

На правах рукописи

Ким Василий Юрьевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ  
ТЕЧЕНИЙ В ПОЛЯХ МАССОВЫХ СИЛ В ТРУБАХ  
С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ГРАНИЦЕЙ

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2010

Работа выполнена на кафедре теоретической механики  
ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
Харламов Сергей Николаевич

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
Матвиенко Олег Викторович

доктор технических наук, профессор  
Сергиевский Эдуард Дмитриевич

**Ведущая организация:** Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
СО РАН, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 2 апреля 2010 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 1 марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, доктор технических наук



Ю.Ф. Христенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению фундаментальных и прикладных задач о гидродинамике и теплообмене при ламинарных и турбулентных, изотермических и неизотермических, прямоочных и закрученных течениях химически инертных вязких сред (жидкостей, газов) во внутренних системах (трубах, каналах) со сложной границей.

В основе физико-математического моделирования статистических свойств пульсационных характеристик сложных сдвиговых течений в полях массовых сил лежит метод статистических моментов второго порядка. Численное исследование рассматриваемых течений и теплообмена выполнено по оригинальной методике расчета определяющих уравнений с привлечением моделей замыкания для напряжений Рейнольдса и удельных турбулентных потоков тепла, включающих редкоиспользуемые в практике прикладных расчётов динамические двухпараметрические модели турбулентности.

**Актуальность работы.** Изучение закономерностей развивающихся и затухающих пространственных неизотермических потоков жидкости и газа важно в связи с их широким практическим использованием в различных отраслях промышленности и распространением в природе.

Основным отличием закрученного течения от других внутренних течений является наличие третьей (окружной) компоненты вектора скорости, что влияет на перераспределение всех параметров потока – осевую и радиальную составляющую вектора скорости, температурные поля, а так же на поле давления, турбулентные характеристики. Всё это формирует оригинальную картину течения и теплообмена в технических устройствах. Именно наличие ряда особенностей таких течений, выявленных экспериментальным путем, например, появление периферийных и центральных рециркуляционных зон, интенсификация и стабилизация процессов тепломассобмена, сложность их аналитического описания и моделирования привлекает большое количество исследователей к решению данных задач.

Исследованию подобных течений посвящены работы [см. например 1 – 5] В.К. Щукина, А.А. Халатова, А.М. Липанова, С.В. Алексеенко, А.Ф. Курбацкого, Э.Д. Сергиевского, А.М. Гришина, А.Р. Дорохова, А.В. Шваба, В.А. Архипова, О.В. Матвиенко и др. Из зарубежных работ [например 6, 13, 15] можно выделить следующих авторов: А.К. Гупта, Д.Г. Лилли, М.Т. Абуджелала, Б.Е. Лаундер, К. Кикуюма и др. Благодаря работам указанных специалистов накоплен значительный опыт и приобретено более глубокое понимание механизмов исследуемых процессов.

Моделирование теплогидродинамических процессов сдвигового течения вязких сред в поле действия центробежных массовых сил осложнено наличием нелинейных уравнений и проблемой предсказания их локальной пульсационной структуры. Аналитическое решение такого класса задач не удаётся получить даже для простых видов внутренних течений. В связи с этим, а так же благодаря бурному развитию в последнее время вычислительных методов и росту компьютерных мощностей современных ПЭВМ, большое

распространение для исследований неизотермических пространственных течений получили численные методы.

Выбор метода решения определяется спецификой задачи, её физическим содержанием, геометрией области движения, значениями определяющих параметров, особенностью структуры рабочей среды и некоторыми другими факторами. При выборе методики необходимо учитывать потребности практики в получении корректной картины распределения осредненных и пульсационных параметров процесса. С этой целью необходимо привлекать эффективные модели и методы, способные в деталях предсказывать локальную структуру вихревого потока, интенсивность и размеры рециркуляционных зон.

В диссертационной работе впервые представлена методика расчёта сложных турбулентных течений с использованием модели для напряжений Рейнольдса и потоков тепла, включающей оригинальную двухпараметрическую опорную базу из дифференциальных уравнений для кинетической энергии турбулентности  $k$  и характерного масштаба времени пульсаций поля скорости  $\tau$ , первоначально представленную в работах С.Дж. Спейзла [2], А.Ф. Курбацкого [3], и обобщенную нами на класс внутренних течений. Разработана и протестирована численная методика решения задач о стационарном пространственном течении и теплообмене ньютоновских вязких сред во внутренних системах со сложной границей. В основе конечноразностной методики лежат идеи использования алгоритма SIMPLE [7], а так же обобщение идей Л.М. Симуни [8] на случай движения с закруткой.

С помощью данной методики решены задачи о ламинарном и турбулентном течении и теплообмене в трубах постоянного и переменного по длине поперечного сечения в прямоточном потоке, а также в течениях под воздействием центробежных массовых сил, обусловленных как полной (локальной) круткой потока в области входа, так и вращением стенки трубы.

Выбор данных моделей течения и теплообмена обусловлен их широким распространением в промышленных устройствах, а исследования распределений кинематических и теплодинамических характеристик для указанных режимов является важным с точки зрения организации оптимального управления оборудованием технологического процесса.

**Объектом исследования** являются стационарные прямоточные и закрученные течения и процессы конвективного теплообмена в химически инертных вязких капельных и газообразных средах.

**Предметом исследования** являются математические модели и численные методы расчета процессов молекулярного и молярного переноса импульса и тепла, осложненные переменностью границы области движения теплоносителей во внутренних системах при наличии центробежных массовых сил.

### **Цели работы**

- На основе анализа и обобщения современных данных теоретического и экспериментального исследования пространственных ламинарных и турбулентных течений в трубах и каналах при наличии и отсутствии действия центробежных массовых сил разработать версию статистической модели турбулентности второго порядка для напряжений Рейнольдса и удельных

турбулентных тепловых потоков, опирающуюся на отдельные двухпараметрические модели с транспортными уравнениями для характерных времён пульсаций поля скорости. С помощью выбранной модели продемонстрировать возможности детального изучения сложных сдвиговых внутренних течений.

- Разработать эффективную и универсальную численную методику расчёта неизотермических потоков в условиях течения вязких сред в каналах со сложной границей и различных способов крутки.

- Исследовать детали развивающихся прямоточных и затухающих закрученных неизотермических течений в трубах со скачком площади поперечного сечения, наличием секций конфузorno-диффузорного типа и с вращающейся и неподвижной стенкой.

- Создать базу данных точных количественных распределений осредненных и пульсационных параметров указанного ряда конфигураций канала.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- Впервые применена модель замыканий для напряжений Рейнольдса и удельных турбулентных тепловых потоков с опорной двухпараметрической базой из  $k$ ,  $\tau$  транспортных уравнений к расчёту внутренних течений с закруткой и без неё;

- Выполнено обоснование и осуществлено внедрение в практику расчёта закрученных турбулентных течений многопараметрических моделей второго порядка с транспортным уравнением для характерного масштаба времени пульсаций поля скорости;

- На основе алгоритма SIMPLE и обобщенного метода Л.М. Симуни на случай переменного в радиальном направлении продольного градиента давления разработана вычислительная методика сквозного расчёта от стенки прямоточных и закрученных ламинарных и турбулентных изотермических и неизотермических течений жидкостей и газов в трубах и каналах, включающих ламинарный подслои и буферную зону;

- Проведено детальное исследование сложных сдвиговых течений в трубах для условий движения:

- переменной по длине площади поперечного сечения (внезапное расширение, сужение);
- с учётом вращения: методом локальной крутки в области входа и подвижной стенкой (вращение трубы вокруг своей продольной оси);
- теплоносителя через секции конфузorno-диффузорного типа.

**Практическая значимость.** В работе представлена научно-техническая информация о распределениях полей температуры, скорости и их корреляций в принципиальных схемах реализации закрученных течений во внутренних системах. Это имеет большое значение при тестировании и калибровке сложных программных комплексов для моделирования пространственных течений, используемых для инженерных расчётов и создания новых технологических процессов, аппаратов для интенсификации течения и теплообмена в энергетических и промышленных установках.

Численная методика, математические модели и методы их решения, внедрены в инженерную практику ООО «СИАМ-Инжиниринг» (г. Томск) для расчетов гидродинамики сложных течений и теплообмена нефтескважинного оборудования и технологических цепей транспортировки углеводородов.

#### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Обоснованность научных заключений и выводов, приведенных в диссертационной работе, следует из адекватности используемых математических моделей и методов численного решения, что подтверждается сравнением с результатами экспериментов и теоретическими данными известных работ других авторов, а так же расчётами с использованием коммерческих программных пакетов.

#### **На защиту выносятся:**

- Математическая модель для исследования сложных вихревых неизотермических течений в каналах со сложной геометрией и разными способами крутки, включающая схемы замыкания второго порядка для напряжений Рейнольдса и потоков тепла с базой из  $k, \tau$  уравнений;
- Конечноразностная методика, основанная на использовании алгоритма SIMPLE и обобщенного метода Л.М. Симуни на случай переменного по радиусу продольного градиента давления для расчета сложного течения и теплообмена при наличии и отсутствии крутки способами: локально на входе и подвижной стенкой;
- Результаты численного исследования турбулентного течения и теплообмена в трубах с особенностью границы области движения флюида;
- Выводы и рекомендации по использованию метода статистических моментов и многопараметрических моделей турбулентности с транспортными уравнениями для компонентов полного тензора напряжений Рейнольдса и скалярных потоков в расчетах гидродинамики и теплообмена закрученных течений вязких сред в каналах со сложной геометрией.

**Личный вклад соискателя.** Диссертационная работа отражает личный вклад соискателя в исследования, выполненные в ТГУ по изучению ряда эффектов конвективного теплообмена в условиях течений закрученных потоков в технически важных конфигурациях труб и узлов, представляющих конструктивные элементы теплоэнергетического оборудования. Соискатель провел работу по математическому моделированию и построению методики расчета сложных течений, выполнил анализ и интерпретацию полученных данных.

**Апробация результатов диссертации.** Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М.А.Усова (Томск, 2006, 2007, 2008 и 2009гг.), Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2006), школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева по проблемам газодинамики и теплообмена, (С-Петербург, 2007; Жуковский, 2009), Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России (Москва, 2007), Всероссийской конференции по математике и механике (Томск, 2008).

**Публикации.** Основные результаты диссертации представлены в 15 работах, включая 2 из списка журналов, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 116 наименований. Содержит 109 рисунков. Общее число страниц - 105.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена общая характеристика работы, обоснована её актуальность, сформулирована цель исследования, показана новизна и практическая значимость полученных данных, изложены защищаемые положения.

В **первой главе** диссертационной работы приведён библиографический обзор по проблемам комплексного физико-математического и численного моделирования прямооточных и закрученных потоков. Описываются сферы применения эффектов закрученных течений в науке и технике, детально анализируются специфические эффекты, сопровождающие процессы переноса импульса, тепла в потоках с локальной круткой на входе, в течениях во вращающихся трубах и при наличии отрыва в каналах со сложной геометрией.

Анализ современных отечественных и зарубежных публикаций показывает, что в данном классе задач не получили достаточного освещения такие существенные для практики вопросы, как анализ эффектов ламинаризации во вращающихся технических системах, их поведения при экстремальных режимах эксплуатации. Три последних десятилетия отмечены усилением интереса к исследованию «тонкой» структуры затухающих вращающихся и прямооточных потоков в устройствах со сложной границей области течения. По-прежнему актуальными остаются вопросы построения адекватных математических моделей динамического поведения сплошных сред, создания новых эффективных методик расчёта и выявления нелинейных эффектов в технологических процессах, осложнённых круткой и изменениями структуры рабочего тела.

Во **второй главе** рассмотрены задачи о ламинарном прямооточном и закрученном течении и теплообмене со стенками в трубах и каналах со сложной границей.

В п. 2.1. главы формулируется общая физическая и математическая постановка задачи. В качестве теплоносителя используются вязкие несжимаемые теплопроводные сплошные среды: жидкости или слабосжимаемые газы. Рассматривается стационарное ламинарное течение в трубе с осевой симметрией. Система определяющих уравнений, описывающих гидродинамику и теплообмен включает в себя уравнение неразрывности, полные уравнения Навье-Стокса и энергии с учётом диссипативных эффектов, которые в цилиндрической системе координат имеют вид:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho V)}{\partial r} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho U U - \mu \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \rho V U - \mu \frac{\partial U}{\partial r} \right) \right] = - \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho U V - \mu \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \rho V V - \mu \frac{\partial V}{\partial r} \right) \right] = - \frac{\partial p}{\partial r} + \left\{ \rho \frac{W^2}{r} - \mu \frac{V}{r^2} \right\}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho U W - \mu \frac{\partial W}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \rho V W - \mu \frac{\partial W}{\partial r} \right) \right] = \left\{ - \rho \frac{V W}{r} - \mu \frac{W}{r^2} \right\}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho c_p U T - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \rho c_p V T - \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = S; \quad (5)$$

$$p = \rho R T. \quad (6)$$

В записи уравнений (1)-(6) обозначения общепринятые.

Решение системы определяющих уравнений (1)-(6) осуществляется с привлечением численной методики, основанной на использовании алгоритма SIMPLE [7] и способа одновременного нахождения с полем скорости продольного градиента давления, предложенного первоначально в работах Л.М. Симуни [8] и обобщенного на случай его переменности в радиальном направлении [9] при исследовании течения с пространственной деформацией, обусловленной наличием закрутки потока и/или скачком площади поперечного сечения.

Суть методики заключается в следующем. Расчётная область покрывается конечно-разностной разнесённой сеткой. Функции  $T$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $W$  и поправка давления вычисляются в соответствии со стандартной процедурой SIMPLE с использованием схемы против потока и метода прогонки.

Дискретные аналоги рассчитываются методом переменных направлений, который использует на каждом своём шаге метод прогонки для решения системы линейных алгебраических уравнений с трёхдиагональной матрицей коэффициентов. Информация о граничных условиях таким способом сразу передаётся во внутреннюю часть области независимо от того, сколько контрольных объёмов используется в расчёте. При итерационном процессе для ускорения или замедления изменения той или иной величины применяется метод верхней или нижней релаксации.

Задание сложной геометрии трубы производится на равномерной сетке методом выключенных контрольных объёмов, таким образом, чтобы оставшиеся действующие контрольные объёмы составляли рассматриваемую нерегулярную область.

Способ блокировки ненужных контрольных объёмов состоит в задании больших значений для источниковых членов в разностном аналоге. Таким образом, возможно присваивать известное значение (например, для скорости значение ноль или для температуры  $T_w$ ) в выключенных контрольных объёмах.

В условиях представленного алгоритма принимается, что численное интегрирование системы определяющих уравнений и замыкающих соотношений (для случая турбулентного течения) выполнено на основе



экономичных неявных конечно-разностных схем второго порядка точности относительно шагов по осевой и радиальной координатам, а так же схем расщепления, как по независимым переменным, так и по физическим процессам и метода прогонки. В радиальном направлении имеет место сгущение узлов разностной сетки по логарифмическому закону, что обеспечивает высокую разрешающую способность сетки в пристеночной области. Особенности данного алгоритма состоят в следующем. Для случаев малой интенсивности закрутки, небольших высот уступа (отсутствуют возвратные движения) используется эволюционный способ построения решения по переменным. Далее этот алгоритм обобщается на режимы с закруткой высокой интенсивности, но суть его, по-прежнему, состоит в выделении эволюционных переменных и способе одновременного с полем скорости нахождения градиента давления. В результате алгоритм, обобщающий идеи Л.М. Симуни, по быстродействию не уступает алгоритмам численного решения задач двумерного пограничного слоя.

Идея использования алгоритма SIMPLE и обобщенного алгоритма Л.М. Симуни определяется потребностью оптимизации и снижения временных затрат на сходимость численного решения при интенсивных возвратных течениях в каналах с высокими значениями интенсивности крутки ( $Ro$ ), скорости потока ( $Re$ ), высоты уступа ( $h/d$ ). Так, в тех областях, где имеются особенности, вызванные возвратными течениями, расчёт проводится по алгоритму SIMPLE, в остальных – по алгоритму Л.М. Симуни.

Далее предложенный численный алгоритм используется при решении нескольких задач, в числе которых следующие.

**В п. 2.3. представлены результаты расчёта гидродинамики и теплообмена в круглой цилиндрической трубе с локальной закруткой потока в области входа.**

В качестве граничных условий для интегрирования определяющих уравнений используются следующие:

*На входе* в трубу задается равномерный профиль осевой компоненты вектора скорости, закрутка потока осуществляется по закону твердого тела. Температура входящего потока постоянна и равняется  $T_0$ :

$$U|_{x=0} = U_0; \quad V|_{x=0} = 0; \quad W|_{x=0} = W_0 \cdot \frac{r}{R} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^m \right); \quad T|_{x=0} = T_0. \quad (7)$$

Здесь значения величин  $U_0$  и  $W_0$  определяются из безразмерных параметров Рейнольдса ( $Re = U_0 \cdot D / \nu$ ) и интенсивности крутки ( $Ro = \Omega \cdot R / U_0 = W_0 / U_0$ ). Значение показателя степени  $m = const$ .

*На стенке* – условия прилипания - равенство нулю компонент вектора скорости. Величина температуры на стенке принимается постоянной и равной  $T_w$ . *На выходе* заданы «мягкие» граничные условия (равенство нулю производных всех величин в осевом направлении).

*На оси* – условия симметрии - равенство нулю производной в радиальном направлении осевой компоненты вектора скорости и температуры; равенство нулю радиальной и тангенциальной компоненты вектора скорости.

В результате сопоставления некоторых отдельных решений с известными данными других авторов (см. например, Рисунок 1) сделан вывод о корректности и достоинствах вычислительной методики, определены возможности дальнейшего анализа эффектов в задачах данного класса течений. Таким образом, расчеты в широком диапазоне изменений чисел  $Re=10\div 2000$  и  $Ro=0\div 22$  показали, что локальная крутка на входе ведет к появлению центральных рециркуляционных зон (Рисунок 5). Размеры зон возвратных течений характеризуются параметрами интенсивности крутки и числом Рейнольдса (Рисунок 1).

Повышение коэффициента трения на стенке трубы (Рисунок 2), обусловленное дополнительным сдвиговым напряжением в закрученном потоке, ведет к большим потерям давления в сравнении с прямоточным течением.

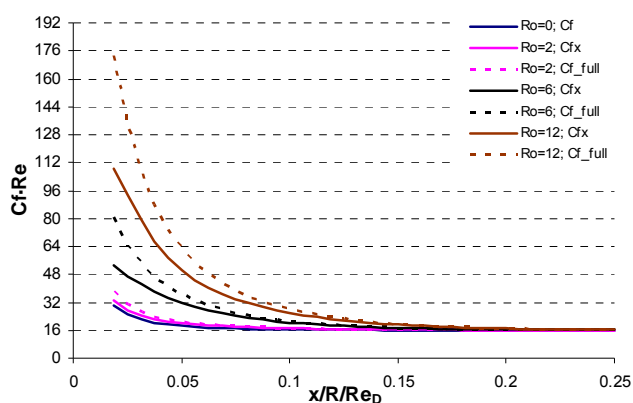


Рисунок 2. Распределения полного коэффициента трения (пунктир.) и трения с учетом только осевой компоненты вектора скорости (сплош.) в зависимости от приведенной длины канала ( $x/R/Re_D$ ) при различных числах крутки. (Локальная крутка на входе).

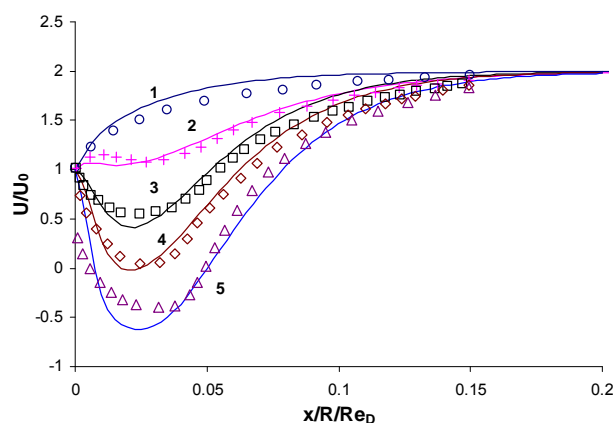


Рисунок 1. Распределения относительной осевой скорости  $U/U_0$  в зависимости от приведенной длины ( $x/R/Re_D$ ) при различных числах крутки  $\Phi=QR/U_0$ . Линии – расчет, значки – данные Шнайдермана и Ершова [10] 1- $\Phi=0$ ; 2-2; 3-3; 4-4; 5-6;

Размеры зон возвратных течений характеризуются параметрами интенсивности крутки и числом Рейнольдса (Рисунок 1).

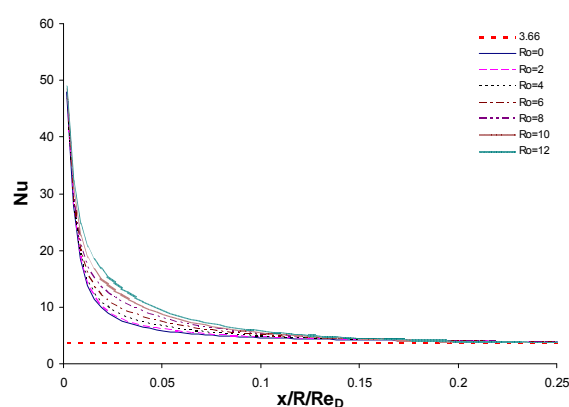


Рисунок 3. Распределения критерия Нуссельта в зависимости от параметра крутки от приведенной длины канала ( $x/R/Re_D$ ). (Локальная крутка на входе).

Изменение критерия Нуссельта (Рисунок 3) и поля температуры (Рисунок 4) показывают интенсификацию теплообмена на начальном участке трубы с повышением закрутки потока.

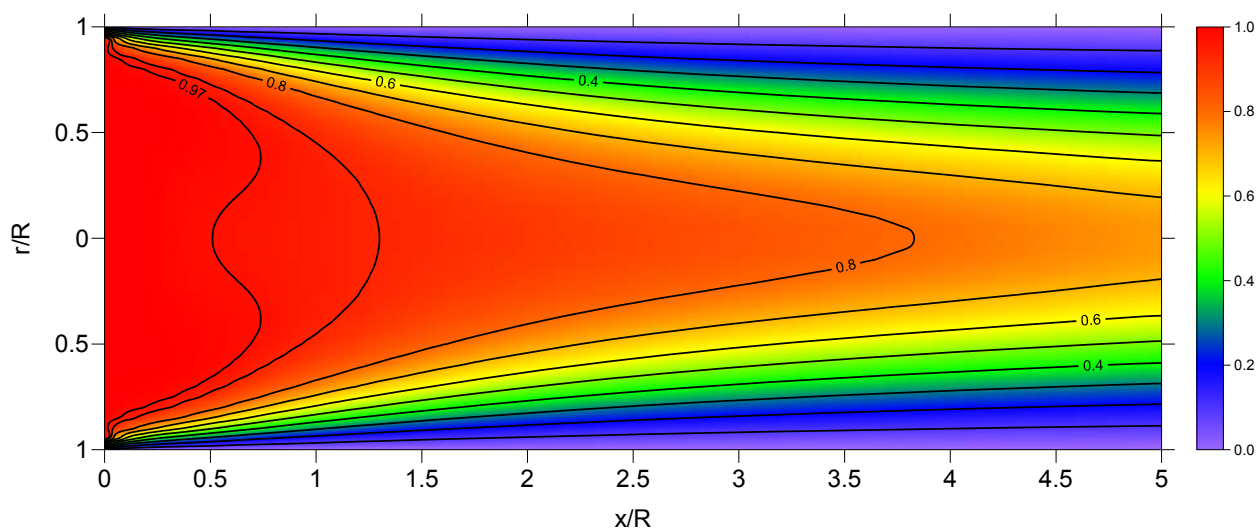


Рисунок 4. Изолинии и поле значений температуры  $(T-T_w)/(T_0-T_w)$  при  $Re=20$  и  $Ro=10$

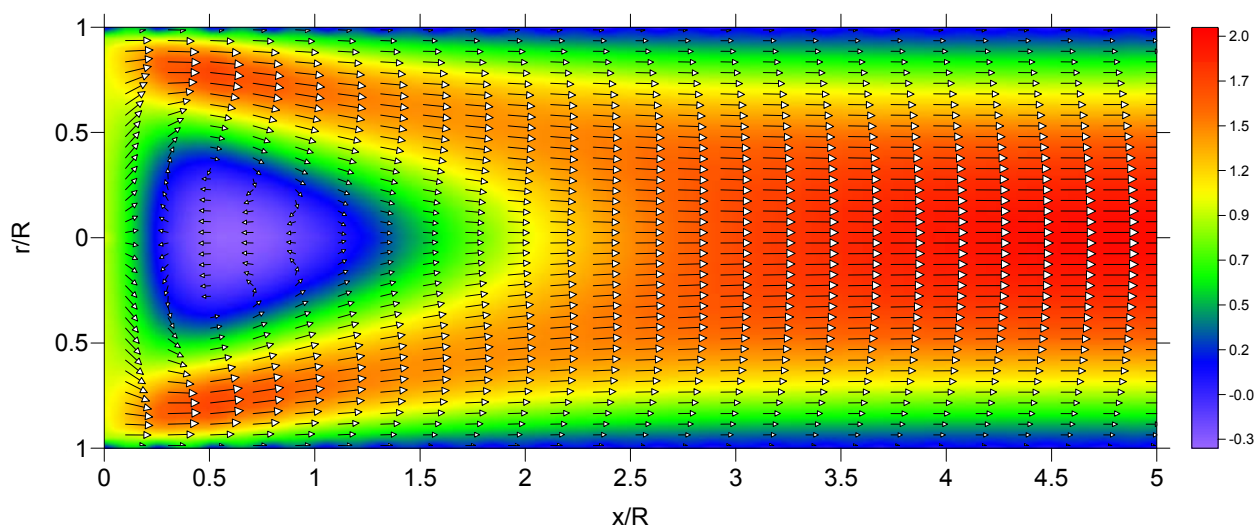


Рисунок 5. Поле значений осевой компоненты вектора скорости  $U/U_0$  (цвет) и векторное поле течения (стрелки) в канале с локальной круткой на входе ( $Re=20$  и  $Ro=10$ ).

#### В п. 2.4. приводится **расчет течения во вращающейся трубе.**

Заметим, что данные о влиянии крутки на гидродинамику в условиях сложного сдвигового течения ограничены и противоречивы. Тем не менее, удаётся установить некоторые общие черты течений в трубах с вращающейся стенкой вокруг своей продольной оси. Интерес к подобным течениям вызван возможностью организации в них ламинаризирующих под действием вращения эффектов и поддержанием режима экстенсификации теплообмена на протяжённых участках.

С целью уяснения деталей такого процесса и механизмов переноса первоначально решались задачи о ламинарном течении и теплообмене в трубах.

Формулировка граничных условий в такой задаче сводится к следующему: *на входе*: развитый профиль осевой компоненты вектора скорости и отсутствие (равенство нулю) радиальной и тангенциальной составляющей. Температура втекающего потока равна  $T_0$ .

$$U|_{x=0} = 2 \cdot U_0 \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right); \quad V|_{x=0} = 0; \quad W|_{x=0} = 0; \quad T|_{x=0} = T_0. \quad (8)$$

На стенке трубы условия прилипания выражаются в отсутствии осевой и радиальной составляющих вектора скорости при  $r=R$ . Тангенциальная компонента вектора скорости на стенке равна скорости вращения трубы  $W_0$ . На выходе заданы «мягкие» граничные условия, на оси – условия симметрии.

Процедура расчёта включала в себя действия с последовательной отработкой блоков: решение задачи об изотермическом и неизотермическом течении с постоянными и переменными теплофизическими свойствам в диапазоне определяющих параметров  $Re=10\div 2000$ ,  $Ro=0\div 22$ .

Сравнения с имеющимися опытными данными результатов расчета (Рисунок 6 и Рисунок 7) и их анализ позволяет сделать следующие выводы:

- течение во вращающейся трубе характеризуется появлением зон обратных токов у стенки на начальном участке трубы и вытягиванием профиля осевой компоненты вектора скорости в сравнении с профилем Пуазейля. Интенсивность движений и размер зоны рециркуляции в пристеночной зоне существенно зависит от скорости вращения трубы и числа Рейнольдса;

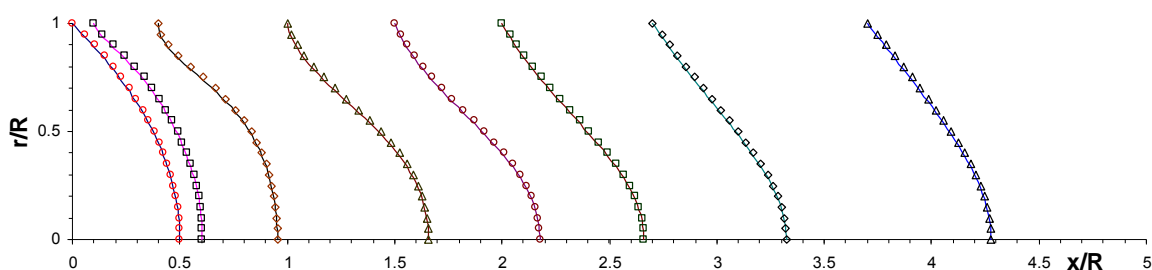


Рисунок 6. Развитие профиля осевой компоненты вектора скорости  $U/U_0$  по длине канала (число Рейнольдса  $Re=20$ , интенсивность крутки  $Ro=5.22$ ; Вращающаяся труба). Линии - расчет, значки - данные Лавана [11] и др.

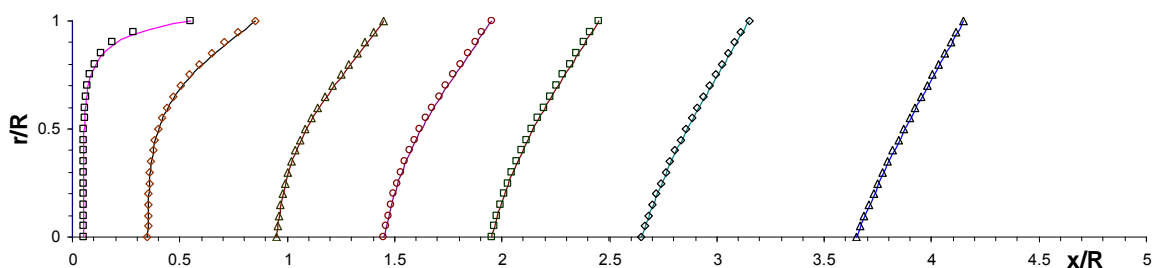


Рисунок 7. Развитие профиля тангенциальной компоненты вектора скорости  $W/U_0$  по длине канала (число Рейнольдса  $Re=20$ ,  $\phi Ro=5.22$ ; Вращающаяся труба). Линии - расчет, значки - данные Лавана [11] и др.

- В количественном значении коэффициента трения на стенке вращающейся трубы полностью преобладает сдвиговое напряжение, обусловленное вращением ( $\tau_{r\phi}$ ), с увеличением параметра крутки возрастает и эффективный (полный) коэффициент трения (Рисунок 8).

- распределения критерия Нуссельта (Рисунок 9) и поля температуры (Рисунок 10) говорят об экстенсификации теплообменных процессов в потоке во вращающейся трубе. Начиная с некоторого расстояния от входа профиль температуры подстраивается под изменение профиля скорости в пристеночной части. Наблюдается его меньшая заполненность у стенки в сравнении с прямоточным течением. Отдельные результаты, иллюстрирующие этот процесс, представлены далее (Рисунок 11)

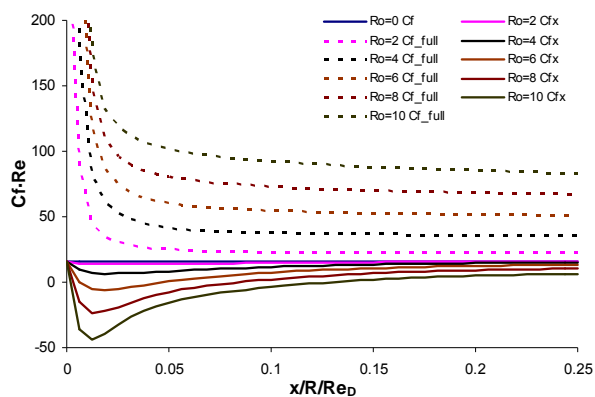


Рисунок 8. Распределения полного коэффициента трения (пунктир.) и трения с учетом только осевой компоненты вектора скорости (сплош.) в зависимости от приведенной длины канала ( $x/R/Re_D$ ) при различных числах крутки. (Вращающаяся труба)

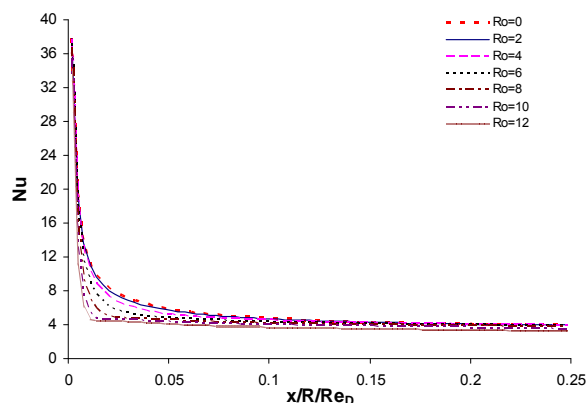


Рисунок 9. Распределения критерия Нуссельта в зависимости от параметра крутки от приведенной длины канала ( $x/R/Re_D$ ). (Вращающаяся труба)

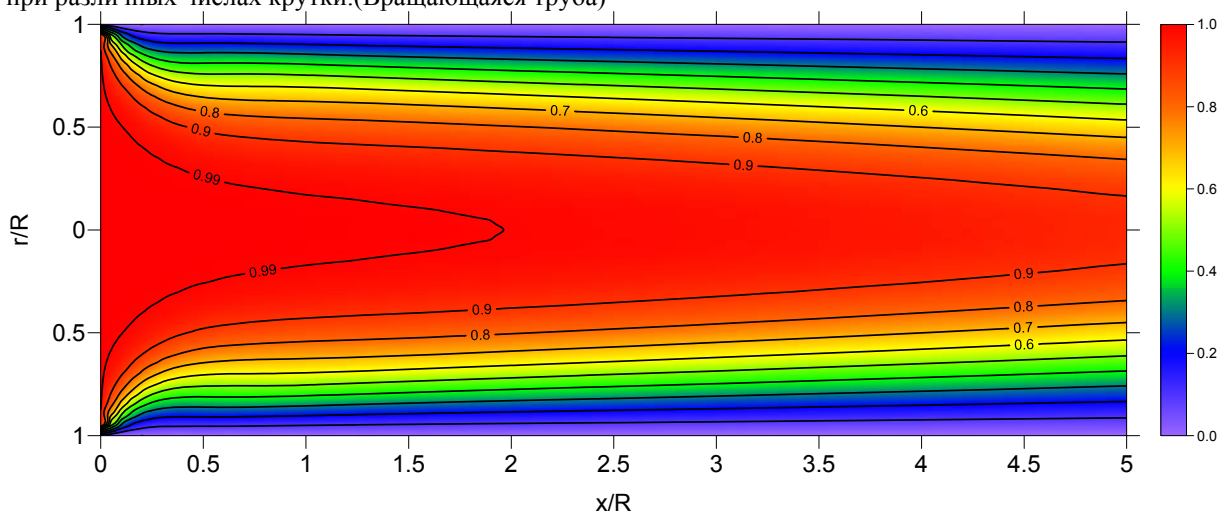


Рисунок 10. Изолинии и поле значений температуры  $(T-T_w)/(T_0-T_w)$  при  $Re=20$  и  $Ro=10$

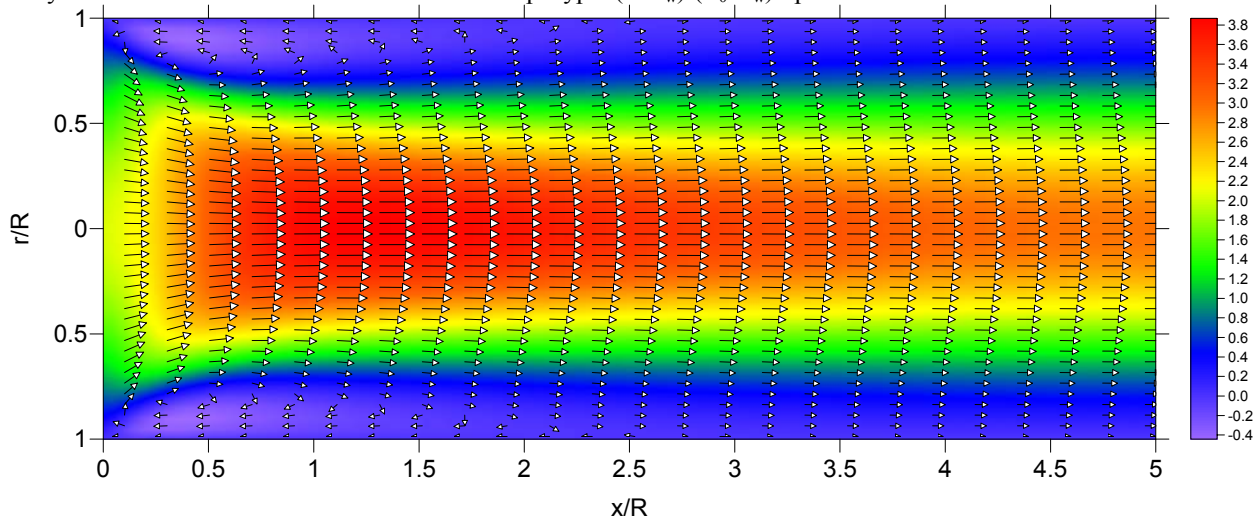


Рисунок 11. Поле значений осевой компоненты вектора скорости  $U/U_0$  (цвет) и векторное поле течения (стрелки) в канале с вращающейся вокруг оси симметрии стенкой. При  $Re=20$  и  $Ro=10$

В п. 2.5. приведены результаты исследования гидродинамики и теплообмена для случая течения в каналах со сложной геометрией. Рассматривается неизотермическое дозвуковое течение жидкости в трубах переменного поперечного сечения. Предполагается, что в общем случае течение на входе считается полностью развитым. Поток втекает в трубу с



температурой  $T_0$ . Температура на стенке равняется  $T_w$ , компоненты вектора скорости принимаются равными нулю (условия прилипания). На оси – условия симметрии, на выходе – «мягкие» граничные условия.

Расчёты конфигураций канала, интересных с точки зрения приложений, и поведение алгоритма в данных условиях показывают, что моделирование течений во внутренних системах с нерегулярной геометрией вполне удовлетворительно согласуется с результатами расчетов и экспериментами других авторов [12]. Расчет течения в трубе с внезапным расширением на входе ( $h/R=0.5$ ) указал на наличие отрыва потока и образование вихрей сразу за уступом в том виде, в котором это было представлено в экспериментальных работах и численных исследованиях других авторов.

Ниже приведены результаты некоторых расчетов, иллюстрирующие возможности алгоритма в предсказании прямоточных и закрученных течений в условиях сложной геометрии трубы.

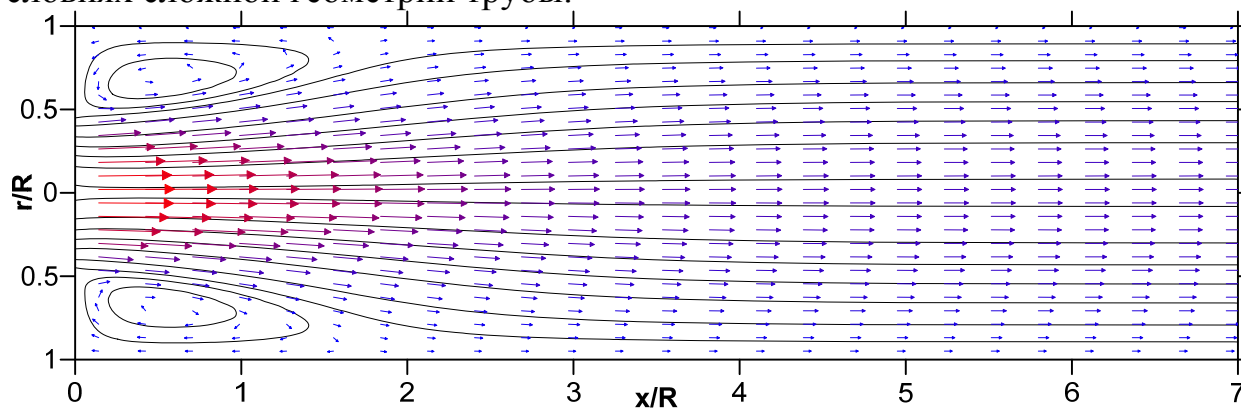


Рисунок 12. Линии тока и векторное поле при течении в канале с внезапным расширением. При  $Re=20$  и  $h/R=0.5$

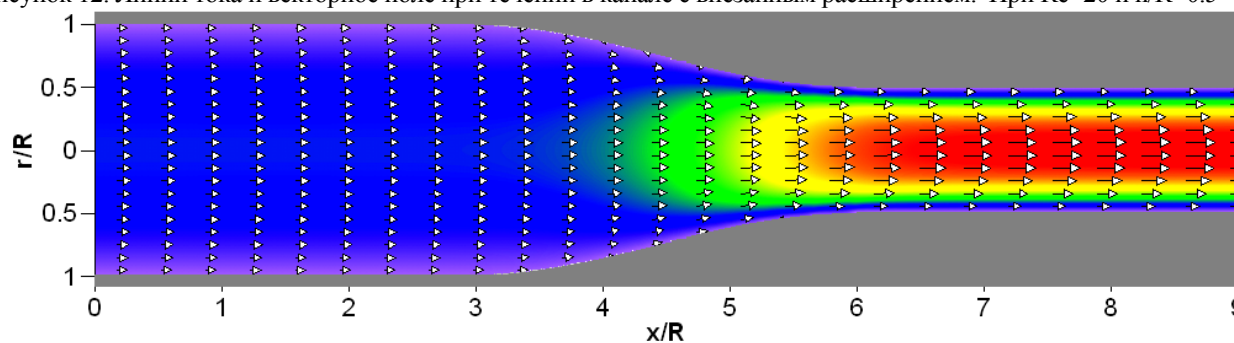


Рисунок 13. Векторное поле и значения осевой компоненты вектора скорости при течении в трубе, сужающейся по синусоидальному закону с  $x/R=3$  до  $x/R=6$ . Просвет уменьшается в два раза.  $Re=20$ .

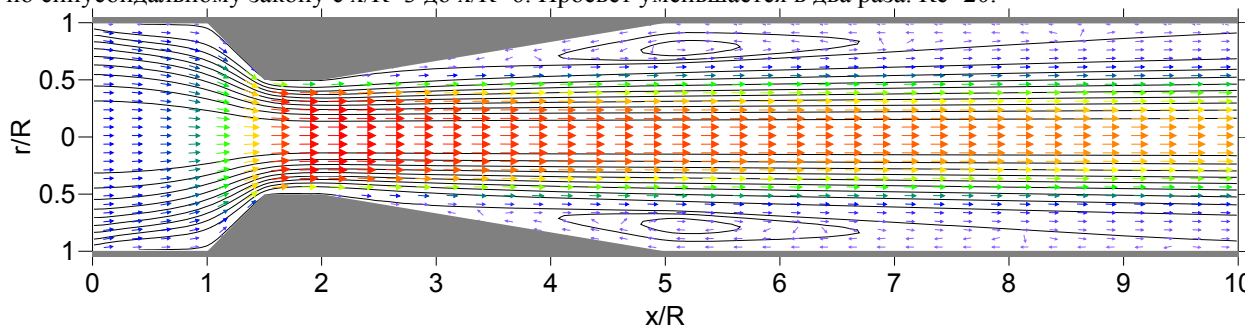


Рисунок 14. Линии тока и векторное поле при течении в канале с постепенным сужением до середины канала. При  $Re=20$ ,  $h_R/R=0.5$ .

Заметим, что для практики основной интерес в расчётах подобных конфигураций и соответствующие оценки возможностей алгоритма в

предсказании механизмов переноса импульса, тепла здесь связан с проблемами определения периферийных рециркуляционных зон в областях за препятствиями, представляющими конфузорно-диффузорные вставки. Расчёты показывают, что размеры зон рециркуляции хорошо согласуются с экспериментом и расчётом.

Это обстоятельство позволяет надеяться на корректное описание подобных течений с аналогичной геометрией в условиях влияния массовых инерционных сил. Эти данные приведены в пункте 2.6 о пространственных закрученных течениях в каналах сложной формы.

В работе установлено, что совместное воздействие на течение закрутки потока и особенностей геометрии трубы ведет к наложению эффектов, сопровождающих каждый тип течения в отдельности. Так, появление центральной рециркуляционной зоны (ЦРЗ) в закрученном локально на входе потоке с внезапным расширением ведет к уменьшению периферийных рециркуляционных зон (ПРЗ), сдвигая точку присоединения потока ближе к входу (Рисунок 15).

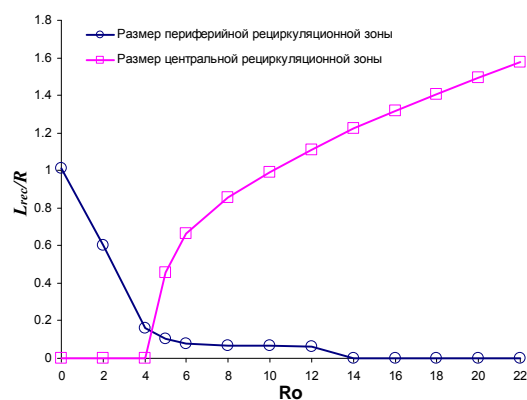


Рисунок 15. Сопоставление ПРЗ и ЦРЗ при взаимном наложении эффектов — локальной закрутки на входе и внезапного расширения канала  $h/R=0.5$ .

Ниже приводятся отдельные результаты, иллюстрирующие перестройку векторного поля скорости в каналах сложной формы (Рисунок 16).

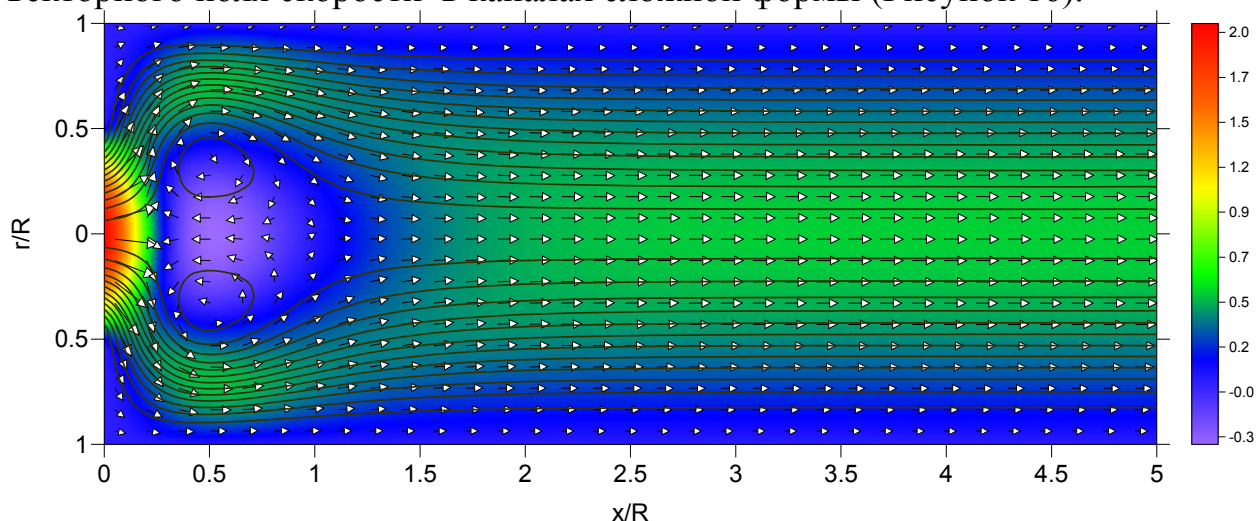


Рисунок 16. Линии тока и векторное поле закрученного локально на входе течения во внезапно расширяющейся трубе. При  $Re=20$ ,  $h/R=0.5$ ,  $Ro=6$

В третьей главе представлен детальный теоретический анализ особенностей развития и затухания турбулентного закрученного потока в трубах.

Рассматривается установившееся турбулентное течение газа и теплообмен в цилиндрических трубах и каналах с постоянным и слабоменяющимся поперечным сечением. Предполагается, что поток вещества является однокомпонентной химически инертной средой. Движение осесимметричное и

осуществляется в отсутствии действия внешних сил (сил тяжести) и объемных источников тепла. Температурные перепады могут быть значительными так, что необходимо учитывать переменность теплофизических характеристик рабочего флюида от температуры.

Система уравнений, определяющих течение и теплообмен, включает уравнения неразрывности, движения (полные уравнения Рейнольдса), энергии и состояния и имеет вид, который для простоты записи представлен в тензорной форме:

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) \right]; \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p U_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u'_i t'} \right); \quad (11)$$

$$p = \rho RT. \quad (12)$$

Использованные обозначения в записи уравнений (9)-(12) общепринятые, все величины осредненные (осреднение по Рейнольдсу). Для замыкания определяющих уравнений привлекается модель турбулентности с уравнениями баланса одноточечных корреляционных моментов второго порядка пульсаций поля скорости ( $\overline{u'_i u'_j}$ ) и температуры ( $\overline{u'_i t'}$ ).

**Модель турбулентности.** С целью простоты представления самих уравнений модели и ее замыкающих соотношений воспользуемся тензорным видом. Для описания членов высшего порядка (турбулентной диффузии, перераспределения, вязкой диссипации) используются аппроксимационные связи, предложенные в работах Дж.С. Ротта, Б.А. Коловандина, Б.Е. Лаундера, Б.С. Петухова, А.Ф. Курбацкого и др. [см. например 3, 13] и обобщенные нами на базу из  $k\tau$ -уравнений. С учетом замечаний, модель составят уравнения, замкнутая форма которых следующая (значения постоянных получены в результате численной оптимизации расчетов):

$$\begin{aligned} \frac{D\overline{u'_i u'_j}}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left[ \left( \nu + c_{\mu 1} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_\alpha} \right] - \frac{d_2}{\tau} \left( \overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - \\ &- d_3 \nu \frac{\overline{u'_i u'_j}}{\tau^2 k} - \frac{2}{3} d_4 \frac{k}{\tau} \delta_{ij} + P_{ij} - \frac{\partial \nu}{\partial x_\alpha} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_\alpha}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\overline{u'_i t'}}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left[ \left( \nu + \frac{(a - \nu)}{(n_i + 2)} + c_{\mu \theta} f_{\mu \theta} \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial \overline{u'_i t'}}{\partial x_\alpha} \right] - c_2 \frac{1}{\tau} \overline{u'_i t'} - \\ &- c_3 (v + a) \frac{\overline{u'_i t'}}{l_{u'_i t'}^2} - \overline{u'_i u'_\alpha} \frac{\partial T}{\partial x_\alpha} - \overline{u'_\alpha t'} \frac{\partial U_i}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial \nu}{\partial x_\alpha} \frac{\partial \overline{u'_i t'}}{\partial x_\alpha}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + c_{\mu 2} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - c_{k1} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{k}{\tau}; \quad (15)$$



$$\begin{aligned} \frac{D\tau}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( v + c_{\mu 2} f_{\mu} \overline{u'_i u'_j \tau} \right) \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{\tau} \left( v + c_{\mu 2} f_{\mu} \overline{u'_i u'_j \tau} \right) \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \frac{\partial \tau}{\partial x_i} + \\ + (c_{\varepsilon 2} f_2 - 1) - (1 - c_{\varepsilon 1}) \frac{\tau}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{2}{k} \left( v + c_{\mu 2} f_{\mu} \overline{u'_i u'_j \tau} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \tau}{\partial x_i}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь обозначено:

$$\frac{D}{Dt} = U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial r}; \quad a = \frac{v}{Pr}; \quad P_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \overline{u'_j u'_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}; \quad (17)$$

$$f_{\mu} = (1 + 3.45/\sqrt{Re_t}) [1 - \exp(-y^+/85)]; \quad f_{\mu\theta} = f_{\mu} f(\Pr); \quad f(\Pr) = 0.5 \cdot (1 + 0.871/\sqrt{\Pr}); \quad (18)$$

$$f_2 = [1 - \exp(-y^+/4.9)]^2; \quad Re_t = k\tau/v \quad l_{u'_i} = f(\Pr)\tau\sqrt{k}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} c_{k1}=0.9; c_{d1}=1.853; c_{d2}=0.83; c_{d3}=1.7; c_{d4}=1.44; d_2=1.4; d_3=140; d_4=0.7; \\ c_{\mu\theta}=0.15; c_{\mu}=0.09; c_{\mu 1}=0.225; c_{\mu 2}=0.066; c_{\varepsilon 1}=1.44; c_{\varepsilon 2}=1.7; \end{aligned} \quad (20)$$

Определяющие уравнения (9)-(16) интегрируются при следующих граничных условиях. На входе – задаются однородные профили осредненных и пульсационных величин, на выходе – так называемые “мягкие” граничные условия для всех искомым параметров. На стенке ( $r=R$ ) – отсутствия движения для гидродинамических величин и тепловой стабильности для осредненной температуры ( $T=T_w$  или  $q_w=const$ ), турбулентный поток тепла пренебрежимо мал. На оси ( $r=0$ ) – условие симметрии для всех величин, кроме сдвиговых напряжений и радиального потока тепла. Решение определяющих уравнений основано на использовании неявных конечно-разностных схем, схем расщепления по физическим процессам с последующим применением методов прогонки и установления по эволюционной переменной  $t$  (время). Для этой цели уравнения (9)-(16) представляются в нестационарном виде. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока при проведении итераций не будет достигнута сходимость по трению и теплоотдаче с точностью в 0.01%. Решение строится на неравномерных сетках со сгущением узлов у стенки и оси. Аппроксимация производных осуществляется со вторым порядком точности относительно шагов в радиальном и осевом направлениях.

Далее приведены некоторые результаты расчета для прямооточных (Рисунок 17-Рисунок 22) и закрученных турбулентных течений (Рисунок 23-Рисунок 32).

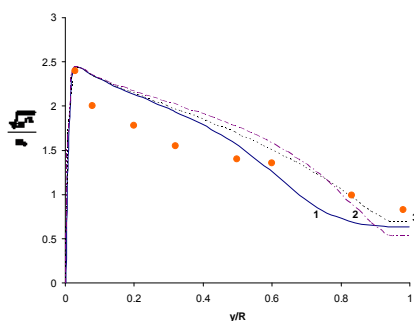


Рисунок 17. Радиальные распределения безразмерной величины пульсаций осевой компоненты вектора скорости по длине канала. Здесь линии – расчет, значки - опыт Ибрагимов [14] ( $Re=3.25 \cdot 10^4$ ,  $1-x/D=32$ , 2-40, 3-160).

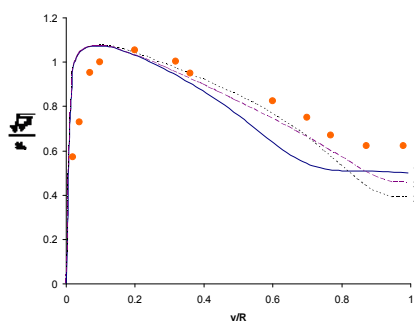


Рисунок 18. Радиальные распределения безразмерной нормальной компоненты вектора скорости в зависимости от продольной координаты. Обозначения аналогичны (Рисунок 17).

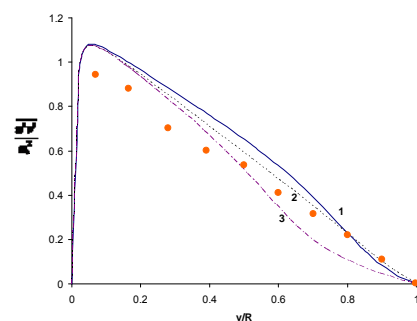


Рисунок 19. Радиальные распределения безразмерной величины сдвигового напряжения в различных сечениях по длине канала. Здесь линии – расчет, значки – опыт Ибрагимова [14]. Обозначения аналогичны (Рисунок 17).

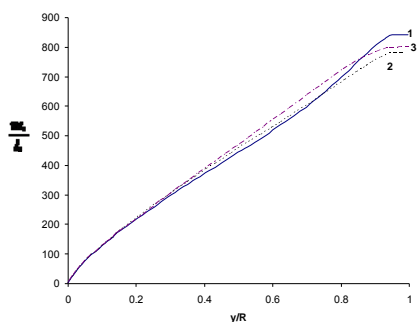


Рисунок 20. Радиальные распределения характерного масштаба времени пульсаций поля скорости по длине канала. Здесь 1-  $x/D=20$ , 2-24 3-160,  $Re=3.25 \cdot 10^4$ .

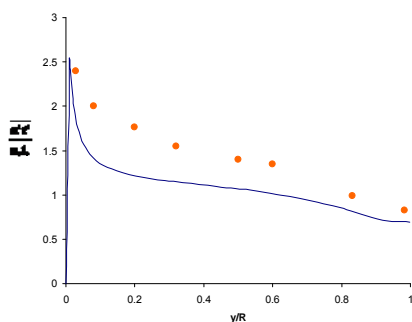


Рисунок 21. Радиальный профиль осевого безразмерного турбулентного потока тепла (значки – опыт [14]  $Re=3.5 \cdot 10^4$ , расчет -  $x/D=100$ )

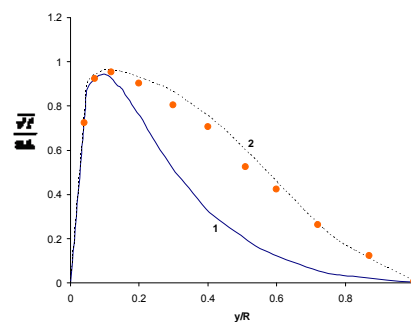


Рисунок 22. Распределение радиального турбулентного потока тепла в сечениях канала (значки – данные [14], 1- $x/D=30$ , 2-120)

Из рисунков видно, что по мере продвижения потока по трубе модель неизменно корректно фиксирует пики пульсаций тепловых и динамических параметров в непосредственной окрестности стенки, при этом уже при  $x/D \approx 60$  проявляются черты развитого течения. Заметим, что в сравнении с опытом модельная корреляция в области ядра течения ( $0.25 < y/R < 0.5$ ) снижена. Частично это связано с отсутствием детальной информации об условиях эксперимента относительно распределения пульсаций величин в области входа.

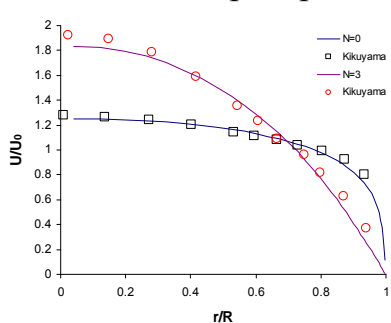


Рисунок 23. Радиальный профиль безразмерной осевой скорости осредненного движения (значки – опыт Кикуюма [15]  $Re=1 \cdot 10^4$ , расчет –  $x/D=200$ )

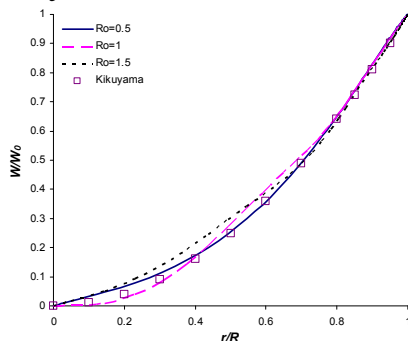


Рисунок 24. Радиальный профиль безразмерной тангенциальной скорости осредненного движения (значки – данные [15], 1- $x/D=200$ )

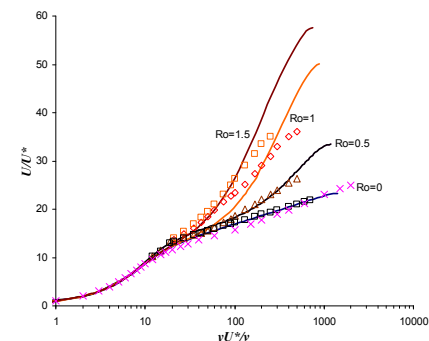


Рисунок 25. Распределение безразмерной осевой скорости в зависимости от интенсивности вращения трубы (значки – данные Кикуюма [15] и Никурадзе, линии – расчет.  $Re=3 \cdot 10^4$ ,  $x/D=200$ )

Качество модели, так же проверялось при расчетах закрученных течений. Так, на рисунках (Рисунок 23-Рисунок 26) представлены некоторые результаты моделирования течения в трубе, вращающейся вокруг своей продольной оси. Сравнение полученных результатов с данными расчетов и экспериментов других авторов показывает удовлетворительное согласие, что свидетельствует о корректном описании рассматриваемого течения.

Далее приведены радиальные распределения пульсационных характеристик поля скорости на выходе из трубы при различных числах крутки (Рисунок 27-Рисунок 32).

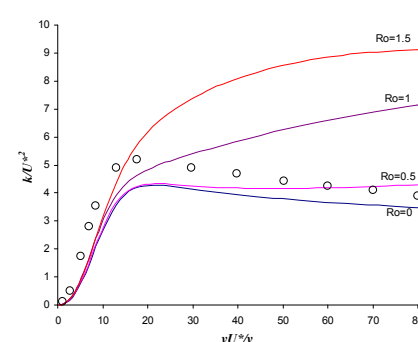


Рисунок 26. Распределение кинетической энергии турбулентных пульсаций у стенки (значки – данные Лауфера, линии – расчет.  $Re=3 \cdot 10^4$ ,  $x/D=200$ )

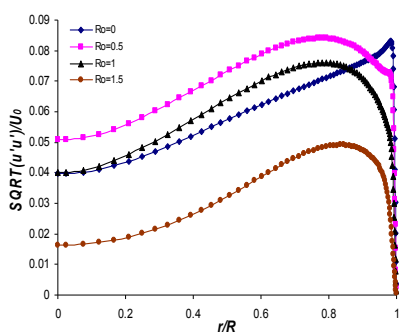


Рисунок 27. Радиальные распределения безразмерной величины пульсаций осевой компоненты вектора скорости. ( $Re=1 \cdot 10^4$ ,  $x/D=200$ )

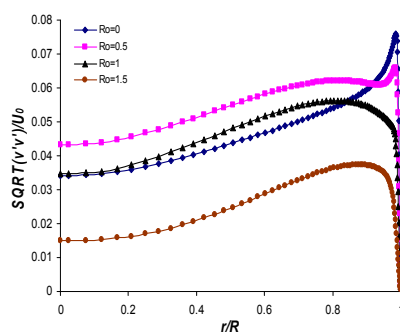


Рисунок 28. Радиальные распределения безразмерной величины пульсаций радиальной компоненты вектора скорости. ( $Re=1 \cdot 10^4$ ,  $x/D=200$ )

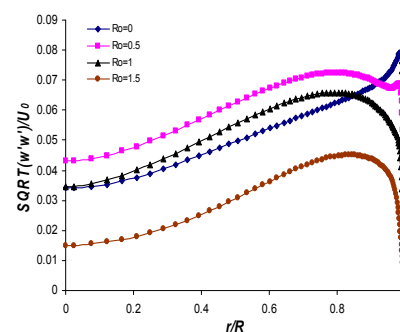


Рисунок 29. Радиальные распределения безразмерной величины пульсаций тангенциальной компоненты вектора скорости. ( $Re=1 \cdot 10^4$ ,  $x/D=200$ )

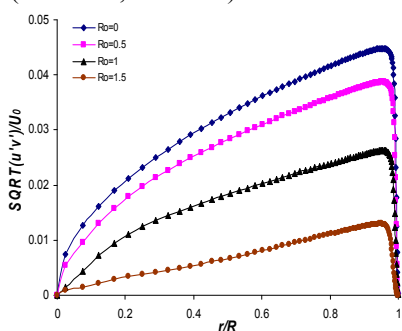


Рисунок 30. Радиальные распределения безразмерной величины сдвигового напряжения. ( $Re=1 \cdot 10^4$ ,  $x/D=200$ )

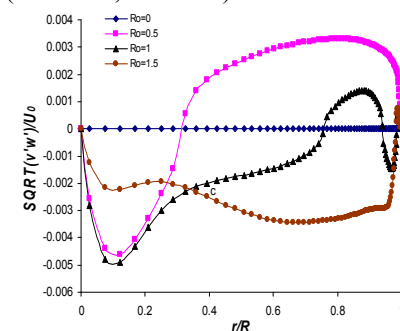


Рисунок 31. Радиальные распределения безразмерной величины сдвигового напряжения в различных сечениях по длине канала. ( $Re=1 \cdot 10^4$ ,  $x/D=200$ )

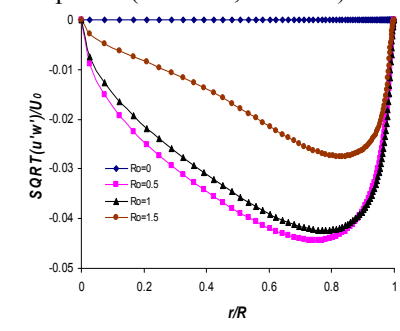


Рисунок 32. Радиальные распределения безразмерной величины сдвигового напряжения в различных сечениях по длине канала. ( $Re=1 \cdot 10^4$ ,  $x/D=200$ )

Из приведенных рисунков (Рисунок 17-Рисунок 32) видно, что расчет удовлетворительно согласуется с данными других авторов. По распределению осредненных и пульсационных характеристик течения во вращающейся трубе (Рисунок 23-Рисунок 32) можно судить о подавлении турбулентных пульсаций массовыми центробежными силами и появлении эффекта ламинаризации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации представлено развитие и обоснование к использованию в расчётах сложных неізотермических закрученных и прямоочных турбулентных потоков современных статистических моделей турбулентности второго порядка для компонентов полного тензора рейнольдсовых напряжений и удельных тепловых потоков с оригинальной опорной базой из транспортных уравнений для кинетической энергии турбулентности и характерного масштаба времени пульсаций поля скорости.

В процессе выполнения работы последовательно изучен ряд конфигураций конвективного теплообмена во внутренних системах, важных с точки зрения приложений в технику, с использованием методов математического и численного моделирования.

По результатам выполненной диссертационной работы можно сделать следующие выводы.

1. В рамках моделей стационарных, ламинарных и турбулентных, дозвуковых, химически инертных, неизотермических, осесимметричных течений жидкостей и газов и на базе конечно-разностной вычислительной методики (алгоритма SIMPLE и подхода Л.М. Симуни, обобщенного на случай переменного по радиусу продольного градиента давления) представлены результаты расчёта гидродинамики и теплообмена в трубах и каналах со сложной конфигурацией стенки (внезапное расширение, сужение, секции конфузорно-диффузорного типа).

2. Детально исследована структура течений при наличии поля массовых инерционных сил (закрутка осуществляется методом локальной крутки потока в области входа и способом вращающейся стенки).

3. Расчётная методика характеризуется отработкой модулей с последовательным использованием алгоритма SIMPLE в расчётах сильно-закрученных ламинарных и турбулентных течений ( $Ro > 4$ ,  $h/R = 0.5$  – течения в трубах с локальной закруткой в области входа;  $Ro > 2$ ,  $h/R = 0.5$  – вращающаяся стенка) и обобщенного алгоритма Л.М. Симуни (остальные случаи). Причем в последнем случае для обеспечения устойчивости и сходимости решения в расчетных областях с большими градиентами течения и теплообмена, а также для снижения временных затрат на численную реализацию, решение производится с привлечением неравномерных сеток со сгущением разностных узлов у стенок.

4. Выполнен большой цикл сравнительных тестовых расчётов для случаев изотермических и неизотермических ламинарных и турбулентных осесимметричных течений в цилиндрических трубах со сложной границей (конфузорно-диффузорного типа, секции скачок – сужение). Установлено, что результаты расчета находятся в удовлетворительном согласии с известными данными других авторов. Исследования гидродинамики и теплообмена производились по широкому спектру изменения осредненных и пульсационных теплогидродинамических величин ( $Re = 10 \div 10^5$ ).

5. Оценены возможности схем замыкания для напряжений и потоков с  $k$ - $\tau$  базой в моделировании сложных течений. Детально проанализирована гидродинамика и теплообмен в условиях ламинаризации потока в трубах вращающейся стенкой ( $Ro > 1$ ). Сделан вывод о перспективности этих схем в расчетах локальной анизотропной турбулентности.

6. Разработанные математические модели, численные методы и методики расчёта сложных сдвиговых течений в полях действия массовых сил внедрены в практику инженерных расчетов ООО «СИАМ-Инжиниринг» (г. Томск) для проведения текущих исследований гидродинамики и теплообмена в технологических цепях транспортировки углеводородов и расчёта эффективности функционирования нефтескважинного оборудования

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щукин В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в полях массовых сил / В.К. Щукин, А.А. Халатов – М. : Машиностроение, 1982. – 200 с.
2. Speziale C.G. Modelling the pressure-strain correlation of turbulence: and invariant dynamical systems approach / C.G. Speziale, S. Sarkar, T.B. Gatski // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1991. – Vol. 227. – P. 245-272.
3. Курбацкий А.Ф. Уравнение переноса для масштаба времени турбулентного скалярного поля / А.Ф. Курбацкий // *Теплофизика высоких температур*. – 1999. – Т. 37, № 4. – С. 589-594.
4. Гришин А.М. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений / А.М. Гришин. – Томск : Изд-во ТГУ, 1973. – 282 с.
5. Архипов В. А. Горение распыленного жидкого топлива в закрученном потоке / В. А. Архипов, О.В. Матвиенко, В.Ф. Трофимов // *Физика горения и взрыва*. – 2005. – № 2. – С. 26-37.
6. Abujelala M.T. Liminations and empirical extensions of the k- $\epsilon$  model as applied to turbulent confined swirling flows / M.T. Abujelala, D.G. Lilley // *AIAA Paper*. – 1984. – № 441. – P. 11.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар ; под ред. В.Д. Виленского – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
8. Симуни Л.М. Численное решение задачи при неизотермическом движении вязкой жидкости в плоской трубе / Л.М. Симуни // *Инженерно-физический журнал*. – 1966. – Т. 10, № 1. С.86-91.
9. Харламов С.Н. Численный алгоритм для расчета внутренних закрученных течений вязкой жидкости / С.Н. Харламов, А.М. Бубенчиков // *Труды международной конференции RDAMM : спец. выпуск* – 2001. – Т. 6, ч. 2. – С. 413-420.
10. Шнайдерман М.Ф. О влиянии закрутки потока на распределение скоростей и температур в круглой трубе / М.Ф. Шнайдерман, А.И. Ершов // *Инженерно-физический журнал*. – 1975. – Т. 28, № 4. – С. 630-635.
11. Lavan Z. Separation and Flow Reversal in Swirling Flows in Circular Ducts / Z. Lavan, H. Nielsen, A.A. Fejer // *The physics of fluids*. – 1969. – Vol. 12, № 2. – P. 1747-1757.
12. Hammad K.J. A PIV study of the laminar axisymmetric sudden expansion flow / K.J. Hammad, M.V. Ötügen, E.B. Arik // *Experiments in fluids*. – 1999. – № 26. – P. 266-272.
13. Launder B.E. Heat and Mass Transport. Turbulence-Topics in Applied Physics / B.E. Launder ; ed. P. Bradshaw. – Berlin : Springer, 1976. – 332 p.
14. Ибрагимов М.Х. Пульсации скорости, температуры и их корреляционные связи при турбулентном течении воздуха в трубе / М.Х. Ибрагимов, В.И. Субботин, Т.С. Таранов // *Инженерно-физический журнал*. – 1970. – Т. 19, № 6. – С. 1060-1069.
15. Kikuyama K. Flow in an Axially Rotating Pipe / K. Kikuyama, M. Murakami, K. Nishibori, K. Maeda // *Bulletin of the JSME*. – 1983. – Vol. 26. – P. 506-513.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сильвестров С.И. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена при сложном течении вязких сред в областях произвольной конфигурации / С.И. Сильвестров, *В.Ю. Ким*, С.Н. Харламов // Известия вузов. Физика. – 2009. – № 7/2. – С. 121-125.
2. *Ким В.Ю.* Численное исследование пространственных неизотермических течений в полях массовых сил в трубах с криволинейной границей / *В.Ю. Ким*, С.И. Сильвестров, С.Н. Харламов // Известия вузов. Физика. – 2009. – № 7/2. – С. 126-130.
3. Харламов С.Н. Математическое моделирование турбулентного течения газа в трубах / С.Н. Харламов, С.И. Сильвестров, *Ким В.Ю.* // Проблемы геологии и освоения недр : труды X международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова. – Томск : Изд-во ТПУ, 2006. – С.450-452.
4. Харламов С.Н. Численное моделирование турбулентного теплообмена в круглых трубах при наличии участков прямого и закрученного движения газа / С.Н. Харламов, С.И. Сильвестров, *В.Ю. Ким* // Труды четвертой российской национальной конференции по теплообмену : в 8 т. – М. : Изд-во МЭИ, 2006. – Т. 8. – С. 116-117.
5. Харламов С.Н. Исследование гидродинамики закрученного ламинарного потока вязкого газа в каналах / С.Н. Харламов, *В.Ю. Ким* // Проблемы геологии и освоения недр : труды XI международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – С. 505-507.
6. Харламов С.Н. Расчет турбулентного теплообмена в круглой трубе с использованием модели транспортных уравнений для рейнольдсовых напряжений / С.Н. Харламов, *В.Ю. Ким* // Труды конференции, посвященной 300-летию со дня рождения Л. Эйлера. – Томск : Изд-во ТГУ, 2007. – С. 39-40.
7. Харламов С.Н. Гидродинамика и теплообмен в закрученных потоках несжимаемой жидкости во входной области круглой трубы / С.Н. Харламов, *В.Ю. Ким* // Наука и образование : труды XI всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск : Изд-во ТГПУ, 2007. – С. 321-323.
8. Харламов С.Н. Моделирование турбулентного течения и теплообмена в круглых трубах с использованием статистических моделей второго порядка / С.Н. Харламов, *В.Ю. Ким* // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках : труды XVI школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева : в 2 т. – М. : Изд-во МЭИ, 2007. – Т. 2. – С. 474-476.
9. *Ким В.Ю.* Моделирование ламинарного закрученного течения природного газа в круглых трубах / *В.Ю. Ким*, С.И. Сильвестров // Труды седьмой всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России. – М. : Интерконтакт Наука, 2007. – С. 26-27.

10. Харламов С.Н. Исследование гидродинамики и теплообмена на участках трубопровода с разрывом теплофизических свойств материала стенки / С.Н. Харламов, **В.Ю. Ким** // Проблемы геологии и освоения недр : труды XII международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – С. 592-594.

11. Харламов С.Н. Математическое моделирование неоднородной анизотропной турбулентности при трубопроводном транспорте сложных по структуре сред / С.Н. Харламов, **В.Ю. Ким**, С.И. Сильвестров // Новые идеи в науках о земле : доклады IX международной конференции : в 3 т. – М., 2009. – Т. 3. – С. 213-214.

12. Харламов С.Н. Проблемы и перспективы сквозного расчёта турбулентного теплообмена в трубах / С.Н. Харламов, С.И. Сильвестров, **В.Ю. Ким** // Вестник РАЕН, ЗСО. – 2009. – Вып. 11. – С. 111-116.

13. Харламов С.Н. Численное моделирование процессов и течений сложных по структуре сред в замкнутых системах / С.Н. Харламов, С.И. Сильвестров, **В.Ю. Ким** // Вестник РАЕН, ЗСО. – 2009. – Вып. 11. – С.117-126

14. Харламов С.Н. Математическое моделирование и численный алгоритм расчёта рециркуляционных неизотермических течений в коротких каналах / С.Н. Харламов, **В.Ю. Ким**, С.И. Сильвестров // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях : труды XVII школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева : в 2 т. – М. : Изд-во МЭИ, 2009. – Т. 2. – С. 151-154.

15. Харламов С.Н. Детальное моделирование турбулентного теплообмена при низкорейнольдсовых течениях / С.Н. Харламов, С.И. Сильвестров, **В.Ю. Ким** // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях : труды XVII школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева : в 2 т. – М. : МЭИ, 2009. – Т. 2 – С. 155-158.

Тираж 120 экз.  
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»  
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а