше всего данный недостаток проявляется при решении задач оптимизации<sup>4</sup>, которые связаны с проведением серии последовательных расчетов характеристик вихревого расходомера. Система компьютерного моделирования для оптимизации проточной части вихревого расходомера представлена в работах Сафонова Е.В, Богданова В.Д<sup>5</sup>, при этом модель строилась в трехмерной постановке и требовалось использование суперкомпьютерных ресурсов. Даже при использовании суперкомпьютера, время одного расчета занимает от 4 до 7 дней. На одну точку оптимизации требуется от 5 до 8 расчетов, точек берется от 20 до 50. В результате процесс оптимизации занимает от 13 до 93 месяцев, в зависимости от вычислительного оборудования и плотности вычислительной сетки.

На основании вышеизложенного, актуальной является задача разработки системы компьютерного моделирования, позволяющей выполнять оптимизацию вихревого течения за счет изменения формы проточного тракта расходомера и других устройств с вихревым течением Кармана за приемлемое время (1–3 месяца), содержащей эффективный численный метод, снижающий время моделирования с сохранением заданной точности результатов.

**Цель работы** – разработка системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации параметров сигнала, реализованной в виде комплекса программ для оптимизации формы проточной части вихревого расходомера и других устройств с течением Кармана.

Для достижения данной цели необходимо реализовать следующие задачи:

1. Анализ современных подходов к моделированию турбулентных течений с когерентными вихревыми структурами для исследования эффекта периодического вихреобразования Кармана, на примере проточной части вихревого расходомера.

2. Разработка системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения Кармана за счет изменения формы проточной части вихревого расходомера и других устройств с данным типом течения.

3. Разработка оптимальной расчетной схемы и модели турбулентности, для имитации нестационарного вихреобразования в проточной части вихревого расходомера.

4. Разработка эффективного вычислительного метода трансформации сигнала плоского течения в сигнал пространственного.

5. Разработка метода оптимизации на базе компьютерной модели проточного

---

<sup>4</sup> Ячиков, И.М. Математическая модель движения частицы в металлическом расплаве / И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин, К.А. Данилюк // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – №5(149). – С. 205-212.

<sup>5</sup> Оптимизация расположения сенсора пульсаций давления в проточной части вихревого расходомера / В. Д. Богданов, А.В. Конюхов, Е.В. Сафонов и др. // Датчики и системы, 2012. – №8(159). – С. 38-39.

тракта с вихревым течением Кармана.

6. Анализ эффективности предложенной системы компьютерного моделирования, реализованной в виде комплекса программ на базе вычислительных и натуральных экспериментов.

#### **Научная новизна работы.**

*В области математического моделирования* в диссертационном исследовании впервые 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. Предложена целевая функция для оптимизации проточной части вихревого расходомера, в качестве критерия используется максимальное относительное отклонение 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. Метод основан на двухэтапном алгоритме, снижающем количество расчетных точек для спектральной обработки сигнала в 5 – 7 раз по сравнению с Фурье анализом. 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. 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» [6] и «Модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь – 2D» [7], 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 значимость** диссертационного исследования заключается в разработке и обосновании нового подхода к моделированию процесса нестационарного вихреобразования в проточной части вихревого расходомера и последующей оптимизации ее формы, представленного в виде системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения. Полученные двухэтапный метод обработки и восстановления сигнала и аналитическая формула трансформации параметров сигнала плоского течения в значения пространственного развивают, как методы обработки сигналов, так и методы

математического моделирования и оптимизации проточных частей устройств с эффектом Кармана, таких как вихревые расходомеры. Разработан эффективный численный метод оптимизации, развивающий методы поиска оптимальных решений.

**Практическая значимость** работы заключается в применимости разработанной системы компьютерного моделирования в различных областях исследований, где наблюдается эффект Кармана. Эта система компьютерного моделирования, позволяет: выполнять расчеты в 40 – 50 раз быстрее, чем общепринятый подход, основанный на трехмерной математической модели и одноэтапной спектральной обработке; получать оптимальные параметры проточных частей устройств с вихревым течением Кармана для заданных рабочих характеристик, что способствует повышению качества 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, получен акт о внедрении.

#### **Методология и методы исследования.**

При разработке компьютерной модели проточной части вихревого расходомера использовались аналитические исследования, математическое моделирование, численный эксперимент в программном комплексе ANSYS, а также натурный эксперимент, с использованием теории статистической обработки сигналов, спектральная обработка методом Фурье – анализа, метод Ньютона поиска минимального среднеквадратичного отклонения. Для создания вычислительного метода трансформации использовались математические методы обработки и восстановления цифровых и аналоговых сигналов, а также теории отрывных течений и пограничного слоя. При разработке метода оптимизации использовался метод поиска экстремума целевой функции Розенброка, выполнялись тестовые численные расчеты вихревого течения в проточной части вихревого расходомера, а также экспериментальные испытания. Для разработки программного комплекса использовались языки программирования Fortran и C++.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на 8 международных и региональных конференциях: восьмая международная научная конференция «Забабахинские научные чтения 2017», Снежинск [10, 11]; одиннадцатая международная научная конференция «Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2017)», Казань [9]; международная научно-техническая конференция «Пром-инжиниринг», Санкт-Петербург, 2017 год [8]; конференция, посвященная дню космонавтики «Динамика и прочность машин» ЮУрГУ, Челябинск, 2017 год; Восьмая научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ, Челябинск, 2016 год; седьмая научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ, Челябинск, 2015 год; шестьдесят шестая конференция профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ, Челябинск, 2014 год [12]; шестая научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ, Челябинск, 2014 год.

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликовано 12 работ [1–12], в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендованных ВАК [1–5], 2 в изданиях, индексируемых международной реферативной базой данных SCOPUS [3,8], 2 программы для ЭВМ [6–7]. В совместных с научным руководителем работах научному руководителю принадлежит постановка задачи, в диссертацию вошли только результаты, полученные ее автором и не затрагивают интересы соавторов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 140 наименований, изложенных на 197 страницах, включая 91 рисунок, 21 таблицу и 3 приложения.

### **Краткое содержание диссертации**

Во **введении** представлено обоснование актуальности избранной темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель и основные задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимости полученных результатов, методология и методы диссертационного исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, дана общая характеристика структуры работы.

В **первой главе** представлен анализ современных методов математического моделирования нестационарных вихревых течений на примере вихревого расходомера. В **п. 1.1** проведен анализ современных методов измерения расхода при помощи вихревого расходомера, рассмотрена типичная конструкция измерительного устройства. Представлено описание эффекта нестационарного вихреобразования Кармана. Приведены характеристики вихревых потоков в стеснённых каналах, на примере расходомерных устройств. Установлено, что основной проблемой при разработке расходомера является получение оптимальной формы проточной части с заданными рабочими характеристиками. В **п. 1.2** рассмотрена проблема математического моделирования вихревых потоков и сложных технических систем. Описаны свойства математических моделей: устойчивость, сходимость, адекватность, точность вычислений. Основная проблема моделирования вихревых потоков – это длительное время расчета, так как требуется выполнять нестационарные гидродинамические расчеты в трехмерной постановке. Рассмотрены возможности численного моделирования вихревых потоков с помощью разностных схем и пакетов прикладных программ. В **п. 1.3** исследованы методы оптимизации, которые предполагается использовать в разрабатываемой системе компьютерного моделирования. В **п. 1.4** представлено обоснование актуальности выполняемого исследования, описаны основные требования к разрабатываемой системе компьютерного моделирования, позволяющей получать оптимальную форму проточной части вихревого расходомера за приемлемое время, не требуя применения суперкомпьютера, с сохранением заданной точности результатов.

**Вторая глава** посвящена разработке системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала В **п. 2.1** рассмотрены различные пути решения поставленной

задачи, из которых выполнен выбор наиболее эффективных, с учетом физических факторов, оказывающих влияние на процесс вихреобразования в проточной части [5]. Применительно к данной задаче, наиболее эффективным является путь снижения размерности задачи, за счет перехода от трехмерной модели к двумерной, поскольку течение является нестационарным. В п. 2.2 представлено построение компьютерной модели для вихревого течения Кармана в проточной части расходомера. Установлено, что достаточно использовать два уравнения (движения и сохранения импульса) из системы уравнений Навье – Стокса с осреднением по Рейнольдсу (RANS) [4], при математическом моделировании вихревого течения в проточной части вихревого расходомера (рис. 1) в ANSYS CFX, необходимо использовать блочно-структурированную гексагональную сетку и начальный профиль скорости [12].

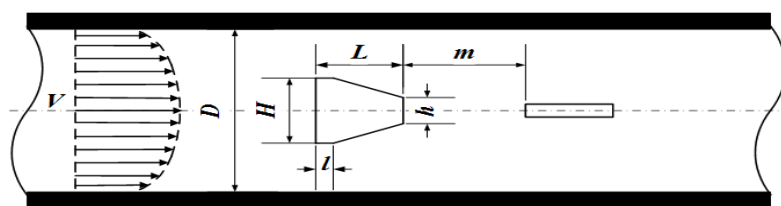


Рисунок 1 – Расчетная схема проточной части вихревого расходомера.

По результатам тестовых расчетов параметров течения в проточной части вихревого расходомера сделан вывод о том, что наиболее оптимальными моделями турбулентности являются  $k-\epsilon$  и SST [3]. Модели показывают высокую точность и при этом не требуют длительного времени расчета, поскольку точка отрыва на теле обтекания строго определена – острая кромка. В п. 2.3 разработан математический метод сокращения времени расчета, за счет моделирования вихревого течения в проточной части расходомера в двумерной постановке с последующей трансформацией искомым параметров сигнала в трехмерные. Выполнена серия тестовых расчетов на плоской и трехмерной моделях, с использованием экспериментальных данных [2]. При сравнении результатов моделирования, установлено, что выходные сигналы пульсаций давления вихрей (рис.2), полученные в контрольной точке, расположенной на пересечении осей сенсора и проточной части, на трехмерной и плоской моделях отличаются, по частоте, фазе и амплитуде [10, 11].

Установление соответствия между результатами 3D и 2D моделирования (иначе – «метод трансформации») возможно с помощью введения так называемой «функции трансформации» или, что является более привычным названием, «передаточной функции», которая в общем случае имеет следующий вид:

$$F = F \{ f_m, a_m, \varphi_m, d_y, v, Re, Sh, \widetilde{Sh}, (x_i, y_i), \rho, \mu \}, \quad (1)$$

где  $f_m$  – частота колебаний  $m$ -ой моды, Гц;  $a_m$  – амплитуда колебаний  $m$ -ой моды, Па;  $\varphi_m$  – фаза (фазовый сдвиг) колебаний  $m$ -ой моды;  $d_y$  – диаметр вихревого расходомера, м;  $v$  – скорость потока, м/с;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Sh$  – число Струхалия;  $\widetilde{Sh}$  – максимальное относительное отклонение числа Струхалия к среднему значению в заданном диапазоне чисел Рейнольдса;  $(x_i, y_i)$  – координаты базовых точек;  $\rho$  – плотность рабочей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость рабочей среды, Па·с.



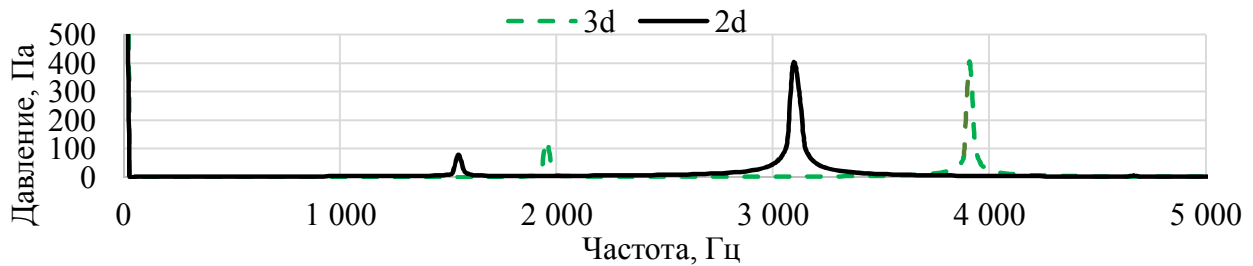


Рисунок 2 – Спектры пульсаций давления вихрей в точке.

В качестве определяющих независимых переменных функции вида (1), одинаковых для параметров 3D и 2D моделирования, выбраны параметры:  $d_y$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $(x_i, y_j)$ ,  $Re$ . В качестве зависимых переменных (получаемых в результате расчета по 3D и 2D моделям), выбраны параметры:  $f_m$ ,  $a_m$ ,  $\varphi_m$ ,  $Sh$ ,  $\widetilde{Sh}$ . Соответственно математический метод, представленный соотношением (1), состоит из трех компонентов, определяющих функции трансформации  $f_m$ ,  $a_m$ ,  $\varphi_m$ .

По результатам математического моделирования при помощи 2D и 3D моделей, проведена оценка сокращения времени расчета на 2D модели по сравнению с 3D моделью (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение времени расчета на 2D и 3D моделях

Модель	Кол-во ядер	Время, час	Ускорение	Эфф-ть, %	Исп. память, МБ	Кол-во ячеек на ядро
3D	1	6,167			213,49	156264
	2	3,167	1,95	97,37	80,90	78132
	4	1,662	3,71	92,75	80,90	39066
	8	1,208	5,10	63,79	80,90	19533
	16	0,892	6,92	43,22	80,90	9767
2D	1	0,416			87,29	5601
	2	0,252	1,65	82,48	22,86	2801
	3	0,209	1,99	66,42	22,86	1867
	8	0,148	2,81	35,14	22,86	700

При равном числе используемых ядер (8 ядер) 2D расчет быстрее 3D расчета в  $\sim 8$  раз. Если сравнивать расчеты с одинаковой эффективностью, то ускорение составляет  $\sim 5,7$  раз.

В п. 2.4 разработан математический метод оптимизации проточной части вихревого расходомера. Выделены основные параметры, определяющие геометрические характеристики вихревого расходомера – заданные и варьируемые (см. рис.1). К числу заданных параметров геометрии проточного тракта вихревого расходомера следует отнести:  $D$  – диаметр проточного тракта вихревого расходомера, м;  $V$  – профиль скорости набегающего потока, м/с. К числу варьируемых параметров геометрии проточного тракта вихревого расходомера следует отнести:  $H$ ,  $L$ ,  $l$ ,  $h$ ,  $t$  (см. рис.1). Данные параметры полностью определяют геометрию проточной части расходомера. Критерием оптимизации  $K$  является максимальное относительное отклонение числа Струхалия к среднему значению в заданном диапазоне чисел Рейнольдса:

$$K = \widetilde{Sh} = \frac{\Delta Sh}{Sh}, \text{ при } Re_{min} \leq Re \leq Re_{max}, \quad (2)$$

где  $-\Delta Sh = Sh_i - \overline{Sh}, \overline{Sh}$  среднее значение числа Струхала в заданном диапазоне чисел Рейнольдса,  $Sh_i$  – текущее расчетное значение числа Струхала.

Ядром процедуры оптимизации являются:

- компьютерная модель проточного тракта вихревого расходомера, включающая 2D моделирование турбулентного течения и процесса вихреобразования;
- метод поиска экстремума целевой функции – метод Розенброка с дискретным шагом и применением одномерной минимизации.

Таким образом, задача оптимизации сводится к поиску экстремума целевой функции следующего вида:

$$K = \widetilde{Sh} = \frac{\Delta Sh}{Sh} = f(H, L, l, h, m, D, Re, \rho, \mu), \quad (3)$$

при заданных  $D$ , диапазоне рабочих параметров – чисел Рейнольдса, свойствах рабочей среды. Для целевой функции (3) не требуется знания ее аналитического выражения, так как ее значение на каждом шаге вычисляется при помощи математической модели. Выполнением критерия оптимизации (2) является нахождение значений  $\widetilde{Sh}$  в заданной области значений (4) во всем диапазоне рабочих параметров – чисел Рейнольдса:

$$-\widetilde{Sh}_{пред} \leq \widetilde{Sh} \leq +\widetilde{Sh}_{пред}, \quad (4)$$

где  $\widetilde{Sh}_{пред}$  – предельное значение  $\widetilde{Sh}$  при оптимизации.

Определение экстремального значения целевой функции – критерия оптимизации (2) производится с помощью варьирования параметров по алгоритму, задаваемому методом оптимизации и расчета параметров потока в вихревом расходомере на каждом шаге многомерной оптимизации. В п. 2.5 предложены функциональные структуры методов трансформации параметров сигнала 2D течения в значения для 3D потока и метода оптимизации ПЧ ВР с использованием 2D моделирования. Разработана функциональная структура для системы компьютерного моделирования и оптимизации с применением вычислительного алгоритма трансформации сигнала (рис. 3) [8].

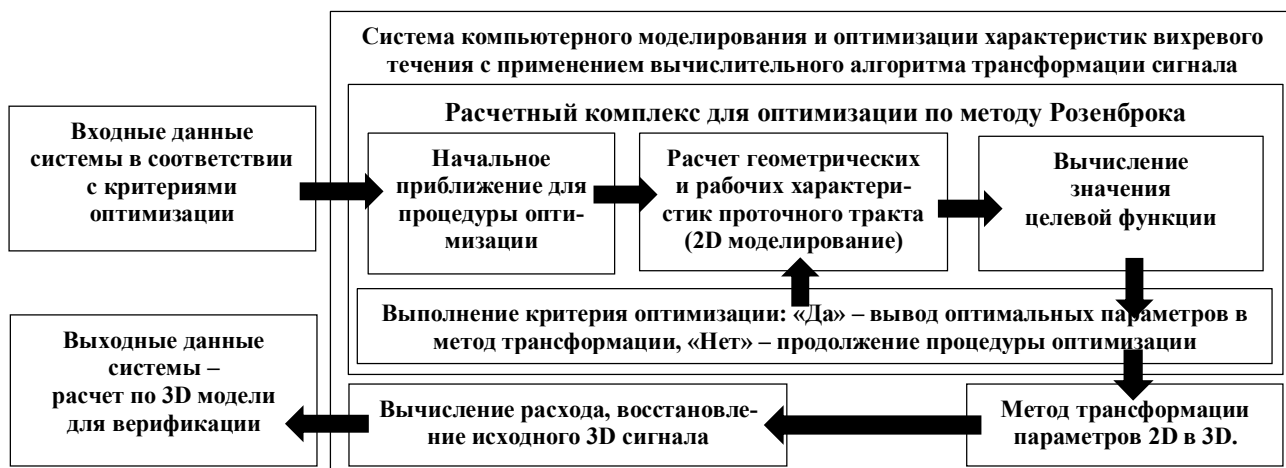


Рисунок 3 – Функциональная структура системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения с применением вычислительного алгоритма трансформации сигнала.

**Третья глава** посвящена разработке численных методов и алгоритмов с дальнейшей программной реализацией. В п. 3.1 представлен вычислительный алгоритм математического метода трансформации параметров сигнала 2D течения в значения 3D потока. Определены функциональные зависимости и передаточные коэффициенты. Представлен метод ускоренной обработки моделируемого сигнала.

Алгоритм основан на методах цифровой обработки сигнала, получаемого в результате численного моделирования вихревого течения. В соответствии с целями настоящей работы для анализа частотных, амплитудных и фазовых характеристик пульсаций давления, сигнал представлен в виде временного ряда  $P(t_i)$ , имеющего периодические составляющие, в равноотстоящих узлах  $t_1...t_n$ . Данный ряд описывает изменение статического давления в точке мониторинга, ряд рассматривается, начиная с некоторого момента времени расчета, после завершения переходного процесса от начальных условий расчета и установления периодических колебаний в точках мониторинга. Далее выполняется аппроксимация временного ряда  $P(t_i)$  непрерывной функцией  $p(t)$  вида:

$$p(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i), \quad (5)$$

где  $A_0$  – постоянная составляющая сигнала,  $A_i, f_i, \varphi_i$  – амплитуда, частота и фаза  $i$ -ой гармоники,  $k$  – число гармонических составляющих.

Аппроксимация проводится в 2 этапа.

**Первый этап.** С помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) определяется наличие гармонических составляющих в исходном сигнале (см. рис. 2). Выделяются гармоники  $k$ , амплитуда которых превышает заданный порог от максимальной амплитуды имеющихся гармоник. Принимается значение данного порога равное 10%. Восстановленный по выделенным гармоникам сигнал отличается от исходного, так как рассматривается не полный диапазон (рис. 4). Для нивелирования данного расхождения выполняется второй этап.

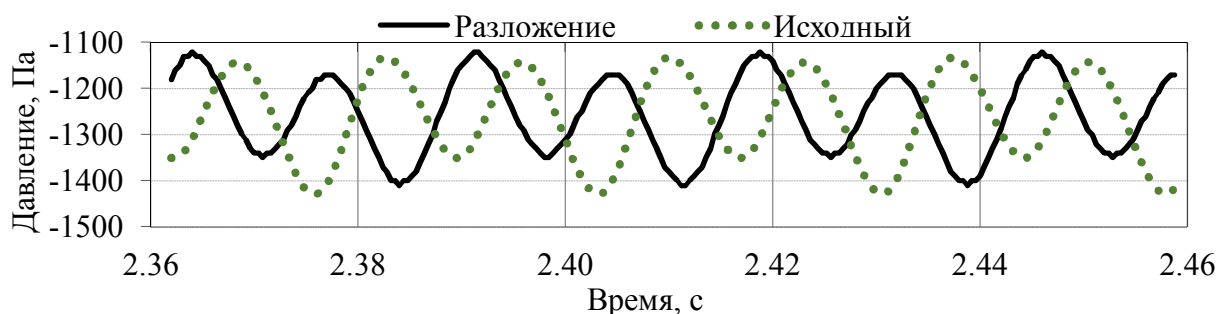


Рисунок 4 – Результат восстановления сигнала по двум гармоникам после БПФ.

**Второй этап.** Принимаются коэффициенты  $A_i, f_i, \varphi_i$  за параметры регрессии и определяется методом наименьших квадратов (МНК). Будем считать, что  $p(t)$ (5) построена при условии наилучшего квадратичного приближения, для чего определяется минимум функции:

$$\sum_{j=1}^n (P(t_j) - p(t_j, A_i, f_i, \varphi_i))^2 \rightarrow \min_{A_i, f_i, \varphi_i}. \quad (6)$$

Задача минимизации решается методом Ньютона, с использованием значений  $A_i, f_i, \varphi_i$ , полученных методом БПФ на первом этапе работы алгоритма в качестве начального приближения. В результате работы алгоритма определяются значения амплитуды, частоты и фазы для зависимости (сигнала) давления от времени  $(A_i, f_i, \varphi_i)_{2D}$ , полученные в результате 2D моделирования (рис. 5).

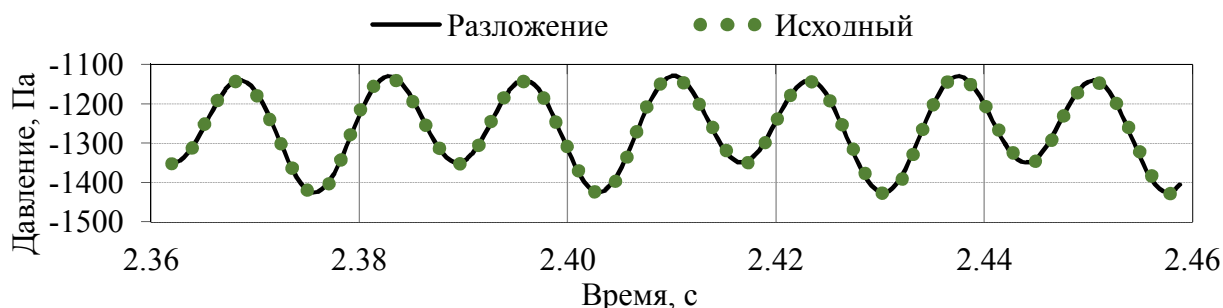


Рисунок 5 – Результат после обработки методом минимизации Ньютона.

Третий этап. Переход от величин  $(A_i, f_i, \varphi_i)_{2D}$ , полученных в результате 2D моделирования, к значениям  $(A_i, f_i, \varphi_i)_{3D}$ , эквивалентного 3D сигнала, соответствующего параметрам 3D моделирования.

Четвертый этап. Вычисление расхода по значениям частоты либо полное восстановление эквивалентного сигнала по формулам (5,6).

Пятый этап. Вывод результатов, полученных по алгоритму трансформации.

Следует отметить, что метод (БПФ + МНК) обработки и восстановления сигнала, обладает дополнительным свойством. Благодаря его использованию, удастся сократить количество расчетных итераций в 5–7 раз ( в зависимости от времени стабилизации процесса вихреобразования). Связано это с тем, что для данного подхода достаточно 5 – 7 периодов колебаний (500 – 700 итераций) для спектральной обработки по двум гармоникам, с последующей минимизацией МНК. При том, что используя только БПФ, количество периодов должно быть 50 – 100 (5000 – 10000 итераций). В итоге, с помощью предложенного подхода обработки сигнала удастся сократить время вычисления в 5 – 7 раз, что является значительным для нестационарного течения. Если учесть применение 2D моделирования потока, то суммарное ускорение составит  $\sim 48$  раз, по сравнению со стандартным 3D моделированием.

Для корректной работы вычислительного алгоритма, в соответствии с функциональной структурой метода (см. рис. 3), необходимо задание коэффициентов и функциональных связей между плоской и пространственной моделью. Используя вычислительный эксперимент были определены зависимости для частоты, амплитуды и фазы [9]. Они позволили установить, связь частоты двумерного сигнала с трехмерным:

$$(f_i)_{3D} = K_{f \text{ расч.}} (f_i)_{2D}, \quad (7)$$

где  $K_{f \text{ расч.}}$  – передаточный коэффициент, определяемый эмпирически или вычисляемый по функциональной зависимости:

$$K_{f \text{ расч.}} = \frac{\pi \cdot D - H}{\pi \cdot (D - H)}. \quad (8)$$

Для амплитуды была получена схожая с (7) зависимость  $(A_i)_{3D} = K_A b(A_i)_{2D}$ , коэффициент  $K_A$  меняется линейно и определяется только эмпирически. Кривая имеет наклон, поправка на который обозначена через параметр  $b$ .

С фазой однозначной зависимости не наблюдается, поэтому необходимо применение индивидуальных функциональных зависимостей и коэффициентов для каждого расчетного случая.

В п. 3.2 представлен численный алгоритм оптимизации геометрических характеристик проточного тракта ВР в соответствии с критерием оптимизации (1). Алгоритм основан на методе Розенброка с дискретным шагом. Метод состоит из начального этапа, на котором определяются начальные и граничные условия, задается размерность задачи, точность определения по каждой из координат, коэффициенты сжатия и растяжения и основного этапа, состоящего из трех шагов поиска оптимального решения. Определение экстремального значения целевой функции, производится с помощью варьирования параметров по алгоритму, задаваемому методом оптимизации, и расчета на 2D модели характеристик потока в вихревом расходомере на каждом шаге многомерной оптимизации.

В п. 3.3 в соответствии с функциональной структурой (см. рис.3) выполнена программная реализация предложенной системы компьютерного моделирования, представленная в виде блок-схемы. Разработано программное обеспечение для трансформации параметров сигнала плоского течения в трехмерные «Вихрь – 2D» [6] и «Модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь – 2D» [7]. Данное ПО работает совместно с программным пакетом ANSYS, а именно модулями CFX и ICEM CFD. Для оценки работоспособности программного комплекса выполнено тестирование на двух типоразмерах проточных частей. В п. 3.4 представлено описание интерфейса пользователя и рекомендации по применению разработанного ПО.

**Четвертая глава** посвящена верификации системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения. В п. 4.1 выполнено тестирование предложенной системы при помощи моделирования вихревого течения в трехмерной постановке и экспериментальных данных. В результате тестирования 3D и 2D компьютерных моделей по экспериментальным данным, установлено хорошее согласование «эквивалентных» 3D сигналов, получаемых с использованием 2D моделирования, разработанного вычислительного метода трансформации сигнала и экспериментальных данных. Расхождение между экспериментом и восстановленным 3D сигналом не превышает 1,5%. Установлено, что результаты, полученные при помощи разработанного метода трансформации, хорошо согласуются с данными, полученными с использованием модели турбулентности SAS SST, расхождение не превышает 2%. В п. 4.2 по результатам проведенных численных расчетов течения Кармана в проточных частях вихревых расходомеров с помощью предложенной системы компьютерного моделирования, получены геометрические параметры проточных частей, обеспечивающих оптимальные рабочие характеристики исследуемых приборов для трех типоразмеров Ду40, Ду50 и Ду80. В п. 4.3 выполнена проверка адекватности работы системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения по экспериментальным данным, полученным при тестировании образцов изготовленных по

оптимизированным параметрам (рис. 6). В результате верификации установлено, что результаты, полученные с использованием предложенной системы, согласуются с экспериментом и показывает аналогичный результат. К примеру, для Ду50, по результатам испытаний (рис. 6), относительная погрешность измерения прибора в рабочем диапазоне уменьшилась в два раза, с  $\pm 0,9\%$  до  $\pm 0,45\%$ . Таким образом, на основе экспериментальной верификации доказано, что разработанный программный комплекс позволяет выполнять поиск оптимального решения за приемлемое время, без использования больших сеток и выполнения дополнительных испытаний.

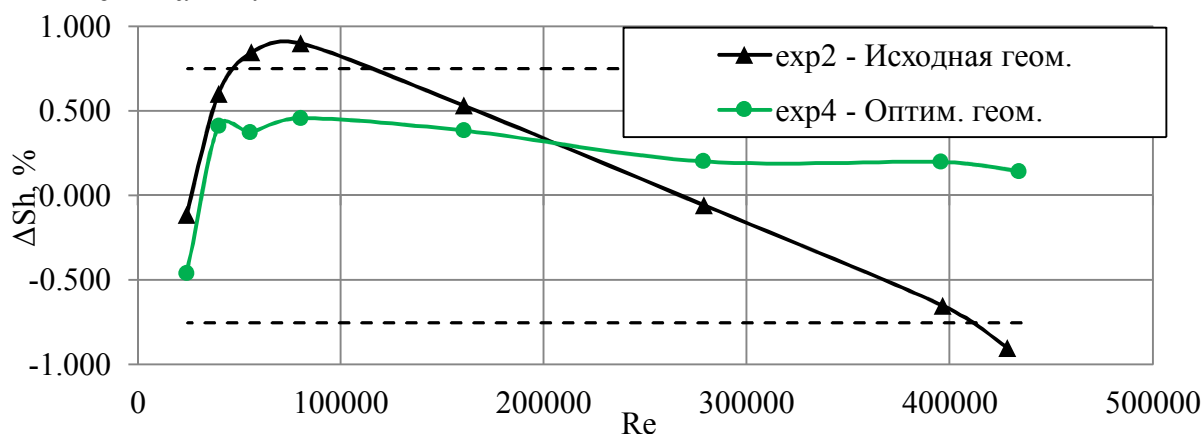


Рисунок 6 – График сравнения результатов испытаний расходомеров с оптимальной геометрией проточной части и стандартной.

В п. 4.4 приведены примеры применимости, разрабатываемого метода на практике в различных областях науки и техники, таких как архитектура, медицина, энергосберегающие технологии и др.

**В заключении** представлены итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

### Положения, выносимые на защиту

*В рамках разработки систем компьютерного и имитационного моделирования предложена 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, обосновании и тестировании эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий разработаны: вычислительный метод трансформации параметров сигнала двумерного течения в характеристики сигнала трехмерного потока; двухэтапный метод аппроксимации сигнала, сокращающий количество расчетных итераций, необходимых для обработки результатов моделирования; 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* разработан 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» [6], для преобразования параметров сигнала двумерного течения в характеристики сигнала трехмерного потока, с использованием двухэтапного метода обработки сигнала для определения амплитуды, частоты и фазы; программный модуль «модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь – 2D» [7], для поиска оптимальных геометрических параметров проточной части с вихревым течением, методом Розенброка с дискретным шагом.

### **Публикации автора по теме диссертации**

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. «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.
7. «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.

8. 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. (SCOPUS)
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// Забабахинские 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// Забабахинские научные чтения: сборник трудов XIII Международной конференции 20–24 марта 2017. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2017. – С. 1-15.
12. Кривоногов, А.А. Исследование пространственных гидродинамических эффектов в проточной части вихревого расходомера и оценка возможности их численного моделирования / А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов // Наука ЮУрГУ. Секция технических наук. Материалы 66-й научной конференции, 2014.– С.33-40.

Подписано в печать 16.10.2018. Формат 60×84 1/16.  
Бумага для множительных аппаратов. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ 54551.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Абрис-принт»  
454008 г. Челябинск, Комсомольский пр., 2, оф. 203