

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность и долговечность газонепроводов и хранилищ»
 Отделение нефтегазового дела
 УДК: 621.643.063:533.697.3

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Влияние эффекта Ранка-Хилша на стояк отбора газа с ДУ 300 мм»

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6Б	Федотов Эркэн Николаевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОНД ИШПР	Харламов С.Н.	д.ф.-м.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН ШБИП	Макашева Ю.С.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Немцова О.А.			

Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Коротченко Т.В.	к.ф.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Бурков П.В.	д.т.н, профессор		

Планируемые результаты обучения по ООП

<i>Код результ ата</i>	<i>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</i>	<i>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</i>
В соответствии с универсальными, общепрофессиональными и профессиональными компетенциями		
Общие по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело»		
P1	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
P2	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</i> , <i>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
<i>в области производственно-технологической деятельности</i>		
P3	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
P4	<i>Внедрять, эксплуатировать и обслуживать</i> современные машины и механизмы 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
<i>в области экспериментально-исследовательской деятельности</i>		
P5	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

<i>Код результ ата</i>	<i>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</i>	<i>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</i>
<i>в области проектной деятельности</i>		
P6	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; (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е)
<i>в области организационно-управленческой деятельности</i>		
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и оперативные планы всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, готовность нести ответственность за результаты работы	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; (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е)
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности; активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности	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; (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е)
Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»		
P9	Организация технологического сопровождения планирования и оптимизации потоков углеводородного сырья и режимов работы технологических объектов	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-6, ОПК-7, ПК-4, ПК-7, ПК-13), требования профессионального стандарта 19.008</i> <i>Специалист по диспетчерско-технологическому управлению нефтегазовой отрасли</i>
P10	Организация ТОиР, ДО нефте- и газотранспортного оборудования	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-5, ОПК-6, ПК-9, ПК-11), требования профессионального стандарта 19.013 "</i> <i>Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования"</i>
P11	Повышение надежности, долговечности, эффективности газотранспортного оборудования	<i>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ОПК-4, ОПК-5, ПК-9, ПК-14), требования профессионального стандарта 19.013 "</i> <i>Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования"</i>

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

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»
 Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП ОНД ИШПР
 _____ Бурков П.В.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ6Б	Федотову Эркэну Николаевичу

Тема работы:

«Влияние эффекта Ранка-Хилша на стояк отбора газа с ДУ 300 мм»
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования: закономерности теплогидрогазодинамических процессов нестационарного течения в тройнике стояка отбора импульсного газа; Сырьё: газообразная углеводородная среда (метан) Трубопроводная система и перекачиваемый материал: диапазон изменения чисел Рейнольдса Re – от 10^4 до 10^5 ; диаметр участков трубы - от 50 до 300 мм.
---------------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Литературный обзор с целью выяснения достижений мировой науки техники в исследованиях для рассматриваемых процессов о состоянии физико-математического моделирования задачи о течении вязких сред в трубопроводе со сложной поверхностью стенки. Задача исследования: анализ закономерности теплогазодинамических процессов нестационарного течения в тройнике стояка отбора импульсного газа; разработка эффективной математической модели с целью предсказания изменений параметров структуры во внутренних развивающихся течениях; 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)	
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Макашева Ю.С. Ассистент ОСТН ШБИП
«Социальная ответственность»	Немцова О.А. Ассистент ООД ШБИП
Разделы, выполненные на иностранном языке	Коротченко Т.В. Доцент ОИЯ ШБИП
Названия раздела, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6Б	Федотов Эркэн Николаевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ6Б	Федотову Эркэну Николаевичу

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

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	«Оценка затрат на проведение научно-исследовательской работы «Экономическое обоснование проведения научно-технического исследования»
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	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 2.07.2009 в редакции от 19.12.2016г..
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	1. Обоснование перспективности проведения исследования с целью выявления термодинамических закономерностей течения для последующего повышения технико-экономических показателей технологических процессов
2. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	1. Определение основных статей расходов на реализацию проекта; 2. Составление сметы затрат; 3. Формирование бюджета для проведения научно-исследовательского проекта.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН ШБИП	Макашева Ю.С.			16.03.2018г

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6Б	Федотов Эркэн Николаевич		16.03.2018г

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ6Б	Федотову Эркэну Николаевичу

Институт	Природных ресурсов	Кафедра	Транспорта и хранения нефти и газа
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело» профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	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.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ вредных факторов при установке нейтрализатора статического электричества 1.1.1. Недостаточная освещенность рабочей зоны 1.1.2. Отклонение показаний климата на открытом воздухе 1.1.3. повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны 1.1.4. Превышение уровней шума 1.2. Анализ опасных факторов. 1.2.1 Электрический ток 1.2.2. Пожароопасность 1.2.3. Движущиеся машины и механизмы 1.2.4. Аппараты под давлением.	Вредными факторами в работе с природным газом в помещении могут являться: недостаточная освещенность рабочего места, отклонение параметров климата на открытом воздухе, повышенная загазованность воздуха рабочей среды, превышение уровни шума. Опасными же факторами в данном случае являются электрический ток, подвижные части оборудования, пожароопасность, аппараты под давлением.
2. Экологическая безопасность:	Во время проведения экспериментов с природным газом возможно возникновение

2.1. Анализ возможного влияния на окружающую среду. 2.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.:	ситуации, когда сам объект исследования, так и работы, осуществляемые в процессе его изучения оказывают негативное влияние на экологию. Это проявляется во влиянии на: - атмосферу; - гидросферу; - литосферу.
3. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: 3.1 специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; 3.2 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.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Немцова О.А			16.03.2018

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6Б	Федотов Эркэн Николаевич		

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

Инженерная школа природных ресурсов (ИШПР)
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»
 Уровень образования магистр
 Отделение нефтегазового дела
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	<i>Литературный обзор</i>	30
	<i>Расчетная часть</i>	20
	<i>Результаты и их обсуждение</i>	10
	<i>Финансовый менеджмент</i>	10
	<i>Социальная ответственность</i>	10
	<i>Заключение</i>	10
	<i>Презентация</i>	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Харламов С.Н.	Д.ф.-м.н., профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Бурков П.В.	д.т.н, профессор		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа __ с., __ рис., __ табл., __ источников.

Ключевые слова: моделирование, стояк отбора газа, модель, турбулентность, гидродинамика, теплообмен, газ.

Объектом исследования в настоящей работе являются процесс движения газа в стояке отбора импульсного газа и модели турбулентности.

Предмет исследования – закономерности теплогазодинамических процессов нестационарного (ускоренного) течения газа через стояк отбора импульсного газа и оценка перспектив, достоинств и недостатков полуэмпирических моделей турбулентности по предсказанию параметров этого процесса.

Цель работы – исследование явления вихревого эффекта, возникающего в тройнике стояка отбора импульсного газа используемых на магистральном газопроводе «Сахалин–Хабаровск–Владивосток», а также разработка рекомендаций по выбору модели турбулентности для исследования теплогазодинамической структуры в нестационарных потоках.

В процессе исследования проводились: анализ литературных источников для рассматриваемых процессов о состоянии физико-математического моделирования задачи о течении вязких сред в трубопроводе со сложной поверхностью стенки; разработка эффективной математической модели с целью предсказания изменений параметров структуры во внутренних развивающихся течениях; исследования вихревого эффекта, возникающего в тройнике отбора газа; моделирование процессов, происходящих в тройнике отбора импульсного газа с использованием трех различных моделей турбулентности семейства $k - \epsilon$ (realizable, RNG и standard), учитывающих изменения механизмов диффузии, порождения, диссипации k и ϵ в вихревом пространственном течении.

В результате исследования даны рекомендации по выбору оптимальной модели турбулентности, численно выявлены закономерности движения газовой среды в стояке отбора газа.

Степень внедрения: настоящие результаты могут быть использованы на заинтересованных предприятиях по математическому моделированию сложных турбулентных трубопроводов с конфузным (диффузорными секциями) в пристеночных областях течения в рамках RANS-метода.

Область применения: математическое моделирование гидродинамических и тепловых особенностей процесса движения газа в тройнике отбора импульсного газа.

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

Планируется более детальное изучение эффектов изменения структуры эволюции параметров течения и теплообмена во внутренней системе (трубопровод – тройник – стояк).

ANNOTATION

Master thesis: __ pp., __ Fig., __ tables, __ sources.

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

The research object: is the gas flow processes in riser of the pulsed gas selection and the turbulence models.

The research subject: is the regularities of the heat, hydro and gas-dynamic processes of nonstationary (accelerated) gas flow through the riser of the pulsed gas selection and an assessment of the prospects, merits and demerits of semi-empirical turbulence models by predicting the parameters of this process.

The research task: is the research phenomenon of the vortex effect arising in the tee of the riser for the selection of pulsed gas used on the «Sakhalin-Khabarovsk-Vladivostok» gas main pipeline, as well as the development of recommendations for the choice of the turbulence model for studying the heat, hydro and gas-dynamic structure in nonstationary flows.

In this research an analysis of literature was carried out for the considered processes on the state of physico-mathematical modeling the development of an effective mathematical model for the purpose of predicting changes in the parameters of the structure in internal means of flow; the research of the vortex effect arising in the gas selection tee; the modeling of the processes occurring in the tee with using for three different models of turbulence of the family $k-\varepsilon$ (realizable, RNG and standard), taking into account changes in diffusion, generation, dissipation k and ε in a vortex spatial flow.

As a result of the research, recommendations were provided on the choice of the optimal turbulence model, the regularities of the motion of the gaseous medium in the riser of gas are numerically revealed.

Implementation level: these results can be used by interested enterprises in mathematical modeling of complex turbulent pipelines with confuser (diffuser sections) in near-wall flow areas within the RANS-method.

Implementation area: mathematical modeling of hydrodynamic and thermal peculiarities of gas flow in riser of the pulsed gas selection/

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 more detailed study of changes in the evolution of flow parameters and heat exchange in the internal system (pipeline - tee - riser) is planned.

ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РАБОТЕ

В настоящей выпускной квалификационной работе применяются следующие обозначения:

C_μ, C_1, C_2 – константы в моделях турбулентности;

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

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, $\text{м}/\text{с}$;

u_i' – пульсационная составляющая проекции скорости, $\text{м}/\text{с}$;

u_i – проекция осредненной скорости, $\text{м}/\text{с}$;

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

W – функция в realizable k - ϵ модели;

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

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_s – 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;

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	15
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	16
1.1 Эффект Ранка-Хилша	16
1.2 Подходы к моделированию турбулентности	18
1.3 Влияние вихревых эффектов на тройник стояка отбора импульсного газа	23
2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	28
2.1 Методика расчета динамических и тепловых параметров потока. Модели турбулентности, используемые для проведения численных экспериментов	28
2.2 Объект исследования и граничные условия.....	32
2.2 Результаты работы и их обсуждение	34
3 ВЫВОДЫ	37
4 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	38
4.1 Расчет материальных затрат на оборудование и программное обеспечение для проведения НТИ	38
4.2 Период проведения исследования согласно заданию	40
4.3 Расчет затрат на амортизационные отчисления	41
4.4 Затраты по основной заработной плате	42
4.5 Отчисления во внебюджетные фонды	45
4.6 Накладные расходы	46
4.7 Формирование бюджета научно-исследовательского проекта.....	47
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	48
5.1. Анализ вредных факторов.....	49
5.1.1. Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	49
5.1.2. Отклонение показаний климата на открытом воздухе	50
5.1.3. Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны	51
5.1.4. Повышение уровней шума.....	53
5.2 Анализ опасных факторов.....	55
5.2.1. Электрический ток.....	55

5.2.2. Пожароопасность	56
5.2.3. Движущиеся машины и механизмы.....	57
5.2.4. Аппараты под давлением	57
5.3. Экологическая безопасность.....	58
5.3.1 Анализ возможного влияния на окружающую среду	58
5.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	59
5.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	60
5.4.1 Специальные (характерныедля рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	60
5.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	61
Список использованной литературы.....	62
Приложение А	66

ВВЕДЕНИЕ

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. 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) [2].

При этом с точки зрения классической гидравлики газопроводов при одномерном движении газа подобные явления являются малообъяснимыми, и даже наоборот – в результате резкого падения давления и расширения газа температура должна сильно понижаться (например, на практике фиксируется обледенение отдельных участков поверхности газопровода). Исследования подобного рода аномального разогрева в технике уже проводились и было показано, что процесс является весьма сложным и зависит от ряда факторов. Сущность явления заключается в возникновении вихревых явлений, в срыве потока среды в тупик и его пульсирование в тупике, сопровождающееся ростом температуры (эффект Ранка-Хилша).

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.

Цель настоящей работы – исследование явления вихревого эффекта, возникающего в тройнике стояка отбора импульсного газа используемых на магистральном газопроводе «Сахалин–Хабаровск–Владивосток», рассмотрение, путем применения основных моделей, принятых для описания турбулентности и широко используемых в пакетах численного моделирования.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Эффект Ранка-Хилша

Вихревой эффект, или эффект Ранка-Хилша, проявляется в закрученном потоке вязкого сжимаемого газа и реализуется в простом устройстве – вихревой трубе (ВТ). Его физическая сущность состоит в том, что подаваемый через спиральный сопловой ввод сжатый газ закручивается в осесимметричном канале и в нем происходит энергетическое разделение газа по температуре и давлению.

Приосевой поток (вынужденный вихрь) имеет энтальпию меньшую исходного, а периферийный (квазипотенциальный) энтальпию выше исходного. Основные виды вихревых энергопреобразователей хорошо изучены экспериментально и теоретически. К ним относятся: делящая ВТ, охлаждаемая ВТ, самовакуумирующаяся ВТ, двухконтурная ВТ, вихревой вакуум-насос-эжектор. ВТ по надежности, ресурсу, простоте обслуживания, массогабаритным характеристикам превосходит другие типы энергопреобразователей. Работы по использованию вихревого эффекта успешно проводились. Это прежде всего индивидуальные кондиционеры для технического персонала, системы термостатирования электронного оборудования, вихревые эжекторы для вентиляции помещений, транспортировки воды для первоначальной запитки центробежных насосов – откачки жидкости, моющих устройств с локализацией зоны мойки, полного сбора продуктов мойки и возможность их локализации. Работы по применению свойств вихревого эффекта представляют значительный интерес.

Одним из многообещающих видов нетрадиционной энергетики является вихревая энергетика, суть которой заключается в технологиях использования кинетической энергии закрученных потоков сплошной среды: газа и жидкости для преобразования её в градиент температуры, и давления.

Интерес к исследованию вихревых явлений не теряет свою актуальность во всем мире длительное время - вихревые структуры периодически выявляются во многих исследуемых физических процессах.

Вихревые (закрученные) потоки представляют собой один из важнейших и наиболее трудных разделов механики жидкостей и газов. Они характеризуются нестандартными, существенно отличающими их от осевого движения свойствами, такими как анизотропия характеристик переноса импульса, высокие градиенты скорости, давления, возникновение вторичных течений, активное и консервативное воздействие на структуру среды, трёхмерный характер осредненных пульсационных параметров и т.д.

Особенно полно эти свойства представляются в «вихревых трубах» - устройствах, выполняющих эффект энергетического разделения закрученных потоков, известный как «эффект Ранка» или «вихревой эффект».

Вихревые потоки газов, жидкостей массово распространены в различных явлениях природы: при формировании циклонов, торнадо в атмосфере, при течении рек, при возникновении больших струйных течений в морях и океанах и т. д.

Внедрение закрученных потоков в настоящее время получает всё большее распространение: в технологических тепломассообменных процессах и аппаратах технической, химической промышленности, в авиакосмической технике и т.д.

Вихревой эффект (эффект Ранка-Хилша) проявляется в закрученном потоке вязкого сжимаемого газа и реализуется в простом устройстве – вихревой трубе. Его физическая сущность состоит в том, что подаваемый через спиральный сопловой ввод сжатый газ закручивается в осесимметричном канале и в нем происходит энергетическое разделение газа по температуре и давлению. Приосевой поток (вынужденный вихрь) имеет энтальпию меньшую исходного, а периферийный (квазипотенциальный) энтальпию выше исходного.

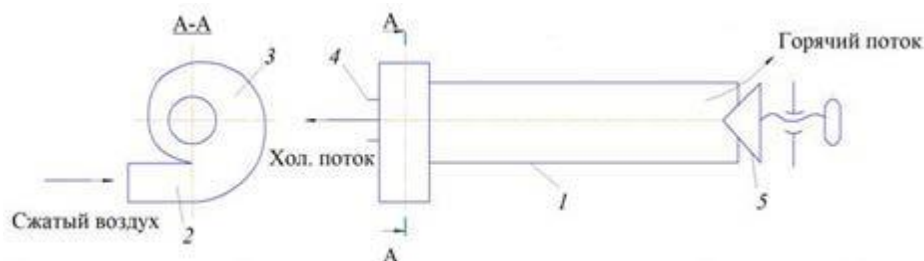


Рисунок 1.1 – Схема вихревой трубы 1 - гладкая труба, 2 - тангенциальное сопло, 3 - входная улитка, 4 - диафрагма, 5 – дроссель

Таким образом в вихревой трубе происходит разделение подаваемого тангенциально к внутренней поверхности трубы потока газа на два потока, один из которых – периферийный – имеет температуру выше температуры исходного газа, а второй – центральный – соответственно ниже. Холодный и горячий потоки выводятся из торцов трубы через отверстие в диафрагме и дроссель соответственно (Рис. 1.1) [4].

1.2 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 [2].

Для решения задач, в которых присутствует перенос тепла, к системе необходимо добавить уравнение энергии (1.3) [2].

Перечисленные уравнения имеют вид [2]:

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

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

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

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. [3, 7]). 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 [2], 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 [2]. 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 [9]:

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

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 [9]:

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

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 [9].

В соответствии с гипотезой Таунсенда связь между величинами $\overline{u_i' u_j'}$ и k определяется выражением [9]:

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

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 [9]:

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

и гипотезу Джонса-Лаундера [10]:

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

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

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

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 [10].

1.3 Влияние вихревых эффектов на тройник стояка отбора импульсного газа

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 [1]. 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 «Гипрогазцентр» был проведен натурный эксперимент [1], 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 [1] 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



Рисунок 2.2 – Внешний вид стояка отбора импульсного газа

Схема подключения стояков отбора импульсного газа на исследуемых КУ, представлена на рисунке 2.3, и соответствует указанному выше. Альбому типовых решений. В трубу DN300 врезан тройник 300x200, к которому подсоединен конический переход 200x50.

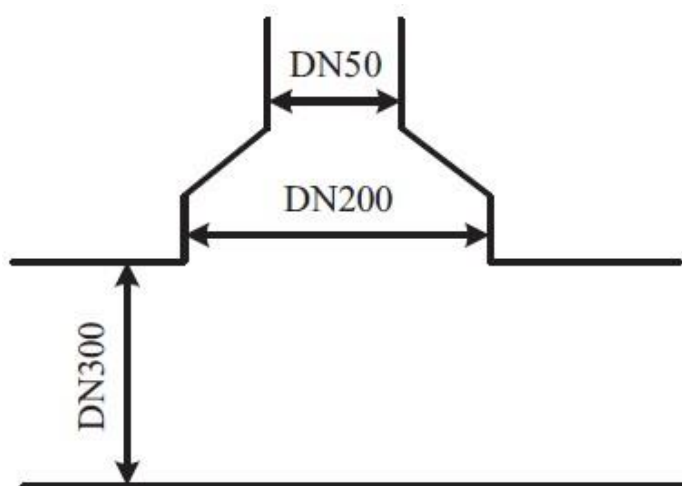


Рисунок 2.3 – Схема присоединения стояка отбора импульсного газа

[1]

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 .

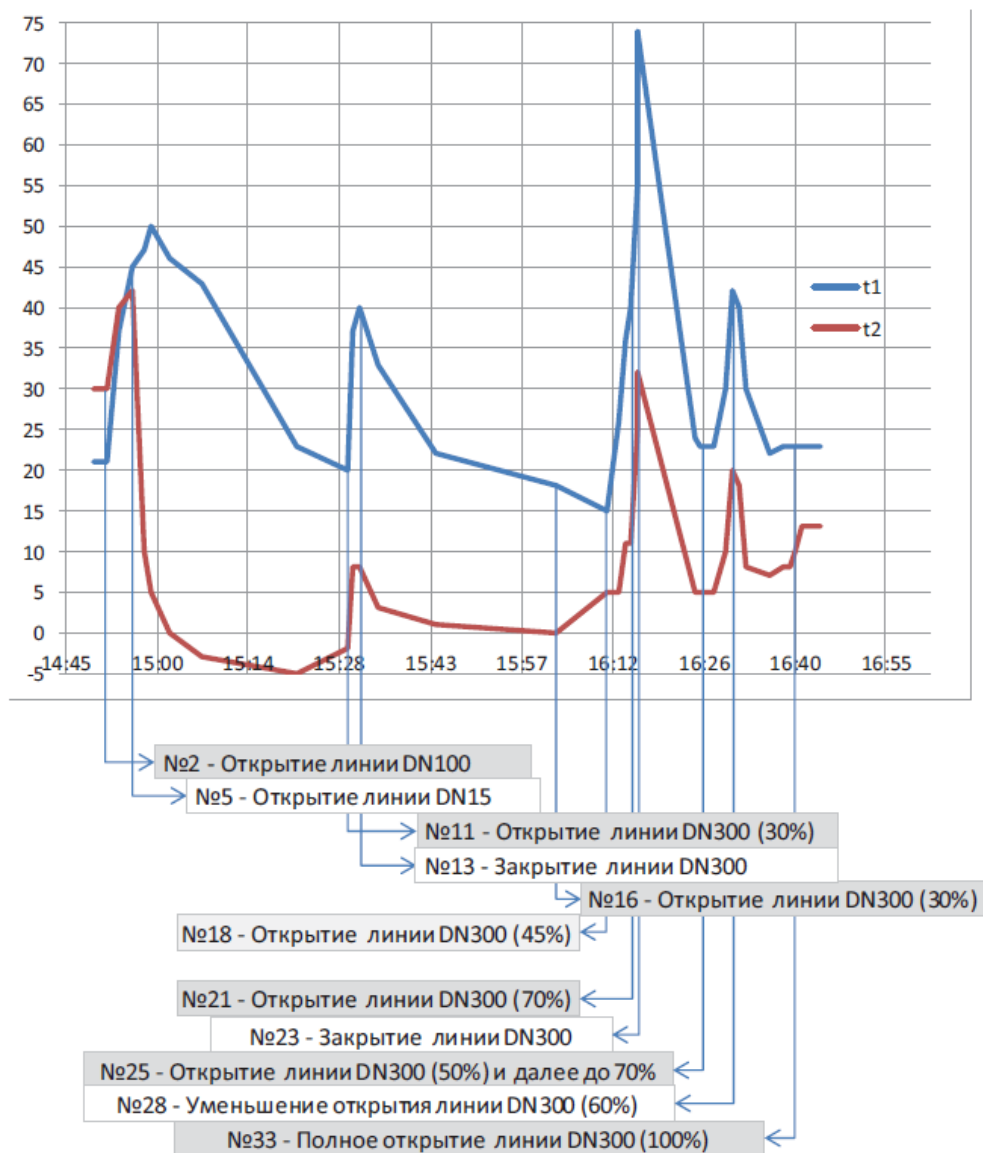


Рисунок 2.4 – График изменения температуры поверхности газопровода в процессе исследований, КУ № 184 (t1 – температура сверху стояка DN50; t2 – температура внизу стояка DN50)

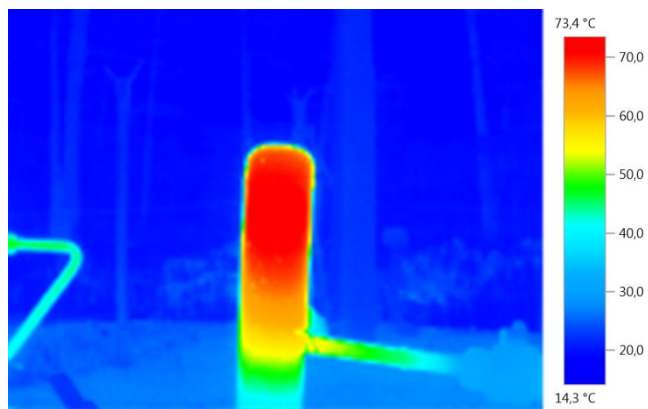


Рисунок 2.5 – Процесс разогрева стояка отбора импульсного газа [1]

2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

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

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) [12], RNG $k - \varepsilon$ (V. Yakhot) [14] и realizable $k - \varepsilon$ модель (T. Shih) [14].

Модель $k - \varepsilon$ standard содержит следующие уравнения для k и ε [6]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k(S_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1(S_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2(S_{k-\varepsilon})} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.2)$$

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

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (2.3)$$

Турбулентная вязкость μ_t определяется зависимостью от k и ε :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

$\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}$, $\sigma_{\varepsilon(S_{k-\varepsilon})}$ - 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 [6]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha_{k(RNG_{k-\varepsilon})} \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1(S_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2(S_{k-\varepsilon})} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (2.6)$$

где

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.7)$$

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

Источниковый член вычисляется следующим образом:

$$R_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} = \frac{R_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (2.8)$$

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 [6]

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 [6]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k(R_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon(R_{k-\varepsilon})}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \rho C_{1(R_{k-\varepsilon})} S \varepsilon - \rho C_{2(R_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2.10)$$

где

$$C_{1(R_{k-\varepsilon})} = \max \left(0,43; \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}; \\ \bar{S}_{ij} = 0,5 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.11)$$

Турбулентная вязкость рассчитывается по уравнению (2.4), но, как упоминалось ранее, для вычисления C_μ вводится специальная функция:

$$C_{\mu(R_{k-\varepsilon})} = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.12)$$

Где

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (2.13)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (2.14)$$

$\bar{\Omega}_{ij}$ – 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:

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

2.2 Объект исследования и граничные условия

Рассматривалась задача о неизоотермическом движении однокомпонентного газа в канале тройника отбора газа. Параметры расчетов принимались с учетом ранее проведенных в работах [5, 9] реальных экспериментов.

Предполагается:

1. Пространственное течение и теплообмен газа со стенкой трубопровода в поле действия массовых сил (сил тяжести).
2. Газ – совершенный, среда - химически инертная, с существенной переменностью теплофизических свойств (вязкость, теплоемкость, теплопроводность).
3. Течение осуществляется с развитой структурой турбулентности в области входа с тройниковым соединением и тупиковым ответвлением
4. Процессы турбулентного переноса тепла и импульса осуществляются с учетом молекулярной диффузии (вязкости и теплопроводности) в изменении параметров локальной структуры турбулентности (k и ϵ).
5. В областях с переменной формой поперечного сечения учитывается наличие волновых и переходных процессов обусловленной ламинаризацией течения.
6. Течение и теплообмен осуществляются в геометрии типа рисунок

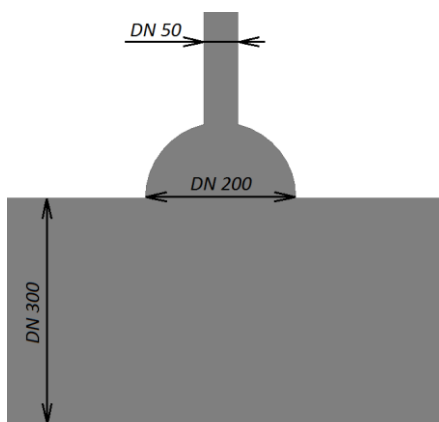


Рисунок 2.5 - Геометрия тройника отбора импульсного газа.

Расчеты проводились в рамках нестационарной задачи.

Для численного интегрирования уравнений Рейнольдса и замыкающих их уравнений (2.1) – (2.14) 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.

В ходе проведения расчета анализировались динамические и температурные параметры потока в сечении в области присоединения стояка к байпасной линии. 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 19.0.

2.2 Результаты работы и их обсуждение

В ходе проведения численного моделирования процессов, протекающих в газовой среде, получены следующие результаты. Ниже представлены результаты моделирования различных динамических и температурных параметров потока, полученные с использованием трех моделей турбулентности семейства $k-\epsilon$: standard, RNG и realizable.

Были рассмотрены поля скоростей, температуры и давления в момент времени $t=0,02$ с в тройнике стояка отбора импульсного газа при параметрах $P=9,8$ Мпа, $T_r=278$ К, $Re=10^5$ (рисунок 2.6).

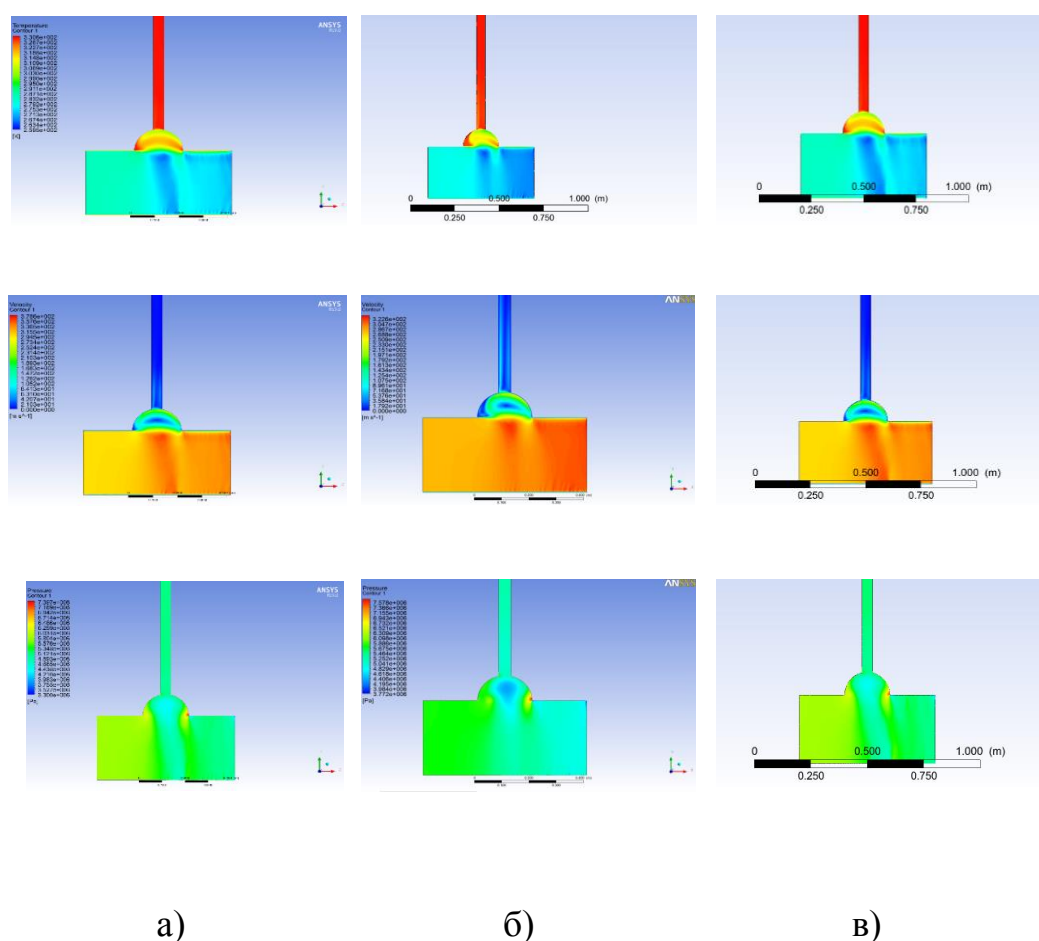


Рисунок 2.6 – Поля скоростей, температуры, давления. а – realizable $k-\epsilon$ модель, б – RNG $k-\epsilon$ модель, в – standard $k-\epsilon$ модель.

Помимо этого, был построен контур вектора скоростей в области присоединения стояка к байпасной линии (рисунок 2.7). Отчетливо видно образование вихрей, скорость которых достигает ~ 300 м/с.

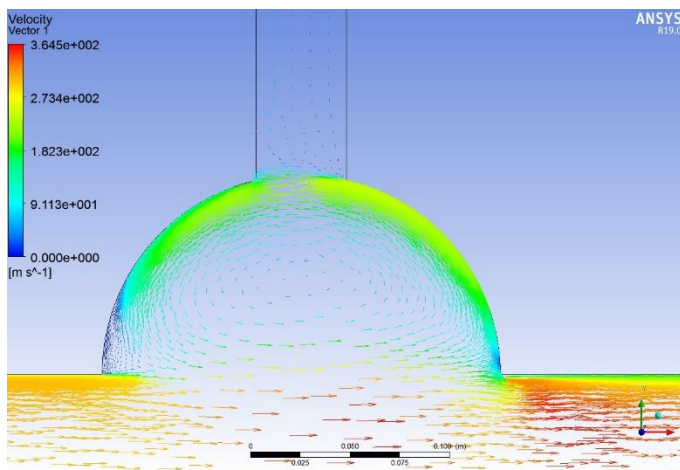
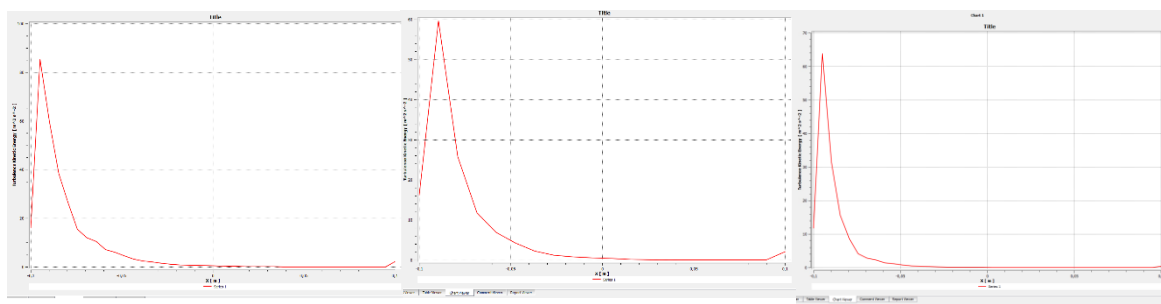


Рисунок 2.7 – Контур вектора скоростей на примере RNG k-ε модели

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

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



а)

б)

в)

Рисунок 2.8 – Кинетическая турбулентная энергия. а – standard k-ε модель, б – RNG k-ε модель, в – realizable k-ε модель.

Во всех случаях наиболее близкие к реальному эксперименту [1] результаты были получены с использованием realizable модели.

Расчеты показывают, что эффект температурного разделения увеличивается:

- при увеличении числа Re от 10^4 - 10^5 и достигает максимального значения порядка 20-25 градусов при числе Re= 10^5 ;
- при увеличении диаметра отвода на величину 10-12%;
- при увеличении закрутки потока в области входа в отвод (Ro=4).

Значительное влияние на долю потока оказывает увеличение размера энергосодержащих вихрей $L = C_D * \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}$ (увеличение L до 10%).

3 ВЫВОДЫ

Вычислительные эксперименты требуют больших затрат машинного времени из-за большого числа параметров: геометрия отвода, параметры входа, структуры пульсационного потока k-ε-и.

Модель турбулентности тепловых потоков требует совершенных зависимостей к заданию турбулентного числа Pr типа формулы Иевлева:

$$a_t = \nu \left(-\frac{1}{2\delta_1 Pr} + \sqrt{\frac{1}{2\delta_1 Pr^2} + \frac{1}{\delta_3^2} * \frac{\nu_1}{\nu} \left(\frac{\nu_1}{\nu} + \frac{1}{\delta_2} \right)} \right)$$

В вихревом течении наряду с волновыми процессами влияние на температурное разделение оказывает тангенциальное составляющее скорости при значениях $Ro = \frac{\vec{W}}{\vec{U}} = 2 \div 6$, что влечет к изменению размеров энергосодержащих вихрей ответственных за перенос тепла.

В расчете интенсивности теплоотдачи во внешнюю среду можно оценить по критериальным связям с учетом более точного прогноза теплофизических свойств за счет включения моделей химической кинетики процесса типа

$$Nu = C * Re^m * Pr^n * A^q,$$

Где $A = \frac{c_{p_{eff}}}{c_{p_\lambda}}$, $C=0,018-0,023$, $m=0,7-0,8$, $n=0,42-0,48$, $q=0,1-0,4$.

Рекомендация в практику. При моделировании стоит учитывать недостатки RANS подхода при использовании моделей со скалярным значением температуропроводности, турбулентной вязкости, поскольку турбулентную структуру течения в данных условиях отвечает свойством высокой неоднородности по масштабам вихрей и анизотропии (изменение пульсаций). Следовательно, нужны модели, в которых вязкость и теплопроводность μ_t , λ_t будут учитывать характер процессов по направлениям.

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.

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 для проведения численного эксперимента.

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, (Z_М), тыс. руб.</i>
Персональный компьютер на базе процессора Intel Xeon E52683v4	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			

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 01.02.2017 по 31.05.18 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 4.2 – Продолжительность работ, выполняемых научно-техническим персоналом

Показатели рабочего времени		Руководитель	Лаборант
Календарное число дней	с 01.02 по 31.12 2017 г.	335	
	с 01.01 по 31.05 2018 г.	151	
Количество нерабочих дней - выходные и праздничные дни	с 01.02 по 31.12 2017 г.	86	102
	с 01.01 по 31.05 2018 г.	36	56
Потери рабочего времени, дни - отпуск, невыходы по болезни	с 01.02 по 31.12 2017 г.	52	28
	с 01.01 по 31.05 2018 г.	-	2
Продолжительность работ, выполняемых научнотехническим работником в период с 01.02.2017 по 31.12.2017 г., раб. дн.		197	205

Продолжительность работ, выполняемых научнотехническим работником в период с 01.01.2018 по 31.05.2018 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 4.3 – 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
Итого, руб.	57 643,6						

Таким образом, сумма затраченная на амортизационные отчисления составила 57 643,6 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_d – коэффициент доплат и надбавок, принимаемый равным

0,2;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.4 – Должностные месячные оклады

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d} \quad (4.4)$$

где: $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M –

количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 5).

Таблица 4.5 – 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 4.6 – 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 4.7 - Основная заработная плата для научно-технического персонала за период с 01.02.2017 по 31.05.2018 г.

Исполнитель	Руководитель	Лаборант
Основная ЗП в период с 01.02 по 31.12 2017 г. , руб.	243 054,66	124 945,45
Основная ЗП в период с 01.01 по 31.05 2018 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:

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

где: $k_{внеб}$ – 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% [], 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 4.8 – Размер обязательных страховых отчислений

Вид затрат	Руководитель	Лаборант
Основная ЗП за 2017 год, руб.	243 054,66	124 945,45
Основная ЗП за 2018 год, руб.	141 884,70	56 682,57
Размер страховых взносов за 2017 год, руб.	66 353,92	34 110,11
Размер страховых взносов за 2018 год, руб.	42 849,18	17 118,14
Суммарные страховые выплаты, руб.	160 431,35	

4.6 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:

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

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

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

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

4.7 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 4.9 – Общая стоимость проведения научно-технических исследований

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Примечание
1. Затраты на материалы, оборудование и программное обеспечение	2 079,975	
2. Затраты на амортизационные отчисления	57,6436	
3. Затраты по основной заработной плате	566,57	
4. Отчисления во внебюджетные фонды	160,431	
5. Накладные расходы	760,19	
6. Итоговая величина затрат	3 624,81	

Общий бюджет проведения научно-технических исследований по теме составил 3 624,81 тыс. руб.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Объектом исследования в данной работе являются газообразные углеводороды и их поведение при движении в стояке отбора импульсного газа магистрального газопровода под влиянием различных внешних факторов. В работе приводятся результаты численного моделирования неизотермического движения флюидов в канале тройника стояка отбора газа. 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. Анализ вредных факторов

Все описанные ниже факторы требуют разработки определенных мероприятий по исключению их возникновения и защите от них, которые должны неукоснительно соблюдаться персоналом [24].

5.1.1. Недостаточная освещенность рабочей зоны

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 [23].

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 [24]:

- 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.

5.1.2. Отклонение показаний климата на открытом воздухе

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.

Для поддержания приемлемых микроклиматических условий в помещениях используются система отопления, интенсивность работы которой регулируется в зависимости от сезонности, и система вентиляции.

Так, согласно [25], на рабочем месте должна поддерживаться температура от +21 до +23 °С 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.

5.1.3. Повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны

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 [20].

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.

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

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.

5.1.4. Повышение уровней шума

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 [22].

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 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

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.

5.2 Анализ опасных факторов

5.2.1. Электрический ток

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.

Меры защиты от поражения электрическим током [26]:

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 ковров, инструментов с изолированными ручками.

5.2.2. Пожароопасность

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 [21].

Таблица 2 – Характеристика взрывопожароопасных веществ, появление которых возможно в воздухе рабочей зоны согласно ГОСТ 308 2.16-2002

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

Методы снижения взрывопожароопасности [27]:

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.

5.2.3. Движущиеся машины и механизмы

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.

5.2.4. Аппараты под давлением

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.

5.3. Экологическая безопасность

5.3.1 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, повышении 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 [24].

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 [28] указаны в таблице 5.4:

Таблица 5.4 – Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде, согласно ГН 2.1.15.1315-03

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

5.3.2 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.

5.4. 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 [30,31]:

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агинеи 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
2. Аникеев А.А., Молчанов А.М., Янышев Д.С. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики. Москва: Либроком, 2010. – 152 с.
3. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие, Балт. ГТУ. СПб., 2001. 108 с.
4. Бирюк В.В., Васильев В.К., Угланов Д.А., Горшкалёв А.А., Шиманов А.А. Применение вихревого эффекта энергетического разделения газов // Научно-практический журнал «Новые исследования в разработке техники и технологий». 2017. №1. Стр. 23-24
5. Влияние ламинаризации 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. Та- тено, С. Хатамия // Теплопередача (Труды американского общества инженеров-механиков). — 1982. — № 2. — С. 144-153.
6. Войтович Р., Липин А. А. О возможности использования различных моделей турбулентности для расчета гидродинамических и энергитических характеристик аппаратов с турбинными мешалками. Теоретические основы химической технологии, 2014, том 48, № 4, с. 386–402.
7. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
8. Ковальногов Н. Н. Прикладная механика жидкости и газа. Ульяновск УлГТУ, 2010. – 219 с.
9. Меркулов А.П., Вихревой эффект и его применение в технике. - М.: Машиностроение, 1969 г., 182 с.

10. Назарчук М. М., Ковецкая М. М., Обратный переход турбулентного течения в ламинарное. Киев: Наук. Думка, 1974. – 94с.
11. 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.
12. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbukence flows // Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. 1974. V.3. P. 269.
13. 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.
14. Yachot V., Orszag S. A. Relaminarizarion group analysis of turbulence // J. Sci. Comput. 1986. V. 1. P. 1.
15. Налоговый кодекс Российской Федерации ред. от 28.12.2016
16. Постановление Правительства РФ от 01.01.2002 N 1 (ред. от 07.07.2016) "О Классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы"
17. 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
18. 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»
19. Федеральный закон от 14.12.15 N 362-ФЗ «О страховых тарифах на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваниях»

20. ГН 2.2.5.1313–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы.
21. ГОСТ 30852.16-2002 Электрооборудование взрывозащищенное. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 23 с.
22. ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 27с.
23. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 68с.
24. 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.
25. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 32с.
26. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
27. ГОСТ 12.1.010–76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1976. – 7с.
28. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования
29. Трудовой кодекс Российской Федерации ред. от 03.07.2016
30. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 8с.

31. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – Москва: Госстандарт России, 1996. – 15с.

32. 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

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

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке

CALCULATION

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6Б	Федотов Эркэн Николаевич		

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.		

2 CALCULATION

2.1 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 $k - \varepsilon$ models of turbulence were used: standard $k - \varepsilon$ [24], RNG $k - \varepsilon$ [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]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha_{k(RNG_{k-\varepsilon})} \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\alpha_{\varepsilon(RNG_{k-\varepsilon})} \mu_{eff} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1(S_{k-\varepsilon})} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2(S_{k-\varepsilon})} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.5)$$

.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

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

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

$\bar{\Omega}_{ij}$ 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:

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

Here

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

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

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

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

2.2. Object of investigation and boundary conditions

The problem of the non-isothermal motion of a one-component gas in the gas extraction pipe was considered. The calculation parameters were taken with allowance for the earlier experiments carried out in Refs [1, 21].

It is assumed:

1. Spatial flow and heat exchange of gas with the pipeline wall in the field of action of mass forces (gravity forces).
2. Gas - perfect, medium - chemically inert, with significant variability of thermophysical properties (viscosity, heat capacity, thermal conductivity).
3. The flow is carried out with a developed structure of turbulence in the region of the entrance with a tee-joint and a dead-end branch
4. The processes of turbulent heat and momentum transfer are performed taking into account molecular diffusion (viscosity and thermal conductivity) in the variation of the parameters of the local turbulence structure (k and ε).

5. In regions with a variable cross-sectional shape, the presence of wave and transient processes due to laminarization of the flow is taken into account.
6. The flow and heat transfer are realized in geometry picture 1.

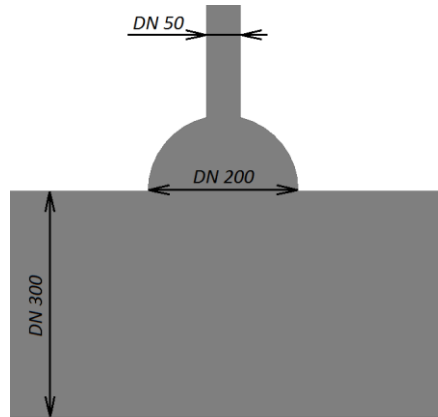


Figure 1 – Geometry of riser tee for pulsed gas/

The calculations were carried out in the framework of a non-stationary problem.

During the calculation, the dynamic and temperature parameters of the flow in the section in the area of the riser connection to the bypass line were analyzed.

The simulation was carried out using the software package Ansys Fluent 19.0.

2.3. Results of the research and discussion

In the course of numerical modeling of the processes taking place in a gaseous medium, the following results were obtained. Below are the results of modeling the various dynamic and temperature parameters of the flow, obtained using three models of the turbulence of the family $k - \varepsilon$: standard, RNG and realizable.

Fields of velocities, temperatures and pressures at time $t = 0.02$ sec in the tee of the riser of the pulsed gas selection were considered for the parameters $P = 9.8$ MPa, $T = 278$ K, $Re = 105$ (Fig. _)

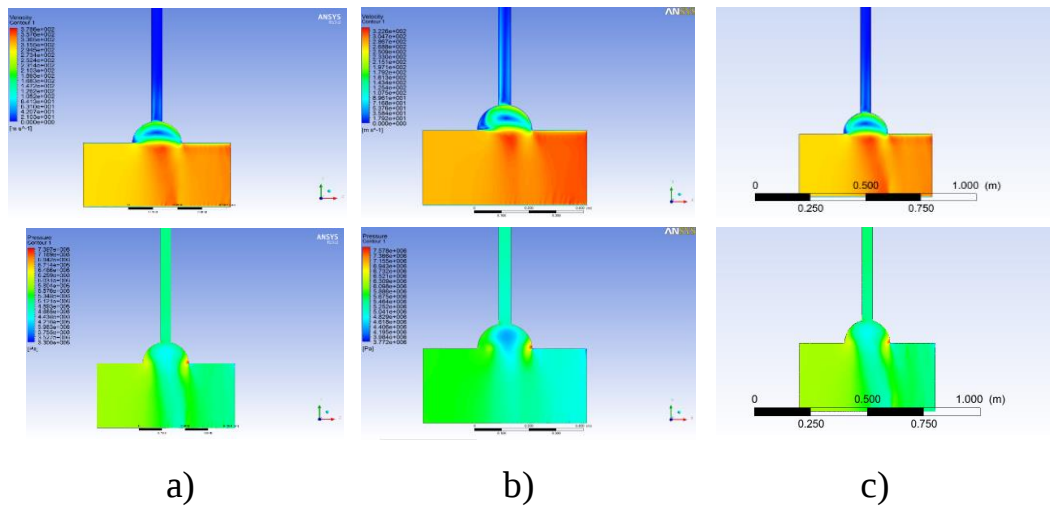


Figure - Fields of velocities, temperature, pressure. a - realizable k - ϵ model, b - RNG k - ϵ model, c - standard k - ϵ model.

One of the important parameters describing turbulent fluid motion is the kinetic energy of turbulence k .

It can be seen from the figure that there is some discrepancy between the values calculated using different models.

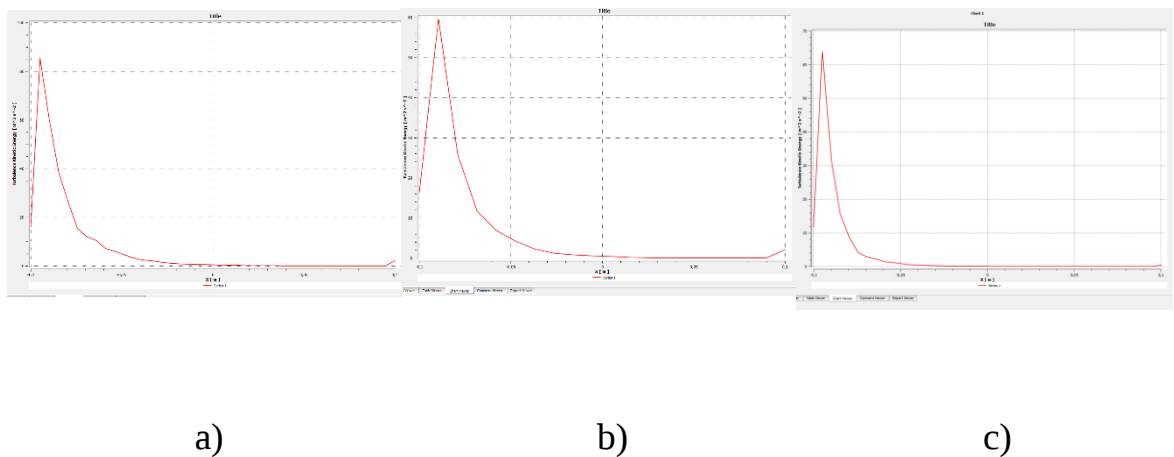


Figure - Kinetic turbulent energy. a is the standard k - ϵ model, b is the RNG k - ϵ model, and c is the realizable k - ϵ model.

In all cases, the results closest to the actual experiment [21] were obtained using a realizable model.

3 CONCLUSIONS

The most realistic forecast processes in the recruitment of realizable model:

- Computational experiments require large expenditures of computer time due to a large number of parameters: branch geometry, input parameters, and k-ε-u pulsation flow patterns.

Calculations show that the effect of temperature separation increases:

- with an increase in the number Re from 10^4 to 10^5 and the value of the wands of the value of 20-25 degrees with the number Re = 10^5 ;
- with an increase in the diameter of the tap by 10-12%;
- with increasing the swirl of the flow in the area of the entrance to the branch (Ro = 4).

Significant influence on the share of the flux of increasing the size of energy-containing vortices is $L = C * D * k^3 / 2 / \varepsilon$ (L increase to 10%).

The turbulence model of heat flows requires perfect dependencies to the assignment of the turbulent Pr number of the Ievlev formula:

$$a_t = \nu \left(-\frac{1}{2\delta_1 Pr} + \sqrt{\frac{1}{2\delta_1 Pr^2} + \frac{1}{\delta_3^2} * \frac{v_1}{\nu} \left(\frac{v_1}{\nu} + \frac{1}{\delta_2} \right)} \right)$$

In the vortex flow together with the wave processes, the influence on the temperature separation is exerted by the tangential velocity component at the values $Ro = \frac{\vec{W}}{\vec{U}} = 2 \div 6$ which entails a change in the dimensions of the energy-containing vortices responsible for heat transfer.

In calculating the intensity of heat transfer to the external environment, it can be estimated from the criterial relationships taking into account a more accurate forecast of thermophysical properties due to inclusion of models of the chemical kinetics of the process according to the formula:

$$Nu = C * Re^m * Pr^n * A^q,$$

Where $A = \frac{C_{p_{eff}}}{C_{p_\lambda}}$, C=0,018-0,023, m=0,7-0,8, n=0,42-0,48, q=0,1-0,4.

Recommendation practice. When modeling, it is necessary to take into account the shortcomings of the RANS approach when using models with scalar

thermal diffusivity, turbulent viscosity, since the turbulent flow structure under these conditions corresponds to the high inhomogeneity in the scale of the vortices and the anisotropy (pulsation variation). Consequently, we need models in which the viscosity and thermal conductivity μ_T , λ_T take into account the nature of the processes along the directions.