

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт природных ресурсов

Направление подготовки (специальность) – 21.04.01 «Нефтегазовое дело»

Профиль – «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»

Кафедра – Транспорта и хранения нефти и газа

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Анализ закономерностей неизотермических течений в сложных трубопроводах в режимах ламинарно-турбулентных переходов, происходящих вследствие пространственной деформации углеводородных сред»

УДК 622.691.4:053:533.6(252.6)

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5А	Фатьянов Дмитрий Сергеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Харламов Сергей Николаевич	д.ф.-м.н, профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Шарф Ирина Валерьевна	К.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер	Маланова Наталья Викторовна	К.т.н.		

Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Коротченко Татьяна Валериевна	К.ф.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И.О.Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТХНГ	Бурков Пётр Владимирович	Д.т.н., профессор, и.о. зав.кафедры		

Томск – 2017г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»
 Кафедра Транспорта и хранения нефти и газа

УТВЕРЖДАЮ:
 И.о. зав. кафедрой
 _____ Бурков П.В.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ5А	Фатьянову Дмитрию Сергеевичу

Тема работы:

«Анализ закономерностей неизотермических течений в сложных трубопроводах в режимах ламинарно-турбулентных переходов, происходящих вследствие пространственной деформации углеводородных сред»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	19.04.2017, №2697/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объект исследования: закономерности динамики и теплообмена в каналах сложной формы; Сырьё: газообразная углеводородная среда (метан) Трубопроводная система и перекачиваемый материал: диапазон изменения чисел Рейнольдса Re – от 7000 до 13000; диапазон изменения угла наклона образующей поверхности конфузора к оси трубопровода – от 1 до 45°; диаметр участков трубы - от 10 до 80 мм.; разница температур стенки и флюида – от 0 до 10 К.
---	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	Литературный обзор с целью выяснения достижений мировой науки техники в исследованиях динамики и теплообмена при ускоренном течении флюидов в каналах сложной формы. Задача исследования: анализ закономерностей динамики и теплообмена течения в каналах сложной формы; анализ возможностей исследуемых моделей турбулентности в моделировании гидродинамики и теплообмена в каналах сложной формы и сравнение полученных результатов с опытными данными. Обсуждение полученных результатов. Дополнительные разделы: Экономическое обоснование проведения научно-технического исследования, социальная ответственность.
---	--

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	-Таблиц:16 -Рисунков:19 -Формул:39
---	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)
--

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Шарф Ирина Валерьевна, к.э.н., доцент кафедры ЭПР
«Социальная ответственность»	Маланова Наталья Викторовна, к.т.н., инженер

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:
--

1 Литературный обзор
2 Влияние эффектов прямого и обратного перехода, происходящего под воздействием пространственной деформации потока, на реальные технологические процессы
3 Расчетная часть
4 Экономическое обоснование проведения научно-технического исследования
5 Социальная ответственность

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ТХНГ	Харламов Сергей Николаевич	д.ф.-м.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5А	Фатьянов Дмитрий Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ5А	Фатьянову Дмитрию Сергеевичу

Институт	ИПР	Кафедра	ТХНГ
Уровень образования	Магистр	Направление/ специальность	131000 «Нефтегазовое дело» профиль «Надежность нефтегазопроводов и нефтегазохранилищ»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость затрат на проведение научно-технического исследования (НТИ): материально-технических, финансовых, информационных и человеческих	<i>«Оценка затрат на проведение научно-исследовательской работы «Экономическое обоснование проведения научно-технического исследования»</i>
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	1. Налоговый кодекс РФ 2. ФЗ–212 о страховых взносах в пенсионный фонд Российской Федерации, фонд социального страхования Российской Федерации, федеральный фонд обязательного медицинского страхования от 24.07.2009 в редакции от 19.12.2016г.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка эффективности НТИ «Анализ закономерностей неизотермических течений в сложных трубопроводах в режимах ламинарно-турбулентных переходов, происходящих вследствие пространственной деформации углеводородных сред»	1. Обоснование перспективности проведения исследования с целью выявления термодинамических закономерностей течения для последующего повышения технико-экономических показателей технологических процессов
2. Произвести расчет затрат научно-исследовательского проекта	1. Определение основных статей расходов на реализацию проекта; 2. Составление сметы затрат; 3. Формирование бюджета для проведения научно-исследовательского проекта.

Перечень графического материала

1. Расчетные формулы: Материальные затраты, амортизационные отчисления; заработная плата, отчисления во внебюджетные фонды, накладные расходы 2. Таблицы: - Стоимость оборудования и программного обеспечения для проведения численного эксперимента; - Стоимость материалов для сборки испытательного стенда ; - Стоимость измерительного оборудования для стенда - Продолжительность работ, выполняемых научно-техническим персоналом - Расчет амортизационных отчислений - Годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала - Среднедневная заработная плата научно-технического персонала - Основная заработная плата для научно-технического персонала - Размер обязательных страховых отчислений - Работы, относящиеся к контрагентным расходам и их стоимость - Общая стоимость проведения научно-технических исследований	
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Шарф И. В.	К.Э.Н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5А	Фатьянов Дмитрий Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ5А	Фатьянову Дмитрию Сергеевичу

Институт	ИПР	Кафедра	ТХНГ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело» профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</i>	<i>Объектом исследования в данной работе являются газообразные углеводороды и их поведение при движении в трубопроводах сложной геометрии и под влиянием различных внешних факторов. Природный газ чаще всего используется как источник энергии, однако иногда применяется и в химической промышленности. Изучение закономерностей термодинамических характеристик движения газа через участки трубопровода сложной геометрии позволит сделать процесс его транспортировки более эффективным и безопасным.</i>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Производственная безопасность</i> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при установке нейтрализатора статического электричества. 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при установке нейтрализатора статического электричества. 1.3. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	<i>Вредными факторами в работе с природным газом в помещении могут являться: недостаточная или избыточная освещенность рабочего места, недопустимые микроклиматические условия, повышенная загазованность воздуха рабочей среды вредными веществами, недопустимые уровни шума.</i> <i>Опасными же факторами в данном случае являются возможность поражения электрическим током, подвижные части оборудования, возможность возникновения взрывов и пожаров.</i>
<i>2. Экологическая безопасность:</i> 2.1. Анализ возможного влияния на окружающую среду. 2.2. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.	<i>Во время проведения экспериментов с природным газом возможно возникновение ситуации, когда сам объект исследования, так и работы, осуществляемые в процессе его изучения оказывают негативное влияние на экологию. Это проявляется во влиянии на:</i> - атмосферу; - гидросферу; - литосферу.
<i>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</i> 3.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований. 3.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на	<i>Чрезвычайные ситуации можно разделить на: ЧС стихийного, социального, экологического и техногенного характера.</i> <i>Причинами чрезвычайных ситуаций на рабочем месте в работе с природным газом могут быть как сам объект исследования, так и</i>

рабочем месте при проведении исследований. 3.3. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.	неполадки в оборудовании и человеческий фактор. Нельзя так же исключать факторы не зависящие от исследователя и объекта исследования, такие как природные и социальные явления. Для предотвращения возникновения подобных ситуаций должны быть приняты превентивные меры в соответствии с нормативной документацией.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: 4.1 специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; 4.2 организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	Процесс работы персонала регламентируется и должен полностью соответствовать условиям, указанным в Трудовом кодексе Российской Федерации, соответствующих федеральных законах и иных нормативных актах, регулирующих трудовую деятельность. Организация рабочей зоны не должна создавать неудобств работнику и полностью соответствовать требованиям нормативной документации.
Перечень графического материала	
1. Таблицы: - Предельно допустимые концентрации вредных веществ, появление которых возможно в рабочей зоне - Характеристика взрывопожароопасных веществ, появление которых возможно в воздухе рабочей зоны - ПДУ производственного звука и давления	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.04.2017 г
--	--------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер	Маланова Н.В.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5А	Фатьянов Дмитрий Сергеевич		

Планируемые результаты обучения магистрантов

№	Результаты обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
1	2	3
Р1	Применять естественнонаучные, математические, гуманитарные, экономические, инженерные, технические и глубокие профессиональные знания в области современных нефтегазовых технологий для решения <i>прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем</i> , соответствующих профилю подготовки (в нефтегазовом секторе экономики)	ОК-1; ОК-2; ОК-3, ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-6; ПК-7; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-17; ПК-19; ПК-20; ПК-21; ПК-23
Р2	Планировать и проводить аналитические и экспериментальные <i>исследования</i> с использованием новейших достижений науки и техники, уметь критически оценивать результаты и делать выводы, полученные в <i>сложных и неопределённых условиях</i> ; использовать <i>принципы изобретательства, правовые основы-в области интеллектуальной собственности</i>	ОК-1; ОК-2; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-6; ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-15; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-22; ПК-23
Р3	Проявлять профессиональную <i>осведомленность о передовых знаниях и открытиях</i> в области нефтегазовых технологий с учетом <i>передового отечественного и зарубежного опыта</i> ; использовать <i>инновационный подход</i> при разработке новых идей и методов <i>проектирования</i> объектов нефтегазового комплекса для <i>решения инженерных задач развития</i> нефтегазовых технологий, <i>модернизации и усовершенствования</i> нефтегазового производства.	ОК-1; ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-6; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-11; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-18; ПК-20; ПК-21; ПК-22; ПК-23
Р4	<i>Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные машины и механизмы</i> для реализации технологических процессов нефтегазовой области, обеспечивать их <i>высокую эффективность</i> , соблюдать правила <i>охраны здоровья и безопасности труда</i> , выполнять требования по <i>защите окружающей среды</i> .	ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-3; ПК-6; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-21; ПК-22;
Р5	Быстро ориентироваться и выбирать <i>оптимальные решения в многофакторных ситуациях</i> , владеть методами и средствами <i>математического моделирования</i> технологических процессов и объектов	ОК-2; ОК-3; ОПК-1; ОПК-2; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-17; ПК-20;
Р6	Эффективно использовать любой имеющийся арсенал технических средств для максимального приближения к поставленным производственным целям при <i>разработке и реализации проектов</i> , проводить <i>экономический анализ затрат, маркетинговые исследования, рассчитывать экономическую эффективность</i> .	ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-16; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-21; ПК-22; ПК-23

№	Результаты обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
1	2	3
Р7	Эффективно работать <i>индивидуально</i> , в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и <i>оперативные планы</i> всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, готовность нести <i>ответственность за результаты работы</i>	ОК-1; ОК-2; ОК-3; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ПК-6; ПК-11; ПК-12; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-23
Р8	Самостоятельно учиться и непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности; активно <i>владеть иностранным языком</i> на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности	ОК-1; ОК-2; ОК-3; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-8; ПК-23

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 118 с., 19 рис., 16 табл., 49 источников.

Ключевые слова: моделирование, конфузор, ускорение, модель, турбулентность, гидродинамика, теплообмен, газ.

Объектом исследования в настоящей работе являются процесс движения газа в каналах и модели турбулентности.

Предмет исследования – закономерности ускоренного течения газа через трубопроводы сложной формы и возможности моделей турбулентности по предсказанию параметров этого процесса.

Цель работы – анализ закономерностей ускоренного движения газа через трубопроводы сложной формы и разработка рекомендаций по выбору модели турбулентности для исследования рассматриваемого процесса.

В процессе исследования проводились: анализ литературных источников с целью выявления закономерностей ускоренного течения газа через трубопроводы сложной формы; математическое моделирование процессов ускоренного движения газа в канале с конфузорной секцией с использованием трех различных моделей турбулентности семейства $k - \epsilon$ (realizable, RNG и standatd) с целью выяснения их возможностей по предсказанию гидродинамики и теплообмена исследуемых течений и выяснения закономерностей гидродинамики и теплообмена потоков при движении в каналах сложной формы. Рассчитана стоимость проведения численного и физического экспериментов с учетом стоимости сборки испытательного стенда, приобретения измерительной аппаратуры и программного обеспечения. Приведены опасные и вредные производственные факторы, которые могут возникнуть при проведении экспериментов, перечислены мероприятия по охране труда и промышленной безопасности.

В результате исследования были составлены рекомендации по выбору модели турбулентности, выявлены закономерности движения газовой среды в трубопроводах с участками сложной формы.

Степень внедрения: настоящие рекомендации на сегодняшний день ***не использовались*** для проведения численного моделирования процессов ускоренного движения в каналах.

Область применения: математическое моделирование гидродинамических и тепловых особенностей процесса движения газа в канале.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в возможности экономии в финансовом эквиваленте за счет проведения экспериментов численных взамен экспериментов реальных.

В будущем планируется более подробное изучение влияния всевозможных геометрических особенностей на параметры потоков с использованием других моделей турбулентности, и, возможно, разработка собственной модели, основываясь на полученных закономерностях.

Annotation

Master thesis: 118 pp., 19 Fig., 15 tables, 49 sources.

Key words: modeling, confuser, acceleration, model, turbulence, hydrodynamics, heat exchange, gas.

The research object: is the gas flow processes and the turbulence models.

The research subject: is the regularities of accelerated gas flow through pipelines of complex shape and the possibility of turbulence models by predicting the parameters of this process.

The research task: is the regularities of accelerated gas flow through pipelines of complex shape and the possibility of turbulence models by predicting the parameters of this process.

In this research an analysis of literature was carried out in order to reveal the patterns of accelerated gas flow through special-form pipelines; Mathematical modeling of the processes of accelerated gas motion in a channel with a confuser section was carried out with help three different $k-\varepsilon$ turbulence models (realizable, RNG and standard) in order to elucidate their capabilities in predicting hydrodynamics and heat transfer. The cost of conducting numerical and physical experiments was calculated with summing the cost of assembling the test stand, measuring equipment and software. Dangerous and harmful production factors that may arise during experiments were listed, and occupational safety and industrial safety measures were listed.

As a result of the research, recommendations were provided on the choice of the turbulence model, the regularities of gas motion in pipelines with complex shape-sections were revealed.

Implementation level: these recommendations have not been used in simulating accelerated motion in channels.

Implementation area: mathematical modeling of hydrodynamic and thermal peculiarities of gas flow in channels.

The economic efficiency of the work is in the reducing financial costs of experiments by using numerical experiments instead of real experiments

Future plans: a detailed study of the geometry influence on the flow parameters using other turbulence models is planned.

ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РАБОТЕ

В настоящей выпускной квалификационной работе применяются следующие обозначения:

C_μ, C_1, C_2 – константы в моделях турбулентности;

Gk – образование турбулентной кинетической энергии, $\text{м}^2/\text{с}^3$;

h – высота канала, м;

K – параметр ускорения;

k – турбулентная кинетическая энергия, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

L – масштаб турбулентности, м;

Nu – число Нуссельта;

P – давление, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$;

Pr_t – турбулентное число Прандтля;

R – радиус канала, м;

Re – число Рейнольдса;

S, S_{ij} – функция в RNG и realizable k - ϵ моделях;

T – температура, К;

U – осредненная скорость потока, м/с;

u_i' – пульсационная составляющая проекции скорости, м/с;

u_i – проекция осредненной скорости, м/с;

U^* – функция в realizable k - ϵ модели;

W – функция в realizable k - ϵ модели;

x, y – координаты в прямоугольной системе координат, м;

β – тангенс угла наклона образующей поверхности конфузора к оси трубопровода;

δ_{ij} – символ Кронекера;

ϵ – скорость диссипации энергии, $\text{м}^2/\text{с}^3$;

η, η_0 – функции в RNG и realizable k - ϵ моделях;

μ – динамическая вязкость, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$;

μ_t – турбулентная вязкость, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$;

τ – время, с;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ – турбулентные числа Прандтля для k и ϵ ;

ϕ – функция в realizable k - ϵ модели;

ω – угловая скорость;

$\Omega_{i,j}$ – скорость вращения тензора.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	15
1 Литературный обзор.....	18
1.1 Подходы к моделированию турбулентности	18
1.2 Влияние ускорения потока на характеристики турбулентных течений.....	22
1.3 Анализ данных об экспериментах с конфузорами с малыми (1 – 5°) углами наклона образующей поверхности конфузорной секции к оси потока.....	27
1.4 Анализ данных об экспериментах с конфузорами со значительными (15 - 45°) углами наклона образующей поверхности конфузорной секции к оси потока.....	34
2 Влияние эффектов прямого и обратного перехода, происходящего под воздействием пространственной деформации потока, на реальные технологические процессы	41
3 Расчетная часть	46
3.1 Методика расчета динамических и тепловых параметров потока. Модели турбулентности, используемые для проведения численных экспериментов	46
3.2 Объект исследования и граничные условия.....	50
3.3 Результаты работы и их обсуждение	52
3.4 Выводы.....	58
4 Экономическое обоснование проведения научно-технического исследования	62
4.1 Расчет материальных затрат на оборудование и программное обеспечение для проведения НТИ.....	64
4.2 Период проведения исследования согласно заданию	68
4.3 Расчет затрат на амортизационные отчисления	69
4.4 Затраты по основной заработной плате	71
4.5 Отчисления во внебюджетные фонды	74
4.6 Расчет контрагентных расходов	75
4.7 Накладные расходы	76
4.8 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта	77
5 Социальная ответственность	78
5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	79
5.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	81
5.1.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	84
5.2 Экологическая безопасность	87

5.2.1 Анализ возможного влияния на окружающую среду.....	87
5.2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.	89
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	90
5.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.....	90
5.3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	91
5.3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	92
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	93
5.4.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	93
5.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя ..	93
Заключение.....	96
Список использованных источников.....	101
Приложение А.....	106

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное управление обменными процессами в движущихся потоках и взаимодействием этих потоков с обтекаемой поверхностью (массоотдачей, теплоотдачей, сопротивлением трения) в элементах энергетических и транспортных систем занимает особое место среди проблем ресурсо- и энергосбережения, а также охраны окружающей среды.

Так, затраты энергии на перекачку флюида могут быть значительно снижены при уменьшении сопротивления трения в трубопроводах и транспортных системах. Габариты теплообменных аппаратов могут быть значительно уменьшены при интенсификации в них теплоотдачи, что в свою очередь позволит ощутимо снизить металлоемкость оборудования и, соответственно, количество природных ресурсов, затрачиваемое на их изготовление и снизить загрязнение окружающей среды [1].

Существует достаточное количество методов и устройств, которые позволяют как повысить показатели теплоотдачи и сопротивления, так и снизить их. Считается [1], что одними из самых эффективных из них являются основанные на воздействии на пристеночную турбулентность. К ним относятся, например [2,3]: воздействие на поток ультразвуковыми колебаниями; применение каналов, в которых чередуются конфузورные и диффузорные участки; использование поперечных гофр или элементов дискретной шероховатости (для изменения продольного градиента давления по длине обтекаемой поверхности, изменения кривизны поверхности) на поверхностях теплообмена и др. Известно [1], что ключевым фактором, влияющим на интенсивность процессов тепло- и массоотдачи, а также сопротивление трения, является турбулентный перенос в пограничном слое. В то же время известно, что кинетическая энергия движения турбулентного мала в сравнении с кинетической энергией осредненного движения. Поэтому энергетические затраты на воздействие на пристеночную турбулентность

обычно оказываются меньшими, чем затраты на воздействие на течение в целом. Это и обуславливает высокую эффективность методов управления обменными процессами, основанными на воздействии на пристеночную турбулентность.

На сегодняшний день на практике во время проектирования трубопроводных сетей и учета особенностей динамики процессов, протекающих при течении флюидов в каналах сложной формы, применяются полуэмпирические технологии, которые часто не позволяют проникнуть в суть механизмов переноса массы, импульса и тепла и сделать вывод о реальных нагрузках и энергонапряженности рабочих элементов.

Методам численного моделирования сложных течений вязких сред, которые активно разрабатываются в последнее время, присуще отсутствие многих недостатков, свойственных для подходов и способов получения эмпирических данных об исследуемых явлениях и процессах. Это позволяет эффективнее и с меньшими затратами находить оптимальные конструктивные решения при проектировании секций и узлов сложной формы для трубопроводных систем.

В таких условиях актуальной представляется задача разработки адекватных математических моделей пространственных турбулентных течений в трубопроводах, осложненных процессами пространственной и тепловой деформации рабочей среды вследствие прохождения особых зон трубопроводов специфической формы поверхности стенки и выявление границ применимости более простых моделей в оценке явлений в трубопроводах и обобщении используемых полуэмпирических методик.

Комплексное физико-математическое и численное моделирование процессов в трубопроводах, проводимое на основе полных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, проведение которого предполагается в настоящей работе, является весьма перспективным и гибким способом прогнозирования основных параметров функционирования

трубопроводов. Кроме того, подбор или создание соответствующих моделей прогнозирования процессов, сопровождающих течение во внутренних системах, особенно актуально для решения прикладных задач в топливно-энергетическом комплексе России.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Подходы к моделированию турбулентности

Турбулентное течение вполне может быть описано обычной системой уравнений Навье-Стокса, поскольку при их выводе не налагалось никаких ограничений на соотношение между силами инерции и силами вязкости .

Уравнения Навье-Стокса — это система дифференциальных уравнений в частных производных, которая описывает движение вязкой ньютоновской жидкости и состоит из уравнения неразрывности (1.1), уравнения движения (1.2). Уравнения Навье-Стокса – одни из важнейших в гидродинамике. Они применяются в ходе математического моделирования разнообразных природных явлений и решения технических задач [4].

Для решения задач, в которых присутствует перенос тепла, к системе необходимо добавить уравнение энергии (1.3) [4].

Перечисленные уравнения имеют вид [4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_k}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right) = \rho J_k - \frac{\partial P}{\partial x_k} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \frac{2}{3} \delta_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right); \quad (1.2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + U_k \cdot \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) = \lambda \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + q_v + \frac{dP}{d\tau} + \mu \cdot \Phi, \quad (1.3)$$

где U – вектор скорости, P – гидродинамическое давление; ρ – плотность; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности; τ – время; μ – коэффициент вязкости; q – поток тепла; c_p – изобарная теплоемкость; J – объемные силы; Φ – диссипативная функция Релея.

Однако если мы каким-то обычным способом попытаемся численно

решить эти уравнения для турбулентного режима течения (этот подход называется прямым численным моделированием, Direct Numerical Simulation, DNS), то для этого нам потребуются значительные вычислительные мощности. Для решения уравнений Навье-Стокса в случае турбулентного режима нужны очень качественные сетки с очень малым шагом. Шаг по времени так же должен быть очень мал. Всё это потребует очень мощных машин с большим объёмом памяти. И потребность в вычислительных ресурсах растёт примерно пропорционально кубу из числа Рейнольдса в рассматриваемом течении (подробнее о DNS см. [5, 6]). Таким образом, в инженерных и научных расчётах, часто возникает необходимость как-то упростить систему уравнений Навье-Стокса, снизив тем самым потребности в вычислительных мощностях.

Для количественного описания развитого турбулентного движения Осборн Рейнольдс предложил следующий, получивший широкое применение приём [4]. Регистрируя во времени параметры потока можно предположить, что значение каждого из них можно представить в виде суммы осреднённой по времени (обозначается чертой сверху) и пульсационной (обозначается штрихом) составляющих. Например, возьмём скорость:

$$U_i = \bar{U}_i + u'_i; \quad U_j = \bar{U}_j + u'_j; \quad U_k = \bar{U}_k + u'_k, \quad (1.4)$$

То есть мы рассматриваем её как некую не меняющуюся (или меняющуюся по какому-то определённом закону) величину к которой добавлены случайные пульсации. Таким образом, мы рассматриваем турбулентное течение, как некий случайный процесс, применяя к нему приёмы, используемые в теории вероятностей и математической статистике.

Представив в виде (1.4) скорость и температуру, подставив их в уравнения системы (1.1) – (1.3), записанную для случая, когда жидкость несжимаема, и выполнив некоторые преобразования [4], получим уравнения

Рейнольдса (RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes):

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1.5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial \tau} + \frac{\partial (\bar{U}_i \cdot \bar{U}_j)}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + \rho J_i; \quad (1.6)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{u'_j T'} \right) + q_v \quad (1.7)$$

Данная система уравнений содержит девять неизвестных членов (шесть компонент тензора напряжений Рейнольдса $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ и три компоненты проекции вектора плотности турбулентного теплового потока $-\rho c_p \overline{u'_j T'}$)

Чтобы вычислить эти члены, требуются дополнительные уравнения. Эти уравнения обычно называют моделью турбулентности.

Выбор модели турбулентности для конкретной задачи - вопрос непростой [4]. При нём нужно учитывать свойства каждой модели и имеющиеся в распоряжении вычислительные мощности.

Встречаются как алгебраические модели для моделирования турбулентности (например, модель пути смешения Прандтля), дифференциальные (семейства моделей k-ε, k-ω, k-L и другие), так и некоторые другие подходы (LES, DES, прямое численное моделирование, другие).

Как можно заметить, некоторые модели включают в себя такой параметр как k – кинетическая энергия турбулентного движения, приходящаяся на единицу массы.

$$k = 0,5(\overline{u_i'^2} + \overline{u_j'^2} + \overline{u_k'^2}) \quad (1.8)$$

Дифференциальное уравнение для определения величины k может иметь вид [1]:

$$\begin{aligned} \frac{Dk}{d\tau} + \overline{u_i'^2} \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_i} + \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \overline{u_i' u_k'} \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_k} + \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} + \overline{u_j'^2} \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_j} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_k} + \\ \overline{u_i' u_k'} \frac{\partial \overline{U}_k}{\partial x_i} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial \overline{U}_k}{\partial x_j} + \overline{u_k'^2} \frac{\partial \overline{U}_k}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{u_i' \left(\frac{p'}{\rho} + k \right)} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u_j' \left(\frac{p'}{\rho} + k \right)} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{u_k' \left(\frac{p'}{\rho} + k \right)} \right) = \nu \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial x_k^2} \right) - \varepsilon, \end{aligned} \quad (1.9)$$

где ε – скорость диссипации турбулентной энергии k .

Уравнение это содержит много неизвестных членов, которые вносят дополнительные неясности. Для их определения часто используют эмпирические зависимости. Так, для определения членов, содержащих пульсации давления применяют модель градиентной диффузии энергии турбулентности, а неизвестные члены определяются, как [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(- \overline{u_i' \left(\frac{p'}{\rho} + k \right)} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_e \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (1.10)$$

Для моделирования других неизвестных, входящих в уравнение (1.9), используются различные гипотезы и эмпирические соотношения. Так, например, для моделирования корреляции $\overline{u_i' u_j'}$ используются гипотезы Таунсенда, Колмогорова, Джонса-Лаундера и др [1].

В соответствии с гипотезой Таунсенда связь между величинами $\overline{u_i' u_j'}$ и k определяется выражением [1]:

$$-\overline{u_i' u_j'} = ck \quad (1.11)$$

где c – эмпирический коэффициент ($c = 0,3$).

Исследованиями установлено, что связь (1.11) применима лишь для тех областей потока, где порождение кинетической энергии турбулентности компенсируется ее диссипацией, а сама энергия сохраняется неизменной.

Более широкую область применения имеют соотношения, отражающие гипотезу Колмогорова [1]:

$$-\overline{u_i' u_j'} = c_0 L \sqrt{k} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (1.12)$$

и гипотезу Джонса-Лаундера [7]:

$$-\overline{u_i' u_j'} = c_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (1.13)$$

Здесь c_0 , c_μ – эмпирические константы; L – интегральный масштаб турбулентности; f_μ – функция, отражающая влияние молекулярной вязкости на турбулентный обмен вблизи стенки.

$$f_\mu = \exp\left(-\frac{2,5}{1 + \frac{0,02k^2}{\nu\varepsilon}}\right) \quad (1.14)$$

Зависимости (8), (9) пригодны для использования в случаях, когда вклад пульсационных составляющих $\overline{u_i'^2}$, $\overline{u_j'^2}$, $\overline{u_k'^2}$ в энергию k сохраняется одинаковым во всей области исследования или меняется незначительно [1].

1.2 Влияние ускорения потока на характеристики турбулентных течений.

Рассмотрим результаты исследований стационарных турбулентных течений с ускорением вдоль траектории движения жидкой частицы [7, 8], т.е. течений при значительных отрицательных

градиентах давления (предполагается, что массовые силы отсутствуют). Применительно к внутренним задачам такие течения возникают, когда ограничивающая область движения газа поверхность искривлена, деформирована. Отсюда часто используемый термин «деформация» потока.

Наличие больших отрицательных значений $\partial P/\partial x$ способно частично или полностью ламинаризовать турбулентный пограничный слой [9]. Естественно, что в этих условиях происходит заметное изменение интенсивности теплообмена и сопротивления. Интерес к исследованию таких процессов определен соображениями как теоретического, так и практического характера. Познание закономерностей развития ускоряющегося потока, с одной стороны, привело к углублению физических представлений о процессах переноса в рассматриваемых условиях, с другой — к совершенствованию математических моделей, используемых для описания турбулентности в неавтомоделных случаях.

Изучая обтекание сферы около- и сверхзвуковым потоком, М. Е. Дейч, по-видимому, впервые обнаружил явление обратного перехода (переход от турбулентной формы движения к ламинарной). Исследуя эффект «ламинаризации» в условиях внутренней задачи в плоском и осесимметричном каналах, а также в сопле, он отмечает [10], что длительное воздействие продольного градиента давления формирует ламинарный профиль скорости. Наличие высоких положительных градиентов скорости приводит к подавлению импульса, вызванного пульсационным движением, а вырождение турбулентности ведет к резкому уменьшению толщины потери импульса. В результате оценки влияния ускорения потока, выполненной А. И. Леонтьевым, было установлено [11] нарушение подобия полей скорости и температуры, особенно в предотрывной области течения.

Также, согласно экспериментальным данным [12] в местах резкого изменения продольного градиента давления отчетливо проявляется влияние предыстории течения на эволюцию пограничного слоя, ламинаризацию профиля осредненной скорости.

Интересные данные были получены в ранних работах Бэка при исследовании газодинамических и тепловых характеристик в соплах. В [13] авторы наблюдали снижение коэффициента теплоотдачи в переменной по сечению зоне канала до уровня, который был существенно ниже значений, отвечающих развитому турбулентному режиму течения. Эффект ламинаризации на входе в сверхзвуковое сопло вызывал снижение интенсивности теплообмена на 50 %. Анализируя условия, при которых наблюдается обратный переход, и его влияние на трение, в [14] показано, что ускорение потока способствует его ламинаризации, подавляя генерацию турбулентности около стенки. Важной особенностью ускоренных потоков является увеличение толщины вязкого подслоя и вообще сильное влияние на структуру течения в пограничном слое. С помощью параметра ускорения K :

$$K = \frac{\mu}{\rho U^2} \cdot \frac{dU}{dx} \quad (1.15)$$

был отделен режим развитой турбулентности от течений с частичной или полной ламинаризацией. Так, при $K > 2 \cdot 10^{-6}$ профиль скорости во внешней части пограничного слоя начинает отклоняться от профиля, соответствующего турбулентному режиму течения, и стремится с увеличением K к ламинарному. Трение на стенке снижалось до значений, отвечающих полностью ламинарному режиму движения.

Совершенствование экспериментальных методов, применение усложненных дифференциальных моделей турбулентности к расчету данного класса задач позволили с середины 70-х годов глубже проникнуть в суть исследуемых процессов переноса. Начало детальному изучению «тонкой» структуры турбулентного динамического и теплового пограничных слоев,

трения и теплоотдачи в условиях градиентного течения было положено работами А. И. Леонтьева, Е. В. Шишова [15]. Оказалось, что при значительном ускорении потока ($K > 2 \cdot 10^{-6}$) нарушается связь между коэффициентами турбулентного переноса и осредненными характеристиками течения в сечениях пограничного слоя и простейшие теории турбулентности, основанные на алгебраических моделях пути смешения, уже не могут надежно служить для построения методов расчета трения и теплообмена. Кроме того, из-за высоких отрицательных градиентов давления по длине проточной части осесимметричных каналов для учета перестройки микроструктуры течения необходима модификация известных усложненных моделей турбулентности, на основе которых могут быть построены методы расчета трения и теплоотдачи [16, 17].

Анализируя результаты [16] экспериментального и теоретического исследования развивающихся пограничных слоев в конфузорной секции при высоких значениях параметра K на основе модели $k - \epsilon$, авторы связывают вырождение турбулентности с уменьшением темпа ее производства.

Показано, что ламинаризация ведет к росту относительного значения толщины вязкого подслоя. Вместе со снижением уровня турбулентных пульсаций наблюдается уменьшение интенсивности теплообмена. Как и профили скорости, распределения температуры в координатах стенки отклоняются от зависимости, справедливой для безградиентного течения.

В отличие от пульсаций скорости, турбулентные флуктуации температуры более консервативны по отношению к воздействиям отрицательного градиента давления. Уменьшение переноса тепла в пристенной зоне ускоренного потока можно фиксировать по значениям корреляционной функции. Ламинаризация ведет к уменьшению этой величины в пристенной области.

Данные о влиянии ускорения потока на коэффициент трения в отмеченной выше области изменения величины K носят противоречивый

характер. Так, рост сопротивления трения отмечен в [18]. По данным [16], ускорение незначительно его снижает. В [19] увеличение абсолютных значений градиента давления вызывает падение трения до уровня, отвечающего области перехода ламинарного течения в турбулентное. Такое положение говорит о недостаточной изученности этого сложного явления.

Проведенный анализ литературы позволяет сделать некоторые выводы. Во-первых, течения с высокими значениями продольного градиента характеризуются существенной неравновесностью пограничного слоя, отсутствием локального подобия в пристенной зоне. Эффекты обратного перехода вызывают снижение интенсивности теплоотдачи, подавление механизма генерации турбулентности около стенки. Во-вторых, влияние ускорения на параметры динамического воздействия потока на стенку в турбулентных течениях выражено слабее, чем на теплообмен. Причем поведение коэффициента трения часто выглядит противоречиво (в умеренном диапазоне критерия ускорения). В-третьих, значительное ускорение потока ($K > 2 \cdot 10^{-6}$) нарушает связь между коэффициентами турбулентного переноса и осредненными характеристиками течения. Применение простейших теорий турбулентности к построению методов расчета трения и теплоотдачи в этом случае ведет к существенным ошибкам как в количественном, так и в качественном отношении. В-четвертых, особенности градиентных течений в широком диапазоне дестабилизирующих факторов надежно могут быть рассчитаны на основе модели турбулентности, учитывающей инерционный распад энергосодержащих вихрей. И, наконец, при больших числах Re эффект ламинаризации, даже при значительных параметрах ускорения, выражен достаточно слабо.

1.3 Анализ данных об экспериментах с конфузорами с малыми (1 – 5 °) углами наклона образующей поверхности конфузорной секции к оси потока

Чтобы исследовать физические явления, связанные с ламинаризацией внутреннего течения был проведен ряд экспериментов. Так, в [20] автор проводил исследование, в котором полностью развитый турбулентный поток между двумя параллельными пластинами ускорялся при прохождении через сужение. После сужающейся секции снова следовал участок с параллельными пластинами. Исследовалось возвращение ламинаризованного потока в турбулентное состояние. Было обнаружено, что на процесс реверсии значительное влияние оказывает число Рейнольдса, а также степень уменьшения числа Нуссельта на выходе из ускоряющей секции по сравнению с полностью развитым турбулентным значением на входе.

В другой работе [21] проводилось детальное исследование физики процесса перехода течения к ламинарному и реверсии от ламинарного потока к турбулентности.

Авторы объясняют основной механизм ламинаризации в соответствии с [22]. Обычно предполагается, что ламинаризация внутреннего течения газа при теплоотводе, по существу, обусловливается тем же самым механизмом, что и в случае течения во внешнем турбулентном пограничном слое, когда происходит сильное ускорение газа на его границе.

Экспериментальный стенд представлял из себя трубопровод, состоящий из двух цилиндрических секций разного диаметра и соединяющей их конфузорной секции. Длина первой секции составляла 1200 мм, второй (конфузор) – 200 мм, третьей – 700 мм. Диаметр первой секции был равен 15 мм.

Ускорение потока описывалось величиной K :

$$K = \frac{\mu}{\rho U^2} \cdot \frac{dU}{dx} = \frac{2\beta}{Re} \quad (1.16)$$

Исследовались случаи со значением K от $2,43 \cdot 10^{-6}$ до $10,93 \cdot 10^{-6}$.

Результаты, представленные в данной работе, свидетельствуют о том, что турбулентный характер движения не может сохраняться при параметре ускорения потока $K > 3 \cdot 10^{-6}$. В этом случае мы имеем ламинаризацию процесса транспортировки газовой среды.

Эксперимент проводился для четырех чисел Рейнольдса: $Re = 5000$, 7300 , 10000 и 14000 . Для каждого числа Рейнольдса угол наклона конфузорной секции изменялся от $\beta = 2/200$ до $12/200$.

Экспериментальные результаты для $Re = 10000$ и 7300 , соответственно, представлены на рис. 5 и 6.

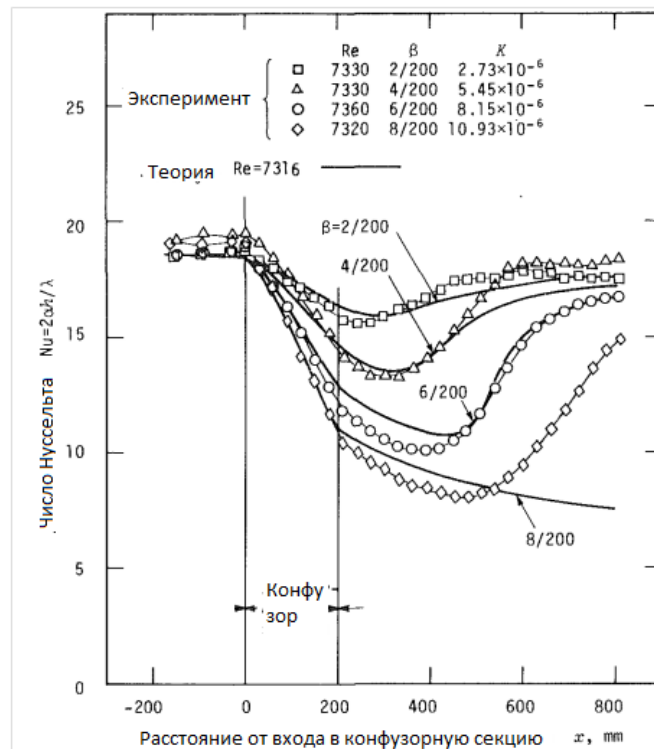


Рисунок 1.1 – Сравнение предсказанных значений числа Нуссельта с опытными данными [21].

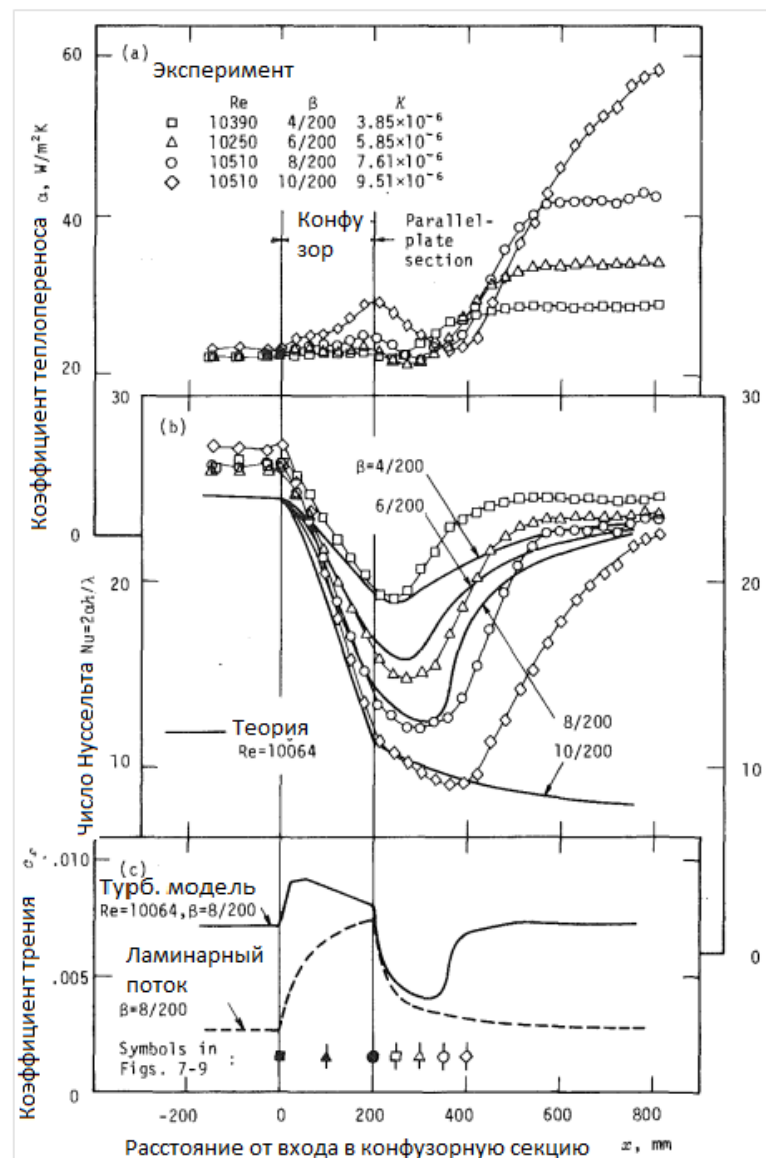


Рисунок 1.2— Результаты, полученные с помощью численного моделирования и опытные данные при $Re = 7300$ [21]

На рис. 1.2 (а) показаны изменения коэффициента теплоотдачи. Несмотря на большое ускорение средней скорости потока, коэффициент теплоотдачи в конфузорной секции лишь незначительно увеличивается из-за эффекта ламинаризации.

Проявляется тенденция к уменьшению коэффициента теплоотдачи в первой секции стенда, он достигает минимума, а затем возрастает и приближается к новому уровню, соответствующему полностью развитому турбулентному состоянию в участке после конфузора.

На рис. 1.2 (b) и рис. 1.3, представлены результаты измерения числа Нуссельта. На этих рисунках видно, что число Нуссельта после прохождения газом конфузора на некотором расстоянии от него возвращается к исходному значению, которое было до того, как поток подвергся ускорению.

Тот факт, что число Нуссельта достигает минимума (в точке, определяемой $x = x_r$) и затем возрастает, свидетельствует о том, что поток становится более турбулентным от $x = x_r$. Также замечен тот факт, что x_r возрастает по мере того, как степень ламинаризации на входе в секцию после конфузора (которая может быть количественно связана с отношением Nu в этом месте к Nu_0 полностью развитого потока) становится более сильной. Эти тенденции четко продемонстрированы на рис. 1.2 и 1.3.

Теоретические предсказания, нанесенные сплошными линиями на рисунках, довольно успешно воспроизводят сложное поведение экспериментальных локальных чисел Нуссельта.

Для случая $Re = 10000$ и $\beta = 8/200$, представлены распределения относительной турбулентной кинетической энергии $k/\bar{U}^2$, масштаба турбулентности L и напряжения на стенке τ_w на рисунках 1.3 – 1.5 соответственно.

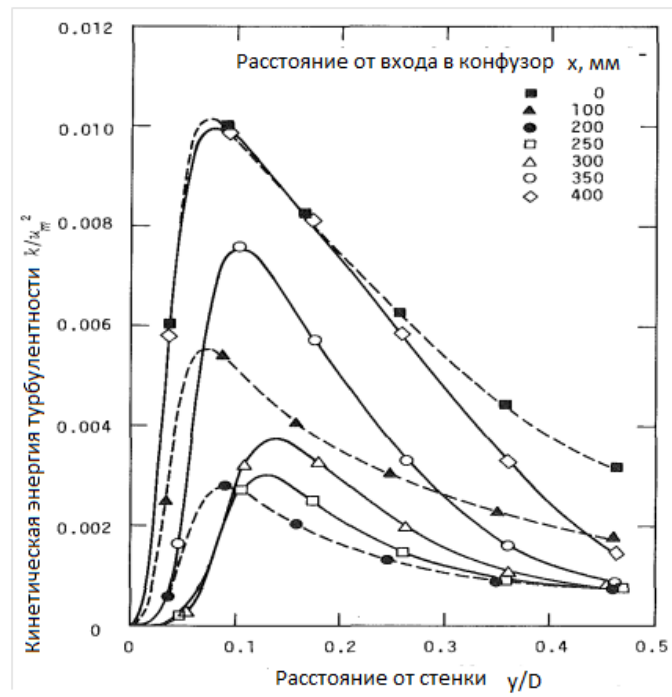


Рисунок 1.3 – Предсказанные значения кинетической энергии турбулентности для $Re = 10000$, $\beta = 8/200$ [21]

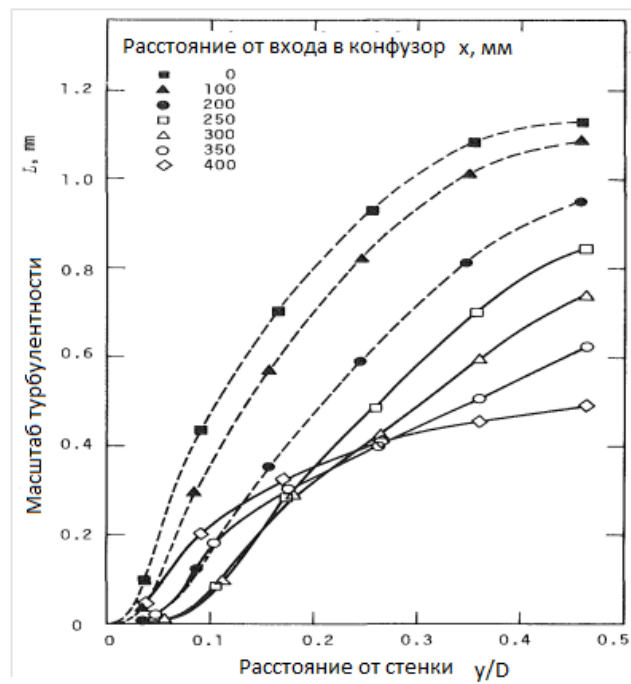


Рисунок 1.4 – Предсказанные изменения значений масштаба турбулентности L для $Re = 10000$, $\beta = 8/200$ [21]

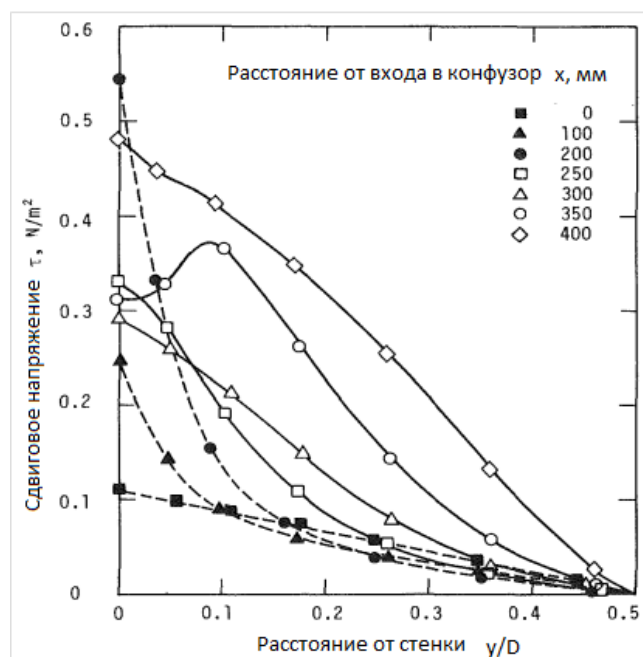


Рисунок 1.5 – Предсказанное изменение значений сдвигового напряжения для $Re = 10000$, $\beta = 8/200$ [21]

Поведение потока в ускоряющей секции, которая простирается от $x = 0$ до 200 мм, обсуждалось ранее, но рисунки 8 и 9 содержат дополнительную информацию. На рис.9 отчетливо заметно резкое уменьшение τ вблизи стенки до $x = 200$ мм, а при $x = 400$ мм поток почти вернулся к полностью развитому турбулентному

На рис. 8 показано, как масштаб турбулентности L монотонно уменьшается в сечении конфузора, но относительная скорость уменьшения в пристенной области выше, чем в области ядра.

После прохождения потоком конфузорной секции турбулентная кинетическая энергия k , показанная на рис. 7 продолжает уменьшаться в окрестности стенки до $x = 300$ мм. При $x = 350$ мм он начинает внезапно расти с пиком около $y/h = 0,1$ и почти достигает развитого турбулентного распределения при $x = 400$ мм. Масштаб турбулентности L также продолжает уменьшаться до $x = 300$ мм (см. Рис.8). Он начинает возрастать вместе с k от $x = 350$ мм. При $x = 400$ мм распределение масштаба турбулентности L почти согласуется с тем, что наблюдалось при $x = 0$.

На рис. 10 предсказания различных моделей турбулентности сравниваются с экспериментальными результатами для случая $Re = 10000$ и $\beta = 8/200$. Были выбраны $k - kL$ -модель[19], $k - \varepsilon$ -модель Джонса и Лаундера [18] и обычная модель пути смешения.

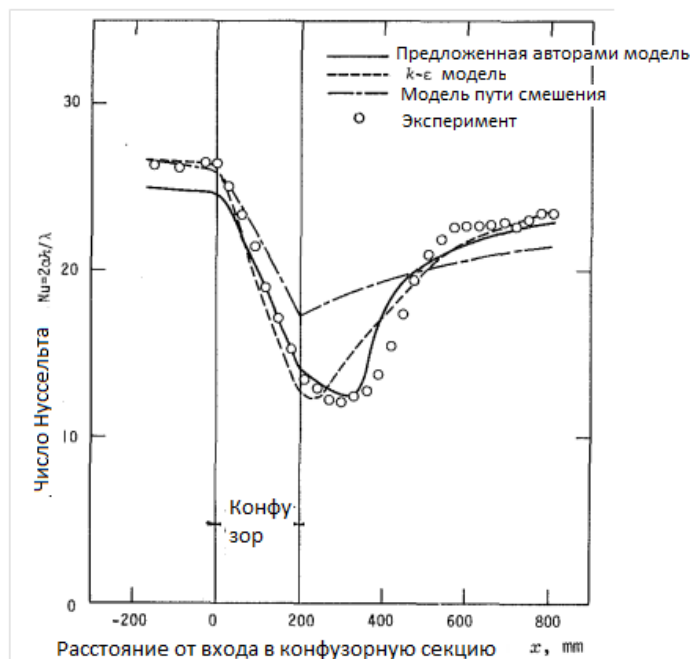


Рисунок 1.6 – Сравнение значений числа Нуссельта, полученных с помощью разных моделей турбулентности и опытных данных[21]

Данные, приведенные на рисунке 10, хорошо иллюстрируют, что значения, полученные при расчете с помощью модели пути смешения, оказались слабо похожими на реальный эксперимент. В частности, минимум числа Нуссельта появляется в самом конце ускоряющей секции, вопреки экспериментальным результатам. В модели пути смешения, результаты которой приведены выше, предполагается локальное равновесие между генерацией и диссипацией турбулентной энергии. Поэтому вполне вероятно, что такая модель не может успешно справиться с неравновесным потоком, таким как поток ламинаризации. Однако более совершенная модель смешения может предсказать поток ламинаризации, но такая модель потребует больше специальных эмпирических данных. Предложенная

авторами $k - k_L$ [21] модель оказалась успешной и для сильно нагретого потока газа в круглой трубе с тем же набором констант, что предложен в работе. Модель $k - \varepsilon$ (Jones-Launder) показывает хорошее согласование с опытом в сечениях конфузора, но точность предсказаний числа Нуссельта падает в секции, расположенной сразу за конфузорной частью. Однако допускается, что $k - \varepsilon$ -модель имеет широкое применение, а также прогностические возможности. Представляется возможным, что модель $k - \varepsilon$ позволит получить лучшие результаты, чем имеющиеся, если константы в модели будут оптимизированы.

1.4 Анализ данных об экспериментах с конфузорами со значительными (15 - 45 °) углами наклона образующей поверхности конфузорной секции к оси потока

Другие авторы[1], сетуя на скудность информации о процессах, происходящих в потоке при ускорении в конфузоре, а также на то, что известные исследования производились только для потоков с малым продольным градиентом давления (параметр K не превышал значения 10^{-5}) представляют результаты собственных термоанемометрических измерений профилей осредненной скорости и характеристик пристенной турбулентности в проточной части трех осесимметричных конических конфузоров с различными углами поджатия потока (угол между образующей и осью конфузоров составлял 45, 30 и 15 °). Входной диаметр конфузоров в проводимых экспериментах – 80 мм; минимальный диаметр проходного сечения – 10 мм.

При проведении измерений перед конфузорами устанавливались сменные цилиндрические предвключенные участки длиной 2,24 и 1,0 м, что обеспечивало получение достаточно толстого пограничного слоя в проточной части рабочих участков и возможность получения достоверных результатов. Число Re , подсчитанное по параметрам потока и диаметру

проточной части на входе в конфузоры, в опытах изменялось в диапазоне $(1,35 \div 2,1) \cdot 10^4$, а на входе в экспериментальный участок имел место развитый турбулентный режим течения в пограничном слое. Параметр ускорения потока K в опытах достигал значений 10^{-4} .

На рис. 1.1 для различных сечений конфузора **В** с углом между образующей и осью 30° показано распределение по радиусу r кинетической энергии k , отнесенной к квадрату местной осредненной скорости $\bar{u}$. Здесь R – радиус поперечного сечения конфузора. Положение сечений показано на рис. 1.1 стрелками.

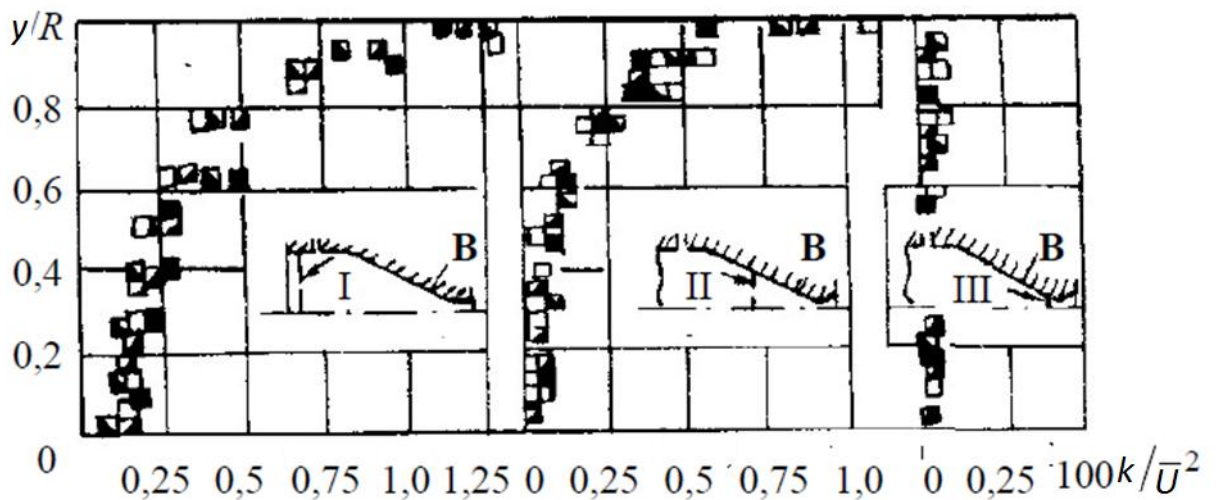


Рисунок 1.7 – Трансформация профилей относительной энергии турбулентности по длине конфузора [1]

Как видно, под действием продольного отрицательного градиент давления происходит снижение относительной энергии турбулентности в сечениях конфузора. Однако абсолютные значения энергии e по длине проточной части возрастают. Это видно из рис. 1.8, где в тех же сечениях конфузора, что и показанных на рис. 1.7, дано распределение по радиусу проточной части кинетической энергии k , отнесенной к квадрату среднерасходной скорости потока $\overline{U_{1cp}}$ на входе в рабочий участок. Характерным здесь является то, что возрастание абсолютного уровня

турбулентной энергии происходит по всей толщине пограничного слоя. При небольших же ускорениях потока во внешней части пограничного слоя энергия турбулентности вдоль обтекаемой поверхности уменьшается.

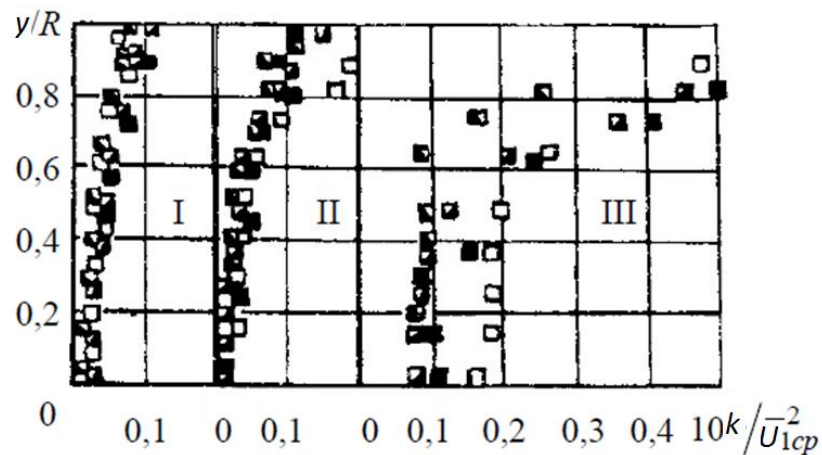


Рисунок 1.8 – Трансформация профилей энергии турбулентности по длине конфузора [1]

Таким образом, под воздействием большого отрицательного продольного градиента давления происходит снижение относительной интенсивности турбулентного движения по всему сечению пограничного слоя. При этом в потоках с достаточно большим ускорением существует область течения, где абсолютный уровень турбулентной энергии возрастает вниз по потоку по всему сечению пограничного слоя. При меньших ускорениях во внешней части пограничного слоя существует участок, где вниз по потоку происходит уменьшение абсолютного уровня турбулентной энергии.

На рис. 1.9 показаны типичные результаты экспериментов, иллюстрирующие трансформацию по длине конфузоров профилей величин Tu_x, Tu_y, Tu_z , определяемых соотношениями (1.17), которые характеризуют интенсивность пульсационного движения в продольном (вдоль оси x , совпадающей с направлением осредненной скорости в рассматриваемой точке), поперечном (вдоль оси y) и окружном (вдоль оси z) направлениях соответственно [1].

$$Tu_x = \frac{\sqrt{u_i'^2}}{\bar{U}}; Tu_y = \frac{\sqrt{u_j'^2}}{\bar{U}}; Tu_z = \frac{\sqrt{u_k'^2}}{\bar{U}} \quad (1.17)$$

Как видно из рис. 1.9, в пристенной области ($r/R > 0,7$) наряду с общим снижением относительной интенсивности турбулентного движения происходит изменение соотношения между величинами Tu_x, Tu_y, Tu_z или, иными словами, происходит перераспределение вклада пульсаций скорости u'_i, u'_j, u'_k в кинетическую энергию турбулентности, что приводит к неоднозначности соотношений (1.11) – (1.14), связывающих корреляцию $\overline{u'_i u'_j}$ с энергией k .

На рис. 1.10 для конфузоров **A** и **C** представлены профили величин Tu_x, Tu_y, Tu_z в сечениях с одинаковым значением относительного радиуса $\bar{R}$, равным его значению в сечении II конфузора **B** (см. рис. 3), близкими значениями режимных параметров потока на входе. Здесь $\bar{R} = R/R_1$, где R_1 – радиус конфузоров на входе.

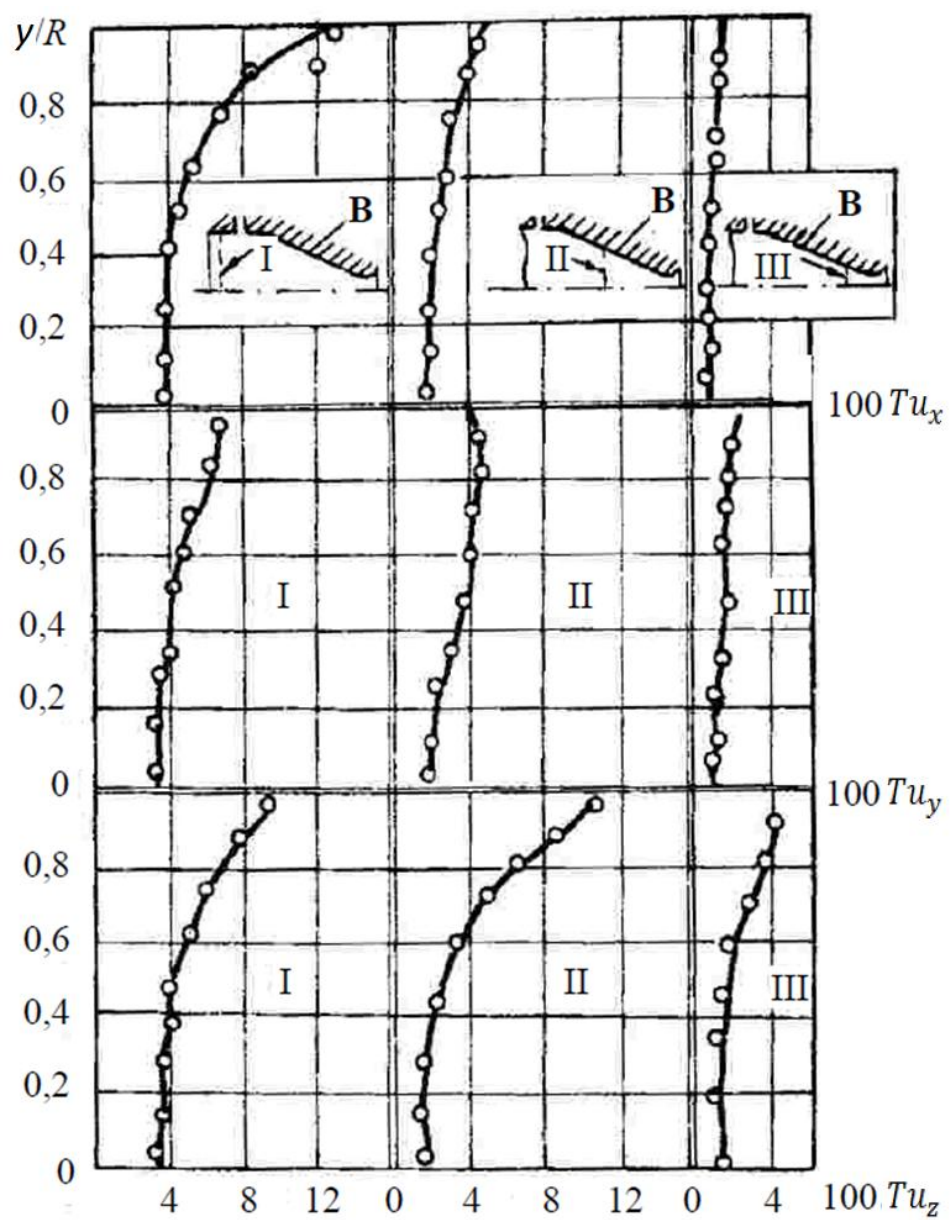


Рисунок 1.9 – Трансформация профилей интенсивности турбулентного движения по длине конфузора [1]

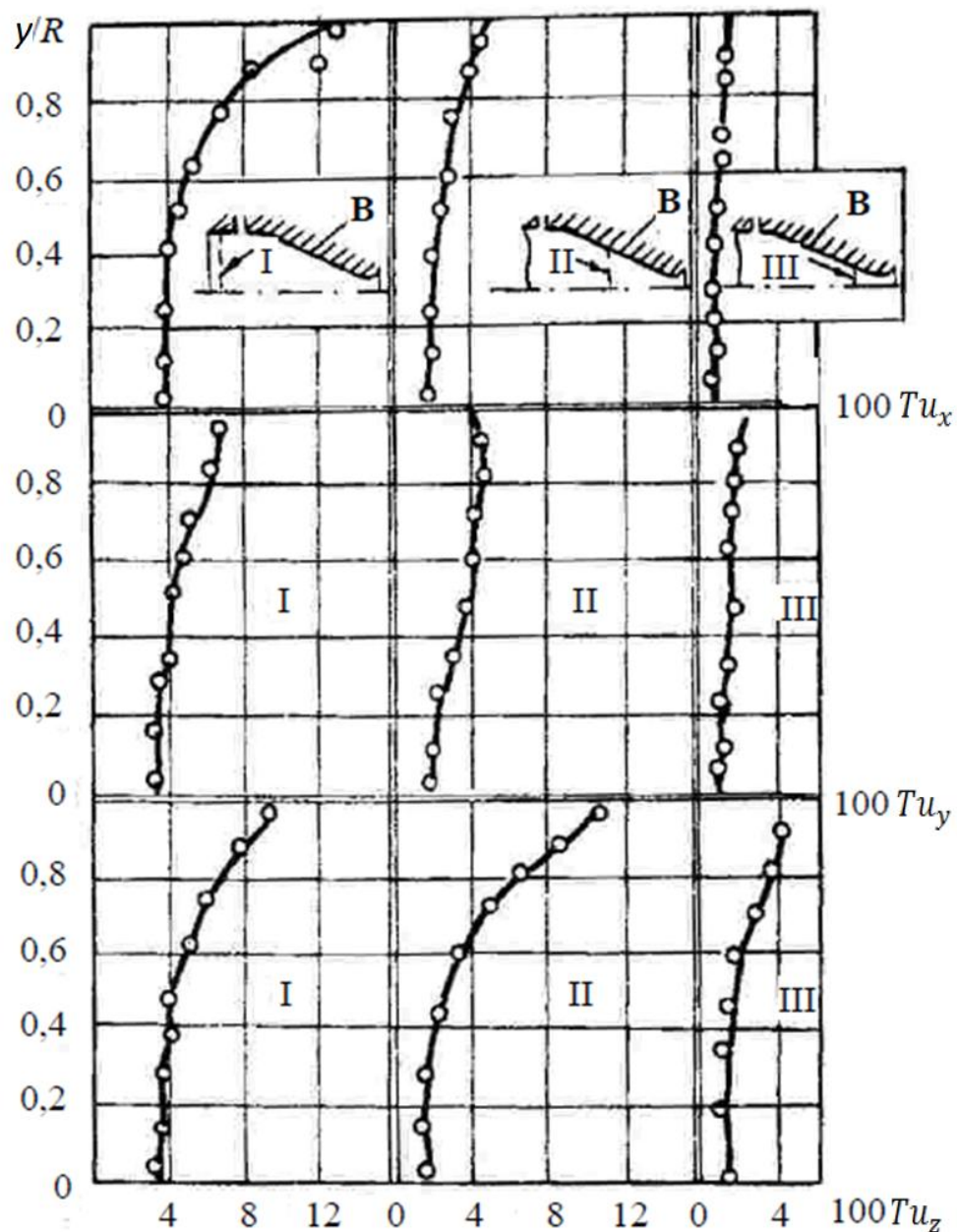


Рис. 1.10 Трансформация профилей интенсивности турбулентного движения по длине конфузора В [1]

Как видно, в пристенной зоне конфузоров величины Tu_x принимают близкие значения. В то же время интенсивность пульсационного движения Tu_z в пристенной зоне разных конфузоров существенно различна. Чем больше угол между образующей и осью, тем выше интенсивность турбулентного движения Tu_z . Приведенные результаты позволяют критически оценить возможность использования известных подходов к

математическому моделированию турбулентного обмена в таких условиях, о чем будет упомянуто в следующей главе. Результаты исследований турбулентной структуры потока в конфузорах показывают, что в потоках с интенсивными воздействиями энергия k может возрасть за счет составляющей $\overline{u'_k{}^2}$ при одновременном уменьшении величин $\overline{u'_i{}^2}$, $\overline{u'_j{}^2}$, $|\overline{u'_i u'_j}|$.

Так, в связи с неоднозначностью соотношений (1.11) – (1.14) ограничивается возможность использования дифференциальных моделей турбулентности, базирующихся на использовании транспортных уравнений для кинетической энергии турбулентности k , а также коммерческих программных продуктов, в которых используются такого рода модели.

Результаты исследований турбулентной структуры потока в конфузорах показывают, что в потоках с интенсивными воздействиями аналогия между переносом турбулентной энергии k и компоненты тензора напряжений Рейнольдса $\overline{u'_i u'_j}$ не соблюдается. Действительно, энергия k может возрасть за счет составляющей $\overline{u'_k{}^2}$ при одновременном уменьшении величин $\overline{u'_i{}^2}$, $\overline{u'_j{}^2}$, $\overline{u'_i u'_j}$.

2 ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ПЕРЕХОДА, ПРОИСХОДЯЩЕГО ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОТОКА, НА РЕАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Эффективное управление обменными процессами в движущихся потоках и взаимодействием этих потоков с обтекаемой поверхностью (массоотдачей, теплоотдачей, сопротивлением трения) в элементах энергетических и транспортных систем занимает особое место среди проблем ресурсо- и энергосбережения, а также охраны окружающей среды.

Так, затраты энергии на перекачку флюида могут быть значительно снижены при уменьшении сопротивления трения в трубопроводах и транспортных системах. Габариты теплообменных аппаратов могут быть значительно уменьшены при интенсификации в них теплоотдачи, что в свою очередь позволит ощутимо снизить металлоемкость оборудования и, соответственно, количество природных ресурсов, затрачиваемое на их изготовление и снизить загрязнение окружающей среды [1].

Существует достаточное количество методов и устройств, которые позволяют как повысить показатели теплоотдачи и сопротивления, так и снизить их. Считается [1], что одними из самых эффективных из них являются основанные на воздействии на пристеночную турбулентность. К ним относятся, например [2,3]: воздействие на поток ультразвуковыми колебаниями; применение каналов, в которых чередуются конфузорные и диффузорные участки; использование поперечных гофр или элементов дискретной шероховатости (для изменения продольного градиента давления по длине обтекаемой поверхности, изменения кривизны поверхности) на поверхностях теплообмена и др. Известно [1], что ключевым фактором, влияющим на интенсивность процессов тепло- и массоотдачи, а также сопротивление трения, является турбулентный перенос в пограничном слое. В то же время известно, что кинетическая энергия движения турбулентного

мала в сравнении с кинетической энергией осредненного движения. Поэтому энергетические затраты на воздействие на пристеночную турбулентность обычно оказываются меньшими, чем затраты на воздействие на течение в целом. Это и обуславливает высокую эффективность методов управления обменными процессами, основанными на воздействии на пристеночную турбулентность.

Однако иногда использование эффектов, возникающих при необдуманном применении устройств, деформирующих среду, может пагубно сказываться на технологическом процессе.

Практика эксплуатации магистральных газопроводов показывает, что при перепуске газа из одного участка МГ, находящегося под давлением, в другой, находящийся под меньшим давлением весьма часто возникает аномальный разогрев тупиковых ответвлений обвязки кранового узла, предназначенных для отбора импульсного газа [23]. Аномальный разогрев выражается в повышении температуры трубопровода и арматуры до значений, способных привести к аварийным ситуациям и порче оборудования (порядка 300-400°C и более).

Так, в 2014 году специалистами ОАО «Гипрогаз-центр» был проведен натурный эксперимент [23], в ходе которого было выяснено, что имеют место процессы аномального разогрева тупиковых ответвлений на крановых узлах в процессе заполнения участков магистрального газопровода. Произведено экспериментальное выявление режимов перепуска газа, в которых возникает аномальный разогрев тупиковых ответвлений на крановых узлах. Разогрев газа в отводе происходил при наличии конического (конфузорного) перехода в тупиковом ответвлении. Специалисты пришли к выводу, что причиной этого эффекта, предположительно, являются нестационарные колебания газа в байпасе и тупиковом ответвлении.

Однако в работе [23] так же показано, что в случае использования прямой врезки, аномальный разогрев тупикового ответвления не происходит.

Поэтому можно сделать предположение, что одной из причин аномального разогрева являются эффекты прямой и обратной турбулизации потока и, соответственно, перехода части турбулентной энергии в тепловую энергию газа.

Объектом исследования являлись стояки отбора импульсного газа DN50, установленные вертикально под прямым углом относительно линии DN300, предназначенные для работы пневматического привода линейного крана. Внешний вид стояка отбора импульсного газа представлен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Внешний вид стояка отбора импульсного газа [23]

Схема подсоединения стояков отбора импульсного газа на исследуемых КУ, представлена на рисунке 2.2, и соответствует указанному выше. Альбому типовых решений. В трубу DN300 врезан тройник 300x200, к которому подсоединен конический переход 200x50.

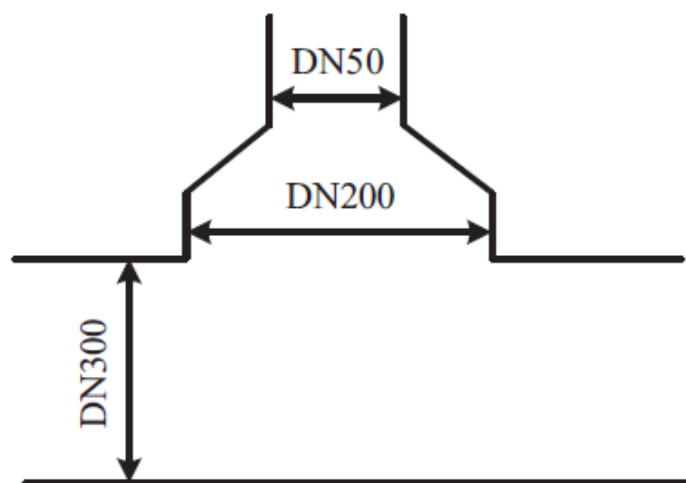


Рисунок 2.2 – Схема присоединения стояка отбора импульсного газа [23]

Во время проведения измерений была зафиксирована максимальная температура на участке с коническим переходом на внешней поверхности стенки до 112°C , а на участке с прямой врезкой с диаметра 300 мм на диаметр 50 мм – 27°C .

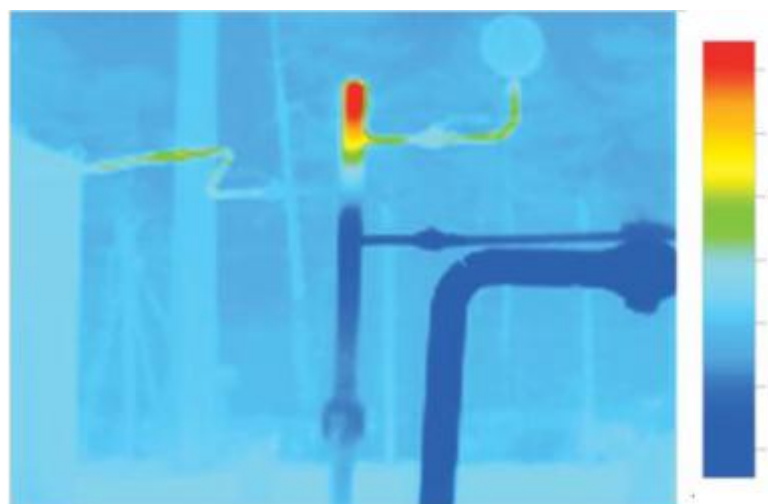


Рисунок 2.3 – Процесс разогрева стояка отбора импульсного газа [23]

Исследование этого эффекта представляется весьма перспективным как с практической, так и с теоретической точки зрения. Ведь подробное изучение и понимание механизмов разогрева газа позволит исключить ситуации с нагревом частей оборудования до температур, способных вывести его из строя.

Однако пробное моделирование эффектов разогрева газа в трубопроводе подобной геометрии не позволило получить результаты, аналогичные эксперименту. Поэтому в настоящей работе было решено изучить особенности процессов, происходящих в трубопроводах со сложной геометрией и выяснить, какие из моделей турбулентности наиболее точно помогают прогнозировать поведение флюида.

3 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Методика расчета динамических и тепловых параметров потока. Модели турбулентности, используемые для проведения численных экспериментов

Моделирование процессов вихревой природы, повсеместно наблюдающихся при движении сплошных сред – сложная и трудоемкая задача. И выбор модели турбулентности – один из ключевых факторов, влияющих на точность полученного в итоге результата. Ведь сегодня не существует единого подхода к описанию турбулентности. Различные модели турбулентности используют те или иные эмпирические коэффициенты и не способны описать весь спектр явлений, происходящих во флюиде. Все эти модели имеют как свои достоинства, так и недостатки. Это может быть выражено как в скорости проведения вычислений, так и в их качестве. Какие-то модели лучше описывают пристеночные течения, другие – развитую турбулентность.

В данном исследовании при моделировании движения газа через участки сложной формы было решено использовать $k - \varepsilon$ -модель, как одну из самых популярных и включенных во все коммерческие пакеты, используемые для моделирования гидродинамики. Использовались три различные модели турбулентности из семейства $k - \varepsilon$: standard $k - \varepsilon$ (B. Launder) [24], RNG $k - \varepsilon$ (V. Yachot) [25] и realizable $k - \varepsilon$ модель (T. Shih) [26]. В эти модели кроме уравнений неразрывности и переноса импульса входят два дополнительных уравнения: для турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации турбулентности ε .

Модель $k - \varepsilon$ standard содержит следующие уравнения для k и ε [27]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k(S_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1(S_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2(S_{k-\varepsilon})} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.2)$$

Где G_k - член, описывающий образование кинетической энергии турбулентности за счет среднего градиента скорости:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (3.3)$$

Турбулентная вязкость μ_t определяется зависимостью от k и ε :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

$\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}$, $\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}$ - турбулентные числа Прандтля для k и ε соответственно. Значения эмпирических констант модели турбулентности:

$$C_{\mu(S_{k-\varepsilon})} = 0,09, \quad C_{1(S_{k-\varepsilon})} = 1,44, \quad C_{2(S_{k-\varepsilon})} = 1,92, \quad \sigma_{k(S_{k-\varepsilon})} = 1, \\ \sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})} = 1,3.$$

Модель турбулентности RNG k - ε была получена с применением специальной статистической техники, название которой – метод ренормализационной группы (RNG). Дополнительный член R_ε , вводится в уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии ε . Он изменяет значения источникового слагаемого и значительно улучшает точность расчета течений с быстроменяющимися параметрами.

Уравнения для k и ε в этом случае имеют вид [27]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha_{k(RNG_{k-\varepsilon})} \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1(S_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2(S_{k-\varepsilon})} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_{\varepsilon} \quad (3.6)$$

где

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.7)$$

$\alpha_k, \alpha_{\varepsilon}$ – обратные эффективные числа Прандтля, входящие в уравнения для k и ε .

Источниковый член вычисляется следующим образом:

$$R_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} = \frac{R_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.8)$$

$$\text{Где } \eta = S \frac{k}{\varepsilon}; S = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}; \bar{S}_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right); \eta_0 = 4,38; \beta = 0,012.$$

Значения констант модели турбулентности, которые были получены с использованием RNG-теории:

$$C_{\mu(RNG_{k-\varepsilon})} = 0,0845, \quad C_{1(RNG_{k-\varepsilon})} = 1,42, \quad C_{2(RNG_{k-\varepsilon})} = 1,68, \\ \alpha_{k(RNG_{k-\varepsilon})} = 1,393, \quad \alpha_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} = 1,393.$$

Realizable $k - \varepsilon$ отличается от standard $k - \varepsilon$ и RNG $k - \varepsilon$ моделей [27] двумя важными нововведениями. Во-первых, новую форму получило уравнение переноса для скорости диссипации турбулентной энергии ε . Получено оно из точного уравнения переноса для среднеквадратичного отклонения скорости. Во-вторых, вводится специальная функция для константы C_{μ} , которая непосредственно влияет на вычисление турбулентной вязкости и некоторых других параметров течения.

В realizable $k - \varepsilon$ модели уравнения для k и ε имеют следующий вид [27]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k(R_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon(R_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \rho C_{1(R_{k-\varepsilon})} S \varepsilon - \rho C_{2(R_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (3.10)$$

$$\text{где } C_{1(R_{k-\varepsilon})} = \max \left(0,43; \frac{\eta}{\eta+5} \right), \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}};$$

$$\bar{S}_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.11)$$

Турбулентная вязкость рассчитывается по уравнению (3.4), но, как упоминалось ранее, для вычисления C_μ вводится специальная функция:

$$C_{\mu(R_{k-\varepsilon})} = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (3.12)$$

Где

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.13)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (3.14)$$

$\bar{\Omega}_{ij}$ – средняя скорость вращения тензора во вращающейся системе отчета с угловой скоростью ω_k .

A_0 и A_S – коэффициенты, выражающиеся как:

$$A_0 = 4,04; \quad A_S = \sqrt{6} \cos \phi,$$

Где

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W); \quad W = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$$

$$\bar{S}_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

Другие константы в realizable $k - \varepsilon$ -модели принимают следующие значения:

$$C_{2(R_{k-\varepsilon})} = 1,9, \quad \sigma_{k(R_{k-\varepsilon})} = 1, \quad \sigma_{\varepsilon(R_{k-\varepsilon})} = 1,2.$$

3.2 Объект исследования и граничные условия

Рассматривалась задача о неизотермическом движении однокомпонентного газа в канале с конфузорной секцией. Проводились серии экспериментов для различных конфигураций геометрии и граничных условий. Параметры расчетов принимались с учетом ранее проведенных в работах [1, 21] реальных экспериментов.

Расчеты проводились в рамках стационарной задачи.

Для численного интегрирования уравнений Рейнольдса и замыкающих их уравнений (3.1) – (3.14) на входе задавались поля искомых величин, на выходе – «мягкие» граничные условия, состоящие в равенстве нулю производной от искомых переменных по осевому направлению. На стенке трубопровода: условия прилипания для динамических характеристик потока – равенство нулю осредненных и пульсационных полей скорости; отсутствие одноточечных корреляционных смешанных моментов пульсации скорости и температуры, а также постоянная величина плотности удельного теплового потока. На оси: условия симметрии для искомых величин.

Во всех проведенных численных экспериментах было принято, что температура флюида на входе распределена по сечению равномерно, а температура стенки постоянна по поверхности.

Геометрия исследуемого участка канала приведена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Участок трубопровода с конфузорной секцией. 0, 1, 2, 3, 4 – исследуемые сечения.

Первая часть численных экспериментов основывалась на [21]. Моделировалась геометрия участков трубопровода с конфузорной секцией со значением параметра β от 0.01 до 0.06. Рассматривались течения со значением числа Рейнольдса Re от $7 \cdot 10^3$ до 10^4 . Разность температур стенки и флюида составляла 5°C .

Другая серия экспериментов проводилась с использованием данных [1]. Здесь угол наклона образующей поверхности конфузорной секции к оси трубопровода составлял 15, 30 и 45° . Число Рейнольдса Re принимало значения от $1.35 \cdot 10^4$ до $2.1 \cdot 10^4$. Температура газа на входе принималась равной температуре стенки и составляла 293 К.

В ходе проведения расчета анализировались динамические и температурные параметры потока в нескольких сечениях. Результаты сравнивались с данными натурных экспериментов для выяснения точности, с которой применяющиеся модели турбулентности позволяют прогнозировать параметры потока в условиях его деформации и ускорения.

Моделирование проводилось с использованием программного пакета Ansys Fluent 16.2.

3.3 Результаты работы и их обсуждение

В ходе проведения численного моделирования процессов, протекающих в газовой среде во время ускоряющегося вследствие деформации в конфузорной секции движения, получены следующие результаты. Ниже представлены результаты моделирования различных динамических и температурных параметров потока, полученные с использованием трех моделей турбулентности семейства $k - \varepsilon$: standard, RNG и realizable.

Одним из важных параметров, описывающих турбулентное движение флюида, является кинетическая энергия турбулентности k .

Из рисунка 3.2 видно, что наблюдается некоторое расхождение между значениями, рассчитываемыми с использованием различных моделей.

Во всех случаях происходит увеличение абсолютных значений энергии. Относительные же значения уменьшаются от сечения 1 к сечению 3 (см. рис. 3.1). Standard модель даже в цилиндрической части канала, располагающейся до конфузора рассчитывает значения кинетической энергии турбулентности так, что они оказываются немного завышенными в сравнении с RNG и realizable моделями.

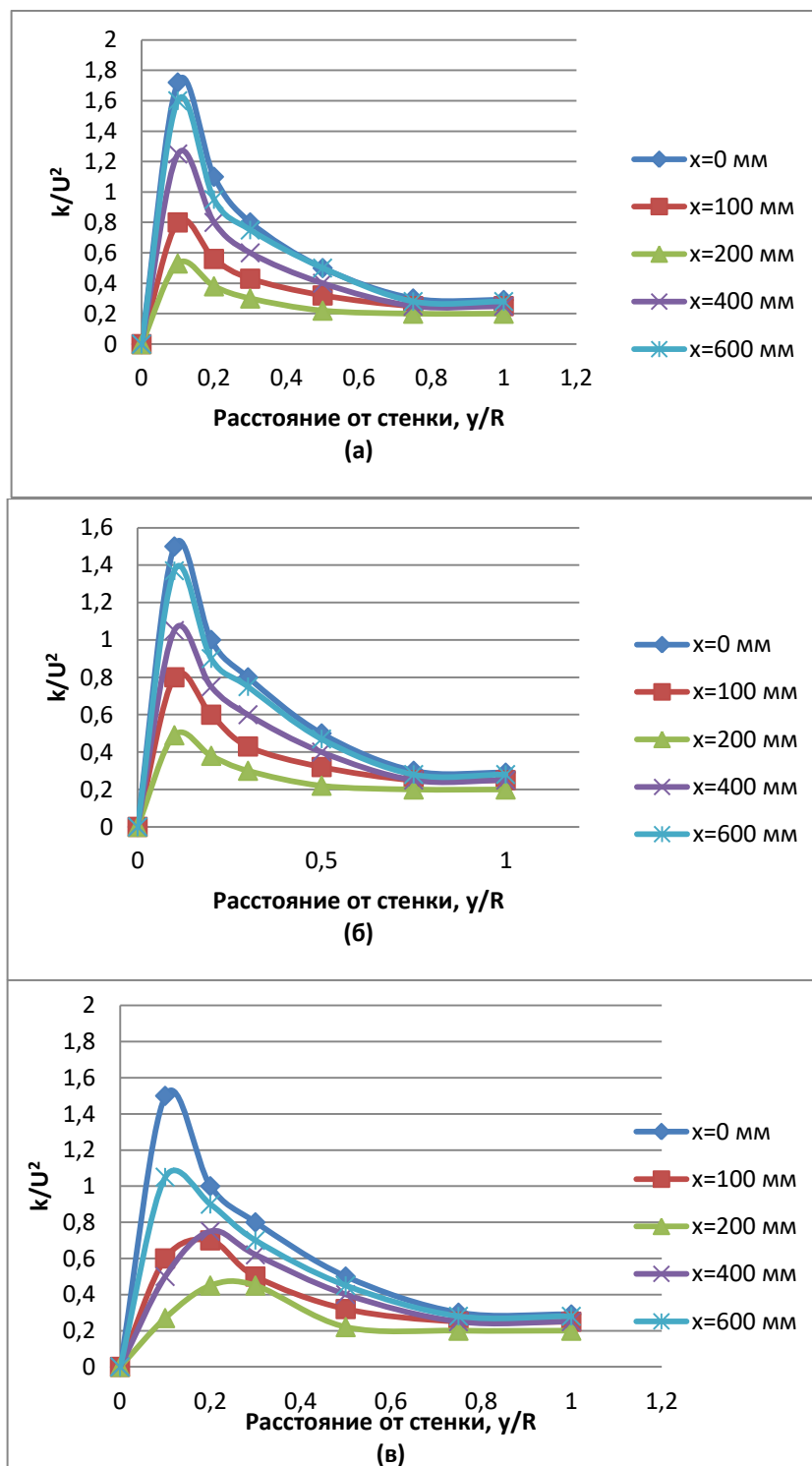


Рисунок 3.2 – Деформация расчетных профилей кинетической турбулентной энергии в зависимости от расстояния от начала конфузорной секции при $\beta=8/200$, $Re=10000$. а – standard $k-\epsilon$ модель, б – RNG $k-\epsilon$ модель, в – realizable $k-\epsilon$ модель

Кроме того, можно заметить, что realizable модель регистрирует увеличение толщины вязкого подслоя во время процесса ламинаризации, чего не наблюдается при моделировании процесса течения моделями RNG и standard. Во всех случаях наиболее близкие к реальному эксперименту [21] результаты были получены с использованием realizable модели.

В моделировании скорости потока до определенного момента все три модели показывают схожие результаты, однако standard модель показывает чуть менее выраженный ламинарный профиль скорости, чем RNG и realizable модели после конфузора, а так же весьма заметно, что профиль скорости после конфузорной секции быстрее приобретает характерный для турбулентных течений вид при выборе standard и RNG модели.

В моделировании же пульсационных составляющих скорости наблюдаются уже существенные различия (рис 3.3).

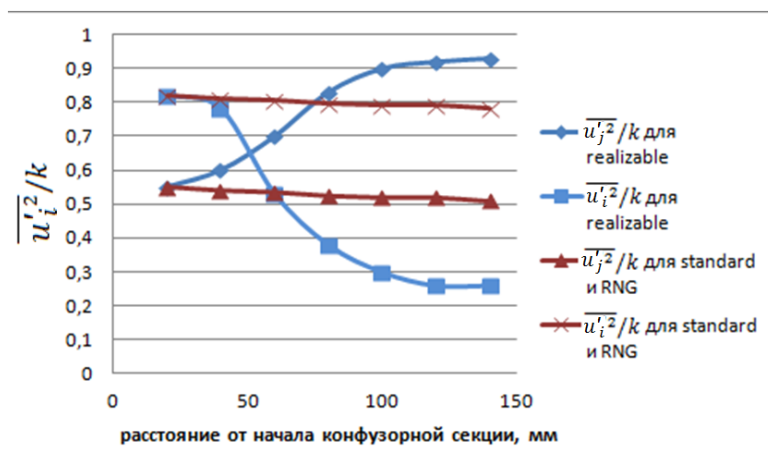


Рисунок 3.3 – Изменение значений пульсационных скоростей по длине конфузора на его оси.

Семейство $k - \varepsilon$ моделей турбулентности не предполагает расчет такой характеристики турбулентного потока, как масштаб турбулентности L , физический смысл которой отображается некоторым объемом флюида, все частицы в котором имеют одинаковую скорость движения в рассматриваемый момент времени. Расчет его производился вручную,

основываясь на данных, полученных в результате проведения вычислений в программном пакете Ansys Fluent.

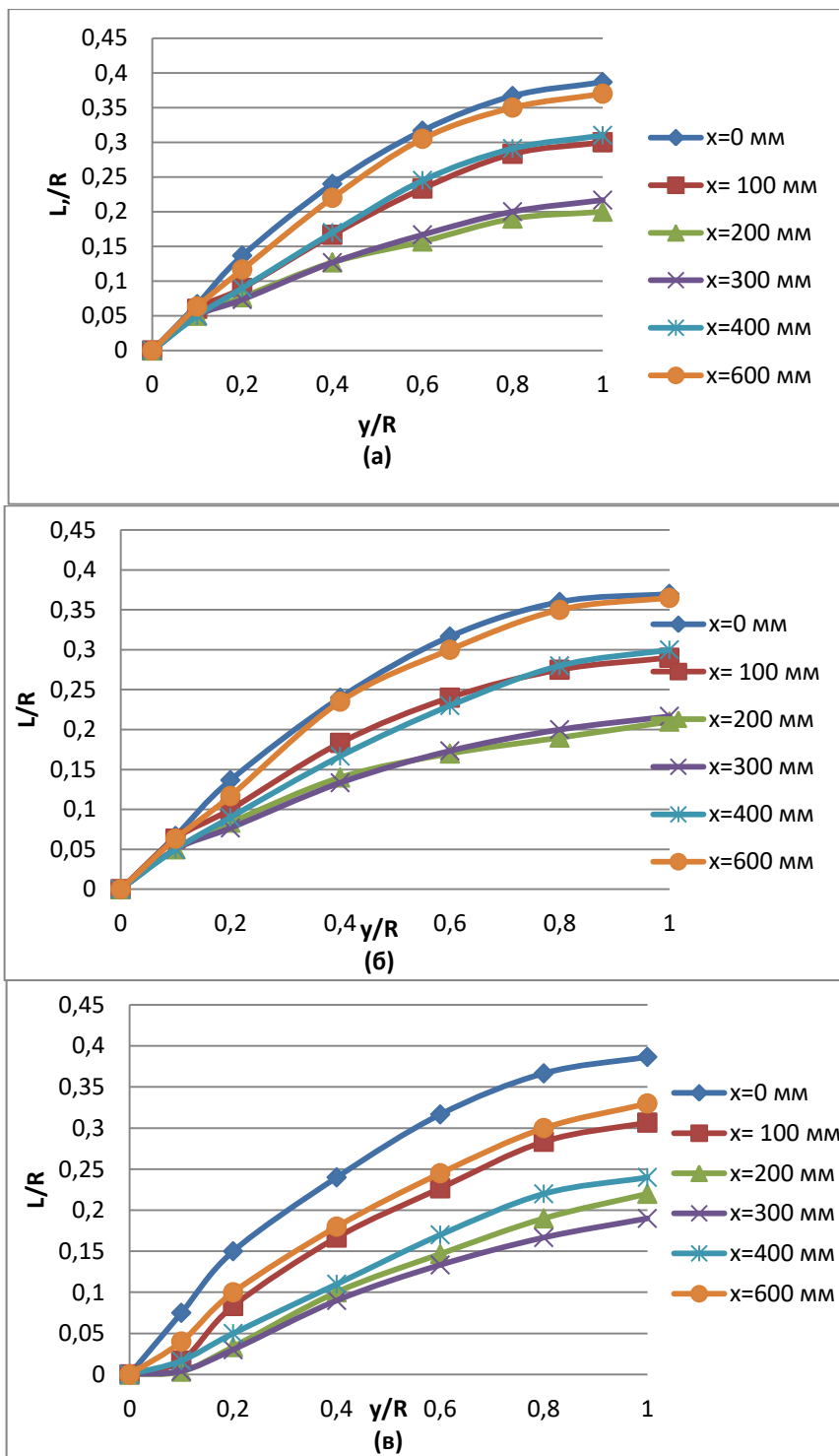


Рисунок 3.4 – Деформация расчетных профилей масштаба турбулентности в зависимости от расстояния от начала конфузорной секции при $\beta=8/200$, $Re=10000$. а – standard k - ϵ модель, б – RNG k - ϵ модель, в – realizable k - ϵ модель.

Для вычисления значений масштаба турбулентности использовалась следующая формула:

$$L = C_d \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

Следует обратить внимание, что кроме отличий в значениях уменьшения величины L и скорости ее восстановления отличается и характер ее уменьшения. Так, *realizable* модель показывает, что сначала наибольшее изменение значений происходит в пристеночной области как при уменьшении значений L , так и при восстановлении. В *RNG* и *standard* моделях изменения происходят равномерно по всему сечению.

Для получения представления о возможностях моделей по расчету тепловых параметров потока было решено рассчитать значения критерия Нуссельта Nu и сравнить полученные значения с данными известных экспериментов [21]. Значения турбулентного числа Прандтля при расчете значений критерия Нуссельта Nu принимались в соответствии со значениями, предложенными в выбранной модели турбулентности. Так, для *standard k-ε* – $Pr_t = 1$, для *RNG* модели – $Pr_t = 0,7194$, для *realizable* – $Pr_t = 1$.

Как можно заметить (рис. 3.5), расчетные данные, полученные с помощью *realizable* модели снова оказались более близкими к реальным. Что, возможно, связано с лучшими результатами в моделировании динамических параметров потока и в силу более тонкого моделирования пристеночных процессов с низкими значениями турбулентности.

При моделировании параметров течения в конфузорах с различными углами β (от 4/200 до 8/200) был замечен факт (рис. 3.6), что при увеличении β возрастает степень ламинаризации потока, а расстояние до точки, в которой число Нуссельта Nu принимает минимальное значение и после которой начинается процесс возвращения к турбулентному режиму течения, увеличивается.

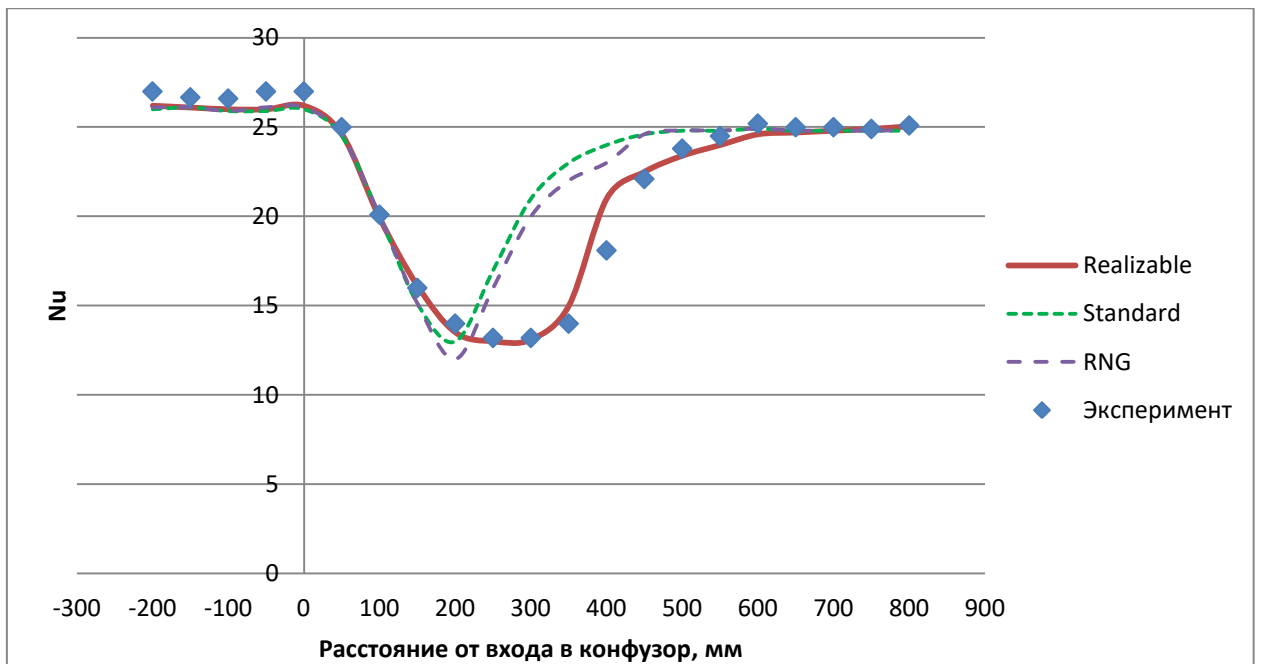


Рисунок 3.5 – Сравнение результатов расчета критерия Нуссельта по длине трубы для различных моделей турбулентности при $\beta=8/200$, $Re=10000$.

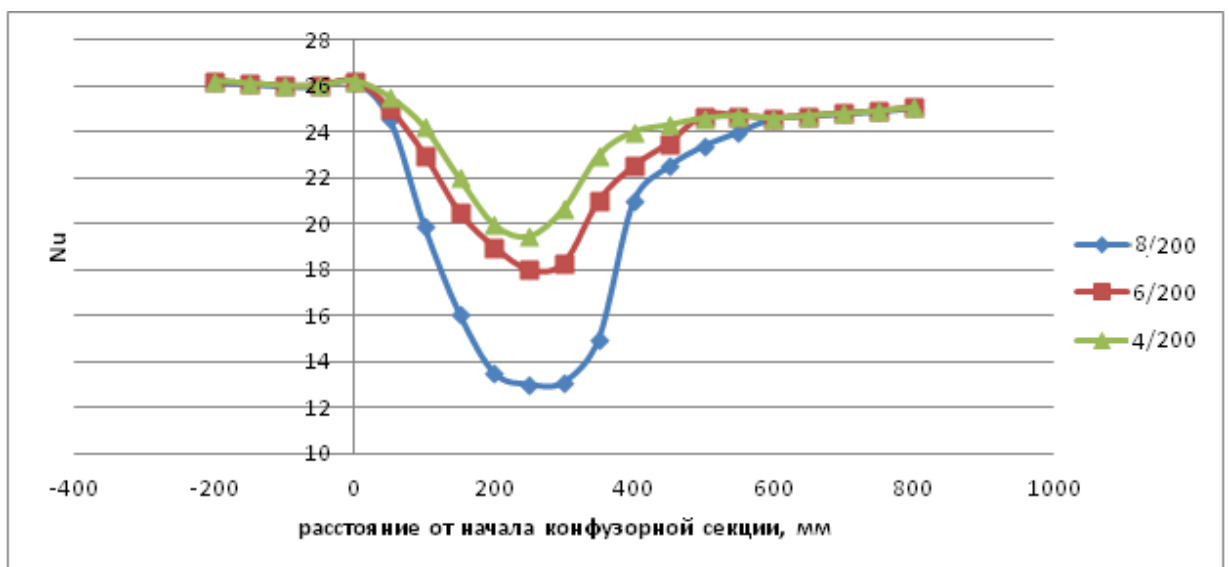


Рисунок 3.6 – Сравнение результатов расчета критерия Нуссельта по длине трубы, рассчитанных realizable k – ε моделью, для различных моделей значений β (от 4/ 200 до 8/200) при $Re=10000$.

3.4 Выводы

Таким образом, результаты представленных исследований, проиллюстрированные на рисунках 3.2 – 3.6, позволяют сделать вывод о том, что при моделировании параметров потока в условиях обычной цилиндрической трубы, все три исследуемые модели турбулентности (standard $k - \varepsilon$ (B. Launder) [24], RNG $k - \varepsilon$ (V. Yachot) [25], realizable $k - \varepsilon$ (T. Shih) [26]) показывают схожие, достаточно приемлемые результаты. Однако случаи ускоренного движения, которое является следствием пространственной деформации в сужающейся конфузорной секции, выявляют различия между моделями.

Такие параметры как скорость потока и ее пульсационные составляющие, масштаб турбулентности, кинетическая энергия турбулентности вычисляются с разной точностью. Можно заметить, что standard и RNG модели имеют схожие результаты, отличные от результатов realizable модели. Но наиболее близкие к экспериментальным значениям параметров все же показывает realizable $k - \varepsilon$ -модель турбулентности, хотя в литературе можно найти данные, когда все эти три модели проявляют себя не с лучшей стороны [27].

Как представляется возможным, подобные результаты были получены по причине разного способа расчета коэффициента C_μ , присутствующего в уравнениях моделирования турбулентной вязкости (3.4), а так же в связи пульсационных характеристик с кинетической энергией турбулентности и ее диссипации (1.13). Так, для standard и RNG моделей, он представляет собой константу, для realizable – для его расчета вводится дополнительная функция (3.12). Поэтому, исходя из полученных результатов, а также данных [21] можно сделать предположение, что в конфузоре, в отличии от обычной цилиндрической трубы, для которой эмпирически доказана гипотеза о том, что вклад пульсационных характеристик в кинетическую энергию турбулентности (1.8) остается пропорционально

постоянным или меняется незначительно, имеет место перераспределение вкладов этих пульсационных составляющих скорости.

Моделирование температурных характеристик потока в рассматриваемых случаях так же показывает преимущество *realizable* модели над *RNG* и *standard*. Что, возможно, связано с лучшими результатами в моделировании динамических параметров потока.

При рассмотрении связи характеристик потока от геометрии конфузорной секции (исходя из анализа ранее проведенных исследований [1, 21] и численного моделирования, проведенного в данной работе), получена зависимость длины ламинаризируемой области течения от угла наклона конфузорной секции. Замечено, что размер области увеличивается при увеличении угла наклона.

Поведение кинетической энергии турбулентности по поперечному сечению дает возможность учесть изменение механизмов переноса в балансе кинетических энергий турбулентных вихрей. В частности, при входе в конфузорную секцию профиль удовлетворяет условиям развитого течения. Далее, проходя через конфузор, возникают особенности, вызванные ускорением потока вследствие увеличения поля давления и оттеснением границы толщины вязкого подслоя вглубь ядра. Это ведет к снижению пика кинетической энергии (смотри линии 100мм, 200 мм на рисунке 3.2). Причем, попадая в секцию постоянного сечения, наблюдается возрастание турбулентных пульсаций в потоке, что восстанавливает структуру турбулентных вихрей (смотри линии 400мм, 600мм на рисунке 3.2). Такой сложный механизм из-за подавления и восстановления пульсационной структуры потока выбранными моделями в рамках изотропного значения турбулентной вязкости вполне удовлетворительно предсказывается лишь моделью *realizable* в сравнении с данными [21] в силу более тонкого моделирования пристеночных процессов с низкими значениями турбулентности. Однако расчетами выявлено, что при более значительных

углах наклона образующей поверхности конфузора к оси течения ($\beta > 8/200$) двухпараметрические модели вносят заметную погрешность в расчет структуры течения и его интегральных параметров (критерий Нуссельта, гидравлическое сопротивление) вследствие доминирования механизмов анизотропии, что позволяет утверждать, что при прогнозе вихревой неустойчивости в каналах сложной геометрии с учетом (без) теплообмена требуется коррекция указанной модели на прогноз анизотропных свойств турбулентного течения.

Заметим, что в выбранном диапазоне определяющих параметров весьма существенна задача о турбулентном теплообмене, которая требует повышенного внимания в моделировании составляющих вектора плотности турбулентного $(\overline{u_i' T'})$ теплового потока. Расчетами установлено, что при значениях β от 4/200 и выше наблюдается интенсификация процесса гашения турбулентного переноса в радиальном направлении. Следовательно, аналитические зависимости к определению коэффициента турбулентной теплопроводности с функциональными связями для числа Прандтля (замыкания Буссинеска) не вполне корректны. Однако можно утверждать, что все двухпараметрические динамические модели успешны в прогнозе эффектов ламинаризации на небольших углах сужения ($\beta < 8/200$) с различными значениями формулировок зависимости к определению турбулентного числа Прандтля. Расчеты утверждают, что турбулентный теплообмен, предсказанный в рамках двухпараметрических динамических и двухпараметрических тепловых моделей, будет более эффективен, что позволит использовать в расчетах полуэмпирические модели, широко опробованные к прогнозу задач нефтегазовой гидродинамики, и отказаться от громоздких формулировок в определении анизотропных турбулентных течений в рамках RANS-метода с полными транспортными уравнениями для турбулентных потоков и напряжений Рейнольдса [28]. Последнее существенно сэкономит затраты на проведение вычислительных расчетов

потоков с учетом изменений компонентного состава углеводородных сред, что характерно для трубопроводного транспорта и позволит вскрыть механизмы в изменениях поля скорости, температуры на таких участках трубопровода, где возникают выраженные процессы перехода кинетической энергии в тепловую, увеличивается роли диссипативных эффектов, характерная для тупиковых ответвлений.

На рисунке 3.3 представлена оригинальная информация о поведении интегрального масштаба энергосодержащих вихрей, который является физическим параметром в отличие от скорости диссипации и позволяющим анализировать картину течения о размерах турбулентных вихрей в переходных процессах и более успешно моделировать на его основе низкорейнольдсовые процессы (вырождение турбулентности) характерные для ламинаризации.

Проведенный анализ изменения механизмов диффузии, конвекции, диссипации турбулентных вихрей в развивающихся переходных течениях в трубопроводах в рамках динамических двухпараметрических моделей группы $k-\varepsilon$ и данные расчетов могут расширить банк данных к тестированию новых турбулентных моделей полуэмпирической теории турбулентности и могут дать сведения к оптимизации работы аппаратов, управляющих вихревой неустойчивостью в трубопроводном транспорте.

На основании этих данных уже можно давать некоторые рекомендации при проектировании геометрии проточной части для различных технологических процессов, но все же в дальнейшем планируется более подробное изучение влияния всевозможных геометрических особенностей на параметры потоков с использованием других моделей турбулентности, и, возможно, разработки собственной модели, основываясь на полученных закономерностях.

4 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Одними из основных задач, стоящими перед энергетическими компаниями, занимающимися транспортировкой нефти, газа и нефтепродуктов являются обеспечение надежности и бесперебойности поставок флюида потребителю, то есть и надежности трубопроводной системы в целом, а так же снижение затрат на осуществление транспортировки.

Турбулентность оказывает сильное влияние на процессы гидродинамики и теплообмена в каналах. Наиболее полно гидродинамические и тепловые характеристики турбулентного потока изучены в гладкой круглой трубе. На основании многочисленных экспериментальных данных получены формулы для расчета полей скорости и температуры, коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи.

При турбулентном течении жидкости в каналах сложной геометрической формы процессы гидродинамики и теплообмена существенно усложняются. Проявляется влияние различных факторов: наличия застойных зон; конвективного переноса, вызванного движением крупномасштабных вихрей и вторичными течениями; зависимости температурного режима теплоотдающей поверхности от геометрических параметров и теплофизических свойств стенки, распределения энерговыделения и т. п. Такое многообразие влияющих факторов приводит к тому, что нельзя получить единого обобщающего метода для расчета гидродинамических и теплопередающих характеристик турбулентного потока в каналах различной геометрической формы. Имеющиеся формулы, полученные на основе обобщения экспериментальных данных, носят частный характер и справедливы только для условий проведения экспериментов.

Многие процессы еще слабо изучены, поэтому при проектировании

тех или иных технологических и инженерных сооружений могут неожиданным образом влиять на процесс их работы. Детальный анализ и выявление закономерностей в термодинамике потока в различных условиях может свести к минимуму их отрицательное влияние, в других же случаях – наоборот, использовать эти закономерности как преимущество, что может помочь как снизить экономические затраты, так и увеличить надежность объектов.

В работе представлен численный расчет термодинамических характеристик потока при его прохождении через секцию трубы сложной геометрии, однако, из-за недостаточной для описания турбулентности математической базы, для полного понимания картины процесса необходимо так же проведения ряда натурных экспериментов.

В данной главе планируется провести оценку стоимости оборудования, работ и программного обеспечения как для проведения эксперимента численного, так и реального.

4.1 Расчет материальных затрат на оборудование и программное обеспечение для проведения НТИ

Математическое моделирование гидродинамических процессов требует серьезных вычислительных мощностей, поэтому для проведения расчетов недостаточно будет использовать персональный компьютер на базе офисных решений. Наиболее хорошо в проведении вычислений зарекомендовали себя многопоточные серверные процессоры, и для многократного ускорения работы целесообразнее выбрать именно его.

Величина расходов, затраченных на приобретение материалов, используемых, непосредственно, в разработке самого поточного преобразователя плотности, рассчитывается по формуле:

$$Z_M = (1 + k_t) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i} ; \quad (4.1)$$

где: m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы

Коэффициент k_T вводится для учета транспортных расходов, принимается равным 0,15. Однако было бы неправильным учитывать расходы на транспортировку для случаев приобретения программного обеспечения, поэтому для определения затрат на их покупку k_T будет принят равным 0.

Таблица 4.1 – Стоимость оборудования и программного обеспечения для проведения численного эксперимента

<i>Наименование</i>	<i>Ед. изм.</i>	<i>Кол-во</i>	<i>Цена за ед., тыс. руб.</i>	<i>Затраты на материалы, (Зм), тыс. руб.</i>
Персональный компьютер на базе процессора Intel Xeon E5-2683v4	шт.	1	156,5	156,5
Программный комплекс ANSYS на одно рабочее место (1 лицензия)	шт.	1	1 900	1 900
Общая стоимость, тыс. руб.	2 056,5			
Общая стоимость с учетом доставки оборудования, тыс. руб.				
	2 079,975			

Для проведения реальных физических экспериментов, которые позволят определить термодинамические свойства перекачиваемого флюида необходимо специальное оборудование, которое можно разделить на то, которое предназначено для разработки испытательного стенда, а также на оборудование, предназначенное непосредственно для выполнения измерений, включая флуоресцентный краситель (ацетон).

Испытательный стенд представляет из себя замкнутый трубопроводный контур с одной входной линией с подключенным к ней компрессором, разветвленной системой параллельно установленных труб с конфузорами с разными углами наклонов стенки к оси и выходной линией, а также шкафа управления процессом перекачки.

Оборудование же, необходимое для измерения параметра потока включает в себя систему манометров, датчиков температуры, потокового расходомера и лазерного доплеровского анемометра, с помощью которого осуществляется большая часть измерений.

В таблице 2 приведена стоимость оборудования для испытательного стенда, включая затраты на их доставку.

Таблица 4.2 – Стоимость материалов для сборки испытательного стенда

<i>Наименование</i>	<i>Ед. изм.</i>	<i>Кол-во</i>	<i>Цена за ед., тыс. руб.</i>	<i>Затраты на материалы, (З_м), тыс. руб.</i>
Труба напорная ПВХ прозрачная PN 16 225х6,5мм (длина 5 м, давление 16 атм.)	шт.	9	88,6	797,4
Труба напорная ПВХ прозрачная PN 16 140х6,5мм (длина 5 м, давление 16 атм.)	шт.	1	58,9	58,9
Труба напорная ПВХ прозрачная PN 16 125х6,5мм (длина 5 м, давление 16 атм.)	шт.	1	52,7	52,7
Труба напорная ПВХ прозрачная PN 16 110х6,5мм (длина 5 м, давление 16 атм.)	шт.	1	28,5	28,5
Труба напорная ПВХ прозрачная PN 16 90х6,5мм (длина 5 м, давление 16 атм.)	шт.	1	21,5	21,5
Труба напорная ПВХ прозрачная PN 16 75х6,5мм (длина 5 м, давление 16 атм.)	шт.	1	20,0	20,0
Набор соединительной арматуры	шт.	1	128,6	128,6
Отвод конический ПВХ 225х140х6,5мм	шт.	1	8,3	8,3
Отвод конический ПВХ 225х125х6,5мм	шт.	1	8,0	8,0
Отвод конический ПВХ 225х110х6,5мм	шт.	1	7,1	7,1
Отвод конический ПВХ 225х90х6,5мм	шт.	1	6,8	6,8
Отвод конический ПВХ 225х75х6,5мм	шт.	1	6,8	6,8
Набор запорной арматуры	шт.	1	119,2	119,2
Насос дозировочный НД 1,0Р	шт.	1	40,5	40,5
Опрессовочный насос SHELF-1 типа ПНУ-2	шт.	1	54,6	54,6

Промышленный блок-контроллер в комплекте с модулями управления, промышленной ЭВМ в шкафу	шт.	1	669,25	669,25
Общая стоимость	2 058,15			
Общая стоимость с учетом доставки оборудования	2 366,87			

Таблица 4.3 содержит данные о затратах на приобретение и доставку измерительного оборудования.

Таблица 4.3 – Стоимость измерительного оборудования для стенда

<i>Наименование</i>	<i>Ед. изм.</i>	<i>Кол-во</i>	<i>Цена за ед., тыс. руб.</i>	<i>Затраты на материалы, (З_м), тыс. руб.</i>
Кориолисовый расходомер массовый Rosemount	шт.	1	156,5	156,5
Датчик давления ПД 100-ДИ10,0-111-0,5	шт.	6	1,25	7,5
Датчик температуры ДТС 105Л-Pt.A3.80 (термосопротивление)	шт.	6	5,07	30,42
Полупроводниковый лазерный доплеровский анемометр ЛАД-078С-ФДА	шт.	1	8 432,0	8 432,0
Флуоресцентный краситель (ацетон) 1л.	шт.	10	0,12	1,2
Общая стоимость, тыс. руб.	8 627,62			
Общая стоимость с учетом доставки оборудования, тыс. руб.	9 921,763			

4.2 Период проведения исследования согласно заданию

Согласно договору на проведение исследования по выявлению термодинамических закономерностей при движении углеводородов в трубопроводах сложной геометрии с целью дальнейшего использования полученных данных для улучшения технических характеристик оборудования была определена продолжительность работ – с 01.02.2016 по 31.05.17 г.

Ниже приведем расчет времени, которое действительно было затрачено на работу с учетом времени, затраченного на выходные, отпуска и невыходы по причине болезни научно-технического персонала.

Таблица 4.4 – Продолжительность работ, выполняемых научно-техническим персоналом

Показатели рабочего времени		Руководитель	Лаборант
Календарное число дней	с 01.02 по 31.12 2016 г.	335	
	с 01.01 по 31.05 2017 г.	151	
Количество нерабочих дней - выходные и праздничные дни	с 01.02 по 31.12 2016 г.	86	102
	с 01.01 по 31.05 2017 г.	36	56
Потери рабочего времени, дни - отпуск, невыходы по болезни	с 01.02 по 31.12 2016 г.	52	28
	с 01.01 по 31.05 2017 г.	-	2
Продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником в период с 01.02.2016 по 31.12.2016 г., раб. дн.		197	205
Продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником в период с 01.01.2017 по 31.05.2017 г., раб. дн.		115	93

4.3 Расчет затрат на амортизационные отчисления

Произведем расчет амортизационных отчислений за период проведения работ. Расчет будем производить линейным методом.

В соответствии с п. 4 ст. 259 НК РФ *линейный метод* представляет собой равномерное списание стоимости амортизируемого имущества в течение срока его полезного использования, установленного организацией при принятии объекта к учету.

В этом случае сумма начисленной за один месяц амортизации, в отношении объекта амортизируемого имущества, определяется как произведение его первоначальной (восстановительной) стоимости и нормы амортизации, определенной для данного объекта.

При применении линейного метода, норма амортизации по каждому объекту амортизируемого имущества определяется по формуле:

$$K = (1/n) \cdot 100 \%, \quad (4.2)$$

где K – норма амортизации в процентах к первоначальной (восстановительной) стоимости объекта амортизируемого имущества;

n – срок полезного использования данного объекта амортизируемого имущества, выраженный в месяцах.

Срок полезного использования объектов имущества определялся согласно постановлению правительства РФ от 01.01.2002 N 1 (ред. от 07.07.2016) "О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы"

В таблице 4.5 приведены данные по расчету амортизационных отчислений.

Таблица 4.5 – Расчет амортизационных отчислений

Объект	Стоимость за единицу, руб.	Кол-во	Амортизационная группа согласно [4]	Срок службы, лет	Месячная норма амортизации, %	Месячная норма амортизации, руб.	Сумма амортизации, руб.
Персональный компьютер на базе процессора Intel Xeon E5-2683v4	156500	1	4	7	1,19	1856,4	25989,6
Программный комплекс ANSYS на одно рабочее место (1 лицензия)	1900000	1	4	7	1,19	22610,0	31654,0
Комплект ПВХ труб и отводов	1016000	1	6	12	0,69	7010,4	98145,6
Комплект соединительной арматуры	128600	1	5	8	1,04	1337,44	18724,16
Комплект запорной арматуры	119200	1	5	8	1,04	1239,68	17355,52
Насос дозировочный НД 1,0Р	40500	1	3	5	1,67	676,35	9468,9
Опрессовочный насос SHELF-1 типа ПНУ-2	54600	1	3	5	1,67	911,82	12765,48
Промышленный блок-контроллер в комплекте с модулями управления, промышленной ЭВМ в шкафу	669250	1	6	15	0,56	3747,80	52469,2
Кориолисовый расходомер массовый Rosemount	156500	1	5	10	0,83	1298,95	18185,3

Датчик давления ПД 100-ДИ10,0-111-0,5	1250	6	5	8	1,04	78,00	1092,0
Датчик температуры ДТС 105Л-Рт.А3.80 (термосопротивление)	5070	6	5	8	1,04	316,37	4429,18
Полупроводниковый лазерный доплеровский анемометр ЛАД-078С-ФДА	8432000	1	6	12	0,69	58180,8	814531,12
Итого, руб.	1 104 810,06						

Таким образом, сумма затраченная на амортизационные отчисления составила 1 104 810,6 рублей.

4.4 Затраты по основной заработной плате

Здесь учитываются расходы, включающие основную заработную плату научных и инженерно-технических работников, которые непосредственно участвуют в выполнении работ. Такими работниками в данном случае являются руководитель и лаборант.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} \quad (4.3)$$

где: $З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда на тарифный коэффициент $k_{\text{т}}$ и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке.

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, принимаемый равным 0,2;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.6 – Должностные месячные оклады

Исполнители	Разряд	k_t	$З_{тс}$, руб.	$З_{м}$, руб
Руководитель	4	2,18	13080	25506
Лаборант	1	1	6000	11700

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_{м} \cdot М}{F_{д}} \quad (4.4)$$

где: $З_{м}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

$М$ – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $М = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $М = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{д}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 5).

Таблица 4.7 – Годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала

Показатели рабочего времени	Руководитель	Лаборант
Календарное число дней	365	
Количество нерабочих дней - выходные и праздничные дни	98	118
Потери рабочего времени, дни - отпуск	48	24
- невыходы по болезни	4	6
Действительный годовой фонд рабочего времени, дни	215	217

Произведя расчет по формуле 3 с учетом годового фонда рабочего времени, получим среднедневную заработную плату для каждого рабочего (таблица 4.8).

*Таблица 4.8 – Среднедневная заработная плата
научно-технического персонала*

Исполнитель	Руководитель	Лаборант
Среднедневная ЗП, руб.	1233,78	609,49

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (4.5)$$

где: $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 7);

$З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Произведя расчет по формуле 4 с учетом продолжительности работ для каждого научно-технического работника, получим основную заработную плату работника за период с 01.06.2014 по 31.05.2016 г. (таблица 4.9).

*Таблица 4.9 - Основная заработная плата для научно-технического
персонала за период с 01.02.2016 по 31.05.2017 г.*

Исполнитель	Руководитель	Лаборант
Основная ЗП в период с 01.02 по 31.12 2016 г. , руб.	243 054,66	124 945,45
Основная ЗП в период с 01.01 по 31.05 2017 г, руб.	141 884,70	56 682,57
Общая сумма, руб.	566 567,38	

Общие затраты на основную заработную плату научно-технического персонала, непосредственно участвующего в проводимых работах, составляют 566567,38 руб.

4.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Настоящая статья предполагает учет расходов на обязательные отчисления в Пенсионный фонд (ПФР), Фонд обязательного медицинского страхования (ОМС) и Фонд социального страхования (ФСС) по установленным законодательством РФ нормам государственного.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (4.6)$$

где: $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2012 – 2017 годах вводится пониженная ставка – 27,1% [1], так как отчисления в ФСС в размере 2,9% не осуществляются.

Однако согласно пункту 5 статьи 18 Закона от 03.07.2016 N 250-ФЗ с 01.01.2017 Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ утратил свою силу. Поэтому в период с 01.01.2017 по 31.05.2017 отчисления во внебюджетные фонды рассчитываются согласно статьям 419, 425 и 426 НК РФ. Размер страховых отчислений составляет в этом случае 30%.

Помимо 30% страховых взносов в государственные внебюджетные фонды, в Фонд социального страхования дополнительно, согласно федеральному закону от 14.12.15 N 362-ФЗ, производятся отчисления на страхование от несчастных случаев. Процентная ставка этих отчислений выбирается в соответствии с приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 25.12.12 N 625н в зависимости от вида проводимых работ и класса, к которому они относятся. Производимые работы (Научные исследования и разработки в области естественных и технических наук)

относятся к первому классу, поэтому размер налоговой ставки составляет 0,2% от начисленной оплаты труда. Таким образом, общая ставка отчислений на страховые взносы составит для периода работ с 01.02 по 31.12 2016 г. – 27,3%, с 01.01 по 31.05 2017 г. – 30,2%.

Таблица 4.10 – Размер обязательных страховых отчислений

Вид затрат	Руководитель	Лаборант
Основная ЗП за 2016 год, руб.	243 054,66	124 945,45
Основная ЗП за 2017 год, руб.	141 884,70	56 682,57
Размер страховых взносов за 2016 год, руб.	66 353,92	34 110,11
Размер страховых взносов за 2017 год, руб.	42 849,18	17 118,14
Суммарные страховые выплаты, руб.	160 431,35	

4.6 Расчет контрагентных расходов

Здесь приведены затраты на проведение обязательной проверки приобретенного оборудования, которую осуществляют специализированные аттестованные лаборатории.

Также здесь учтены расходы на монтаж испытательного стенда и опоры для него, которые тоже выполняются сторонними организациями.

Все работы, выполняемые подрядными организациями по договору или контракту и стоимость этих работ представлены в таблице 10.

Таблица 4.11 – Работы, относящиеся к контрагентным расходам и их стоимость

Наименование	Кол-во	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, (З _к), тыс. руб.
Проведение поверки приборов, установленных на испытательном стенде в специализированной лаборатории.	1	62,75	62,75
Работы по монтажу металлической опоры для установки испытательного стенда	1	12	12
Работы по сборке испытательного стенда	1	34,5	34,5
Общая стоимость затрат			109,25

4.7 Накладные расходы

Величина накладных затрат обуславливается расходами, не попавшими в предыдущие статьи расходов, такие как печать, ксерокопирование материалов исследований, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д. Она рассчитывается согласно формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot \sum_6^1 Z_i \quad (4.7)$$

где: $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Примем величину коэффициента накладных расходов равной 5% (т.е. 0,05).

$$Z_{\text{накл}} = 0,05 \times (2079,98 + 2366,87 + 9921,76 + 566,57 + 159,30 + 109,25) = 760,19 \text{ тыс.руб.}$$

4.8 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта

Величина бюджета на разработку научно-исследовательской продукции является нижним пределом по уровню затрат, который защищается научной организацией при формировании договора с заказчиком.

Бюджет включает в себя учет всех ранее рассчитанных необходимых затрат, для проведения научных исследований и получения, в конечном итоге, продукт, который и является целью работы.

Таблица 4.12 – Общая стоимость проведения научно-технических исследований

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Примечание
1. Затраты на материалы, оборудование и программное обеспечение	14 368,61	Пункт 6.1
2. Затраты на амортизационные отчисления	1 104,81	Пункт 6.3
3. Затраты по основной заработной плате	566,57	Пункт 6.4
4. Отчисления во внебюджетные фонды	159,30	Пункт 6.5
5. Контрагентные расходы	109,25	Пункт 6.6
6. Накладные расходы	760,19	Пункт 6.7
7. Итоговая величина затрат	17 069,86	Сумма ст. 1-6

Общий бюджет проведения научно-технических исследований по теме составил 17 069,86 тыс. руб.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Объектом исследования в данной работе являются газообразные углеводороды и их поведение при движении в трубопроводах сложной геометрии и под влиянием различных внешних факторов. В работе приводятся результаты численного моделирования неизотермического движения флюидов в режимах ламинарно-турбулентных переходов, вызываемых пространственной деформацией углеводородной среды. Однако в дальнейшем планируется проведение и натурных экспериментов с целью уточнения и более глубокой детализации закономерностей движения среды в трубопроводе. Численное моделирование требует использования вычислительных машин со специализированным программным обеспечением, проведение же физических экспериментов предполагает сборку стенда для копирования процессов, протекающих в реальных трубопроводах и измерение термодинамических характеристик исследуемого газа с использованием технически сложной измерительной аппаратуры. Для создания условий, максимально приближенным к тем, в которых происходит процесс транспортировки газа, планируется использование многокомпонентного природного газа, а также компрессорного оборудования для значительного повышения давления в системе.

Сам процесс проведения экспериментов может нести в себе ряд опасностей как для жизни и здоровья научно-технических работников, персонала и третьих лиц, так и для окружающей среды, а также возможность возникновения чрезвычайных ситуаций.

5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.

Природный газ (а также этилмеркаптан, добавляемый в него для обнаружения утечек), проведение экспериментов с которым планируется провести для более подробного изучения закономерностей его поведения в исследуемых условиях, неблагоприятно влияет на человеческий организм. Природный газ состоит из горючей компоненты (метан, иногда более тяжелые гомологи метана: этан, пропан, бутан; водород; окись углерода;), балластной (азот, углекислый газ, кислород) и вредных примесей (сероводород, синильная кислота).

Веществами, неблагоприятно влияющими на здоровье человека, являются в данном случае следующие: углеводороды, углекислый газ, сероводород, синильная кислота, меркаптаны. В таблице 5.1 приведены их предельно допустимые концентрации и классы опасности согласно [35].

Перечисленные выше вещества можно классифицировать как яды. Взаимодействие с ними приводит к различным нежелательным последствиям для человеческого здоровья, таким как тошнота, раздражение слизистых, повышение температуры, недомогание, затруднение дыхания и в отдельных случаях – смерть.

Опасными же факторами при использовании природного газа является возможность взрыва или воспламенения отдельных его компонентов при достижении определенных концентраций этих веществ в воздухе рабочей зоны.

Температуры самовоспламенения и концентрационные пределы взрываемости описанных выше компонент приведены в таблице 5.2 [36].

Таблица 5.1 – Предельно допустимые концентрации вредных веществ, появление которых возможно в рабочей зоне, согласно ГН 2.2.5.1313 – 03

Вещество	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м³	Класс опасности
Углекислый газ	9000	IV
Углеводороды C ₁ – C ₁₀	300	IV
Сероводород	10	II
Метанол	5	III
Сероводород в смеси с УВ	3	III
Меркаптаны	1	II
Синильная кислота	0,3	I

Таблица 5.2 – Характеристика взрывопожароопасных веществ, появление которых возможно в воздухе рабочей зоны согласно ГОСТ 30852.16-2002

Наименование	Температура, °С		Предел взрываемости, мг/л	
	вспышки	самовоспламенения	нижний	Верхний
Метан	—	537	29	113
Этан	—	515	31	194
Пропан	—	470	31	200
Бутан	—	372	33	225
Сероводород	—	246	57	650
Метанол	11	386	73	484

5.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Метеорологические условия в рабочей зоне, такие как относительная влажность, интенсивность теплового излучения от нагретых поверхностей, барометрическое давление, скорость движения и температура воздуха также имеют немаловажное значение. Все они влияют как на здоровье и самочувствие человека, так и на его работоспособность. Для создания благоприятных для работы человека условий необходимо добиться оптимального сочетания этих факторов, а неверный их подбор способен причинить вред здоровью.

Рабочий процесс во время проведения экспериментов происходит в условиях повышенного шумового фона. Источником шума являются устройства для охлаждения вычислительных машин, а также работа компрессоров, используемых для создания необходимого давления в системе и перекачке газа внутри стенда. Уровень шума выше нормированных значений оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека и результат его работы. Длительное воздействие шума снижает остроту слуха, может являться причиной его потери, изменяет кровяное давление, ухудшает зрение, нарушает координацию движений. Нормированный уровень шума для рабочего персонала, выполняющего физический труд на территории и в помещениях определяется по таблице 5.3 [37].

Наиболее опасными участками относительно получения травм механическим способом являются зоны, расположенные в непосредственной близости от трубопроводов и оборудования, работающего под давлением, а также движущиеся части механизмов. Возможность разрушения стендового трубопровода, его элементов и оборудования, происходящего совместно с разлетом осколков металла, может причинить вред здоровью, вплоть до смертельного исхода.

*Таблица 5.3 – ПДУ производственного звука и давления согласно
ГОСТ 12.1.003-2014*

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами в Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА	
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000		8000
Предприятия, учреждения и организации										
Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, приема больных в здравпунктах	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в рабочих комнатах конторских помещений, в лабораториях	93	79	70	68	58	55	52	52	49	60

Освещенность рабочих мест так же оказывает значительное влияние на рабочий процесс. Чрезмерное или же недостаточное освещение может

привести к негативным последствиям для здоровья персонала, снижает производительность труда вследствие ухудшения условий работы.

Вредным производственным фактором являются и пульсации светового потока искусственного освещения. Допустимыми значениями величины пульсаций является промежуток в интервале 5 – 15 % в зависимости от напряженности зрительной работы на рабочем месте. Пульсации отсутствуют полностью при использовании ламп накаливания, работающих от источника постоянного тока, при переменном токе – малые значения коэффициента пульсаций. Люминесцентные лампы проявляют себя с этой точки зрения гораздо хуже, так как коэффициент пульсаций при их использовании выше. Недопустимые значения коэффициента пульсаций могут привести к таким вредным воздействиям на организм человека, как расстройство биологических ритмов, бессонница, депрессия, различным патологиям сердечно-сосудистой системы. Немаловажным является и стробоскопический эффект – кажущаяся “стационарность” движущихся предметов, что может вести к фатальным последствиям [38].

Работа с любым электрооборудованием несет в себе опасность поражения электрическим током. При проведении экспериментов с природным газом электробезопасности следует уделять особое внимание, ведь в воздухе рабочей зоны возможно появление взрывопожароопасных веществ, при определенной концентрации которых в воздухе и появлении искры возможен взрыв или возгорание.

Причинами поражения электрическим током могут послужить прикосновение к токоведущим элементам, ошибочные действия персонала, нарушение изоляции токоведущих элементов, метеорологические условия (удар молнии), авария.

5.1.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Все описанные выше факторы требуют разработки определенных мероприятий по исключению их возникновения и защите от них, которые должны неукоснительно соблюдаться персоналом [39].

Мероприятия по снижению загазованности и защиты организма человека:

1. Исключение источников появления вредных веществ (соблюдение правил эксплуатации, своевременная замена уплотнений оборудования и запорной арматуры).

2. Применение газоанализаторов для контроля загазованности.

3. Вентилирование помещений, в которых возможно появление вредных веществ, для снижения их концентрации в воздухе рабочей зоны.

4. Использование средств индивидуальной защиты (противогазы, респираторы, спецодежда, изолирующие костюмы, рукавицы, перчатки, очки, маски).

5. Исключение необходимости присутствия человека или снижение времени его работы путем автоматизации процессов и применения оборудования для дистанционного управления.

Методы снижения уровня шума в рабочей зоне:

1. Расположение оборудования, являющегося источником шума, на максимально отдаленном от работников расстоянии, иногда – в отдельных блоках или боксах, стенки которых выполняют из материалов, обеспечивающих необходимую звукоизоляцию.

2. Применение средств дистанционного управления рабочим процессом, которые исключают необходимость длительного присутствия рабочего персонала в зоне воздействия акустического шума.

3. В отдельных случаях – использование средств индивидуальной защиты. Для случаев, предусматривающих защиту от шумового загрязнения,

применяются вкладыши, представляющие собой мягкие тампоны, пропитанные смесью парафина и воска, жесткие вкладыши из резины, звукоизолирующие наушники, звукоизолирующие шлемы.

Для поддержания приемлемых микроклиматических условий в помещениях используются система отопления, интенсивность работы которой регулируется в зависимости от сезонности, и система вентиляции. Так, согласно [40], на рабочем месте должна поддерживаться температура от +21 до +23°C в холодное время года и от +22 до +24 – в теплое. Относительная влажность должна находиться в пределах от 40 до 60%, а скорость движения воздуха не должна превышать 0,2 м/с.

При работе в условиях, которые не соответствуют санитарным нормам применяется различная спецодежда и спецобувь, отличающаяся в зависимости от вида работ и времени года.

Необходимые условия освещенности достигаются путем использования как естественного, так и искусственного освещения. Естественное освещение в помещениях обеспечивается наличием необходимого количества окон, но это осуществимо только в дневное время. Для поддержания освещенности в пределах норм темное время суток пользуются искусственным освещением. Во время ремонтных работ используется местное освещение, представляющие собой переносные светильники, работающие от аккумуляторов.

Среди мер по снижению коэффициента пульсации выделяют [39]:

- Использование электронных пускорегулирующих автоматов (ЭПРА), которые преобразуют входную частоту питающей сети до значений, к которым человек уже нечувствителен (свыше 300 Гц);
- Установка в одной точке двух или трёх светильников на разные фазы переменного тока;
- Питание разных ламп многоламповых люминесцентных светильников от разных фаз переменного тока;

- Использование светильников, работающих только от токов частотой 300 Гц и более.

Также должны быть использованы аварийное освещение для продолжения работы при отключении рабочего освещения (используются лампы, для которых применяется автономное питание электроэнергией), эвакуационное освещение для эвакуации людей из помещений при аварийном отключении рабочего освещения, сигнальное освещение для фиксации границ опасных зон.

Для поддержания давления в нормативных пределах необходима установка оборудования для отслеживания давления – манометров, оборудования для поддержания давления в рабочем диапазоне – предохранительные клапаны и регуляторы давления. Также особое внимание следует уделять состоянию трубопроводов и оборудования, не допускать коррозии и других повреждений, своевременно производить осмотры и ремонты, заменять неисправные и выработавшие свой ресурс системы.

Следует опасаться движущихся машин и механизмов, движущихся частей машин и механизмов, соблюдать технику безопасности при работе с ними, использовать средства индивидуальной защиты. Необходимо следовать правилам безопасности и при работе на площадках, находящихся выше уровня земли, находящихся, например, в блоке узла переключения.

Меры защиты от поражения электрическим током [41]:

1. Применение защитного зануления, защитного заземления, защитного отключения.
2. Обеспечение изоляции, ограждение и недоступность электрических цепей.
3. Использование предупредительных плакатов и знаков безопасности.
4. Установка молниеотводов.
5. Проведение инструктажей и обучения персонала безопасным

методам работы с электроприборами.

6. Использование средств индивидуальной защиты: диэлектрических перчаток и бот, диэлектрических резиновых ковриков, инструментов с изолированными ручками.

Методы снижения взрывопожароопасности [42]:

1. Исключение появления источников утечки вредных веществ (соблюдение правил эксплуатации, своевременная замена уплотнений оборудования и запорной арматуры).

2. Вентилирование помещений, в которых возможно появление взрывопожароопасных веществ, для снижения их концентрации в воздухе рабочей зоны.

3. Применение газоанализаторов для контроля загазованности.

4. Использование электрооборудования во взрывобезопасном исполнении.

6. В случае ремонтных работ – использование инструмента в искробезопасном исполнении.

На случай возникновения ситуации, когда предотвратить появление пожара всё же не удалось, помещения должны быть оборудованы огнетушителями и пожарными кранами.

5.2 Экологическая безопасность

5.2.1 Анализ возможного влияния на окружающую среду

Проведение экспериментов с природным газом несет в себе опасность попадания его компонентов в атмосферу. Такая ситуация может возникнуть при нарушениях в работе оборудования, износе уплотнений, повышения давления в трубопроводе и оборудовании выше допустимых пределов. Утечки также могут случаться во время транспортировки газа к месту проведения исследований и во время его закачки в трубопроводную систему испытательного стенда.

Допустимые концентрации веществ, входящими в состав природного газа, в воздухе указаны в таблице 5.1 .

Работа с оборудованием предполагает его своевременное обслуживание и ремонт, замену расходных материалов (металлические изделия, пластиковые и резиновые изделия, в том числе уплотнения, аккумуляторные батареи, осветительные лампы), большое количество бумажной работы, а следовательно образование определенного количества твердых бытовых отходов, которые должны быть подвергнуты сортировке. Часть отходов (макулатура, метизы) может быть вывезена на специализированные полигоны, предназначенные для их захоронения, что не исключает возможности их переработки. Другая же часть (аккумуляторы, пластики, осветительные лампы) подлежат обязательной переработке на специализированных предприятиях для предотвращения попадания опасных веществ (серная кислота, ртуть и др.), являющихся составной частью оборудования, в почву [39].

Работы с использованием природного газа на специальном стенде, служащего для создания необходимых для исследования условий течения, могут являться причиной попадания веществ, входящих в состав газа, таких как углеводороды ($C_6 - C_{10}$), сероводород, меркаптаны, метанол, в сточные воды. Причиной этого могут послужить ремонтные работы, несоблюдение правил эксплуатации оборудования, износ уплотнений оборудования, запорной арматуры, аварии. Предельно допустимые концентрации этих веществ в воде [43] указаны в таблице 5.4:

Таблица 5.4 – Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде,
согласно ГН 2.1.5.1315-03

Вещество	ПДК в воде, мг/м ³	Класс опасности
Меркаптаны	0,0002	IV
Углеводороды C ₅ – C ₁₀	0,1	III
Сероводород	0,003	IV
Метанол	3,0	II

5.2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Для охраны окружающей среды от негативных воздействий необходимо проводить ряд действий, направленных на предотвращение возникновения факторов, способных нанести ущерб или для минимизации их последствий [39]:

Мероприятия по защите атмосферы:

1. Проверка оборудования на прочность и герметичность.
2. Неукоснительное соблюдение согласованных технологических режимов работы оборудования.
3. Своевременная замена уплотнений оборудования и запорной арматуры.
4. Использование системы контроля загазованности.

Для защиты гидросферы следует соблюдать определенные требования и прибегать к превентивным мерам:

1. Исключение появления источников утечки вредных веществ (соблюдение правил эксплуатации, противокоррозионная защита, своевременная замена уплотнений оборудования и запорной арматуры).
2. Своевременная уборка отходов в специально отведенные места с дальнейшей транспортировкой до мест переработки.

Мероприятия по уменьшению негативного влияния на литосферу:

1. Все отходы подлежат селективному сбору, временному хранению на специально отведенных площадках в соответствии с проектом нормативов образования и лимитов размещения отходов и передаче на утилизацию специализированным организациям в соответствии с заключенными договорами.
2. Проверка оборудования на прочность и герметичность.
3. Неукоснительное соблюдение согласованных технологических режимов работы оборудования.
4. Своевременная замена уплотнений оборудования и запорной арматуры.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

Чрезвычайная ситуация — это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь или повлекла за собой человеческие смерти, а также ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [44].

Чрезвычайные ситуации можно разделить на следующие: ЧС стихийного, социального, экологического и техногенного характера.

Как было отмечено ранее, компоненты, входящие в состав природного газа представляют опасность как вредные вещества, влияющие на здоровье человека, так и могут быть причиной взрывов и пожаров, а соответственно и разрушения зданий, оборудования, причинения иного вида материального ущерба и опасности для жизни и здоровья людей, так как компоненты эти являются веществами взрывопожароопасными.

5.3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

К чрезвычайным ситуациям техногенного характера при проведении исследований закономерностей течения природного газа относятся разрывы трубопроводов и сосудов, находящихся под давлением, воспламенение легкогорючих жидкостей (бензин, дизельное топливо, скипидар и т.п.), взрывы скоплений природного газа, загорания пыльных взвесей, аварии на электрических сетях с долгим перерывом в электроснабжении, возгорание и взрывы оборудования.

К ЧС природного характера можно отнести штормовые ветры, ураганы, ливни, сильный град, землетрясения, лесные пожары, оползни и сели. Повреждение зданий и помещений, в которых планируется проведение экспериментов может повлечь нанесение дополнительного

К экологическим ЧС можно отнести превышение предельно допустимых концентраций веществ в атмосфере, почве и воде, недопустимые температурные изменения вследствие деятельности человека, нарушение видового разнообразия животного и растительного мира из-за влияния на места их обитания.

К последней группе социальных ЧС относятся террористические атаки на УПГТ, забастовки рабочего персонала, диверсии и порча оборудования и коммуникация группой лиц ввиду социально-политических мотивов и т.д.

Наиболее частой является ЧС техногенного характера. В основе аварий могут лежать как технические причины (износ оборудования, его разрушение, нарушение технологического процесса, отказ электроники и механических средств предотвращения появления опасных факторов, таких как повышение давления), так и человеческий фактор.

5.3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Для того, чтобы уменьшить вероятность возникновения ЧС и повысить устойчивость объекта проводятся следующие мероприятия [44]:

1. Организация технической диагностики оборудования, коммуникаций, их техническое обслуживание и ремонт.
2. Использование современных приборов контроля и сигнализации.
3. Проведение периодических и внеочередных инструктажей с обслуживающим персоналом, медицинских обследований работников на предмет соответствия их здоровья установленным требованиям.
4. Соблюдение всех правил и требований работы с оборудованием, неукоснительное соблюдение согласованных технологических режимов работы оборудования.

Для предотвращения ЧС социального характера (террористический акт) территория оборудуется системами видеонаблюдения, сигнализации, возможно использование услуг охранных организаций. Персонал периодически проходит инструктажи по способам противодействия преступникам и правилам поведения в подобных ситуациях. Проводятся специальные учения с задействованием в них охранной службы предприятия, МЧС и полиции.

Минимизация последствий ЧС экологического и стихийного характеров обеспечивается еще на стадии проектирования как самих зданий, в которых планируется проведение эксперимента, так и экспериментальной установки. Место расположения и планировка объекта определяются в зависимости от тектонической активности, формы рельефа, свойств грунта, наличия поблизости разного рода растительности. Для защиты от попадания молнии на прилегающей территории возможна установка молниеотвода, а для предотвращения распространения огня как с соседних зданий и

сооружений, так и с используемого здания на соседние, необходимо соблюдение строительных норм и правил [45].

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.4.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Работодатель обязан обеспечить работникам здоровые и безопасные условия труда. Необходимо последовательное снижение показателей производственного травматизма, профессиональных заболеваний, аварийности и загрязнения окружающей среды в результате производственной деятельности; обеспечение постоянного повышения знаний, компетентности и осведомленности работников по вопросам промышленной безопасности, охраны труда и окружающей среды посредством различных форм мотивации, обучения и наставничества.

Все вопросы, связанные с оценкой условий труда на производстве, согласовываются с требованиями ФЗ от 28.12.13 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда», ст.147 ТК РФ и ст.117 ТК РФ. Весь рабочий и инженерно-технический персонал обязуется соблюдать требования ФЗ от 28.12.2013 № 421-ФЗ «О рабочем времени», ст.94 ТК РФ, а их руководители (начальник цеха или лицо, его замещающее) не имеют права нарушать требования Трудового Кодекса Российской Федерации.

5.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Организация рабочего пространства подразумевает под собой расположение предметов на рабочем столе, расстановку оборудования по рабочей зоне, наличие специальных мест под рабочий инструмент, и прочее. Во всех этих случаях должен быть обеспечен не только удобный и быстрый

доступ к оборудованию, но и безопасный. Таким образом, организация рабочего пространства должна отвечать критерию безопасности вкупе с эффективностью. Должен быть обеспечен наиболее удобный и быстрый доступ к оборудованию.

Численный эксперимент предполагает проведение большого количества вычислительных операций с использованием компьютера, соответственно длительное нахождение в сидячем положении и работу с системами ввода и вывода информации. Все это регулируется требованиями нормативной документации [47,48]:

Рабочее место должно обеспечивать оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать возможность размещения на рабочей поверхности необходимого комплекта оборудования и документов с учетом характера выполняемой работы. Рабочая поверхность стола не должна иметь острых углов и краев. Покрытие рабочей поверхности стола должно быть из диффузно отражающего материала с коэффициентом отражения 0,45-0,50.

Рабочий стул (кресло) должен обеспечивать поддержание физиологически рациональной рабочей позы оператора в процессе трудовой деятельности, создавать условия для изменения позы с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины, а также для исключения нарушения циркуляции крови в нижних конечностях.

Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову. Дисплей на рабочем месте должен быть установлен ниже уровня глаз оператора. Угол наблюдения экрана оператором относительно горизонтальной линии взгляда не должен превышать 60°.

Клавиатура на рабочем месте оператора должна располагаться так, чтобы обеспечивалась оптимальная видимость экрана. Клавиатура должна иметь возможность свободного перемещения. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии от 100 до 300 мм от переднего края, обращенного к оператору, или на специальной регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

При проведении реальных экспериментов в работе со стендом должны обеспечиваться следующие принципы [49]:

Система должна быть управляема оператором. Должен быть обеспечен беспрепятственный доступ к органам управления, необходимые для управления манипулирования тела не должны быть неудобными для оператора

Должен быть обеспечен простой доступ к информации, необходимо, чтобы показания индикаторов находились в поле зрения оператора.

Также должны соблюдаться условия предотвращения влияния вредных и опасных для здоровья человека факторов, подробный анализ которых приведен в предыдущих пунктах главы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты представленных исследований, проиллюстрированные на рисунках 3.1 – 3.6, позволяют сделать вывод о том, что при моделировании параметров потока в условиях обычной цилиндрической трубы, все три исследуемые модели турбулентности (standard $k - \varepsilon$ (B. Launder) [24], RNG $k - \varepsilon$ (V. Yachot) [25], realizable $k - \varepsilon$ (T. Shih) [26]) показывают схожие, достаточно приемлемые результаты. Однако случаи ускоренного движения, которое является следствием пространственной деформации в сужающейся конфузорной секции, выявляют различия между моделями.

Выяснено, что скорость потока и ее пульсационные составляющие, масштаб турбулентности, кинетическая энергия турбулентности вычисляются с разной точностью. Можно заметить, что standard и RNG модели имеют схожие результаты, отличные от результатов realizable модели. Но наиболее близкие к экспериментальным значениям параметров все же показывает realizable $k - \varepsilon$ -модель турбулентности, хотя в литературе можно найти данные, когда все эти три модели проявляют себя не с лучшей стороны [27].

Как представляется возможным, подобные результаты были получены по причине разного способа расчета коэффициента C_μ , присутствующего в уравнениях моделирования турбулентной вязкости (1.13), а так же в связи пульсационных характеристик с кинетической энергией турбулентности и ее диссипации (1.13). Так, для standard и RNG моделей, он представляет собой константу, для realizable – для его расчета вводится дополнительная функция (3.12). Поэтому, исходя из полученных результатов, а также данных [1] можно сделать предположение, что в конфузоре, в отличие от обычной цилиндрической трубы, для которой эмпирически доказана гипотеза о том, что вклад пульсационных характеристик в кинетическую энергию турбулентности (1.8) остается

пропорционально постоянным или меняется незначительно, имеет место перераспределение вкладов этих пульсационных составляющих скорости.

Моделирование температурных характеристик потока в рассматриваемых случаях так же показывает преимущество *realizable* модели над RNG и *standard*. Что, возможно, связано с лучшими результатами в моделировании динамических параметров потока.

При рассмотрении связи характеристик потока от геометрии конфузорной секции (исходя из анализа ранее проведенных исследований [1, 21] и численного моделирования, проведенного в данной работе), получена зависимость длины ламинаризируемой области течения от угла наклона конфузорной секции. Замечено, что размер области увеличивается при увеличении угла наклона.

Поведение кинетической энергии турбулентности по поперечному сечению дает возможность учесть изменение механизмов переноса в балансе кинетических энергий турбулентных вихрей. В частности, при входе в конфузорную секцию профиль удовлетворяет условиям развитого течения. Далее, проходя через конфузор, возникают особенности, вызванные ускорением потока вследствие увеличения поля давления и оттеснением границы толщины вязкого подслоя вглубь ядра. Это ведет к снижению пика кинетической энергии (смотри линии 100мм, 200 мм на рисунке 3.2). Причем, попадая в секцию постоянного сечения, наблюдается возрастание турбулентных пульсаций в потоке, что восстанавливает структуру турбулентных вихрей (смотри линии 400мм, 800мм на рисунке 3.2). Такой сложный механизм из-за подавления и восстановления пульсационной структуры потока выбранными моделями в рамках изотропного значения турбулентной вязкости вполне удовлетворительно предсказывается лишь моделью *realizable* в сравнении с данными [21] в силу более тонкого моделирования пристеночных процессов с низкими значениями турбулентности. Однако расчетами выявлено, что при более значительных

углах наклона образующей поверхности конфузора к оси течения ($\beta > 8/200$) двухпараметрические модели вносят заметную погрешность в расчет структуры течения и его интегральных параметров (критерий Нуссельта, гидравлическое сопротивление) вследствие доминирования механизмов анизотропии, что позволяет утверждать, что при прогнозе вихревой неустойчивости в каналах сложной геометрии с учетом (без) теплообмена требуется коррекция указанной модели на прогноз анизотропных свойств турбулентного течения.

Заметим, что в выбранном диапазоне определяющих параметров весьма существенна задача о турбулентном теплообмене, которая требует повышенного внимания в моделировании составляющих вектора плотности турбулентного $(\overline{u_i' T'})$ теплового потока. Расчетами установлено, что при значениях β от 4/200 и выше наблюдается интенсификация процесса гашения турбулентного переноса в радиальном направлении. Следовательно, аналитические зависимости к определению коэффициента турбулентной теплопроводности с функциональными связями для числа Прандтля (замыкания Буссинеска) не вполне корректны. Однако можно утверждать, что все двухпараметрические динамические модели успешны в прогнозе эффектов ламинаризации на небольших углах сужения ($\beta < 8/200$) с различными значениями формулировок зависимости к определению турбулентного числа Прандтля. Расчеты утверждают, что турбулентный теплообмен, предсказанный в рамках двухпараметрических динамических и двухпараметрических тепловых моделей, будет более эффективен, что позволит использовать в расчетах полуэмпирические модели, широко опробованные к прогнозу задач нефтегазовой гидродинамики, и отказаться от громоздких формулировок в определении анизотропных турбулентных течений в рамках RANS-метода с полными транспортными уравнениями для турбулентных потоков и напряжений Рейнольдса [28]. Последнее существенно сэкономит затраты на проведение вычислительных расчетов

потоков с учетом изменений компонентного состава углеводородных сред, что характерно для трубопроводного транспорта и позволит вскрыть механизмы в изменениях поля скорости, температуры на таких участках трубопровода, где возникают выраженные процессы перехода кинетической энергии в тепловую, увеличивается роли диссипативных эффектов, характерная для тупиковых ответвлений.

На рисунке 3.3 представлена оригинальная информация о поведении интегрального масштаба энергосодержащих вихрей, который является физическим параметром в отличие от скорости диссипации и позволяющим анализировать картину течения о размерах турбулентных вихрей в переходных процессах и более успешно моделировать на его основе низкорейнольдсовые процессы (вырождение турбулентности) характерные для ламинаризации.

Проведенный анализ изменения механизмов диффузии, конвекции, диссипации турбулентных вихрей в развивающихся переходных течениях в трубопроводах в рамках динамических двухпараметрических моделей группы $k-\varepsilon$ и данные расчетов могут расширить банк данных к тестированию новых турбулентных моделей полуэмпирической теории турбулентности и могут дать сведения к оптимизации работы аппаратов, управляющих вихревой неустойчивостью в трубопроводном транспорте.

Была рассчитана стоимость проведения численного и физического экспериментов с учетом стоимости сборки испытательного стенда, приобретения измерительной аппаратуры и программного обеспечения и выяснено, что стоимость проведения численных экспериментов оказалась дешевле. Приведены опасные и вредные производственные факторы, которые могут возникнуть при проведении экспериментов, перечислены мероприятия по охране труда и промышленной безопасности.

На основании этих данных уже рекомендовать к использованию для моделирования ускоряющихся вследствие пространственной деформации

течений realizable $k - \varepsilon$ модель турбулентности. В дальнейшем планируется более подробное изучение влияния всевозможных геометрических особенностей на параметры потоков с использованием других моделей турбулентности, и, возможно, разработки собственной модели, основываясь на полученных закономерностях с целью разработки рекомендаций по конструированию геометрии проточной части каналов.

Список использованных источников

1. Ковальногов Н. Н. Прикладная механика жидкости и газа. Ульяновск УлГТУ, 2010. – 219 с.
2. Теория тепломассообмена. Учебник для вузов (под ред. А.И. Леонтьева) 2-е изд. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 389с.
3. Калинин Э.К., Дрейцер А.Г. Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1990. – 247с.
4. А.А. Аникеев, А.М. Молчанов, Д.С. Янышев Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики. Москва: Либроком, 2010. – 152 с.
5. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие, Балт. ГТУ. СПб., 2001. 108 с.
6. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
7. Харламов С.Н и др. Математические модели течения и теплообмена во внутренних задачах динамики вязкого газа. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. – 187 с.
8. Сахнов А. Ю. Пограничный слой с асимптотическим отрицательным градиентом давления: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск: ФГБУН Институт теплофизики им. С. С. Кутеладзе СО РАН, 2012. – 20 с.
9. Назарчук М. М., Ковецкая М. М., Обратный переход турбулентного течения в ламинарное. Киев: Наук. Думка, 1974. – 94с.
10. Дейч М. Е., Лазарев Л. Я. Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный // ИФЖ. 1964. Т.7. №4. С. 18-24.
11. Леонтьев А. И., Обливин А. Н. Исследование сопротивления и теплообмена при турбулентном течении воздуха в осесимметричных каналах с продольным градиентом давления // ПМТФ. 1961. №5. С. 16-25.

12. Репик Е. У., Кузнецов В. К. Опытное определение коэффициента поверхностного трения в пограничном слое с продольным градиентом давления // ИЖФ. 1976. №5. С. 793-802.
13. Бэк Л.Г. Ламинаризация турбулентного пограничного слоя при течении в сопле // ПМТФ. 1971. №4. С. 194-196.
14. Бэк Л. Г., Массье П. Ф. Исследование течения и конвективного теплообмена при течении в коническом сверхзвуковом сопле // РТК. 1967. №10. С. 191-202.
15. Шишов Е. В., Афанасьев В. Н. Структура турбулентного пограничного слоя и теплообмен в ускоренном потоке // Исследование процессов тепло- и массообмена: Тр. МВТУ. 1979. №302. С. 5-30.
16. Леонтьев А. И. Исследование пульсационной структуры теплового турбулентного пограничного слоя в условиях ламинаризации потока. // Тепломассообмен. Минск. 1976. Т.1. С. 77-86.
17. Щукин В.К., Ковальногов Н. Н. Турбулентная структура, теплопередача и трение внутренних осесимметричных потоков с большими отрицательными продольными градиентами давления. // Тепломассообмен. Минск. 1984. Т.1. С. 175-179.
18. Красавин В. М. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа с отрицательным градиентом давления в проточных частях двигателей летательных аппаратов. Казань: КАИ. 1977. 17 с.
19. Бубенчиков А. М., Харламов С. Н., Трение и теплообмен при течении газа в канале с конфузорной секцией. // Изв. СО АН СССР. Сер. Тех. Н. 1989. №3. С. 93-98.
20. Tanaka, H. and Shimizu, J., "Laminarization in Low Reynolds Number Turbulent Duct Flows," ASME JOURNAL OF HEAT TRANSFER, Vol. 99, 1977, pp.682-684
21. Влияние ламинаризация потока и его последующей турбулизации на теплообмен в случае течения при малых числах Рейнольдса

в канале, состоящем из конфузорной секции и следующей за ней секции с постоянным поперечным сечением / Х. Танака, Х. Кавамура, А. Татено, С. Хатамия // Теплопередача (Труды американского общества инженеров-механиков). — 1982. — № 2. — С. 144-153.

22. Tanaka, H., Tsuge, A., Hirata, M. "Effects of Buoyancy and of Acceleration Owing to Thermal Expansion on Forced Turbulent Convection in Vertical Circular Tubes," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 16, 1973, pp. 1267-1288.

23. Агинец Р.В., Парфенов Д.В. Экспериментальные исследования нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов при заполнении газом магистрального газопровода «Сахалин–Хабаровск–Владивосток» // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. 2014. №3. Стр. 50-53

24. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. 1974. V.3. P. 269.

25. Yachot V., Orszag S. A. Relaminarization group analysis of turbulence // J. Sci. Comput. 1986. V. 1. P. 1.

26. Shih T., Liou W. W. A new k - ϵ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows // Comput. Fluids. 1995. V. 24. P. 227.

27. Войтович Р., Липин А. А. О возможности использования различных моделей турбулентности для расчета гидродинамических и энергетических характеристик аппаратов с турбинными мешалками. Теоретические основы химической технологии, 2014, том 48, № 4, с. 386–402.

28. Бубенчиков А. М., Харламов С. Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. - Томск: Изд.-во ТГУ, 2001. – 448с

29. Налоговый кодекс Российской Федерации ред. от 28.12.2016

30. Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 N 1 (ред. от 07.07.2016) "О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы"

31. Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования» ред. от 19.12.2016

32. Федеральный закон от 03.07.2016 N 250-ФЗ (ред. от 19.12.2016) «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных законодательных актов (положений законодательных актов) Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона «О внесении изменений в части первую и вторую Налогового кодекса Российской Федерации в связи с передачей налоговым органам полномочий по администрированию страховых взносов на обязательное пенсионное, социальное и медицинское страхование»

33. Федеральный закон от 14.12.15 N 362-ФЗ «О страховых тарифах на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваниях»

34. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 25.12.12 N 625н «Об утверждении Классификации видов экономической деятельности по классам профессионального риска»

35. ГН 2.2.5.1313–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы.

36. ГОСТ 30852.16-2002 Электрооборудование взрывозащищенное. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 23 с.

37. ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 27с.

38. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 68с.

39. Русак О.Н., Малаян К.Р., Занько Н.Г. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие. 3-е изд., испр. и доп. / Под ред. О.Н. Русака. - СПб.: Издательство «Лань», 2000. - 448 с., ил.
40. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 32с.
41. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
42. ГОСТ 12.1.010–76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1976. – 7с.
43. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования
44. ГОСТ Р 22.0.01-2016. Безопасность в ЧС. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 11с.
45. ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения. – Москва: Госстандарт России, 1994. – 14с.
46. Трудовой кодекс Российской Федерации ред. от 03.07.2016
47. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 8с.
48. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – Москва: Госстандарт России, 1996. – 15с.
49. ГОСТ EN 894-1-2012. Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 1. Общие руководящие принципы при взаимодействии оператора с индикаторами и органами управления. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 22с.

Приложение А

(обязательное)

Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке

CALCULATION

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5А	Фатьянов Дмитрий Сергеевич		

Консультант кафедры ТХНГ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Харламов Сергей Николаевич	д.ф.-м.н, профессор		

Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Коротченко Татьяна Валериевна	К.ф.н.		

3 CALCULATION

3.1 The calculation of dynamic and thermal parameters. Turbulence models used to conduct numerical simulations

Simulation of the vortex processes observed during the motion of continuum is a complex and time-consuming task. The choice of a turbulence model is one of key factors affecting the accuracy of results. At present, there is no common approach to describe turbulence effects. Different models of turbulence use various empirical coefficients and they are not able to describe the entire spectrum of phenomena occurring in the fluid. All these models have their own advantages and disadvantages, which can be expressed in terms of calculation speed and calculation quality. Some models efficiently describe the near-wall effects, but as for developed turbulence it is more suitable to use other models.

It was decided to use the ‘k-ε’-based models for this study as the most popular ones, which are included in all commercial software packages used in hydrodynamic modeling. Three different k – ε models of turbulence were used: standard k - ε [24], RNG k - ε [25] and realizable k-ε model [26]. The ground of these models is continuity and transport equations, and here they are added by two additional equations, i.e. the turbulent kinetic energy (k) equation and the rate of turbulent energy dissipation (ε) equation.

The standard k-ε model contains the following k and ε equations [27]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k(S_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1(S_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2(S_{k-\varepsilon})} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.2)$$

Here G_k is a term used to describe the formation of the turbulence kinetic energy due to the average velocity gradient:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (3.3)$$

Turbulent viscosity μ_t is a function of k and ε :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

$\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}$ and $\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}$ are turbulent Prandtl numbers of k and ε correspondently. The values of empirical constants are as follows:

$$C_{\mu(S_{k-\varepsilon})} = 0,09, \quad C_{1(S_{k-\varepsilon})} = 1,44, \quad C_{2(S_{k-\varepsilon})} = 1,92, \quad \sigma_{k(S_{k-\varepsilon})} = 1, \\ \sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})} = 1,3.$$

The RNG k - ε turbulence model was obtained using a special statistical technique, which is called the renormalization group (RNG) method. The additional term R_ε is included into the equation for the dissipation rate of turbulent energy ε . The term changes the values of the source term and greatly improves the calculation accuracy of flows with rapidly changing parameters.

For that case the equations for k and ε have the following form [27]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha_{k(RNG_{k-\varepsilon})} \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1(S_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2(S_{k-\varepsilon})} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (3.6)$$

Here:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.7)$$

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ are inverse effective Prandtl numbers, which are included into equations of k and ε .

The source term should be calculated in the way described below.

$$R_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} = \frac{R_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.8)$$

$$\text{Here: } \eta = S \frac{k}{\varepsilon}; \quad S = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}; \quad \bar{S}_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right); \quad \eta_0 = 4,38;$$

$$\beta = 0,012.$$

Constant values of turbulence model described below have been obtained in frameworks of RNG theory.

$$C_{\mu(RNG_{k-\varepsilon})} = 0,0845, \quad C_{1(RNG_{k-\varepsilon})} = 1,42, \quad C_{2(RNG_{k-\varepsilon})} = 1,68, \\ \alpha_{k(RNG_{k-\varepsilon})} = 1,393, \quad \alpha_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} = 1,393.$$

Realizable k - ε model differs from standard k - ε and RNG k - ε models [27] because of two important innovations. First, the transport equation for the dissipation rate of the turbulent energy (ε) was obtained in a new form. It is obtained from the exact transport equation for the root-mean-square deviation of the velocity. Secondly, a special C_μ function is introduced instead of the constant C_μ for other models, and this function directly affects the calculation of turbulent viscosity and other flow parameters.

In realizable k- ε models, the equations for k and ε have the following form [25]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k(R_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon(R_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \rho C_{1(R_{k-\varepsilon})} S \varepsilon - \rho C_{2(R_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (3.10)$$

$$\text{here } C_{1(R_{k-\varepsilon})} = \max \left(0,43; \frac{\eta}{\eta+5} \right), \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}};$$

$$\bar{S}_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.11)$$

The turbulent viscosity is calculated using the equation (3.4), however, the special function C_μ used in the model as it was already mentioned:

$$C_{\mu(R_{k-\varepsilon})} = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (3.12)$$

Here

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.13)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.14)$$

$\bar{\Omega}_{ij}$ is an average speed of tensor rotation for rotating reference system with angular velocity ω_k .

A_0 and A_S are special coefficients expressed in the following form:

$$A_0 = 4,04 ; A_S = \sqrt{6}\cos\phi,$$

Here

$$\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W); W = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

$$\bar{S}_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

Other constant values of realizable $k-\varepsilon$ are as follows:

$$C_{2(R_{k-\varepsilon})} = 1,9, \quad \sigma_{k(R_{k-\varepsilon})} = 1, \quad \sigma_{\varepsilon(R_{k-\varepsilon})} = 1,2.$$

3.2 Research object and boundary conditions

The problem of nonisothermal motion of a one-component gas in a channel with confuser section was solved. A series of experiments was performed for various configurations of geometry and boundary conditions. The calculation parameters were based on previous research [1, 21].

Calculations were carried out within the framework of a stationary problem.

It was assumed for every numerical experiment that the fluid temperature at the inlet is equally distributed over the cross-section, and the wall temperature is constant over the surface.

The first part of numerical experiments was based on [21]. The angle between forming surface and the pipeline axis took values from 1 to 5 degrees. The interval of Reynolds number (Re) was from 1 up to 2. The difference between wall and fluid temperatures was 5°C.

Another series of experiments was based on Kovalnogov's research data [1]. Here the angle between forming surface and the pipeline axis was 15, 30 and

45 degrees. The Reynolds number (Re) took values from $1.35 \cdot 10^4$ to $2.1 \cdot 10^4$. The inlet gas temperature was equal to the wall temperature and it was 293 K.

The dynamic and thermal parameters of the flow were analyzed in several cross-sections. In order to determine the prediction accuracy of each turbulence model, the results were compared with the data of physical experiments with accelerating flows

Simulation was carried out in the software package Ansys Fluent 16.2.

3.3. Results of the research and discussion

The numerical simulation of the accelerated compressible flows in the confuser section was conducted. The results of modeling the various dynamic and temperature parameters of the flow are presented below. All results were obtained using three $k - \varepsilon$ turbulence models (standard, RNG and realizable).

One of the important parameters describing the fluid's turbulent motion is the turbulence kinetic energy (k).

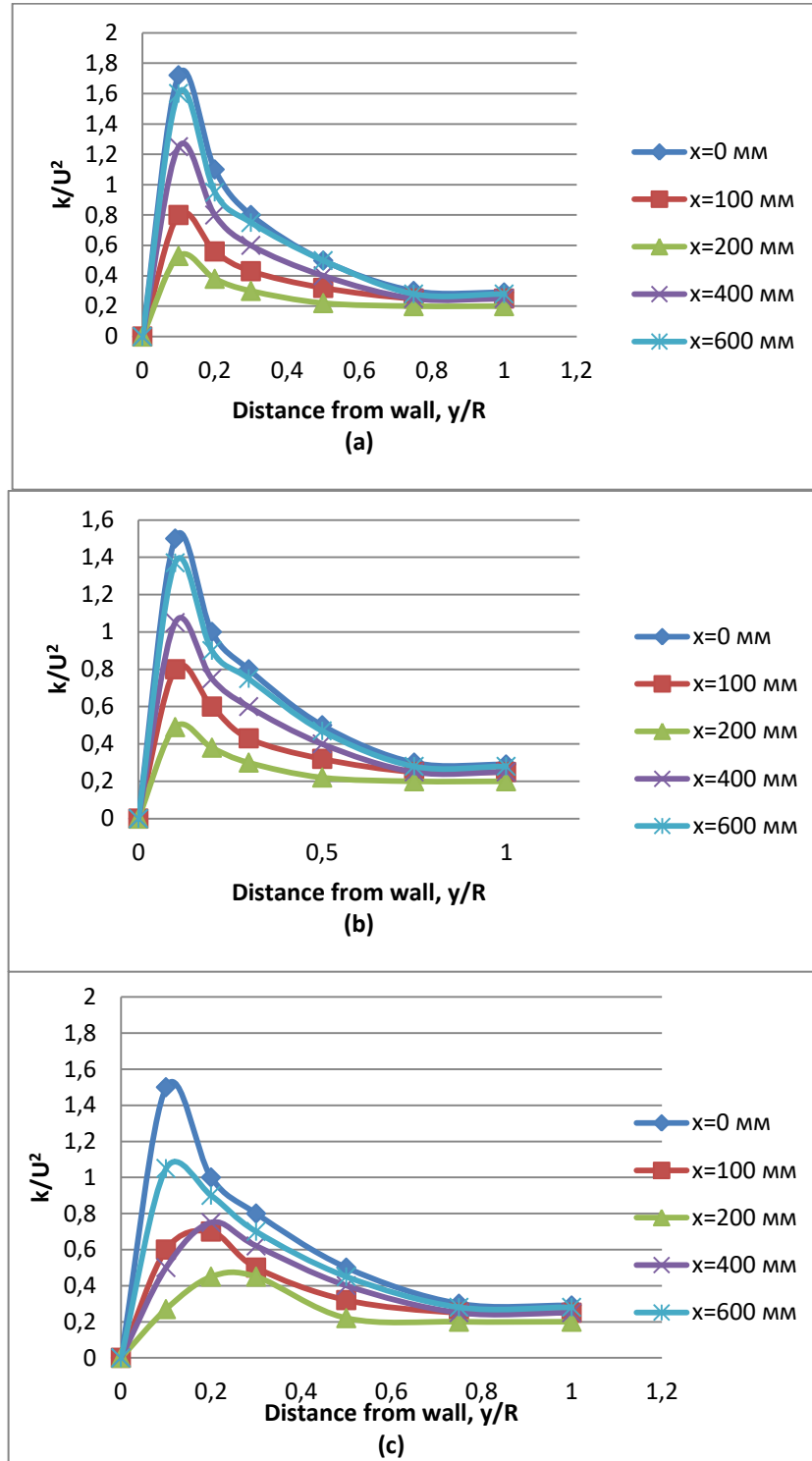


Figure 3.2 – Deformation of kinetic turbulent energy vs the distance from the beginning of the confuser section for $\beta=8/200$, $Re=10000$. a – standard $k-\varepsilon$ model, b – RNG $k-\varepsilon$ model, c – realizable $k-\varepsilon$ model

Figure 3.2 shows that there is some mismatch between the values calculated with different models.

The absolute value of energy increases in all cases. Relative values decrease from section 1 to section 3. Even in the pre-confuser cylindrical part of the channel the standard model calculates the values of the turbulent kinetic energy so that they are slightly over the values calculated with RNG and realizable models.

Moreover, it is easy to mention that the realizable model shows the increase in the thickness of the viscous sublayer during the laminarization process, which is not observed when modeling of the flow is provided with the RNG and standard models. In all cases, realizable model gives greater compliance with physical experiment data [21] in comparison with other models.

In pre-confuser section each model shows similar result, but the standard model shows a slightly less laminar velocity profile than the RNG and realizable models after the confuser section. It is also noticeable that in the after-convergent section the standard and RNG models show the velocity profile of the type, which is characteristic for turbulent flows.

There are significant differences in the simulation of the velocity pulsation components (Fig. 3.3).

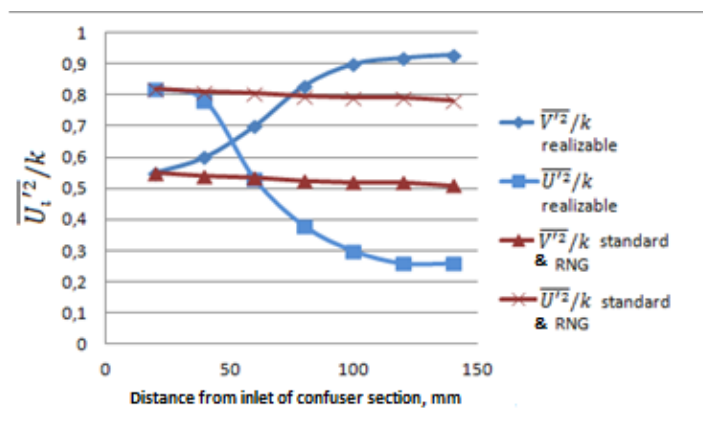


Figure 3.3 – The change of pulsation velocities vs the length of confuser section (among the axis).

k-e turbulent models do not calculate such a parameter of turbulent flows as turbulence scale L , the physical meaning of which is the abstraction, describing volumes of fluid, in which all particles have the same velocity at the considered timepoint. It was hand calculated on the basis of the data obtained from the software package Ansys Fluent. The following formula was used:

$$L = C_d \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

Figure 3.4 shows that all models predict a decrease in both absolute and relative values of the turbulence scale L from cross section 1 to cross section 3 (Fig. 2.1). They also predict the restoration of its relative magnitude at some distance from the end of the converging section. For standard and RNG models this occurs at a distance of about 0.6 m from the end of confuser, the realizable model shows that recovery to initial value of L occurs later.

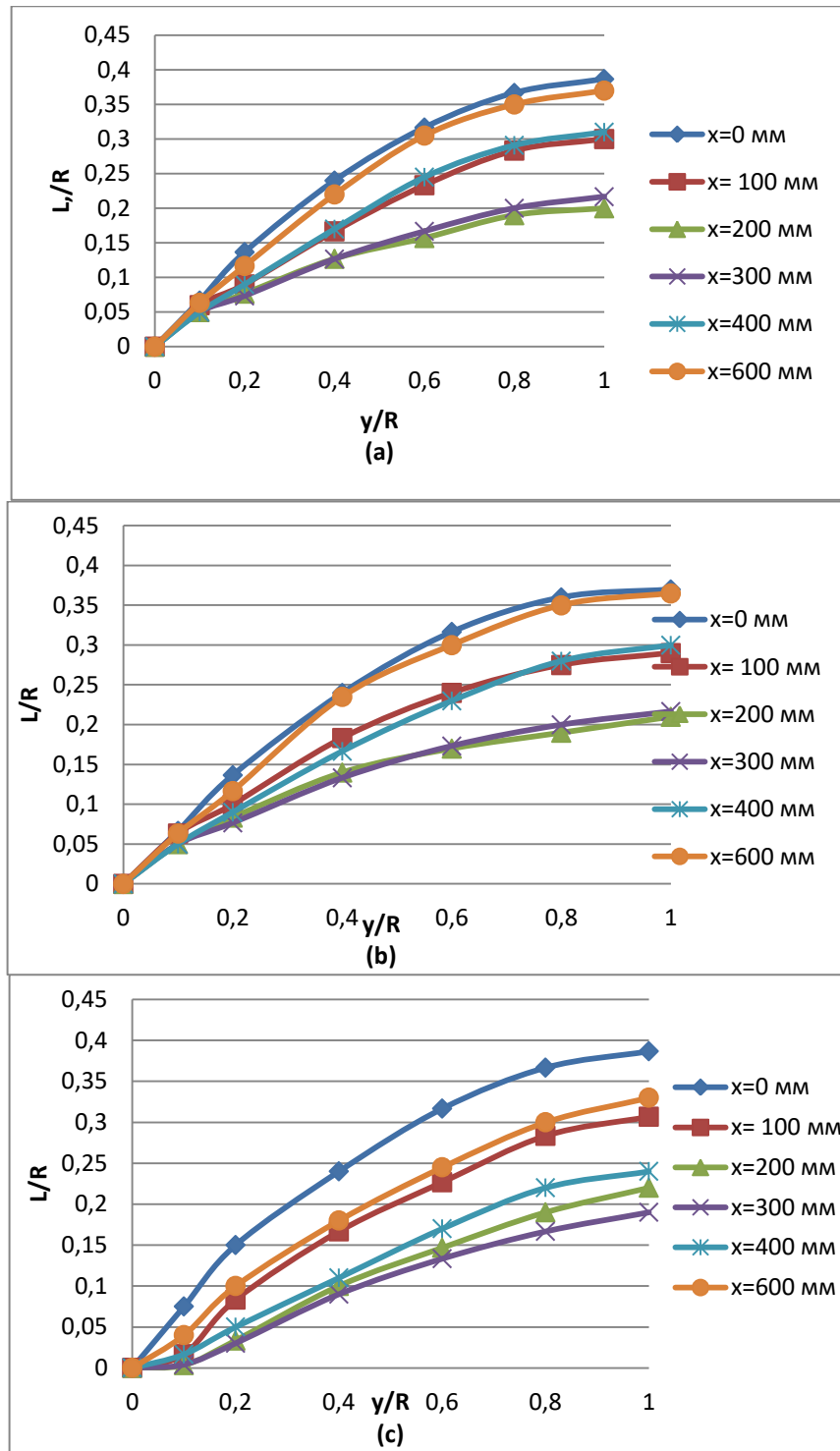


Figure 3.4 – Deformation of calculated turbulence scales in dependence on the length from the beginning of confuser section for $\beta=8/200$ and $Re=10000$.

a – standard $k-\epsilon$ model, b – RNG $k-\epsilon$ model, c – realizable $k-\epsilon$ model.

It should also be noted that, in addition to the differences in decreased L-values and in the rate of its restoration, the nature of its decrease also differs. So, the realizable model firstly shows the greatest change in L value at the near-wall area both in cases of its decreasing and increasing. In the RNG and standard models the changes occur uniformly over the entire section.

It was decided to calculate the Nusselt number (Nu) values and compare the obtained result with the data of known experiments [21] in order to obtain an understanding of turbulence models predictable possibilities in case of thermal parameters calculating.

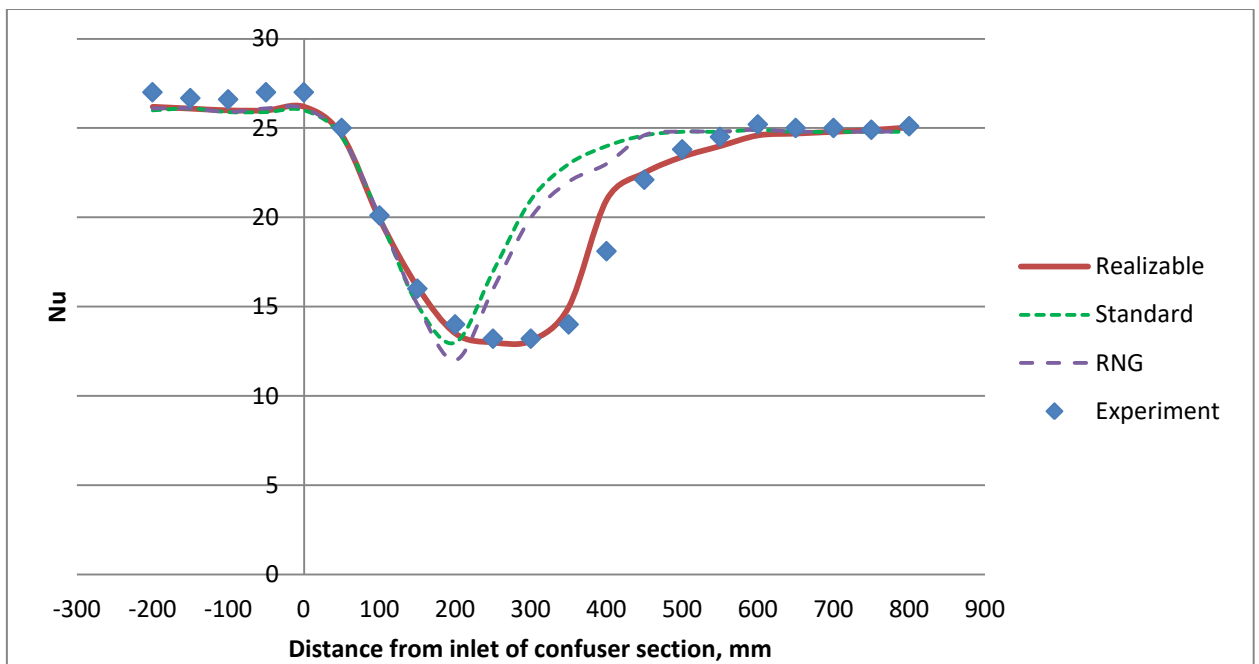


Figure 3.5 – Comparison of calculation results ‘Nusselt number’ vs ‘pipe length’ for various turbulent models and values $\beta=8/200$ and $Re=10000$.

It is possible to mention that the calculated data of the realizable $k - \varepsilon$ model is closer to the real experimental values. Hypothetically it could be caused with better results of modeling the dynamic flow parameters.

The simulation of flow parameters in confusers with different angles β (from $4/200$ to $8/200$) (Figure 3.6) shows that the increase of β causes laminarization of the flow to increase. At the same time, there is a growth of the distance to the point at which the Nusselt number Nu assumes a minimum value

and after which the process of turbulent flow restoration begins.

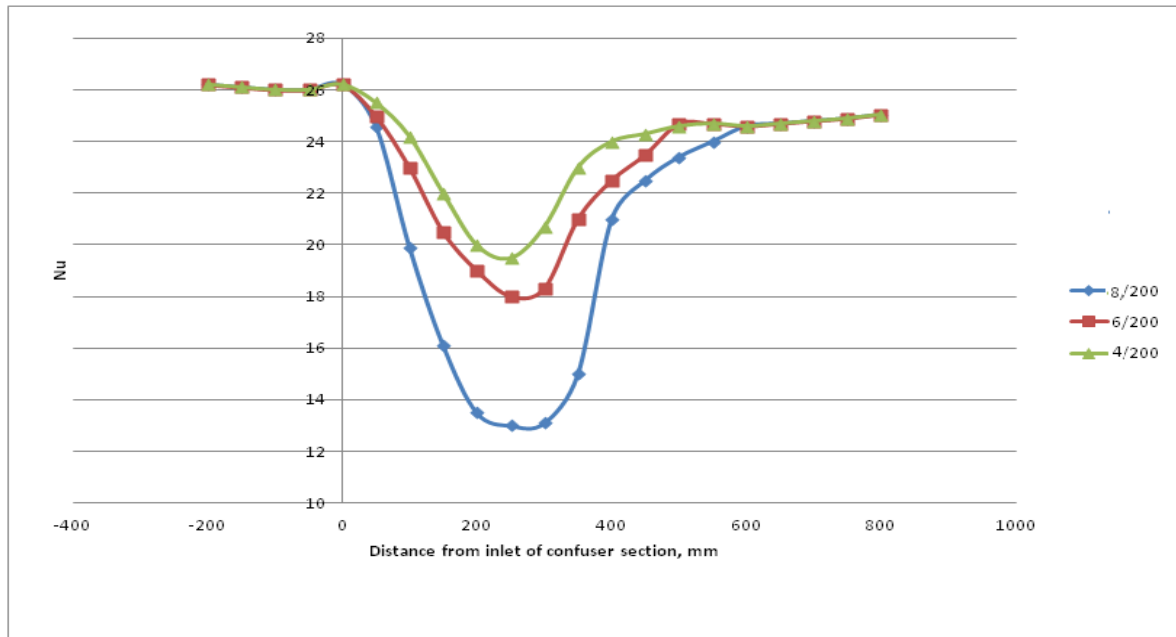


Figure 3.6 – Comparison of the calculation results ‘Nusselt number’ vs ‘pipe length’, which obtained using the realizable k- ε model for different values of β (from 4/200 to 8/200) at $Re = 10000$.

Conclusions

Thus, the results of the presented research (see Figures 3.1 - 3.6) allow drawing the conclusion that all three turbulence models (standard k - ε [24], RNG k - ε [25], Realizable k - ε [26]) show similar and fairly acceptable results in modeling the flow parameters under the conditions of a conventional cylindrical tubes. However, the cases of accelerated motion, caused with flow compression in the converging confuser section, reveal differences between the models.

Such parameters as the flow velocity and its pulsation components, the scale of turbulence, the kinetic energy of turbulence are calculated with different accuracy. It can be noticed that the standard and RNG models have relatively similar results, which differs from the results of the realizable model. But still a realizable k- ε turbulent model shows the closest match with experimental values of parameters, although one can find examples of inappropriate behavior for each model [27].

Hypothetically such form of results is obtained due to the different way of calculating the coefficient C_μ , which is a component of the turbulent viscosity modeling equations (3.4). Another possible reason is the connection of the pulsation characteristics with the turbulent kinetic energy and its dissipation (1.13). So, C_μ is a constant value for standard and RNG models, but for realizable model an additional function (3.12) is introduced for C_μ calculation. Therefore, based on the obtained results and the data of [1], it can be assumed that there is a redistribution of pulsating velocity components in confusers, in contrast to a conventional cylindrical tube, for which empirically proved that the contribution of the pulsation characteristics to the kinetic turbulence energy (1.8) remains constant or changes insignificantly.

The realizable model shows excellent results in modeling the temperature characteristics of the flow in confuser sections. The probable reason is related to the suitable results in modeling the dynamic flow parameters.

The analysis of relationship between flow characteristics and the geometry of the confuser section (based on an analysis of earlier studies [1, 21] and numerical modeling carried out in this research) allows to obtain the dependency of the laminarized region length on the slope angle of the confuser section. It is noted that the size of the region increases due to the increase of inclination angle.

On the basis of these data, it is possible to give some recommendations in the design of flow channels for various technological processes, but in the future it is planned to study in detail the influence of various geometric properties on the flow parameters using other turbulence models and the model developed on our own research.