

На правах рукописи

Сильвестров Сергей Игоревич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ
ВЯЗКИХ СРЕД В ОБЛАСТЯХ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

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 физико-математических наук, профессор
Булгаков Виктор Кирсанович

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

Защита 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, 34 а.

Автореферат разослан 1 марта 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета доктор технических наук



Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшей отраслью промышленности, обеспечивающей энергетическую безопасность и экономическую самостоятельность промышленно развитой страны, выступает топливно-энергетический комплекс, который одновременно служит источником загрязнения окружающей среды. Вопросы повышения безопасности, эффективности, экологичности объектов ТЭК являются ключевыми для рационального экономического развития предприятий, снижения вредных воздействий на окружающую среду. Газо-трубопроводы высокого давления, устройства интенсификации тепловых процессов в теплоэнергетике, химической промышленности работают в условиях высоких энергозатрат, в том числе на транспорт природного сырья, в режимах устойчивых и переходных ламинарно-турбулентных эффектов и требуют подробного анализа гидродинамики и теплообмена.

Одна из тенденций при конструировании современных устройств в биомедицине, химии и компьютерных технологиях – постоянное уменьшение размеров. В результате чего в некоторых случаях критерий Re оказывается настолько малым, что отвечающий ему режим течения перестаёт быть турбулентным. На микроуровне результаты экспериментов и расчётов нередко расходятся даже для ламинарных течений. Наличие вихревой структуры в устройствах, кроме, например, интенсификации теплообмена, может привести также к скорой эрозии рабочей поверхности аппарата. В таких случаях данные расчётов, экспериментов и их анализ позволяют верно установить влияние определенных параметров на поток и установить пределы и критерии, при которых реализуется желаемый режим течения.

В связи с этим актуальность проблем моделирования тепло-массопереноса, обоснование методов расчёта различных по сложности течений сред в каналах с произвольной границей представляется достаточно высокой и имеет большое практическое значение при получении оценок параметров реальных процессов при работе энергетических и других систем. Кроме того,

создание и использование соответствующих турбулентных моделей, методик и пакетов программ широкого назначения особенно актуально для российской науки, которая, к сожалению, пока отстаёт от зарубежного уровня.

Цель работы.

1. На основе существующих моделей дозвуковых ламинарных и турбулентных течений вязких сред модифицировать методы численного решения применительно к областям различной/сложной геометрии с учётом теплообмена.
2. Разработать и внедрить в практику прикладных расчётов внутренних течений эффективный численный алгоритм.
3. Выполнить серийные расчёты внутренних течений в областях различной конфигураций и режимов интенсивности теплообмена.
4. Оценить степень влияния переменности теплофизических свойств, эффектов ламинаризации за счёт тепловой и динамической деформации рабочей среды на интегральные и локальные параметры течения.

Научная новизна работы. Новыми в диссертационной работе являются следующие положения и результаты:

1. Методика сквозного расчёта низкорейнольдсовых течений с теплообменом с использованием оригинальных двухпараметрических тепловых и динамических моделей турбулентности типа $k-L, \overline{v'^2} - \overline{h'^2}, k-\tau, \tau_\theta - \overline{\theta'^2}$.
2. Оценка возможностей комплекса $k-\tau-\tau_\theta - \overline{\theta'^2} - R$ с коэффициентом разномасштабности R процессов диссипации тепловых и динамических времён турбулентности, в том числе с использованием модели переноса напряжений рейнольдса, в анализе ламинаризирующихся течений в трубах и каналах в условиях интенсивного прогрева газа тепловыми потоками, идущими со стенки.

3. Представлены алгоритм и новые данные численного расчёта течений капельных высоковязких углеводородных сред в трубопроводных системах.
4. Численно установлены особенности течений в каналах, газоходах, нефтегазопроводах в условиях пространственной тепловой деформации рабочей среды.

Практическая значимость и ценность работы обусловлена тем, что рассмотренные в ней математические модели включают разнообразные физические и тепловые процессы, протекающие в областях движения среды со сложной геометрией стенки. Методики расчёта могут быть применены для анализа широкого класса стационарных химически инертных дозвуковых ламинарных и турбулентных течений вязких сред с учётом теплообмена, ламинаризации. В работе построен и реализован численный алгоритм и вычислительный пакет к моделированию гидродинамики и теплообмена в трубопроводах слабо- и высоковязких сред (например, нефть, масло, мазут и т.д.).

Степень достоверности результатов проведённых исследований. Достоверность подтверждается многочисленными сравнениями результатов расчёта с аналитическими решениями, экспериментальными и расчётными данными других авторов. Для контроля уровня схемной вязкости проводилась проверка результатов по методу вложенной сетки на явление насыщения.

Автор защищает:

1. Методику расчёта и результаты численного моделирования гидродинамики и теплообмена установившегося течения в трубах и каналах произвольной формы поперечного сечения.
2. Установленные в результате расчётов особенности течений и теплообмена и выводы по результатам анализа полученных данных.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на X, XI и XII международных симпозиумах студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова в 2006, 2007 и 2008

году соответственно (Томск); на конференции посвящённой 300-летию со дня рождения Л. Эйлера (Томск); на школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева в 2007 году (СПб.); на седьмой всероссийской конференции молодых учёных, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности в 2007 году (Москва).

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 16 работах, в том числе 2 в журналах из списка ВАК, которые приведены в конце автореферата.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Содержит 71 рисунок, объём работы – 108 страниц.

Автор выражает свою благодарность заведующему кафедрой теоретической механики механико-математического факультета, доктору ф.-м. наук, профессору кафедры теоретической механики А.М. Бубенчикову за его полезные замечания при написании диссертационной работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и практическая значимость полученных результатов. Изложено краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена ламинарному режиму течения жидкости во внутренних системах. Условно она состоит из четырёх частей. В первой и второй частях сделан краткий обзор и представлены физическая, математическая постановка задачи, описан численный метод решения. В третьей и четвёртой частях рассматривается течение жидкости через внезапное расширение в круглых трубах и плоских каналах соответственно.

Рассматриваются стационарные течения и теплообмен. Рабочая среда – несжимаемая жидкость или слабосжимаемый газ. В первой главе свойства жидкости считаются постоянными, не меняющимися от температуры (во второй и третьей главах вязкость рабочей среды меняется в зависимости от температуры по нескольким соотношениям, в зависимости от типа жидкости).

Система уравнений для описания течения и теплообмена ламинарного движения имеет вид:

$$\frac{\partial(r^n \rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(r^n \rho v)}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [r^n \rho u u] + \frac{\partial}{\partial r} [r^n \rho v u] = \frac{\partial}{\partial x} \left[r^n \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right] - r^n \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [r^n \rho u v] + \frac{\partial}{\partial r} [r^n \rho v v] = \frac{\partial}{\partial x} \left[r^n \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right] - r^n \frac{\partial p}{\partial r} - \mu \frac{v}{r} n. \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [r^n \rho c_p u \theta] + \frac{\partial}{\partial r} [r^n \rho c_p v \theta] = \frac{\partial}{\partial x} \left[r^n \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r^n \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] + \mu \Phi_v. \quad (4)$$

$$p = \rho R \theta. \quad (5)$$

Если $n=1$, то система (1)-(5) описывает осесимметричное течение, если $n=0$, то система (1)-(5) описывает плоское течение. Обозначения общепринятые.

Численное решение задачи строится в некоторой физической области евклидова пространства $\Omega \subset R^2$ с кусочно-гладкой функцией Γ и с заданной системой декартовых или цилиндрических координат x_j . Считается, что в

общем случае $\Gamma = \bigcup_{i=1}^4 \Gamma_i$, где Γ_1 – поверхность входа, Γ_2 – неподвижная стенка, Γ_3

– плоскость симметрии или неподвижная стенка, Γ_4 – поверхность выхода.

Граничные условия. На входе потока задаются значения всех искомых функций (u_i, θ) . Принимается, что на выходе поток полностью развит:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} = (\vec{n} \nabla \Phi) = 0, \quad \Phi = \{u_i, \theta\}, \quad \text{где } \vec{n} \text{ - единичный вектор внешней нормали к}$$

поверхности. На плоскости симметрии – условие симметрии: $\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} = 0$. На

неподвижных стенках компоненты вектора скорости равны нулю, температура принимается известной функцией (или задается тепловой поток).

Полученная система линейных алгебраических уравнений первого порядка точности (использовалась схема против потока) решается с помощью полунявного метода для уравнений связанных давлением (SIMPLE).

Отдельные результаты расчёта гидродинамики и теплообмена в каналах со скачком площади поперечного сечения приведены ниже. Так, на рисунке 1 представлены результаты численного расчёта и эксперимента продольной компоненты вектора скорости. Здесь x отсчитывается от места внезапного расширения в направлении основного течения, H – ширина канала после скачка площади поперечного сечения, $h = \frac{1}{2}H$. Видно, что в основном расчётные линии хорошо согласуются со значками эксперимента. Исключение составляет область $x/h \approx 7 \div 10$, где расчётный профиль восстанавливается быстрее экспериментального.

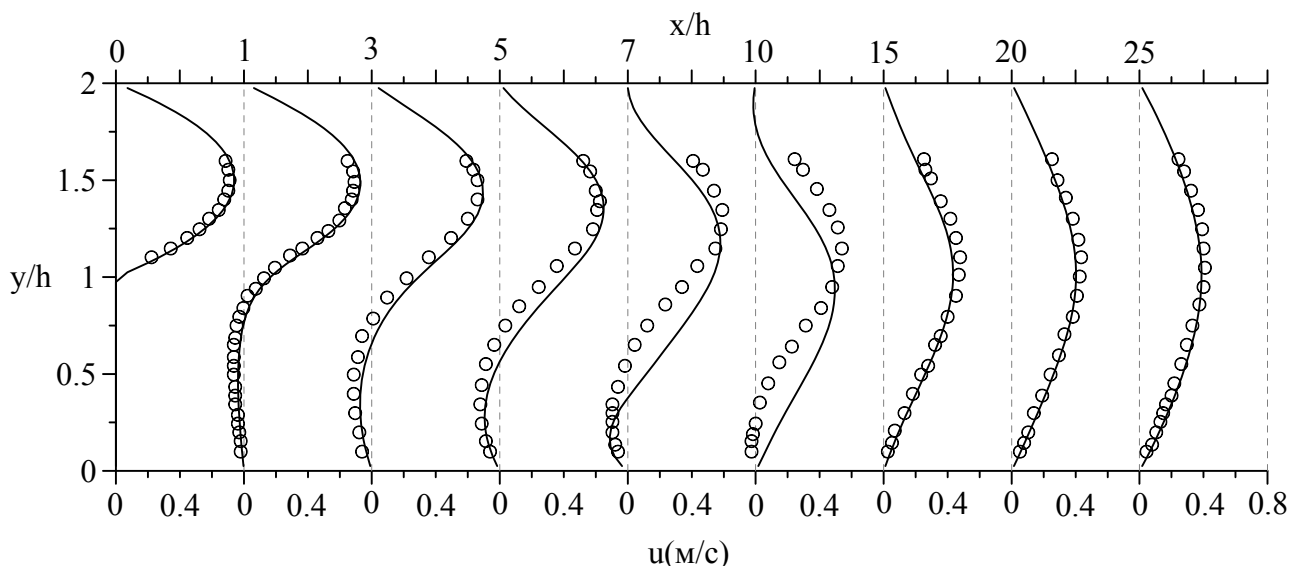


Рисунок 1 Развитие по длине плоского канала профиля компоненты u вектора скорости при $Re=525$. Значки – эксперимент [1]

На рисунке 2 представлена зависимость расстояния до точки присоединения потока в трубе от числа Рейнольдса и от высоты уступа. Здесь же значками нанесены результаты некоторых экспериментов, выполненных для двукратного внезапного увеличения диаметра (x_r – расстояние вдоль трубы от места внезапного расширения до места присоединения, h – высота уступа, R – радиус трубы). При моделировании течения через внезапное расширение чаще всего эксперименты позволяют исследовать влияния только числа Re на место

расположения точки присоединения x_r . Влияние высоты уступа на тот же параметр экспериментально изучено очень плохо. В трубах отношение бóльшего диаметра к меньшему в экспериментах равняется двум или почти двум. Аналогично для каналов. На рисунке 3 представлена зависимость расстояния до точки присоединения x_r от высоты уступа h при разных числах Re . Здесь зависимость x_r от h при фиксированном числе Re нелинейная. Это заметно при приближении от $h/R=0,5$ к граничным значениям $h/R=0$ (нет уступа) и $h/R \rightarrow 1$ (очень узкая входная труба).

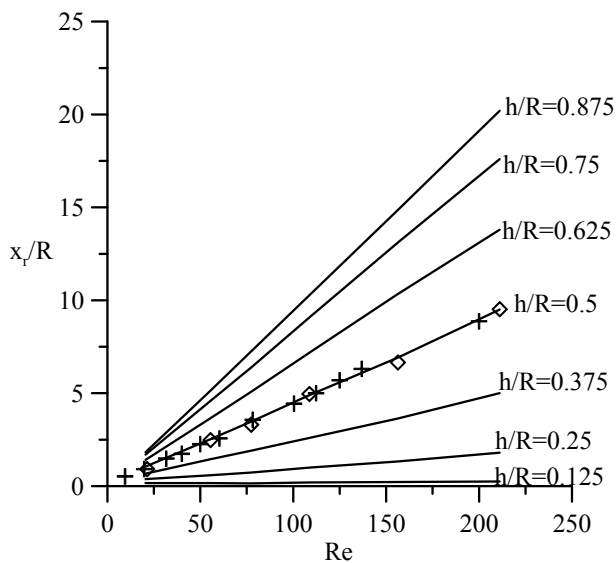


Рисунок 2 Зависимость расстояния до точки присоединения x_r/R от числа Re при разных высотах уступа h/R . Значки – эксперимент [2,3], сплошная линия – расчёт

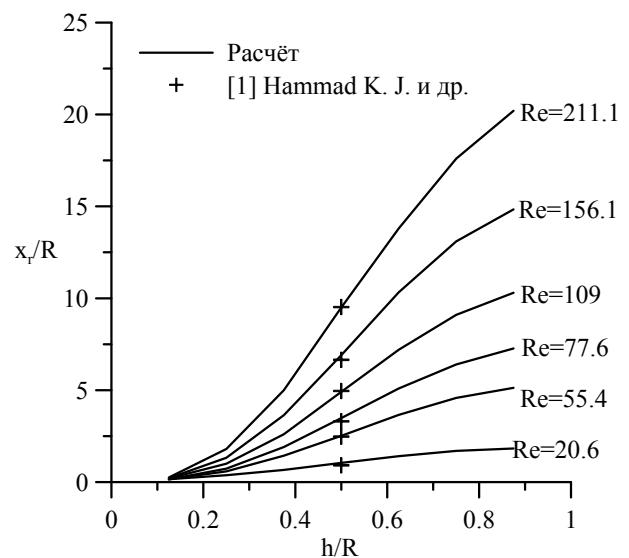


Рисунок 3 Зависимость расстояния до точки присоединения x_r/R от высоты уступа h/R при разных числах Re

На рисунке 4 представлено развитие компоненты u вектора скорости вдоль трубы для разных чисел Re . Видно, что хотя эксперимент и показывает слегка более короткую дистанцию восстановления течения, в целом эксперимент и расчёт согласуются хорошо.

На рисунке 5 представлено распределение по длине трубы коэффициента трения, рассчитанного по начальной средней скорости u_0 на входе в трубу в сравнении с расчётом других авторов (выполненных по модели течения в приближении «узкого канала»).

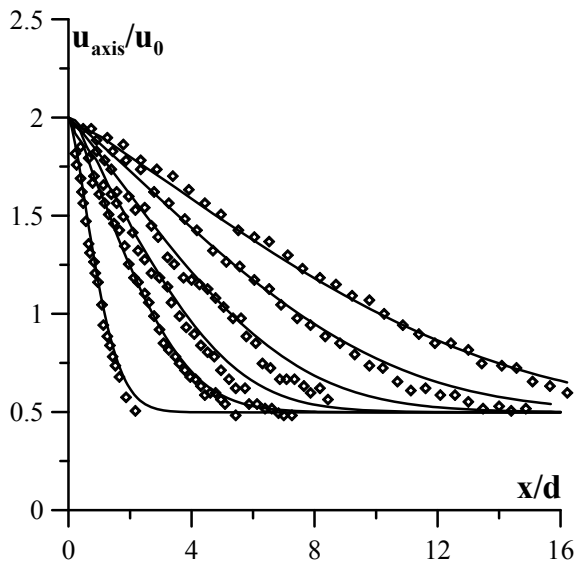


Рисунок 4 Распределение по длине трубы x/d осевой компоненты вектора скорости u_{axis}/u_0 , взятой на оси. Значки – эксперимент [2], сплошная линия – расчёт

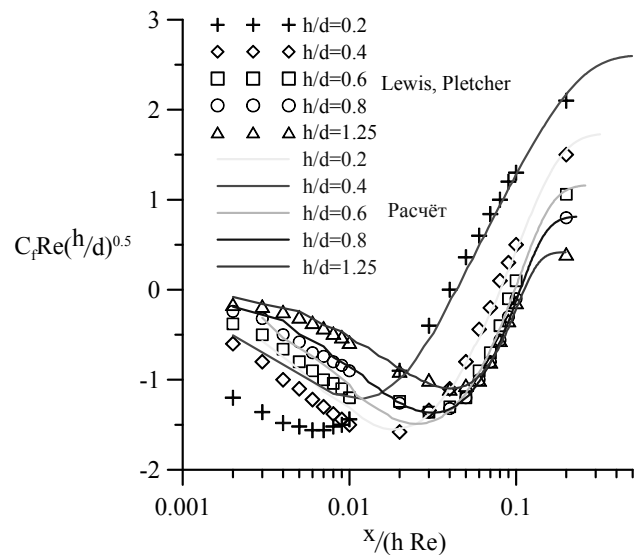


Рисунок 5 Распределение коэффициента трения $C_f Re(h/d)^{0.5}$ в зависимости от безразмерной координаты $x/(h Re)$. Значки - результаты расчёта по модели, использующей приближение «узкого канала» [4]

В первой части **второй главы** представлены результаты расчёта течений в каналах и трубах с различной геометрией стенки. Один из примеров подобной задачи представлен на рисунке 6.

Во второй части приведены результаты численного исследования структуры развивающегося ламинарного течения капельных сред в круглых трубах постоянного поперечного сечения. Здесь температура стенки трубы θ_w постоянна и значительно отличается от температуры входящего потока θ_e . Здесь и ниже по тексту параметры с индексом w соответствуют температуре на стенке трубы, e – температуре на входе в трубу. Индекс m соответствует температуре $\theta_m = 1/2(\theta_w + \theta_e)$, индекс s соответствует изотермическому течению.

Переменность теплофизических свойств в случае течения слабовязких сред (например, воды) моделируется соотношением:

$$\frac{\mu}{\mu_w} = e^{(-B\theta)} = \left(\frac{\mu_e}{\mu_w} \right)^{\Theta} \quad (6)$$

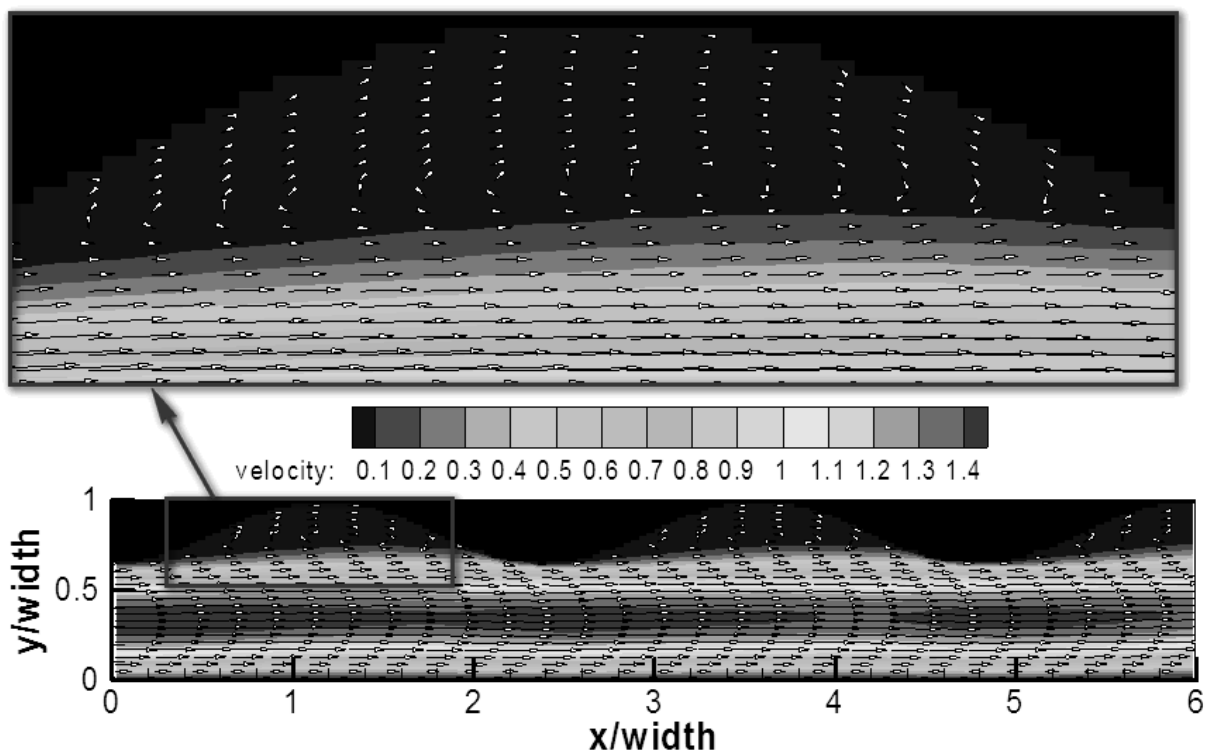


Рисунок 6 Расчётное векторное поле скорости при течении жидкости в плоском канале с одной прямой стенкой и второй волнообразной (по закону косинуса). Серый фон отображает величину безразмерной скорости u/u_0 , где u_0 это средняя скорость на входе в канал. $Re=1800$

где $\Theta^* = (\theta - \theta_w) / (\theta_e - \theta_w)$ – безразмерная температура, а $B = -\ln(\mu_e / \mu_w)$ – безразмерный вязкостный параметр.

Высоковязкие капельные углеводородные среды (нефть, мазут и т.д.) моделируются формулой Рейнольдса-Филонова:

$$\mu = \mu_0 e^{(-u(\theta - \theta_w))}. \quad (7)$$

Здесь $u = \frac{1}{(\theta_1 - \theta_2)} \ln\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)$. Вязкости μ_1 и μ_2 , отвечающие заданным

полям температуры, определяются табличными значениями.

В качестве рабочих сред для течений в трубах и трубопроводах использовались вода, нефть, бензин, масла. Расчеты выполнены при следующих значениях характерных параметров течения: $Re_m = 500 \div 1000$, $Pr_m = 5 \div 500$, $Pe = 2500 \div 12500$, $\theta_w / \theta_{in} = 0.5 \div 2$. Заметим, отношение $Pr_e / Pr_w > 1$ соответствует нагреву капельной среды, а $Pr_e / Pr_w < 1$ ее охлаждению, случай

$Pr_e/Pr_w=1$ иллюстрирует изотермическое течение с неизменным значением вязкости. Коэффициент трения f_a определялся по соотношению

$$f_a = \frac{(p_{in} - p)D}{2\rho u_0^2 x}. \quad (8)$$

На рисунке 7 представлено влияние переменности вязкости от температуры на перенос тепла по отношению к осевому распределению числа Нуссельта для течения нефти в круглой трубе. Хорошо видно влияние изменения вязкости от температуры на развитие интегральных характеристик в области входа в трубу. В месте, где начинают свое формирование профили скорости и температуры $X^* < 0,01$, эффект значителен (до $9 \div 13\%$), но уменьшается для Nu и становится пренебрежимо малым в области $X^* \approx 0,1$. Отличия между локальными значениями Nu/Nu_c , найденными для разных отношений Pr_{in}/Pr_w , происходят из-за перестройки локальных динамических и тепловых полей по каналу вследствие конвективно-диффузионных обменных процессов. На рисунке 8 представлено развитие в осевом направлении скорости и температуры, значками нанесены результаты расчёта [5].

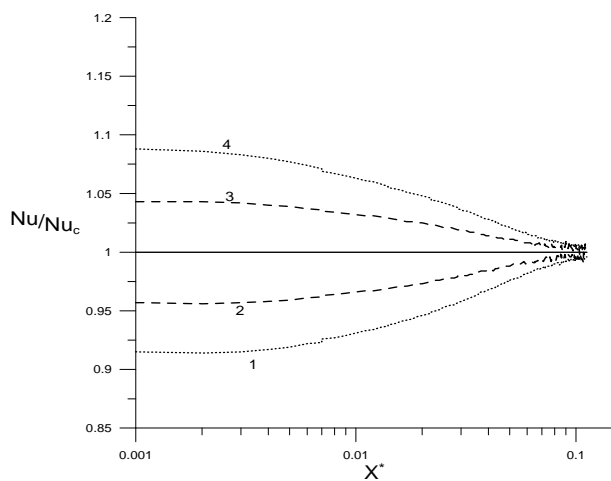


Рисунок 7 Нефть. Изменение приведенного коэффициента теплообмена по длине канала в зависимости от безразмерной приведенной длины X^+ при переменных тепловых условиях (нагрева и охлаждения потока). Здесь линии 1 – $Pr_e/Pr_w=1/4$; 2 – $1/2$; 3 – 2; 4 – 4. Nu_c – критерий Нуссельта в среде постоянной вязкости.

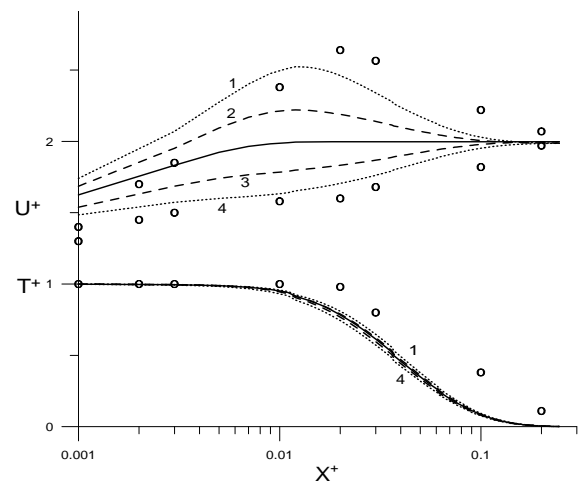


Рисунок 8 Вода. Развитие по длине канала относительной скорости U^+ и температуры T^+ в сечении $r=0$ в зависимости от безразмерной приведенной длины X^+ при различных значениях Pr_e/Pr_w . В обозначениях принято: 1 – $Pr_e/Pr_w=1/4$; 2 – $1/2$; 3 – 2; 4 – 4. Значки – результаты расчёта [5].

В третьей главе рассматривается турбулентное течение и теплообмен во внутренних системах, представляющих собой трубы постоянного поперечного сечения. Выполнена попытка в предсказании параметра разномасштабности R – величины отношения временных масштабов турбулентных пульсаций температуры τ_θ и скорости τ . Обычно R находится экспериментально или теоретически путем введения в анализ двух дополнительных дифференциальных уравнений относительно $\overline{\theta'^2}$ и ε_θ . Но даже для одного класса течений значение коэффициента разномасштабности может различаться.

Модель турбулентного движения несжимаемого газа в круглой трубе, описываемая уравнениями Рейнольдса в приближении «узкого канала», без действия внешних сил, без источников членов, совместно с уравнениями неразрывности и энергии имеет вид (9)-(12). Все величины в записи системы осреднены по Рейнольдсу. Обозначения общепринятые.

Турбулентная структура потока рассчитывается на основе уравнений для кинетической энергии турбулентных пульсаций k и масштаба турбулентности L (13), (14). Константы модели и замыкающие соотношения опущены для краткости.

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rV)}{\partial r} = 0, \quad (9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial x} (U^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rVU) \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r(\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial r} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0, \quad (11)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial}{\partial x} (U\Theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV\Theta) \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2, \quad (12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial x} (Uk) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rVk) \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r(\mu + b_1 \mu_t) \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 - b_2 \frac{(\mu + b_1 \mu_t)}{L^2} k, \quad (13)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial x} (UL) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rVL) \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r(\mu + b_3 \mu_t) \frac{\partial L}{\partial r} \right) - b_4 \frac{L}{k} \mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + B b_5 \rho \sqrt{k} \left(1 - \frac{L^2}{(R_0 - r)^2} \right). \quad (14)$$

В условиях сильного нагрева рабочей среды происходит изменение вязкости в 3-4 и даже десятки раз, что существенно затрудняет картину течения и распределение пульсационных параметров. Кроме того, наличие преград или уступов на пути движения жидкости вносят дополнительный эффект в распределение характеристик турбулентности. В условиях анизотропии турбулентного течения более выгодной с точки зрения точности расчёта выглядит модель переноса рейнольдсовых напряжений, записанная в тензорном виде ниже:

$$U_\alpha \frac{\partial(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left[\left(\nu + c_{\mu 1} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_\alpha} \right] - \frac{d_2}{\tau} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - d_3 \nu \frac{\overline{u'_i u'_j}}{\tau^2 k} - \frac{2}{3} d_4 \frac{k}{\tau} \delta_{ij} + P_{ij} - \frac{\partial \nu}{\partial x_\alpha} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_\alpha}, \quad (15)$$

$$U_\alpha \frac{\partial(\overline{u'_i \theta'})}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left[\left(\nu + \frac{a - \nu}{n_i + 2} + c_{\mu \theta} f_{\mu \theta} \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial \overline{u'_i \theta'}}{\partial x_\alpha} \right] - \frac{c_2}{\tau} \overline{u'_i \theta'} - c_3 (\nu + a) \frac{\overline{u'_i \theta'}}{l_{u_i \theta'}^2} - \overline{u'_i u'_\alpha} \frac{\partial \Theta}{\partial x_\alpha} - \overline{u'_i \theta'} \frac{\partial U_i}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial \nu}{\partial x_\alpha} \frac{\partial \overline{u'_i \theta'}}{\partial x_\alpha}, \quad (16)$$

$$U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + c_{\mu 2} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - c_{k1} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{k}{\tau}, \quad (17)$$

$$U_i \frac{\partial \tau}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + c_{\mu 2} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{\tau} \left(\nu + c_{\mu 2} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \frac{\partial \tau}{\partial x_i} + (c_{\varepsilon 2} f_2 - 1) - (1 - c_{\varepsilon 1}) \frac{\tau}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{2}{k} \left(\nu + c_{\mu 2} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \tau \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \tau}{\partial x_i}, \quad (18)$$

$$U_i \frac{\partial \tau_\theta}{\partial x_i} = 2 \left(1 - C_{d3} \frac{\tau_\theta}{\tau} \right) \frac{P_\theta}{\theta'^2} \tau_\theta + \frac{1}{2} (f_{\theta 1} C_{d1} - 2) - C_{d4} \tau_\theta \frac{P}{k} + f_{\theta 1} C_{d2} \frac{\tau_\theta}{\tau} + \frac{2}{\theta'^2} \left(\alpha + \frac{\nu_i}{\sigma_{\tau_{\theta 1}}} \right) \frac{\partial \overline{\theta'^2}}{\partial x_i} \frac{\partial \tau_\theta}{\partial x_i} - \frac{2}{\tau_\theta} \left(\alpha + \frac{\nu_i}{\sigma_{\tau_{\theta 2}}} \right) \frac{\partial \tau_\theta}{\partial x_i} \frac{\partial \tau_\theta}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha + \frac{\nu_i}{\sigma_{\tau_{\theta 2}}} \right) \frac{\partial \tau_\theta}{\partial x_i} \right), \quad (19)$$

$$U_i \frac{\partial \overline{\theta'^2}}{\partial x_i} + 2 \overline{u'_i \theta'} \frac{\partial \Theta}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial \overline{\theta'^2}}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_i}{\sigma_{\theta'^2}} \frac{\partial \overline{\theta'^2}}{\partial x_i} \right) - \frac{\overline{\theta'^2}}{\tau_\theta}. \quad (20)$$

В качестве опорной базы для модели переноса рейнольдсовых напряжений (15) и турбулентного теплового потока (16) используются уравнения для кинетической энергии турбулентных пульсаций и временных масштабов турбулентности динамического и скалярного полей (17)-(20).

Ниже представлены некоторые сравнения с опытами измерений «тонких» параметров. Так, на рисунке 9 представлено распределение относительной скорости вдоль трубы в различных сечениях по радиусу в сравнении с опытными данными. На рисунке 10 – кинетическая энергия турбулентности $k^+ = k/U_*^2$ в зависимости от радиальной координаты y/R за участком гидродинамической стабилизации. Видно, что математическая модель и вычислительный алгоритм удовлетворительны в предсказании механизмов порождения турбулентности в развивающихся течениях. Результат численного счета хорошо совпадает с данными Лауфера, при этом большой максимум k^+ всегда успешно соотносится с границей безразмерной зоны $y^+ \approx 10 \div 20$, $y^+ = yU_*/\nu$, $k^+ \approx 5,25$. Хорошее поведение осевой компоненты вектора скорости по длине трубы позволяет получить удовлетворительное распределение коэффициента трения, представленного на рисунке 11. Здесь в сравнении с экспериментом выведены расчетные данные по двум моделям турбулентности $k-\tau$ и $k-L$.

На рисунке 12, 13 в условиях развивающегося течения представлены радиальные профили безразмерных временных масштабов турбулентных

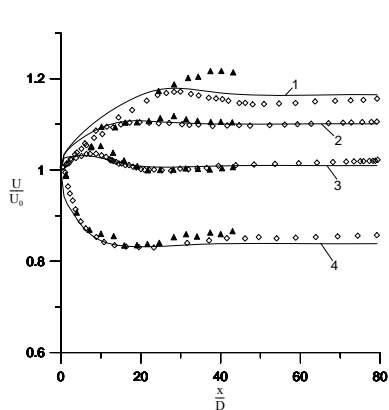


Рисунок 9 Развитие относительной скорости вдоль канала. $Re=38 \cdot 10^4$; 1 – $y/R=0$; 2 – $y/R=0.5$; 3 – $y/R=0.75$; 4 – $y/R=0.94$; (значки \blacktriangle - эксперимент, значки \blacklozenge - расчет по $k-\epsilon$ модели)

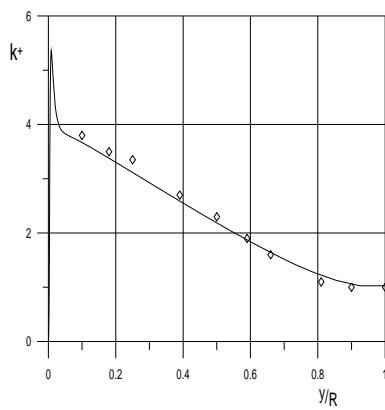


Рисунок 10 Распределение кинетической энергии турбулентных пульсаций $k^+ = k/U_*^2$ в зависимости от радиальной координаты y/R за участком гидродинамической стабилизации

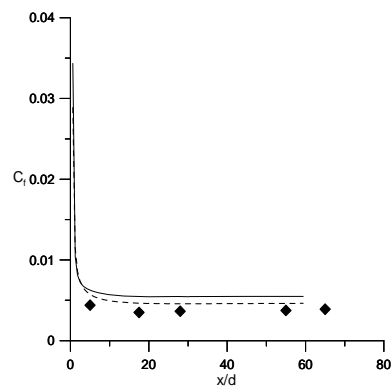


Рисунок 11 Коэффициент трения C_f . $Re=105000$, (прямая – модель $k-\tau$, пунктир – $k-L$, значки – эксперимент J.K. Reichert, R.S. Azad)

пульсаций динамического $\tau^+ = \frac{\tau U_*^2}{\nu}$ и скалярного $\tau_\theta^+ = \frac{2\tau_\theta U_*^2}{\nu}$ полей в зависимости от продольной осевой координаты x/D . Расчёты показали, что данные «тонкие» характеристики турбулентного потока весьма чувствительны к возмущениям на оси, а у стенки консервативны, как и интегральный масштаб турбулентности L . Это, несомненно, достоинство уравнения для τ и модели $k-\tau-\tau_\theta$ в целом. По сравнению с $k-\varepsilon$ моделями $k-\tau$, $k-L$ менее жестки в расчете пристеночных процессов и имеют близкие по длине участки стабилизации ($x/D=120-140$). Распределение коэффициента разномасштабности R представлено на рисунке 14 в трубе в условиях развитого течения и теплообмена. Введение R вызвано необходимостью разработки надежного замыкания второго порядка к переносу скалярного величины (температуры). В большей части сечения $R \approx 0.4 \div 0.5$. Однако у стенки $R = \tau_\theta/\tau$ убывает, это связано с характерным изменением временных масштабов турбулентности τ , τ_θ .

На рисунке 15 для некоторых выделенных сечений по длине трубы представлены радиальные распределения касательного напряжения тензора рейнольдсовых напряжений. При моделировании таких чувствительных

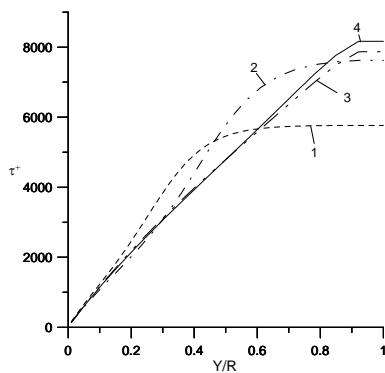


Рисунок 12 Распределение динамического временного масштаба. Здесь линии – 1 – $x/D = 9.6$; 2 – 12.8; 3 – 24; 4 – 158; $Re = 4.25 \cdot 10^5$

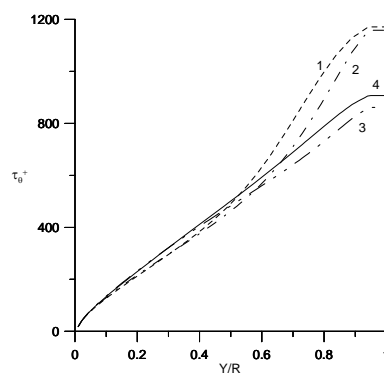


Рисунок 13 Радиальные профили $\tau_\theta^+ = \frac{2\tau_\theta U_*^2}{\nu}$ в различных сечениях по длине канала. Здесь линии – 1 – $x/D = 9.6$; 2 – 12.8; 3 – 24; 4 – 158; $Re = 3.25 \cdot 10^4$

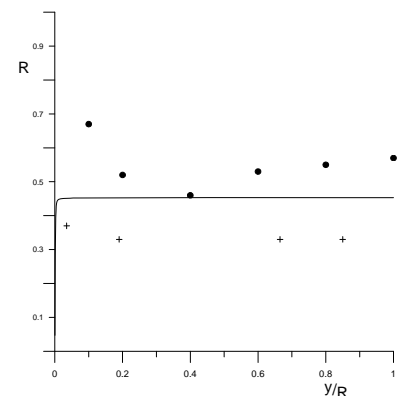


Рисунок 14 Распределение коэффициента разномасштабности $R = \tau_\theta/\tau$ в зависимости от радиальной координаты y/R_0 за участком гидродинамической стабилизации

характеристик турбулентности, как напряжения рейнольдса, для точного моделирования развивающегося течения необходимы самые корректные входные данные. В условиях отсутствия таких данных на входном участке трубы расчетный профиль не успевает подстраиваться на опыт. Тем не менее, ближе к участку гидродинамической стабилизации течения модель корректно фиксирует максимумы пульсаций тепловых и динамических параметров в непосредственной окрестности стенки.

На рисунке 16 приведены радиальные профили среднеквадратичного значения пульсаций температуры в развитии по длине трубы. Видно, что тепловая часть модели турбулентности позволяет получить большой максимум у стенки, положение которого фиксируется корректно в сравнении с экспериментом.

На рисунке 17 изображены радиальные распределения сдвигового напряжения $\overline{u'v'}/U_*^2$ при развитии по длине канала. Анализ поведения этой характеристики турбулентности показывает, что её определение по $k-\tau$ модели вполне успешно в пристеночно области по всей длине трубы.

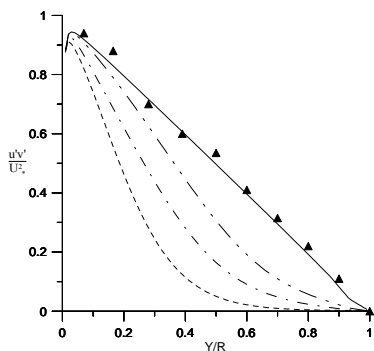


Рисунок 15 Развитие по длине трубы радиального профиля касательного напряжения. $Re=380000$. (пунктир – $x/D=3.2$, пунктир с точкой – $x/D=8$, пунктир с двумя точками – $x/D=12.8$, прямая – $x/D=158.4$, \blacktriangle – эксперимент А.Ж. Варбин, J.B. Jones)

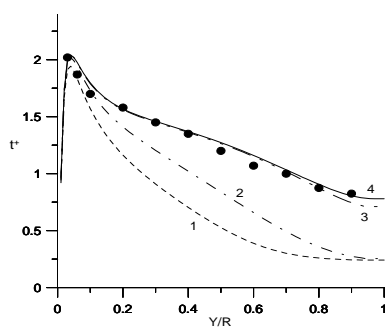


Рисунок 16 Радиальные профили безразмерных значений пульсаций температуры $t^+ = \rho C_p U_* \sqrt{\theta'^2} / q_w$ в различных сечениях по длине канала. Здесь значки – опыт S. Tanimoto, T.J. Hanratty ($Re=3.25 \cdot 10^4$), расчет – линии (1 – $x/D=8$; 2 – 12.8; 3 – 24; 4 – 158)

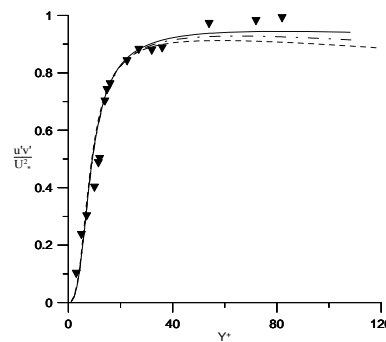


Рисунок 17 Распределение касательной пульсации в области стенки. $Re=3.25 \cdot 10^4$ (пунктир – $x/D=3.2$, пунктир с точкой – $x/D=8$, линия – $x/D=158.4$, \blacktriangledown – эксперимент Лапин, Стрелец)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В рамках существующих моделей стационарных дозвуковых ламинарных и турбулентных течений разработана методика решения уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса применительно к областям со сложной геометрией границы с учётом теплообмена, турбулентности, теплопроводности в стенке.
2. Реализован и внедрен для ООО «СИАМ-Инжиниринг» эффективный алгоритм расчёта осреднённых и пульсационных параметров течения и теплообмена во внутренних системах с сохранением устойчивости в областях высоких градиентов искомым функций в широком диапазоне изменения входных условий и геометрии канала.
3. Выполнен большой цикл сравнительных тестовых расчётов для случая изотермических ламинарных и турбулентных течений в канонических каналах и в более сложных областях с сужением и расширением трубопровода короткой и протяженной длины. Сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными и расчётами других авторов показали хорошие совпадения.
4. Представлены примеры моделирования вязкостно-инерционных течений в каналах со сложной границей.
5. Разработаны методики моделирования и расчёта неізотермических течений в двухмерных каналах с привлечением оригинальных и редко используемых двухпараметрических тепловых и динамических моделей турбулентности типа $k-L$, $\overline{v'^2} - \overline{h'^2}$, $k-\tau$, $\tau_\theta - \overline{\theta'^2}$ с эффектом разномасштабности процессов диссипации R скалярных и динамических характеристик, а также с привлечением модели переноса рейнольдсовых напряжений.
6. На базе сквозного расчёта (от стенки канала через ламинарный подслой, буферную зону до самого ядра течения) детально изучены механизмы переноса тепла, импульса в низкорейнольдсовых течениях в условиях отрыва и присоединения потока во внутренних системах.
7. Систематизированы данные по параметрам, влияющим на длину присоединения после отрыва потока при ламинарном режиме течения.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Armaly B.F. Measurements in three-dimensional laminar separated flow / B.F. Armaly, A. Li, J.H. Nie // International journal of heat and mass transfer. – 2003. – P. 3573-3582.
2. 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.
3. Macagno E.O. Computational and experimental study of a captive eddy / E.O. Macagno, T.K. Hung // Journal of fluid mechanics. – 1967. – № 28. – P. 43-64.
4. Lewis J.P. Limitation of the boundary-layer equation for prediction laminar symmetric sudden expansion flows / J.P. Lewis, R.H. Pletcher // AIAA paper. – 1986. – № 86-1131.
5. Nonino C. Temperature dependent viscosity effects on laminar forced convection in the entrance region of straight ducts / C. Nonino, S. Del Giudice, S. Savino // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – № 49. – P. 4469-4481.

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, В.Ю. Ким, С.И. Сильвестров* // 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.* Моделирование теплообмена при ламинарном движении жидкости в канале с существенной зависимостью вязкости от температуры / *С.Н. Харламов, С.И. Сильвестров* // Труды конференции, посвященной 300-летию со дня рождения Л. Эйлера. – Томск : Изд-во ТГУ, 2007. – С. 37-38.

6. *Харламов С.Н.* Гидродинамика и теплообмен при ламинарном течении углеводородов с существенной переменностью теплофизических свойств в трубах / *С.Н. Харламов, С.И. Сильвестров* // Проблемы геологии и освоения недр : труды XI международного симпозиума студентов и молодых учёных имени академика М.А. Усова. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – С. 519-522.

7. Харламов С.Н. Численное исследование теплообмена в круглых трубах при вязкостно-инерционном движении капельных сред с существенной переменностью теплофизических свойств / С.Н. Харламов, **С.И. Сильвестров** // 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. 470-473.

8. 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.

9. Харламов С.Н. Численный расчет ламинарного течения нефти в трубах при существенном нагреве стенок канала / С.Н. Харламов, **С.И. Сильвестров** // Труды седьмой всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России. – М. : Интерконтакт Наука, 2007. – С. 53-54.

10. Харламов С.Н. Исследование пространственных течений на участках трубопроводных систем с особенностью формы поперечного сечения / С.Н. Харламов, **С.И. Сильвестров** // 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., Сильвестров С.И. Численное моделирование пространственных неизотермических течений несжимаемой жидкости в узких трубах / С.Н. Харламов, **С.И. Сильвестров** // Сборник трудов всероссийской конференции по механике и математике. – Томск : Изд-во ТГУ, 2008. – С. 176-177.

12. 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

теплообмена 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.

13. Харламов С.Н. Детальное моделирование турбулентного теплообмена при низкорейнольдсовых течениях / С.Н. Харламов, *С.И. Сильвестров*, В.Ю. Ким // Проблемы газодинамики и теплообмена 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.

14. 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.

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

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

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

