

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

Кривоногова Алексея Александровича

«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.

### **1. Актуальность темы работы**

Системы компьютерного моделирования гидрогазодинамических процессов становятся важнейшим инструментом, используемым при проектировании сложнейших технических устройств, реализующих течения с необходимыми характеристиками потока. В работе рассматриваются турбулентные течения с вихревой дорожкой Кармана в стесненном канале (проточной части вихревого расходомера). Существует множество программных пакетов вычислительной гидрогазодинамики, таких как ANSYS CFX, ANSYS Fluent, STAR-CD, FLOWEFD, NUMECA, OpenFOAM, Phoenix и др., в которых для моделирования течения жидкостей и газов используется система уравнений Навье – Стокса решаемая при помощи различных вычислительных методов DNS, LES, RANS и др. Но даже метод RANS, наименее требовательный к вычислительным ресурсам, требует значительных вычислительных мощностей и временных затрат для такого типа течений. Так, время одного расчета занимает от трех до семи дней в зависимости от размерности сетки и вычислительных мощностей. Если целью является поиск оптимальных параметров течения, то необходимо выполнять серию расчетов, что приводит к потере целесообразности использования численного моделирования для таких задач, поскольку время вычислений превышает экспериментальную отработку. Некоторые исследователи (Е.В. Сафонов, В.Д. Дорохов, И.С. Шулев и др.) занимались разработками виртуального стенда для оптимизации проточной части вихревого расходомера, но применительно к той задаче требовалось использование кластера, содержащего несколько сотен вычислительных узлов. Таким образом, актуальность работы обусловлена созданием системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения, позволяющей выполнять вычисления в несколько раз быстрее существующих подходов без значительной потери точности получаемых результатов.

### **2. Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Объем диссертации составляет 197 страниц, список литературы содержит 140 наименований.

Во введении представлены актуальность диссертации, степень ее разработанности, цель, задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимости, методология и методы исследования, основные положения выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов, дана общая характеристика структуры работы.

Первая глава посвящена анализу методов математического моделирования гидродинамических течений, конструкции вихревого расходомера, эффекта нестационарного вихреобразования Кармана. Отмечено, что основной проблемой моделирования вихревых потоков является длительное время расчета. Представлено обоснование актуальности выполняемого исследования и требования к разрабатываемой системе компьютерного моделирования.

Вторая глава посвящена разработке системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала. А.А. Кривоноговым проведены исследования различных моделей турбулентности, и, исходя из суммарной оценки критериев «время», «точность», «согласованность», установлено, что оптимальными для данной задачи моделями турбулентности являются  $k-\varepsilon$  или SST. 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 с помощью предложенной функции трансформации. А.А. Кривоноговым установлено, что при равном числе используемых ядер (8 ядер) 2D расчет быстрее 3D расчета в  $\sim 8$  раз, что является значительным плюсом в сравнении с «прямым» трехмерным моделированием. Разработан математический метод оптимизации проточной части вихревого расходомера, ядром процедуры которого являются: компьютерная модель проточного тракта вихревого расходомера, включающая 2D моделирование процесса вихреобразования; метод поиска экстремума целевой функции – метод Розенброка с дискретным шагом и применением одномерной минимизации. Разработана функциональная структура для системы компьютерного моделирования и оптимизации с применением вычислительного алгоритма трансформации сигнала.

Третья глава посвящена разработке численных методов и алгоритмов с дальнейшей программной реализацией, в ней представлен вычислительный алгоритм математического метода трансформации параметров сигнала 2D течения в значения 3D потока. С помощью предложенного А.А. Кривоноговым 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. Автором представлен численный алгоритм оптимизации геометрических характеристик проточного тракта вихревого расходомера в соответствии с критерием оптимизации. Выполнена программная реализация предложенной системы в виде программного обеспечения для трансформации параметров сигнала плоского течения в трехмерные «Вихрь – 2D» и «Модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь – 2D». Данное ПО работает совместно с программным пакетом ANSYS, а именно модулями CFX и ICEM CFD.

В четвертой главе автором выполнена верификация системы компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения с помощью вихререзающих моделей и экспериментальных данных, результаты которой свидетельствуют об удовлетворительной точности вычислений. Выполнено тестирование

системы на промышленном предприятии АО «ПГ «Метран» на основе которого доказано, что разработанный программный комплекс позволяет выполнять поиск оптимального решения за приемлемое время, без использования больших сеток и выполнения дополнительных испытаний. Приведены примеры применимости разрабатываемого метода на практике в различных областях науки и техники, таких как архитектура, медицина, энергосберегающие технологии и пр.

В заключении представлены итоги выполненного исследования в соответствии с паспортом специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, даны рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

### **3. Степень обоснованности и достоверности основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Степень обоснованности изложенных в работе научных положений выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается всесторонним и комплексным рассмотрением автором поставленной цели и задач, строгими теоретическими выводами, использованием известных научных методов обоснования полученных результатов, проведением верификационных расчётов на вихреразрешающих моделях и натуральных экспериментов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, вытекает из использования теоретических положений, основанных на известных достижениях теории численного моделирования турбулентных течений, обработки сигнала и методов оптимизации, привлечения данных вычислительных и натуральных экспериментов, сравнения их с результатами моделирования, а также использования на промышленном предприятии.

### **4. Научная новизна исследования и основных результатов**

К новым научным результатам, являющимся заслугой автора диссертационного исследования, следует отнести:

- Новую систему компьютерного моделирования для исследования процесса нестационарного вихреобразования, позволяющую выполнять вычисления в 40 – 50 раз быстрее «прямого» трехмерного моделирования.

- Аналитическую формулу трансформации параметров сигнала плоского течения в значения для трехмерного потока.

- Целевую функцию для оптимизации проточной части вихревого расходомера, критерий оптимизации, позволяющий выполнять оптимизацию во всем рабочем диапазоне расходомера по одному выходному параметру.

- Вычислительный метод восстановления параметров пространственного периодического сигнала по параметрам плоского течения, позволяющий снизить количество расчетных точек.

- Численный метод выбора оптимальной конфигурации проточной части вихревого расходомера по заданным критериям, позволяющий выполнять поиск экстремума целевой функции.

- Программные модули «Вихрь – 2D» и «Модуль оптимизации для программного обеспечения Вихрь – 2D», в которых реализована разработанная сис-

тема компьютерного моделирования, работающая совместно с пакетом программ ANSYS.

### **5. Теоретическая и практическая значимости**

Теоретическая значимость диссертационного исследования обусловлена представленной системой компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения, содержащей новый двухэтапный метод обработки и восстановления сигнала и аналитическую формулу трансформации параметров сигнала плоского течения в значения пространственных развивающихся методы обработки сигналов и теории методов математического моделирования вихревого течения Кармана в проточных частях устройств, а также численный метод оптимизации формы проточной части, развивающий теории методов поиска оптимальных решений.

Практическая значимость разработанной системы компьютерного моделирования обусловлена тем, что она позволяет: выполнять расчеты в 40 – 50 раз быстрее, чем «прямое» трехмерное моделирование вихревого течения в стесненном канале. У автора имеется Акт о внедрении результатов его работы в деятельности АО «ПП «Метран» в качестве программного обеспечения для подробного анализа вихревых процессов в проточной части вихревых расходомеров.

### **6. Замечания по диссертации**

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В п.2.2 указано, что численные расчеты в двумерной постановке выполнялись в программном пакете ANSYS CFX, но нет обоснования выбора именно этого программного обеспечения (для проведения двумерного расчета в ANSYS CFX автору пришлось строить трехмерную модель толщиной в одну ячейку, тогда как существуют пакеты, позволяющие строить двумерные модели, например, ANSYS Fluent).

2. В работе не указаны значения задаваемой в граничных условиях типа «стенка» шероховатости, которая может оказывать влияние на интенсивность вихреобразования.

3. В п.4.3 стр.167 показан график сравнения результатов испытаний расходомера до и после оптимизации проточной части. Следовало бы добавить результаты моделирования, поскольку не ясно, как они коррелируют с результатами испытаний.

Указанные замечания не снижают значимость научных результатов, полученных А.А. Кривоноговым в диссертации и не влияют на общую положительную оценку работы.

### **7. Публикации и апробация работы**

Основные результаты опубликованы в 12 научных работах, из которых 5 статей - в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 - в SCOPUS, 2 программы для ЭВМ. Получен акт о внедрении результатов диссертационного исследования в деятельность АО «ПП «Метран». Автором выполнена апробация на 8 международных и региональных конференциях.

Автореферат диссертации правильно отражает ее основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые моменты.

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

Диссертационная работа Кривоногова Алексея Александровича «Система компьютерного моделирования и оптимизации вихревого течения на основе вычислительного метода трансформации сигнала» является законченным научным исследованием по актуальной теме. В работе представлены результаты, имеющие важное научное и практическое значение для специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Результаты исследований, представленные в диссертации, делают существенный вклад в решение актуальной проблемы создания системы компьютерного моделирования и оптимизации нестационарных гидрогазодинамических течений за приемлемое время для инженерных изысканий.

Диссертационная работа соответствует критериям, установленным пп. 9 – 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК Министерства образования и науки РФ, 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.

Ведущий научный сотрудник  
отдела перспективных разработок  
Акционерного общества  
«Научно- исследовательский  
институт машиностроения»,  
кандидат технических наук

 / В.Л. Салич  
29.11.2018

Салич Василий Леонидович

Телефон: (34345) 36-246

Электронная почта: salich\_vas@mail.ru

Адрес: 624740, Свердловская область, г. Нижняя Салда, ул. Строителей, 72, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт машиностроения».

Ведомственное подразделение: Госкорпорация «РОСКОСМОС»

Личную подпись В.Л. Салича заверяю:  
Зам. генерального директора  
АО «НИИМаш» по управлению персоналом



В.П. Трубановский