



На правах рукописи

**Чионов Антон Михайлович**

**Инструменты компьютерного  
моделирования  
термогидродинамических режимов  
потока в многослойно изолированных  
подводных газопроводах высокого  
давления**

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2016**

Работа выполнена на кафедре логистики и экономической информатики Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева и в ООО «Научно-исследовательский институт экономики и организации управления в газовой промышленности»

Научный руководитель академик РАН, доктор технических наук, профессор **Мешалкин Валерий Павлович**, заведующий кафедрой логистики и экономической информатики Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Мошев Евгений Рудольфович**, профессор кафедры Машины и аппараты производственных процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета

доктор физико-математических наук, профессор **Смирнов Николай Николаевич**, заместитель заведующего кафедрой газовой и волновой динамики механико-математического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Уфимский государственный нефтяной технический университет

Защита состоится 17 января 2017 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.204.16 при РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Автореферат диссертации разослан \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.204.16

Дударов С.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Трубопроводный транспорт имеет важное значение для газовой отрасли и всей экономики Российской Федерации. В настоящее время общая протяженность газопроводов (ГП) России составляет более 160 тыс. км и непрерывно возрастает. Растут рабочие давления, газопроводы прокладываются во все более сложных климатических и инженерно-геологических условиях, на стадиях разработки и эксплуатации находятся такие крупные международные ГП, как «Голубой поток», «Южный поток», «Северный поток», и др. К основным научно-исследовательским задачам эксплуатации и проектирования ГП относятся задачи гидравлического и теплового расчета трубопроводных систем (ТС).

Основные методы гидравлического расчета сложных ТС и отдельных сложных трубопроводов предложены в работах отечественных ученых: проф. Лобачева В.Г., проф. Андрияшева М.М., член-корр. РАН Меренкова А.П., проф. Хасилева В.Я., проф. Новицкого Н.Н., проф. Сухарева М.Г., проф. Зоркальцева В.И.

Разработке математических моделей и методов расчета сложных ТС посвящено множество работ отечественных ученых: академиком Нигматулина Р.И., Кутателадзе С.С. и Кутепова А.М.; профессоров Бутусова О.Б., Полянина А.Д., Мамаева В.А., Фисенко В.В., Медведева В.Ф., Лурье М.В., Марона В.И., Селезнева В.Е., Васильева О.Ф., Воеводина А.Ф., Галиуллина З.Т., Кривошеина Б.Л., Радченко В.П., Сулейманова В.А. Сарданашвили С.А., Темпеля Ф.Г., Ходановича И.Е., Чарного И.А., и др.

С середины 1970-х годов по настоящее время под научным руководством академика, профессора, д.т.н. Мешалкина В.П. в РХТУ имени Д.И. Менделеева активно проводятся оригинальные научные исследования по топологическим методам расчета потокораспределения и оптимизации сложных ТС, как сложных гидравлических цепей, а также по методам компьютерного анализа нестационарных газовых потоков в ТС, включая научные работы профессоров Панова М.Я., Квасова И.С., к.т.н. Кантюкова Р. А., Булкатова А.Н., Григорьева А.В. и др.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи компьютерного термогидродинамического анализа однофазных потоков газа в подводных многослойно изолированных ГП высокого давления (до 36 МПа) в приближении осевой симметрии поля температуры окружающей среды. Отличительной особенностью диссертации является разработка термогидродинамической модели однофазного потока газа в приближении осевой симметрии поля температуры окружающей среды применительно к современным подводным МГ, в том числе и высокого давления (до 36 МПа).

К сложным современным ГП высокого давления предъявляются повышенные требования к безопасности и надежности их функционирования, для обеспечения которых необходимо постоянно осуществлять экспресс-контроль термогидродинамических параметров эксплуатации ГП (давление и температура), при выполнении соответствующих технологических и физических ограничений. Для подводных ГП высокого давления одними из основных ограничений является максимальное и минимальное давление в трубе, а также минимальная температура газа. Причем, так как ГП находится под водой, ограничение по минимальному

значению температуры газа обуславливается не только прочностными характеристиками трубы, но и температурой обмерзания, при которой на внешней поверхности ГП могут образовываться наледи, что может привести к изменению механических нагрузок на трубопровод из-за движения грунта или изменения выталкивающей силы.

В условиях ограниченности экспериментальных данных о параметрах потока в ГП и его температурном режиме работы особую важность приобретает научная задача разработки адекватной математической термогидродинамической модели ГП. В настоящее время при выполнении инженерно-технических расчетов ГП традиционно используют нормативные документы, такие как «Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов», которые могут применяться для расчетов ГП с давлениями не выше 16 МПа.

В настоящее время для расчетов термогидродинамических режимов ГП применяют различные коммерческие комплексы программ (КП), такие как КП «Simone» (разработчик SIMONE Research Group, s.r.o.), КП «OLGA» (SPT Group, Норвегия) и другие. Описание в инструкциях по эксплуатации используемых в этих КП математических моделей, как правило, носит общий характер и не содержит информации об особенностях программной реализации, которая скрыта от пользователя и защищена законодательно. При этом разработчики КП не несут ответственности за результаты расчетов и их возможные последствия, при практическом использовании этих результатов. Так, например, для КП «Simone» до недавнего времени ограничение на максимально возможное давление составляло 20 МПа, в то время как уже существуют газопроводы, такие как «Голубой поток», рабочее давление в которых поднимается значительно выше.

КП «OLGA» использует общую одномерную систему уравнений газовой динамики. При этом, если в КП «Simone» используются различные уравнения для расчета гидравлического сопротивления, то КП «OLGA» использует только формулу Хааланда, не позволяя гибко изменять вид уравнения расчета гидравлического сопротивления. Как показали расчеты газопровода «Голубой поток», использование этой модели гидравлического сопротивления не позволяет адекватно моделировать как стационарные, так и нестационарные гидродинамические режимы. Таким образом, как правило, имеющиеся коммерческие КП не обладают необходимой гибкостью и открытостью используемых гидродинамических моделей ГП. В связи с этим научная задача разработки оригинальной термогидродинамической модели и КП приобретает дополнительную **актуальность** для ускоренного решения экономически важных проблем импортозамещения и обеспечения устойчивого развития экономики России.

Основные разделы диссертационной работы соответствуют пункту **Плана фундаментальных научных исследований РАН до 2025 года**: «3.1.4. Теплофизика и гидродинамика в процессах получения и переработки реологически сложных материалов и сред (нефть, нефтепродукты, продукты нефтепереработки, кровь, лимфатические жидкости, спецвещества, порох и т.п.)»; **Перечню критических технологий**: «20. технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи», «21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», определенных в

Указе Президента РФ «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» от 7 июля 2011 года.

**Целью диссертационной работы** является разработка термогидродинамических моделей ГП, алгоритмов и комплекса программ термогидродинамического расчета подводных многослойно изолированных ГП высокого давления с учетом теплообмена с окружающей средой.

Для реализации поставленной цели диссертации на основе применения методов газовой динамики и технической термодинамики, методов теории теплопроводности сформулированы и успешно решены **следующие основные задачи**:

1. Разработка термогидродинамической модели однофазного потока в ГП высокого давления.

2. Разработка модели теплообмена потока газа в подводном ГП с окружающей средой.

3. Разработка алгоритма совместного численного решения системы уравнений газодинамики однофазного потока газа в ГП и уравнений теплопроводности в многослойной цилиндрической области в приближении осевой симметрии поля температур для установившегося и неуставившегося неизотермического режимов работы.

4. Разработка методов идентификации и адаптации предложенной термогидродинамической модели для быстроедействующих расчетов подводного ГП в реальном времени.

5. Оценка адекватности разработанной термогидродинамической модели однофазного потока в подводном ГП высокого давления для неуставившегося неизотермического режима работы.

6. Оценка эффективности применения разработанной термогидродинамической модели для расчетов параметров потока в подводных ГП высокого давления при неполных или недостоверных данных.

7. Разработка комплекса программ термогидродинамического расчета однофазного потока в подводном ГП высокого давления с учетом взаимодействия с окружающей средой для решения ряда важных прикладных задач управления подводными ГП.

**Методы решения поставленных задач:** методы газодинамики, термодинамики, гидродинамического моделирования, вычислительной математики, методы математической физики.

#### **Научная новизна.**

1. Разработана термогидродинамическая модель потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления (до 36 МПа) в приближении осевой симметрии поля температур, отличающаяся комплексным учетом как гидродинамических процессов в трубе, так и тепловых явлений в стенке трубы, что позволяет увеличить точность термогидродинамического расчета подводного ГП высокого давления.

2. Разработана упрощенная термогидродинамическая модель потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления (до 36 МПа), отличающаяся использованием упрощенного дифференциального уравнения,

аппроксимирующего эффект тепловой инерции материалов стенки трубопровода при переходных режимах, что позволяет повысить точность и быстродействие термогидродинамических расчетов современных ГП высокого давления.

3. Предложены быстродействующие алгоритмы решения дифференциальных уравнений газовой динамики и теплопроводности в длинном многослойном цилиндре с теплоизолированными торцами, отличающиеся преобразованием информационно-разреженной многомерной матрицы систем уравнений к упорядоченному блочно-ленточному стандартному виду, что позволяет сократить время расчетов, в сравнении с классическими итерационными алгоритмами.

4. На основании многочисленных вычислительных и натуральных экспериментов на промышленных ГП впервые обоснована корректность использования общих одномерных уравнений газодинамики совместно с уравнениями теплопроводности в многослойной цилиндрической области в приближении осевой симметрии поля температур для расчета термогидродинамических параметров однофазного потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления для стационарных и нестационарных режимов работы.

5. На основе сравнения результатов вычислительных экспериментов с натурными данными о нестационарных режимах работы впервые было научно обоснована правомерность использования общих одномерных уравнений газодинамики с поправкой в уравнение энергии, обусловленной тепловой инерцией стенки трубы, для расчета термогидродинамических параметров однофазного потока газа в подводном МГ высокого давления для нестационарных режимов работы.

6. Разработан комплекс программ термогидродинамического расчета потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур, который успешно использован для решения ряда важных прикладных задач управления подводными ГП

#### **Практическая значимость диссертационной работы.**

Разработанная термогидродинамическая модель однофазного потока газа в ГП успешно использована для инженерно-технических расчетов различных режимов работы ГП высокого давления «Голубой поток» и «Северный поток».

Разработанная термогидродинамическая модель позволяет в режиме реального времени с повышенной точностью по сравнению с упрощенными инженерно-техническими линеаризованными гидродинамическими моделями рассчитывать с высокой точностью распределения параметров потока в современных ГП высокого давления, в том числе для неустановившихся режимов работы при возникновении нештатных ситуаций.

Разработанная модель ГП может быть адаптирована к расчету реальных ГП и использована в существующих автоматизированных системах контроля и управления потоком газа для повышения безопасности транспорта газа по ГП высокого давления.

**На защиту выносятся** следующие результаты теоретических исследований, имеющих научную и практическую значимость, а именно:

1. Компьютерная термогидродинамическая модель потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления (до 36 МПа) в приближении осевой симметрии поля температур.

2. Упрощенная термогидродинамическая модель потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления (до 36 МПа).

3. Быстродействующие алгоритмы решения уравнений газовой динамики и теплопроводности в длинном многослойном цилиндре с теплоизолированными торцами, отличающиеся преобразованием информационно-разреженной матрицы систем уравнений к стандартному блочно-ленточному виду.

4. Алгоритм совместного решения системы уравнений газодинамики и теплопроводности для однофазного потока газа в ГП для установившегося и неустойчивого неизолированных режимов работы.

**Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов** обеспечена строгостью используемого математического аппарата и подтверждается хорошим совпадением результатов многочисленных вычислительных и натуральных экспериментов.

Сформулированные в работе технологические и физические допущения обоснованы как в результате их смыслового теоретического анализа, так и применением методов математического моделирования и вычислительной математики. Результаты диссертационной работы не противоречат ранее полученным известным результатам других авторов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: III Международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2009) – г. Москва, Октябрь 2009 г.; IV Международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее», г. Москва, Октябрь 2011 г.; научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов среди научно-исследовательских и проектных предприятий ОАО «Газпром» «Актуальные вопросы проектирования объектов добычи и транспорта газа», г. Нижний Новгород, Сентябрь 2013 г.; юбилейная десятая всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика), г. Москва, Октябрь 2013 г.; V Международная молодежная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» Москва, Ноябрь 2013 г.; международный семинар «Рассохинские чтения», г. Ухта, Февраль 2014 г.; всероссийский научный семинар с международным участием «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем» г. Белокураха, Сентябрь 2014 г.; 5 международной конференции-школы по химической технологии (ХТ-5-16), 16-20 мая 2016, Волгоград.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 научных трудах, в том числе 9 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ, и 2 тезисах и докладах Международных и Всероссийских конференций и 1 монографии.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, пяти приложений и библиографического списка из 96

наименований. Работа изложена на 247 страницах машинописного текста, содержит 3 таблицы и 84 рисунка.

## **Оглавление работы**

### **ВВЕДЕНИЕ**

## **Глава 1 Современное состояние научных исследований по математическому моделированию потоков газа в трубопроводах**

1.1 Аналитический обзор методов расчета термодинамических характеристик природного газа

1.2 Аналитический обзор основных математических моделей, алгоритмов и методов гидродинамического расчета однофазных потоков газа в трубопроводах

1.3 Анализ методов математического моделирования процессов теплообмена потока газа в трубопроводе с окружающей средой

1.4 Инженерно-технологическая постановка задачи анализа термогидродинамических режимов подводного газопровода высокого давления

1.5 Выводы

## **Глава 2 Разработка математической модели и алгоритмов термогидродинамического расчета многослойно изолированных подводных газопроводов высокого давления**

2.1 Термогидродинамическая модель потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур

2.1.1 Обоснование модели расчета термобарических свойств газа

2.1.2 Обоснование выбора формулы расчета коэффициента гидравлического сопротивления

2.1.3 Термогидродинамическая модель потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур

2.2 Алгоритм расчета однофазного потока газа в газопроводе высокого давления

2.2.1 Построение разностной схемы для уравнений газовой динамики

2.2.2 Построение разностной аппроксимации граничных условий

2.2.3 Алгоритм решения разностных уравнений газовой динамики для стационарного случая

2.2.4 Алгоритм решения разностных уравнений газовой динамики для нестационарного режима

2.2.5 Алгоритм преобразования информационно разреженной матрицы системы разностных уравнений газовой динамики к упорядоченному блочно-ленточному виду

2.3 Алгоритм расчета теплообмена потока газа с окружающей средой в многослойно изолированном газопроводе в приближении осевой симметрии поля температур

2.3.1 Анализ аналитических решений уравнения теплопроводности

2.3.2 Построение разностной схемы для уравнений теплопроводности в многослойной цилиндрической области

2.3.3 Алгоритм преобразования информационно разреженной матрицы системы разностных уравнений теплопроводности к упорядоченному блочно-ленточному виду

2.3.4 Алгоритм решения разностных уравнений теплопроводности в многослойной цилиндрической области для стационарного режима

2.3.5 Алгоритм решения разностных уравнений теплопроводности в многослойной цилиндрической области для нестационарного режима

2.4 Алгоритм совместного решения системы уравнений газодинамики и теплопроводности

2.5 Разработка упрощенной термогидродинамической модели потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления в приближении трехслойного изоляционного покрытия

2.6 Выводы

### **Глава 3 Разработка комплекса программ термогидродинамического расчета ГП и результаты вычислительных экспериментов по оценке эффективности алгоритмов**

3.1 Архитектура комплекса программ термогидродинамического расчета потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур

3.2 Программно-информационное обеспечение комплекса программ

3.1.1 Схема взаимодействия базовых модулей и информационного обеспечения

3.1.2 Программный модуль расчета термодинамических свойств многокомпонентной смеси углеводородов

3.1.3 Программный модуль термогидродинамического расчета потока газа в трубопроводе

3.1.4 Программный модуль расчета температурного поля в стенке трубы с многослойным изоляционным покрытием в приближении осевой симметрии поля температур и теплообмена газа с окружающей средой

3.3 Режимы функционирования и методика применения комплекса программ для термогидродинамического расчета потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур

3.4 Результаты вычислительных экспериментов по анализу сходимости алгоритма расчета термогидродинамических параметров потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур

3.5 Выводы

### **Глава 4 Практическое применение комплекса программ термогидродинамического расчета подводного многослойно изолированного ГП высокого давления**

4.1 Методики проведения и результаты вычислительных экспериментов по оценке влияния многослойного изоляционного покрытия на режимные параметры газопровода

4.2 Идентификация и оценка адекватности термогидродинамической модели потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур

4.3 Анализ результатов термогидродинамических расчетов потока газа в подводном газопроводе высокого давления

4.4 Разработка научно-обоснованных рекомендаций по анализу возникновения возможных нештатных ситуаций при эксплуатации подводных газопроводов высокого давления

4.5 Выводы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А Таблица констант простого и эталонного вещества

Приложение Б Таблица констант индивидуальных веществ для расчета мольной теплоемкости при постоянном давлении в идеальном газе

Приложение В Формулы преобразования информации разреженной СЛАУ к блочно-трехдиагональному виду для различных типов граничных условий

Приложение Г Глоссарий основных терминов и понятий.

Приложение Д Справки о практическом использовании результатов диссертационной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, основные положения, выносимые на защиту. Приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

**В первой главе** изложен краткий аналитический обзор результатов современных научных исследований по термодинамике, газовой динамике; кратко описаны термогидродинамические модели потоков газа в трубопроводах.

**Вторая глава** посвящена разработке термогидродинамической модели потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур, которая имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0; \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v^2) + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \alpha + \frac{1}{4r_{in}} \xi \rho v |v| = 0; \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \varepsilon + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g H \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho v \left( \frac{v^2}{2} + h + g H \right) \right) = -\frac{Q}{S}; \quad (1.3)$$

$$a_i \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (1.4)$$

$x$  – координата оси трубопровода,  $t$  – время,  $p(t, x)$  – давление в газопроводе,  $\rho(t, x)$  – плотность газа,  $v(t, x)$  – скорость потока газа,  $r$  – радиальная координата,  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления,  $\alpha$  – угол наклона газопровода к горизонту,  $H$  – высота от рассматриваемой точки газопровода до уровня моря,  $\varepsilon$  –

удельная внутренняя энергия газа,  $h$  – удельная энтальпия газа,  $g$  – ускорение свободного падения,  $Q$  – поток теплоты от газа в окружающую среду в единицу длины трубы,  $S$  – площадь внутреннего сечения трубы,  $i$  – индекс материала слоя стенки трубы,  $a_i^{-1}$  – коэффициент температуропроводности  $i$ -го слоя стенки трубы,  $u(t, r, x)$  – поле температуры в материале стенки трубы,  $T(t, x)$  – температура газа. Система (1.1)-(1.4) описывает процессы взаимодействия трех физических подсистем: движущийся газ, стенка трубы, окружающая среда и замыкается соотношениями для расчета термодинамических свойств газа

$$\rho = \rho(p, T), h = h(p, T), \varepsilon = h - \frac{p}{\rho}, \quad (2)$$

краевыми условиями на границах раздела сред и торцах трубопровода

$$\lambda_n \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=r_{ex}} = K_{ex} (T_{os} - u \Big|_{r=r_{ex}}), \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \lambda_i \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=r_i}, \quad (3)$$

$$Q = -2\pi r_{in} K_{in} (T - u \Big|_{r=r_{in}}), \quad (4)$$

граничными условиями для уравнений газовой динамики, например в виде

$$p(t, 0) = \varphi_1(t), p(t, L) = \varphi_2(t), T(t, 0) = \psi_1(t), T(t, L) = \psi_2(t) \quad (5)$$

и начальными условиями в момент времени  $t_0$ :

$$p(t_0, x) = p_0(x), v(t_0, x) = v_0(x), T(t_0, x) = T_0(x), \quad (6)$$

$$u(t_0, r, x) = u_0(r, x). \quad (7)$$

Где  $K_{ex}$  – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности трубопровода в окружающую среду,  $K_{in}$  – коэффициент теплоотдачи от газа к внутренней поверхности трубы,  $r_{ex}$  – радиус внешнего слоя изоляции,  $r_{in}$  – внутренний радиус трубы,  $T_{os}$  – температура окружающей среды,  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя изоляции,  $n-1$  – количество слоев изоляции,  $L$  – протяженность трубопровода.

Очевидно, что если существует решение уравнений (1.1)-(1.3), дополненных уравнениями связи (2) и (4) с начальными условиями (6) и граничными условиями (5) при заданном распределении  $u \Big|_{r=r_{in}}(t, x)$  в (4) и существует решение четвертого уравнения системы (1.4) с начальными условиями (7), граничными условиями (3) и граничным условием первого рода на внутренней границе  $r = r_{in}$ , определяемым  $u \Big|_{r=r_{in}}(t, x)$ , то эти решения будут одновременно являться решением задачи (1)-(7) если выполнено условие

$$K_{in} (T - u \Big|_{r=r_{in}}) = \lambda_0 \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=r_{in}} \quad (8)$$

Уравнения связи (2) определяются из термодинамики текущего газа. В диссертационной работе для расчета термодинамических свойств газа в области высоких давлений в качестве основного уравнения состояния выбрано уравнение Ли-Кеслера. Для метаносодержащих составов (более 80% метана) точность расчета термодинамических потенциалов по уравнению Ли-Кеслера составляет порядка 2% при давлениях до 36 МПа и температурах от 250 К до 400 К. При повышении

содержания метана точность, как показала проверка этого уравнения состояния в диссертации, существенно увеличивается.

Численное решение строится методом конечных разностей. Построение разностной схемы для уравнений (1.1)-(1.3) производится интегро-интерполяционным методом (Рис. 1).

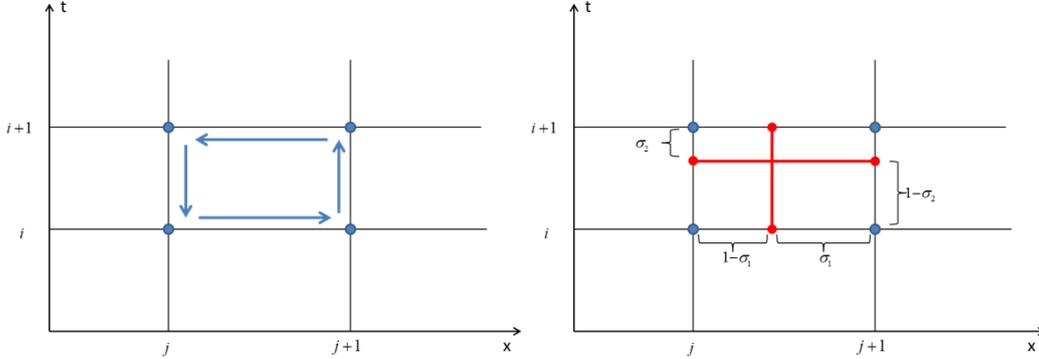


Рис. 1. Пояснение процедуры построения разностной схемы

В работе используется полностью неявная по времени,  $\sigma_2 = 0$ , и центрально-разностная по координате  $\sigma_1 = 1/2$  разностная схема:

$$\Lambda_t^{1/2}[G] + \Lambda_x^0[Gv + Sp] + \left[ S\rho g \sin \alpha + \frac{\pi r}{4} \xi \rho v |v| \right]_{j+1/2}^{i+1} = 0 \quad (9.1)$$

$$S\Lambda_t^{1/2}[\rho] + \Lambda_x^0[G] = 0 \quad (9.2)$$

$$S\Lambda_t^{1/2} \left[ \rho \varepsilon^{(y\theta)} + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g H \right] + \Lambda_x^0 \left[ G \left( \frac{v^2}{2} + h^{(y\theta)} + g H \right) \right] = -Q_{j+1/2}^{i+1} \quad (9.3)$$

где  $G = \rho v S$ ,  $\Lambda_t^{\sigma_1}$  и  $\Lambda_x^{\sigma_2}$  операторы разностного дифференцирования по времени и координате с соответствующими весами. Система нелинейных алгебраических уравнений (9.1)-(9.3), дополненная граничными условиями, решается многомерным методом Ньютона. На каждом шаге итераций производится преобразование информационно разреженной матрицы системы линейных уравнений (далее СЛАУ) к блочно-трехдиагональному виду для решения методом матричной прогонки. Размерность решаемой СЛАУ порядка  $10^5$ . Итерации прерываются при достижении сходимости. Проверка сходимости предложенной автором разностной схемы проводилась на известном аналитическом решении уравнений газовой динамики для распространения ударной волны в идеальном газе.

В следующей части диссертации проводится анализ теплообмена газового потока с окружающей средой. В упрощенной постановке построены и проанализированы аналитические решения для уравнения теплопроводности (1.4) в многослойно изолированной стенке трубы. В общем случае построен численный алгоритм решения, построена полностью неявная разностная схема для нестационарного уравнения теплопроводности (1.4) в цилиндрической системе координат в многослойной области (Рис. 2).

$$\frac{1}{r_j \Delta r} \left( r_{j+1/2} \frac{u_{j+1,i}^{\tau+1} - u_{j,i}^{\tau+1}}{\Delta r} - r_{j-1/2} \frac{u_{j,i}^{\tau+1} - u_{j-1,i}^{\tau+1}}{\Delta r} \right) + \frac{u_{j,i+1}^{\tau+1} - 2u_{j,i}^{\tau+1} + u_{j,i-1}^{\tau+1}}{\Delta x^2} = a_k \frac{u_{j,i}^{\tau+1} - u_{j,i}^{\tau}}{\Delta t} \quad (9.4)$$

Проведено тестирование разработанной разностной схемы на сходимость и устойчивость. Построенная разностная схема для уравнения теплопроводности (9.4) описана в литературе и является безусловно устойчивой.

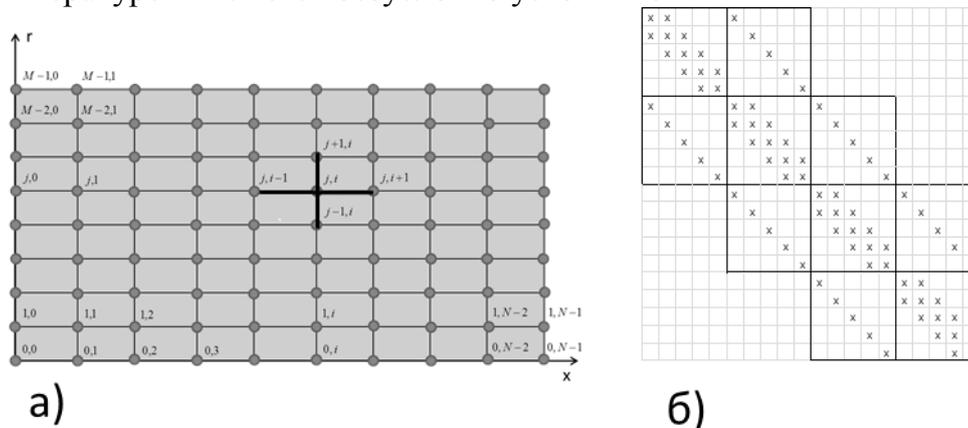


Рис. 2. Пояснение к разностной схеме уравнения теплопроводности: а) шаблон разностной схемы на двумерной пространственной сетке; б) вид матрицы СЛАУ.

Разработан быстродействующий алгоритм построения стационарного решения уравнения теплопроводности, учитывающий особенности области построения решения, который может быть применим для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка в длинной прямоугольной области. Использована индексация разностных уравнений и переменных (9.4), при которой получившаяся СЛАУ имеет ленточную структуру (Рис. 2) и решается методом матричной прогонки, число операций можно оценить как  $N \cdot M^2$ , где  $M$  число узлов сетки по радиальной переменной,  $N$  по координате  $x$  ( $N \sim 10^5$ ). При использовании итерационного метода число операций можно оценить как  $10n \cdot N \cdot M$ , где  $n$  число итераций, следовательно при  $M < 10n$  предложенный метод решения оказывается более экономичным.

Разработан алгоритм решения системы уравнений (1)-(7). Проводится исследование сходимости алгоритма при решении системы (8) методом простой итерации и методом Ньютона. Сходимость невязки системы уравнений (8) к нулю свидетельствует о существовании решения задачи (1)-(7) (Рис. 3).

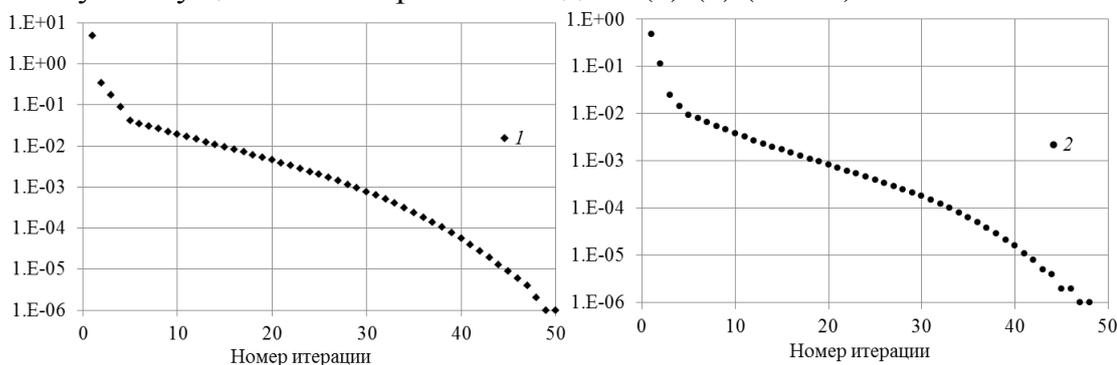


Рис. 3. Графики сходимости алгоритма:  
 1 – зависимость невязки от номера итерации, 2 – зависимость изменения температуры от номера итерации

Расчет процесса теплообмена газопровода с окружающей средой традиционно проводится по упрощенной формуле  $Q = -2\pi r_{in} K_{cp} (T - T_{os})$ , где  $K_{cp}$  общий коэффициент теплопередачи, рассчитываемый по приближенным формулам в зависимости от способа прокладки газопровода,  $T_{os}$  температура окружающей среды, который обладает удовлетворительной точностью, несмотря на то, что в нем пренебрегается взаимным влиянием газа и окружающей среды и нестационарными эффектами. В работе было построено приближенное аналитическое решение уравнения теплопроводности в многослойно изолированной стенке трубопроводе, которое позволило получить упрощенную термогидродинамическую модель потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления, характеризующуюся новым уравнением баланса энергии движущегося газа [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho \varepsilon^{(v\theta)} + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g H \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho v \left( \frac{v^2}{2} + h^{(v\theta)} + g H \right) \right) = -\frac{2}{r_{in}} K_{cp} (T - T_{os}) + \frac{2}{r_{in}} \gamma \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.3a)$$

где  $\gamma = \left( \frac{K_{in}}{K_{in} + K_{ex}} \right)^2 c \rho \Delta r$ ,  $K_{cp} = \left( K_{in}^{-1} + K_{ex}^{-1} + \frac{\Delta r}{\lambda} \right)^{-1}$  общий коэффициент теплоотдачи,

$\Delta r$  - толщина стальной стенки трубы,  $c$  - удельная теплоемкость стали,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности стали,  $\rho$  - плотность стали. Предложенная автором поправка  $\frac{2}{r_{in}} \gamma \frac{\partial T}{\partial t}$  в уравнение баланса энергии обусловлена тепловой инерцией стенки трубы, что показано в последующих главах диссертации.

Так же в главе приведены основные соотношения, полученные автором для преобразования информационно разреженных матриц к блочно-трехдиагональному виду.

**В третьей главе** диссертации дано описание архитектуры, программно-информационного обеспечения и режимов функционирования комплекса программ для термогидродинамического расчета потока газа в подводном многослойно изолированном ГП высокого давления.

В архитектуру КП входят четыре функциональные группы программных модулей: модуль расчета свойств многокомпонентной смеси углеводородов, модуль решения уравнений газовой динамики, модуль решения уравнения теплопроводности в длинной цилиндрической области, модуль решения задачи (1)-(7).

Все программные модули написаны на алгоритмическом языке Си++. Объем программного кода порядка 24 000 строк. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№2016614013 Программа моделирования теплопроводности в многослойном цилиндре в приближении аксиальной симметрии).

Приведены результаты вычислительных экспериментов по проверке сходимости алгоритмов решения уравнений газовой динамики (1.1) (1.2) (1.3) и теплопроводности (1.4). Проверка сходимости разностной схемы проводилась на известном аналитическом решении для распространения ударной волны в идеальном газе. На рисунке (Рис. 4) показаны графики распределения скорости, давления и температуры газа при уменьшении шагов пространственно-временной сетки при соотношении

шагов  $\frac{\Delta x}{\Delta t} = 0.1v_1$ , где  $v_1 \approx 129$  м/с - скорость газа за фронтом волны. На рисунке (Рис.

4) видно, что численное решение сходится к аналитическому.

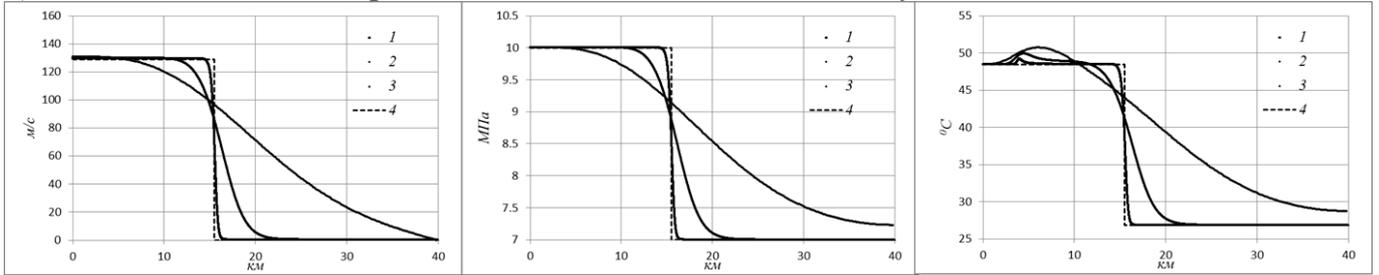


Рис. 4. Графики оценки сходимости разностной схемы:

1-  $\Delta t = 10$  с, 2-  $\Delta t = 1$  с, 3-  $\Delta t = 0.1$  с, 4-точное решение

В диссертации показывается, что построенная полностью неявная разностная схема (9.1)-(9.3) обладает сходимостью при различных соотношениях  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ . В диссертационной работе проведено определение оптимальных параметров пространственно-временной сетки разностной схемы для расчета режимов работы газопроводов, встречающихся на практике.

**В четвертой главе** диссертации проведена проверка адекватности построенной термогидродинамической модели потока газа в многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления в приближении осевой симметрии поля температур.

Приведены результаты вычислительных экспериментов для модельного газопровода. Представлены результаты сравнительного анализа традиционного алгоритма расчета теплообмена потока газа с окружающей средой, с помощью общего коэффициента теплопередачи, и алгоритма, разработанного в диссертации (1.1)-(1.4). Рассчитывается величина поправки температуры газа, обусловленной уточнением модели окружающей среды как при стационарных, так и при нестационарных режимах работы газопровода.

Проанализирована область применимости разработанной автором модели по давлению и температуре. Показано, что значения давления и температуры газа, характерные для морских газопроводов удовлетворяют этой области. Рассмотрен вопрос выбора гидравлического сопротивления. Проведена идентификация эквивалентной шероховатости и коэффициента теплопередачи  $K_{ex}$ . Проведена оценка адекватности модели путем сравнения рассчитанных параметров газового потока с результатами измерений (Рис. 5).

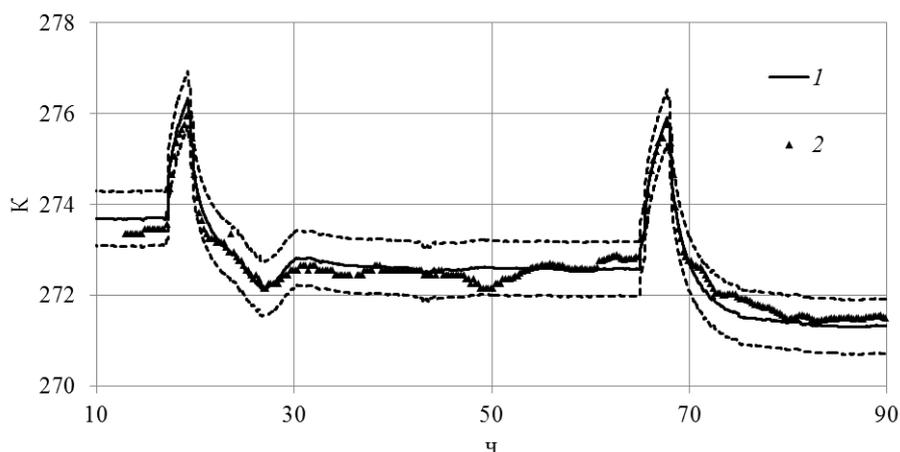


Рис. 5. Температура газа в конце газопровода:  
1- расчет, 2- эксперимент.

Далее рассматриваются результаты применения разработанной модели окружающей среды для расчета реальных газопроводов. Проводится анализ неопределенности исходных данных об окружающей среде при расчете коэффициента теплопередачи и влияние ошибки в расчете данного коэффициента на термогидродинамический расчет подводного газопровода высокого давления.

Затем проводится анализ нестационарных режимов работы. Рассматривается влияние на работу газопровода эффекта тепловой инерции трубы, описанного в упрощенной термогидродинамической модели потока газа в многослойно изолированном подводном газопровode высокого давления (1.3а). Расчеты показывают, что использование при существенно нестационарных режимах работы упрощенной прикладной модели (1.3а) существенно увеличивает точность термогидродинамических расчетов по сравнению с традиционными моделями (Рис. б).

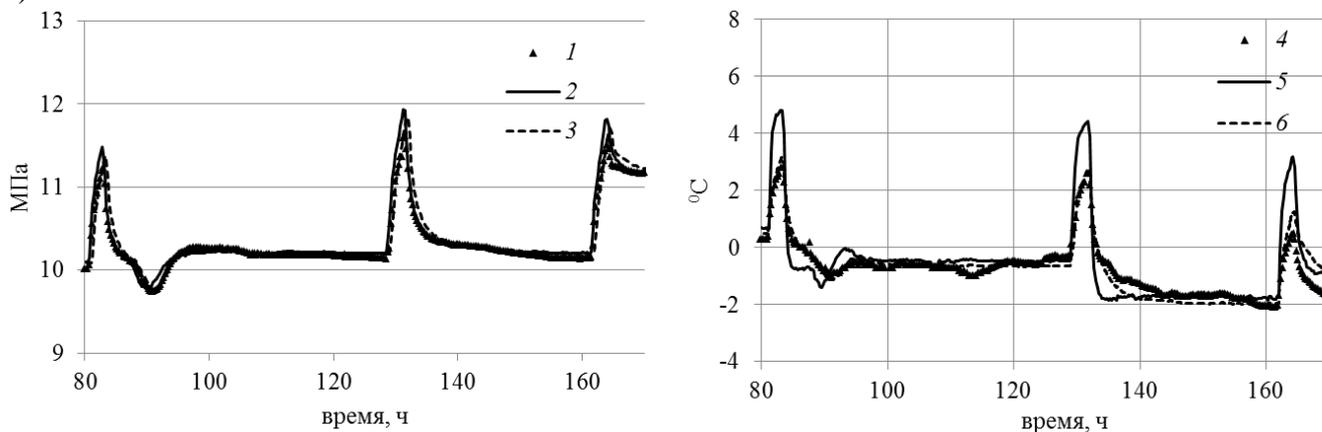


Рис. 6. Давление и температура в конце газопровода:

- 1- замер давления; 2- расчет давления, традиционная модель теплообмена;  
3- расчет давления, модель с поправкой в уравнение энергии; 4- замер температуры;  
5- расчет температуры, традиционная модель теплообмена; 6- расчет температуры,  
модель с поправкой в уравнение энергии.

В заключении описаны технологические постановки задач, возникающие при выработке научно-обоснованных рекомендаций по анализу возникновения возможных нештатных ситуаций при эксплуатации газопроводов высокого давления.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана физико-математическая модель однофазного потока газа в газопроводе высокого давления и математическая модель теплообмена потока газа с окружающей средой в приближении осевой симметрии поля температуры.

2. Разработаны численные алгоритмы решения системы уравнений газодинамики совместно с уравнением теплопроводности в многослойной цилиндрической области в приближении осевой симметрии поля температур.

3. Предложена поправка в уравнение сохранения энергии системы уравнений газовой динамики, обусловленная инерционностью процессов теплообмена и теплоемкостью стенки трубопровода.

4. Разработан программный комплекс, реализующий предложенные численные алгоритмы и позволяющий проводить термогидродинамический расчет подводного газопровода высокого давления.

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

### В изданиях перечня ВАК:

1. Казак К.А., Чионов А.М., Коршунов С.А., Кулик В.С., Казак А.С. Идентификация неизмеряемых параметров газопровода для моделирования параметров потока газа // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. №2. – С. 36-41.

2. Кулик В.С., Коршунов С.А., Казак К.А., Чионов А.М., Казак А.С. Об использовании различных формул коэффициента гидравлического сопротивления для расчета параметров потока в газопроводах высокого давления // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. №3. – С. 34-37.

3. Коршунов С.А., Чионов А.М., Казак К.А. Метод расчета неустановившихся режимов транспортировки газа по ЛЧМГ при возникновении утечки // Газовая промышленность. – 2012. №4. – С. 44-47.

4. Коршунов С.А., Чионов А.М., Казак К.А., Казак А.С., Кулик В.С., Бушмелева А.В., Котенев В.М. Метод обнаружения утечки газа в линейной части газопровода // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – №1. – С. 14-21.

5. Чионов А.М., Коршунов С.А., Казак К.А., Кулик В.С., Казак А.С. Влияние тангенциальных составляющих потока тепла на общий теплообмен трубопровода с окружающей средой // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. №5. – С. 4-7.

6. Коршунов С.А., Чионов А.М., Кулик В.С., Казак К.А. Влияние теплоемкости трубы на процесс теплообмена при транспортировке природного газа // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. №6. – С. 8-11.

7. Чионов А.М. Метод расчета параметров потока газа в трубопроводе в приближении аксиальной симметрии температурного поля окружающей среды // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. №3-4(43-44). – С. 38-43.

8. В.П. Мешалкин, А.М. Чионов, А.С. Казак, В.М. Аристов, Компьютерная модель нестационарного газового потока в протяженном многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления // Доклады академии наук. – 2016. Т.469. №6. – С. 694-697.

9. В.П. Мешалкин, А.М. Чионов, А.С. Казак, В.М. Аристов, Прикладная компьютерная модель нестационарного потока в протяженном многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления // Доклады академии наук. 2016. Т.470. №1. – С. 56-59.

**В других изданиях:**

10. Чионов А.М., Стурейко И.О., Казак К.А. Система теплогидравлического моделирования режимов работы магистральных газопроводов при различных способах их прокладки // Газотранспортные системы: настоящее и будущее: Тез. докл. III Международной научно-технической конференции – М., 2009. С. 72.

11. Казак А.С., Стурейко И.О., Казак К.А., Чионов А.М., Коршунов С.А., Бушмелева А.В. Метод расчета неустановившихся режимов транспортировки газа по линейному участку магистрального газопровода при возникновении утечки / Газотранспортные системы: настоящее и будущее: Тез. докл. IV Международной научно-технической конференции – М., 2011. – С. 29.

12. Казак А.С., Казак К.А., Чионов А.М., Коршунов С.А., Кулик В.С., Панкратов С.Н. Моделирование газотранспортных систем: монография. М.: ИНФРА-М, 2016. 264с.

В совместно опубликованных работах А.М. Чионову принадлежат следующие результаты: построено и проанализировано аналитическое решения уравнения теплопроводности в цилиндре с теплоизолированными торцами. Построены разностные схемы для решения системы уравнений (1.1)-(1.4) и предложен метод преобразования информационно разреженных матриц к блочно техдиагональному виду, для части краевых условий разработаны соответствующие расчетные модули. С применением открытых экспериментальных данных проанализирована область применения уравнения Ли Кеслера для расчета свойств углеводородов в области высоких давлений. Получено приближенное аналитическое решение нестационарного уравнения (1.4) и на основании него предложена поправка в уравнение баланса энергии движущегося газа (1.3а). Разработаны и реализованы в виде программных модулей алгоритмы идентификации неизмеряемых параметров и проведено исследование области применимости известных формул гидравлического сопротивления.

\*\*\*

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить свою глубокую благодарность научному руководителю – академику, профессору, д.т.н., высокоуважаемому Мешалкину Валерию Павловичу за внимание и ценные научно-методические консультации.

Автор благодарит преподавателей РХТУ им. Д. И. Менделеева за доброжелательную поддержку и плодотворные научные дискуссии по результатам диссертационной работы.

Автор выражает глубокую благодарность своему учителю - профессору, д.т.н., Казаку Александру Соломоновичу.