

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и  
инновационной работе

Ю.М. Боровин

« 06 »

2018 г.

М.П.



### ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» на диссертационную работу Кривоногова Алексея Александровича на тему: «Система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ.

На основании представленной диссертационной работы и автореферата заключаем следующее:

#### **Актуальность избранной темы исследования и связь с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства**

В эпоху цифровизации системы компьютерного моделирования играют важную роль в научных исследованиях и производственных процессах. Одной из наиболее сложных и актуальных задач является моделирование систем с внутренним движением жидких сплошных сред, встречающихся в различных прикладных задачах промышленной теплоэнергетики и приборостроении. Причина этого заключается в необходимости точного моделирования турбулентных течений, описываемых уравнениями Навье – Стокса, осложненных формами реальных объектов и каналов, а также проявлением различных нестационарных эффектов и отрывных течений, например, таких как вихревая дорожка Кармана. Сложный характер нестационарного течения требует применение многошаговых по времени нестационарных методов, например URANS. Если при этом дополнительно решается задача оптимизации конструкций, например, проточной части вихревого расходомера, то процесс моделирование в трехмерной нестационарной постановке при помощи общепринятого подхода к задаче становится практически не реализуемым при ограниченных вычислительных возможностях.

Таким образом, задача по разработке высокоэффективной системы компьютерного моделирования и оптимизации, позволяющей выполнять оптимизацию формы проточного тракта вихревого расходомера и других устройств с вихревым течением Кармана за приемлемое время с заданной точностью получаемых результатов, которой посвящена диссертационная работа А.А. Кривоногова, является очень актуальной и востребованной.

### **Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Результаты, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации, имеют научную новизну и вносят значительный вклад в развитие математического моделирования, численных методов и комплексов программ, а именно:

- в области математического моделирования предложены новая система компьютерного моделирования процесса нестационарного вихреобразования, ускоряющая вычисления в десятки раз за счет применения двумерной численной модели и метода оптимизации на основе разработанной целевой функции, и новая аналитическая формула трансформации параметров сигнала плоского течения в значения для трехмерного потока, позволяющая определять передаточный коэффициент для преобразования значения частоты вихреобразования;

- в области численных методов разработаны новый вычислительный метод восстановления параметров пространственного периодического сигнала по параметрам плоского течения, основанный двухэтапном алгоритме трансформации с применением быстрого преобразования Фурье и метода минимизации среднеквадратичного отклонения, и новый численный метод выбора оптимальной конфигурации проточной части вихревого расходомера по заданным критериям, позволяющий выполнять поиск экстремума целевой функции в заданном диапазоне параметров;

- в области комплексов программ разработаны программные модули «Вихрь – 2D» и «Модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь – 2D», в которых реализована разработанная система компьютерного моделирования, работающая совместно с программным пакетом для имитационного моделирования ANSYS или другими пакетами программ.

### **Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов**

Теоретическая значимость диссертации заключается в представленной системе компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения, содержащей новый двухэтапный метод обработки и восстановления сигнала и аналитическую формулу трансформации параметров сигнала плоского течения в значения пространственного, развивающих методы обработки сигналов и теории методов математического моделирования гидродинамических течения в стесненных каналах, а также численный метод оптимизации формы проточной части, развивающий теории методов поиска оптимальных решений.

Практическая значимость работы заключается в применимости разработанной системы компьютерного моделирования в различных областях исследований, где наблюдается эффект Кармана. Предложенная система, позволяет: выполнять расчеты в десятки раз быстрее, чем общепринятый подход; получать оптимальные параметры проточных частей устройств. В результате экспериментальных испытаний, результаты работы внедрены в деятельности АО «ПГ «Метран» в качестве программного обеспечения для подробного анализа вихревых процессов в проточной части вихревых расходомеров, о чем свидетельствует акт о внедрении.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные Кривоноговым А.А. результаты рекомендуется использовать в деятельности приборостроительных предприятий (АО «ПГ «Метран», НПП «ЭЛЕМЕР», ООО «ЭлМетро-Инжиниринг», ГК «ЭМИС») и институтов (ВНИИР, ВНИИМС, УНИИМ) для оптимизации проточных частей устройств с вихревым течением Кармана, например, расходомеры, защитные гильзы термометров, клапаны, вихревые колонны; в строительстве для определения оптимальной формы поперечного сечения сооружения, например, поперечное сечение моста или здания.

### **Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений**

Обоснованность и достоверность результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректным использованием методов математического моделирования; согласованием вычислительных экспериментов на основе 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» в качестве инструмента для оптимизации проточных частей вихревых расходомеров и подробного анализа турбулентных течений с последующим внедрением разработанной системы компьютерного моделирования в деятельность АО «ПГ «Метран».

### **Оценка содержания диссертации и ее завершенности в целом**

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

Во введении представлено обоснование актуальности избранной темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель и основные задачи, 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 турбулентных течений на примере проточной части вихревого расходомера. Представлено описание процесса нестационарного вихреобразования Кармана в стесненных каналах на примере вихревого расходомера. Проанализированы современные методы моделирования турбулентных течений и методы оптимизации. Обозначена основная проблема моделирования вихревых потоков – длительное время. Представлена актуальность и основные требования к разрабатываемой системе компьютерного моделирования.

Во второй главе описана функциональная структура системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала. Обозначен путь решения поставленной задачи. Построена компьютерная модель для проведения вычислительного эксперимента. Разработан математический метод сокращения времени расчета в  $\sim 5,7$  раз по сравнению с существующим подходом, за счет моделирования вихревого течения в проточной части расходомера в двумерной постановке с последующей трансформацией искомым параметров сигнала в трехмерные. Представлен математический метод оптимизации проточной части вихревого расходомера и других устройств с дорожкой Кармана. Определена целевая функция и критерий оптимизации.

В третьей главе изложены численные методы и алгоритмы с дальнейшей программной реализацией. Показан вычислительный алгоритм математического метода трансформации и функциональные зависимости параметров сигнала двумерного и трехмерного течений. Описан численный алгоритм оптимизации. Представлены программная реализация разработанной системы компьютерного моделирования в виде комплекса программ «Вихрь – 2D».

В четвертой главе выполнена верификация системы компьютерного моделирования при помощи экспериментальных испытаний и тестовых расчетов на трехмерных моделях. Представлено практическое применение системы в промышленном предприятии для оптимизации проточных частей вихревых расходомеров. Приведены примеры применения системы в различных областях науки и техники.

В заключении содержатся основные выводы по работе.

Диссертация А.А. Кривоногова имеет последовательную, логически законченную структуру. В целом работа воспринимается положительно. Редкий случай, когда вычислительные процедуры подкрепляются сопоставлением не только с расчетом по более сложной математической (трехмерной) модели, но и с опытными данными.

## **Замечания по диссертации**

Содержательный анализ материалов диссертационной работы позволил сделать следующие замечания:

1. В п. 1.1 (стр. 22) в формуле (1.2), гидравлический диаметр  $D_H$  – не указано сечение. Следовало бы указать, что это кольцевое сечение в месте установления расходомера или живое сечение трубы.

2. В п. 1.1 (стр. 36) правильно указывается, что от трехмерного потока можно перейти к осесимметричному двумерному или к двумерному плоскому. Далее, по факту, переход к двумерному плоскому. Нигде не оговорено, почему выбран этот вариант, геометрически менее подобный двумерный плоский поток.

3. При сравнении результатов численного моделирования и экспериментальных испытаний п. 2.2, рисунок 2.15, следовало бы учесть имеющуюся погрешность испытаний и погрешность вычислений.

4. При степени  $1/7$  опытные и расчетные профили скорости согласуются до числа Рейнольдса 100000 (Шлихтиг Г. Теория пограничного слоя. 1974. см. стр. 541). С возрастанием числа Рейнольдса показатель степени последовательно уменьшается до  $1/8$ . В работе приведены результаты расчетов по числу Рейнольдса до 450000. Видимо надо было внести разъяснение в текст, что в качестве примера расчет проводился с  $1/7$ . Хорошо было бы оценить, как при этом изменится уровень соответствия с опытными данными и трехмерным расчетом при изменении показателя степени с возрастанием числа Рейнольдса.

5. При значительном объеме диссертации иллюстративная часть, в которой сравниваются результаты расчетов на двумерной модели с трехмерной моделью и опытными данным представлены в весьма небольшом объеме. Следовало бы, по возможности, добавить число иллюстраций.

### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат в полной степени отражает содержание диссертации. В нем содержатся актуальность избранной темы исследования, цель и основные задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимости полученных результатов, методология и методы диссертационного исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, апробация результатов, дана общая характеристика структуры работы, кратко описано содержание глав.

### **Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати**

Полученные результаты своевременно опубликованы, апробированы на различных всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации соискателем опубликовано 14 научных работ. Среди них 5 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендованных

ВАК, 2 в изданиях, индексируемых международной реферативной базой данных SCOPUS, 2 программы для ЭВМ.

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

Полученные результаты соответствуют научной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Результаты диссертации являются новыми, строго обоснованными, практически подтвержденными, внедренными в промышленное предприятие и получены автором самостоятельно.

Диссертация Кривоногова Алексея Александровича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по разработке системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Кривоногов Алексей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв заслушан, обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет» 23 ноября 2018 года, протокол №4.

В расширенном заседании участвовали приглашенные специалисты: заведующий кафедрой «Прикладная информатика» Суворов С.В., к.э.н., доцент; заведующий кафедрой «Автоматика и управление» Кузнецов А.В., к.т.н., доцент.

Заведующий кафедрой  
«Промышленная теплоэнергетика»,  
к.т.н, доцент

Марюшин Леонид Александрович,  
тел. +7 (495) 276-32-87  
email: pte@mospolytech.ru

 Л.А. Марюшин  
 ЗАВЕДУЮЩИЙ ОТДЕЛА КАДРОВ  
Доронина А.А. 06 ДЕК 2018

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»,  
адрес: 107023, г. Москва, Б. Семёновская ул. 38,  
телефон/факс: +7 (495) 223-05-23, email: mospolytech@mospolytech.ru,  
сайт: <https://mospolytech.ru>