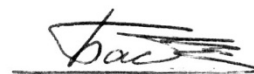


На правах рукописи



Бабенко Алексей Васильевич

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-ЭВРИСТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ И КОМПЛЕКСЫ
ПРОГРАММ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ
С ДВУХФАЗНЫМИ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫМИ ПОТОКАМИ**

Специальности:

- 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре информатики и компьютерного проектирования
Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

Научный руководитель: заведующий кафедрой информатики и
компьютерного проектирования Российского
химико-технологического университета имени
Д.И. Менделеева, доктор технических наук, про-
фессор Гартман Томаш Николаевич

Официальные оппоненты: заведующий кафедрой компьютерно-
интегрированных систем в химической техноло-
гии Российского химико-технологического
университета имени Д.И. Менделеева,
доктор технических наук профессор
Егоров Александр Федорович;

директор научно-технического центра «Маги-
стральный транспорт газа», кандидат технических
наук Белинский Александр Вячеславович.

Ведущая организация: Российский государственный университет нефти
и газа им. И.М. Губкина.

Защита состоится 19 ноября 2013 года в 13:00 на заседании диссертационного
совета Д212.204.10 при РХТУ им. Д.И. Менделеева по адресу 125047 Москва,
Миусская пл., д. 9, Конференц-зал (ауд. 443).

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

Автореферат разослан «__» _____ 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.204.10, д. т. н., профессор



Ю.А. Комиссаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

Сложные трубопроводные системы (ТС), транспортирующие технологические однофазные и многофазные потоки, обеспечивают перемещение продуктов между аппаратами химических производств, представляющих собой разного уровня сложные химико-технологические системы (ХТС). Стоимость технологических трубопроводов (ТТ) на химических предприятиях (ХП) составляет примерно 7-10% от общих капитальных затрат, что обуславливает практическую важность точности их расчета и оптимизации параметров ТС при проектировании и реконструкции ХП.

К основным задачам анализа систем технологических трубопроводов (СТТ) относятся задачи гидравлического и теплового расчета ТС. Тепловым и гидравлическим расчетом ТС называется определение эксплуатационных характеристик (потери давления, теплотери, расходы, давления и температуры во всех узлах и сопротивлениях) готовой (существующей или проектируемой) ТС при известных геометрических и конструктивных параметрах ТС.

Задача анализа ТС, транспортирующих двухфазные потоки, является актуальной, поскольку двухфазные потоки часто перемещаются по ТС в разных отраслях промышленности: нефтехимической, атомной, в нефтегазодобыче и др. Гидравлический и тепловой расчет подобных ТС представляет собой сложную инженерно-технологическую задачу, в решении которой можно выделить три основных подзадачи: расчет элементов неразветвленных участков ТС (прямые участки труб, отводы, переходы, арматура и др.); расчет неразветвленных участков ТС с постоянным расходом (ветвей ТС); расчет потокораспределения в сложных ТС.

Основные методы решения задачи гидравлического расчета ТС, или расчета потокораспределения в сложных ТС изложены в работах отечественных ученых: проф. Лобачева В.Г., проф. Андрияшева М.М., член-корр. РАН Меренкова А.П., проф. Хасилева В.Я., академика Кафарова В.В., член-корр. РАН, проф. Мешалкина В.П., проф. Новицкого Н.Н., проф. Сухарева М.Г., проф. Зоркальцева В.И и др., а также ряда зарубежных ученых: Cross H., Todini E и др. Анализ указанных научных работ показал, что в них отдельно не рассматривались методы решения задачи расчета потокораспределения в сложных ТС с двухфазными потоками.

Особый интерес представляют научные работы член-корр. РАН, проф. Мешалкина В.П. и его учеников проф. Панова М.Я. и проф. Квасова И.С. по топологическим и диакоптическим методам анализа сложных ТС, которые широко использовались при решении задач проектирования и реконструкции ТС предприятий нефтегазохимического комплекса и ТС жилищно-коммунального хозяйства. В работах член-корр. РАН, проф. Мешалкина В.П. и проф. Бутусова О.Б. предложены оригинальные методы расчета трубопроводов с нестационарными течениями газо-жидкостных потоков.

Разработке математических моделей и методов расчета прямых участков труб, отводов, переходов и др. элементов ТС с двухфазными потоками, посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых: академика Нигматулина Р.И., Кутателадзе С.С., Мамаева В.А., Фисенко В.В., Медведева В.Ф., Лурье М.В., Марона В.И., Taitel Y., Dukler A.E., Barnea D., Petalas N., Aziz K., Chisholm D., Morris S.D., Simpson H.C., Rouhani S.Z., Xiao, J.; Shoham, O., Brill, J. P и др. Однако, из-за определенных особенностей двухфазных потоков большинство математических моделей и методов, предложенных указанными авторами, имеют ограниченный круг применимости, что

не позволяет использовать их при любых параметрах двухфазных потоков. Также в этих работах не рассматривались методы решения задач потокораспределения в сложных ТС с двухфазными потоками.

Основными отличительными особенностями двухфазных потоков, затрудняющими применение методов математического моделирования однофазных потоков, являются: существование принципиально различных режимов течения с разным поведением и взаимодействием фаз, различные скорости фаз, различие расходного и истинного содержания фаз, малая скорость звука в двухфазном потоке (большая вероятность околоскоростного и критического течения), необходимость учета скоростного напора, возможность изменения состава продукта для многокомпонентных потоков, возможность сепарации на тройниках.

Таким образом, научная задача разработки универсальных математических моделей и вычислительных алгоритмов анализа сложных ТС с двухфазными потоками с учетом физико-химических и гидродинамических свойств двухфазных потоков, а также реализация их в виде комплексов проблемно-ориентированных программ является актуальной задачей, имеющей важное значение для проектирования и управления эксплуатацией сложных ТС.

Основные разделы диссертационной работы соответствуют следующим пунктам Плана фундаментальных научных исследований РАН до 2025 года: «3.1.3. Исследования движения гетерогенных сред применительно к проблеме использования двухфазных рабочих тел и твердого топлива в энергетике», «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» и приоритетным направлениям «Информационно-телекоммуникационные системы» и «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», 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.

Цель диссертационной работы: разработка математических моделей, декомпозиционно-эвристических алгоритмов и комплексов программ анализа сложных ТС с двухфазными потоками с учетом особенностей двухфазных потоков.

Для достижения указанной цели потребовалось сформулировать и решить следующие основные научные задачи:

1. Классификация типовых задач анализа ТС с двухфазными потоками.
2. Разработка модели течения двухфазных потоков в трубопроводе, учитывающей физико-химические и гидродинамические особенности движения двухфазных потоков.
3. Создание моделей представления знаний о применении замыкающих соотношений для расчета истинного газосодержания и гидравлических потерь в зависимости от параметров двухфазных потоков.
4. Разработка алгоритма теплового и гидравлического расчета двухфазных потоков в прямых участках труб и местных сопротивлениях, учитывающего осо-

бенности двухфазных потоков и узкий круг применимости замыкающих соотношений.

5. Разработка алгоритма теплового и гидравлического расчета двухфазных потоков в неразветвленных трубопроводах с учетом возможности критического и околоскритического течения и обеспечивающим автоматическую адаптацию используемых видов уравнений.
6. Модификация алгоритма глобального градиента (GGA) для расчета потокораспределения в сложных ТС с двухфазными потоками.
7. Разработка архитектуры и режимов функционирования расчетной части комплексов программ «Гидросистема» и «Предклапан», реализующих предложенные модели и алгоритмы анализа трубопроводных систем с двухфазным течением.
8. Оценка эффективности разработанного модифицированного глобально-градиентного алгоритма при решении тестовой задачи расчета потокораспределения в сложной ТС с двухфазными потоками.

Научная новизна основных результатов работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель течения двухфазных потоков в трубопроводе, отличающаяся использованием смешанной математической модели течения и гибким использованием различных соотношений для определения режимов двухфазного течения, а так же замыкающих соотношений для расчета истинного газосодержания и гидравлических потерь в зависимости от параметров двухфазного потока, что позволяет наиболее адекватно описывать сложные гидродинамические режимы течения газо-жидкостных потоков.
2. Предложен декомпозиционно-эвристический алгоритм теплового и гидравлического расчета двухфазных потоков в прямых участках труб и местных сопротивлениях, отличающийся использованием редактируемых наборов эвристических правил выбора (в зависимости от режима течения, вязкости фаз, расхода, типа гидравлического сопротивления) методик расчета режимов двухфазного течения, истинного газосодержания, потерь на трение, потерь в местных сопротивлениях, учетом кипения или конденсации с определением фазовых переходов и теплообмена с окружающей средой (в том числе в трубопроводах с тепловой изоляцией), что позволяет повысить точность теплового и гидравлического расчета трубопроводов.
3. Предложен адаптивный алгоритм теплового и гидравлического расчета двухфазных течений в неразветвленных трубопроводах, отличающийся возможностью прямого (по направлению потока) и обратного (против направления потока) расчета с учетом возможного критического и околоскритического течения и автоматической адаптацией вида используемых уравнений, что позволяет выполнять тепловой и гидравлический расчеты ветвей трубопровода с докритическим, околоскритическим или критическим течением двухфазных потоков.
4. Предложен модифицированный глобально-градиентный алгоритм расчета потокораспределения в сложных ТС, отличающийся возможностью гидравлического и теплового расчета «замороженного» двухфазного течения, что позволяет выполнять расчет тепловых и гидравлических характеристик сложных ТС с двухфазными потоками.

5. Разработаны архитектура и режимы функционирования расчетной части комплексов программ «Гидросистема» и «Предклапан», реализующих предложенные математические модели и алгоритмы анализа трубопроводных систем с двухфазным течением, что позволяет автоматизировано выполнять поверочные расчеты различного вида ТС с двухфазными потоками.

Теоретическая и практическая значимость.

Разработанные в диссертации математические модели и алгоритмы вносят определенный вклад в развитии теории гидравлического расчета сложных ТС с двухфазными потоками.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Предложенные алгоритмы реализованы с применением методов объектно-ориентированного программирования на языке C++ при разработке проблемно-ориентированных комплексов программ «Гидросистема» и «Предклапан».
2. С использованием разработанных алгоритмов и комплекса программ проведен тепловой и гидравлический расчет промышленной ТС ректификационной установки.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования, вычислительной математики, методы теории графов, теории матриц, численные методы решения дифференциальных уравнений, математические модели типовых процессов химической технологии, современные методы и средства разработки комплексов программ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель течения двухфазных потоков в трубопроводе, учитывающая особенности двухфазных потоков.
2. Декомпозиционно-эвристический алгоритм теплового и гидравлического расчета двухфазных потоков в прямых участках труб с учетом местных сопротивлений, особенностей двухфазных потоков и границ применимости замыкающих соотношений.
3. Адаптивный алгоритм теплового и гидравлического расчета неразветвленных трубопроводов с двухфазными потоками, учитывающий возможность критического и околоскритического течения и обладающий возможностью автоматически адаптировать вид используемых уравнений.
4. Модифицированный глобально-градиентный алгоритм расчета потокораспределения в сложных ТС с двухфазными потоками.
5. Архитектура, режимы функционирования и программная реализация расчетной части комплексов программ «Гидросистема» и «Предклапан», реализующих предложенные модели и алгоритмы анализа трубопроводных систем с двухфазным течением.
6. Результаты оценки эффективности разработанного модифицированного алгоритма глобального градиента (GGA) при решении тестовой задачи расчета потокораспределения в сложной ТС.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность приведенных в работе научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена применением методов математического моделирования, теории графов, теории матриц, методов вычислительной математики, современных методов и средств разработки комплексов программ, а также многочисленными численными экспериментами, резуль-

таты которых позволяют сделать вывод об адекватности разработанных математических моделей и работоспособности созданных алгоритмов.

Результаты работы апробированы докладами на пяти научных конференциях: 12-е заседание Всероссийского семинара с международным участием «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем», г. Ялта, 2010 г; VI Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии МКХТ-2010 (The 6-th United Congress of Chemical Technology of Youth «UCChT-2010»), г. Москва, 2010 г; 13-е заседание Всероссийского семинара с международным участием «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем», учебно-производственный центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012 г; 50-е заседание Группы пользователей DIERS (Design Institute for Emergency Relief Systems) при Американском Институте Инженеров-Химиков (American Institute of Chemical Engineers – AIChE), Бостон, США (Boston, MA, USA), 2012 г; The Tulsa University Fluid Flow Projects (TUFPF) Advisory Board Meeting, Талса, США, 2013 г.

Предложенные в диссертации математические модели и алгоритмы, реализованные в виде комплекса программ «Гидросистема» и «Предклапан», в настоящее время используется более чем в 50 организациях России и стран СНГ.

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ, в том числе 5 в журналах, рекомендуемых ВАК.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, глоссария основных терминов и понятий, двух приложений.

Оглавление диссертации.

Введение

Глава 1. Состояние современных научных исследований по компьютерному моделированию трубопроводных систем с двухфазными потоками и расчету потокораспределения в сложных трубопроводных системах

1.1 Аналитический обзор современных методов расчета потокораспределения в сложных трубопроводных системах

1.2 Аналитический обзор основных математических моделей, алгоритмов и методов расчета многофазных потоков в трубопроводных системах

1.2.1 Особенности гидравлических и тепловых расчетов трубопроводных систем с двухфазными потоками

1.2.2 Математические модели и алгоритмы расчета двухфазных течений

1.2.3 Методы определения режимов течения в трубопроводных системах

1.2.4 Методы расчета объемного газосодержания

1.2.5 Методы расчета гидравлических потерь в трубах и местных сопротивлениях

1.2.6 Методы расчета теплообмена с окружающей средой

1.3 Сравнительный анализ существующих комплексов программ анализа трубопроводных систем с двухфазными потоками

1.4 Обоснование актуальности, цели и задачи диссертационной работы

Глава 2. Разработка математического и алгоритмического обеспечения компьютерного анализа трубопроводных систем с двухфазными потоками

2.1 Классификация задач анализа сложных трубопроводных систем с двухфазными потоками

2.2 Разработка математической модели гидродинамики двухфазных потоков с учетом различных режимов течения и замыкающих соотношений

2.3 Декомпозиционно–эвристический алгоритм расчета течений в участках сложных трубопроводов с двухфазными потоками

2.4 Адаптивный алгоритм расчета потока в ветви трубопровода с учетом возможного критического истечения

2.5 Модифицированный глобально-градиентный алгоритм расчета потокораспределения для изотермического и неізотермического «замороженного» двухфазного течения в сложных трубопроводных системах

2.6 Выводы

Глава 3. Архитектура и программно-информационное обеспечение комплекса программ анализа трубопроводных систем с двухфазными потоками

3.1. Архитектура комплексов программ анализа трубопроводных систем с двухфазными газо-жидкостными потоками «Гидросистема» и «Предклапан»

3.2 Программное обеспечение комплексов программ

3.2.1 Интерфейс пользователя

3.2.2 Система базовых классов и модуль проведения тепловых и гидравлических расчетов

3.2.3 Модуль взаимодействия с библиотеками расчета теплофизических свойств и фазовых равновесий

3.3 Интеллектуальное и информационное обеспечение

3.3.1 Используемые базы данных

3.3.2 База инженерно-технологических знаний о выборе замыкающих соотношений для математических моделей гидродинамики двухфазных потоков

3.3.3 Модуль «Климатология»

3.4 Режимы функционирования и методика применения комплексов программ

3.4.1 Программа «Гидросистема»

3.4.2 Программа «Предклапан»

3.5 Результаты вычислительных экспериментов по оценке эффективности разработанных алгоритмов компьютерного анализа сложных трубопроводных систем с двухфазными потоками

3.6 Выводы

Глава 4. Практическое применение комплекса «Гидросистема» для компьютерного анализа трубопроводной системы промышленной ректификационной установки с двухфазным течением

4.1 Инженерно-технологическая и математическая постановка задачи анализа трубопроводной системы ректификационной установки

4.2 Формирование правил выбора замыкающих соотношений

4.3 Разработка компьютерных моделей трубопроводной системы

4.4 Анализ научно-обоснованных результатов расчета трубопроводной системы

4.5 Выводы

Заключение

Список литературы

Глоссарий основных терминов и понятий

Приложение 1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет предохранительных клапанов» № 2013610629

Приложение 2. Акт об использовании результатов диссертационной работы на ЗАО «ИПН» (Инженерно-промышленная нефтехимическая компания).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются: актуальность научных исследований по компьютерному моделированию сложных ТС с использованием комплексов проблемно-ориентированных программ. Формулируется цель диссертационной работы и решаемые в ней задачи, излагаются научная новизна, научная значимость и практическая значимость полученных теоретических результатов.

В первой главе «Состояние современных научных исследований по компьютерному моделированию трубопроводных систем с двухфазными потоками и расчету потокораспределения в сложных трубопроводных системах» изложена общая постановка научной задачи компьютерного моделирования сложных ТС с двухфазными потоками, проанализированы современные методы расчета потокораспределения в сложных ТС, а также основные математические модели, алгоритмы и методы расчета многофазных потоков в ТС. На основе аналитического обзора научных исследований сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава «Разработка математического и алгоритмического обеспечения компьютерного анализа трубопроводных систем с двухфазными потоками» посвящена разработке математической модели и алгоритмов анализа сложных ТС с двухфазными потоками.

Анализ сложных ТС с двухфазными потоками представляет собой сложную инженерно-технологическую задачу, в решении которой автор выделяет три основных подзадачи:

- Гидравлический и тепловой расчет элементов неразветвленных участков ТС (прямые участки труб, отводы, переходы, арматура и др.);
- Гидравлический и тепловой расчет неразветвленных участков ТС с постоянным расходом (ветвей ТС);
- Расчет потокораспределения в сложных ТС.

Для решения каждой из вышеперечисленных задач предложены оригинальные алгоритмы, описанные ниже.

Для решения задачи гидравлического и теплового расчета элементов неразветвленных участков ТС предложен **декомпозиционно-эвристический алгоритм (ДЭ-алгоритм)**, отличающийся использованием редактируемых наборов эвристических правил выбора методик расчета режимов течения, истинного газосодержания, потерь давления в прямых участках труб и местных сопротивлений.

В качестве математической модели использована смешанная математическая модель, основанная на описании равновесного разделенного течения SFM (Separated Flow Model), что позволяет рассматривать фазы по отдельности. После преобразований с учетом рекомендаций Azzopardi¹ уравнения сохранения количества движения и сохранения энергии принимают вид:

¹ Azzopardi B.J. Gas-liquid flows // USA, Begell House, Inc. 2006. 331c.

$$\frac{dp}{dl} = \left(\frac{dp}{dl} \right)_f - G^2 \frac{du_m}{dl} - g\rho_{mv} \sin \theta - dp_{local} \quad (1)$$

$$\frac{di_m}{dl} + \frac{G^2}{2} \frac{d(u_m^2)}{dl} + g \sin \theta = - \frac{q}{AG}, \quad (2)$$

где: $\frac{dp}{dl}$ – общие потери давления на ед. длины, Па/м; $\left(\frac{dp}{dl} \right)_f$ – потери давления на

ед. длины за счет трения, Па/м; G – удельная скорость потока, кг/(м²·с); u_m – удельный объем смеси, м³/кг; ρ_{mv} – объемная плотность смеси, кг/м³; θ – угол подъема трубы относительно горизонта, рад; dp_{local} – потери на местных сопротивлениях Па; A – площадь поперечного сечения трубы, м²; q – теплопотери в окружающую среду на единицу длины, Вт/м; i_m – удельная энтальпия смеси, Дж/кг.

Для решения уравнений (1), (2) необходимо использовать корреляции для нескольких видов замыкающих соотношений. Среди большого числа корреляций были выбраны наиболее известные и упоминаемые в литературе (таблица 1), охватывающие в совокупности подавляющую часть области параметров решаемой задачи.

Таблица 1. Используемые замыкающие соотношения

Вид замыкающего соотношения	Реализованные корреляции
Расчет истинного газосодержания	HEM, Zivi, Fauske, Thom, Baroczy, Wallis, Lockhart – Martinelli, Chisholm, Smith, Premoli, Rouhani I, Rouhani II, Dix, Dix-Ghajar-Woldesemayat, Goda-Hibiki-Kim-Ishii-Uhle
Определение гидравлических потерь в трубах	Beattie – Whalley, Shannak, Lockhart – Martinelli, Chisholm, Friedel, Muller-Steinhagen and Heck
Определение гидравлических потерь в местных сопротивлениях	HEM, Chisholm, Simpson, Morris
Определение режимов течения	Taitel-Dukler, Barnea, Petalas-Aziz

Предложенный ДЭ-алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 1, включает в себя следующие основные этапы:

Этап 1. Расчет недостающих начальных параметров и выбор типа расчета течений.

Исходными данными при расчете участков являются начальные давления p_n , температуры T_n и газосодержания e_n . Возможны случаи неполного задания исходных данных, когда задано только два из трех начальных параметров. При этом третий параметр необходимо рассчитать. Расчет недостающих параметров проводится с помощью расчета фазовых равновесий и зависит от типа продукта (однокомпонентный/многокомпонентный).

В зависимости от начальных параметров и типа задания продукта выбирается один из видов расчета, который будет запущен на этапе 2. Это может быть либо расчет однофазного течения, если $e_n = 0$ или $e_n = 1$, либо расчет двухфазного течения с учетом массообмена между фазами, либо расчет «замороженного» двухфазного течения без учета массообмена между фазами.

Этап 2. Тепловой и гидравлический расчет.

На данном этапе может выполняться один из трех видов расчетов, выбранных на Этапе 1.

Расчет однофазного течения, который проводится по стандартным методикам и корреляциям, и в данной работе не рассматривается.

Расчет двухфазного течения, который заключается в интегрировании уравнений (1), (2) по длине трубы. При этом на каждом шаге интегрирования происходит обращение к базе информационно-технологических знаний о выборе замыкающих соотношений. В базе информационно-технологических знаний хранятся сведения о том, какие из реализованных на данный момент замыкающих соотношений (для расчета режима течения, потерь на трение и в местных сопротивлениях, истинного газосодержания) применимы при заданных условиях. На выбор замыкающих соотношений могут влиять следующие факторы: $Visc_1$ – динамическая вязкость жидкой фазы, Па с; $Visc_g$ – динамическая вязкость газовой фазы, Па с; G – расход на единицу площади сечения, кг/м²с; $resistance_type$ – класс используемого гидравлического сопротивления; $Flow_mode$ – режим течения.

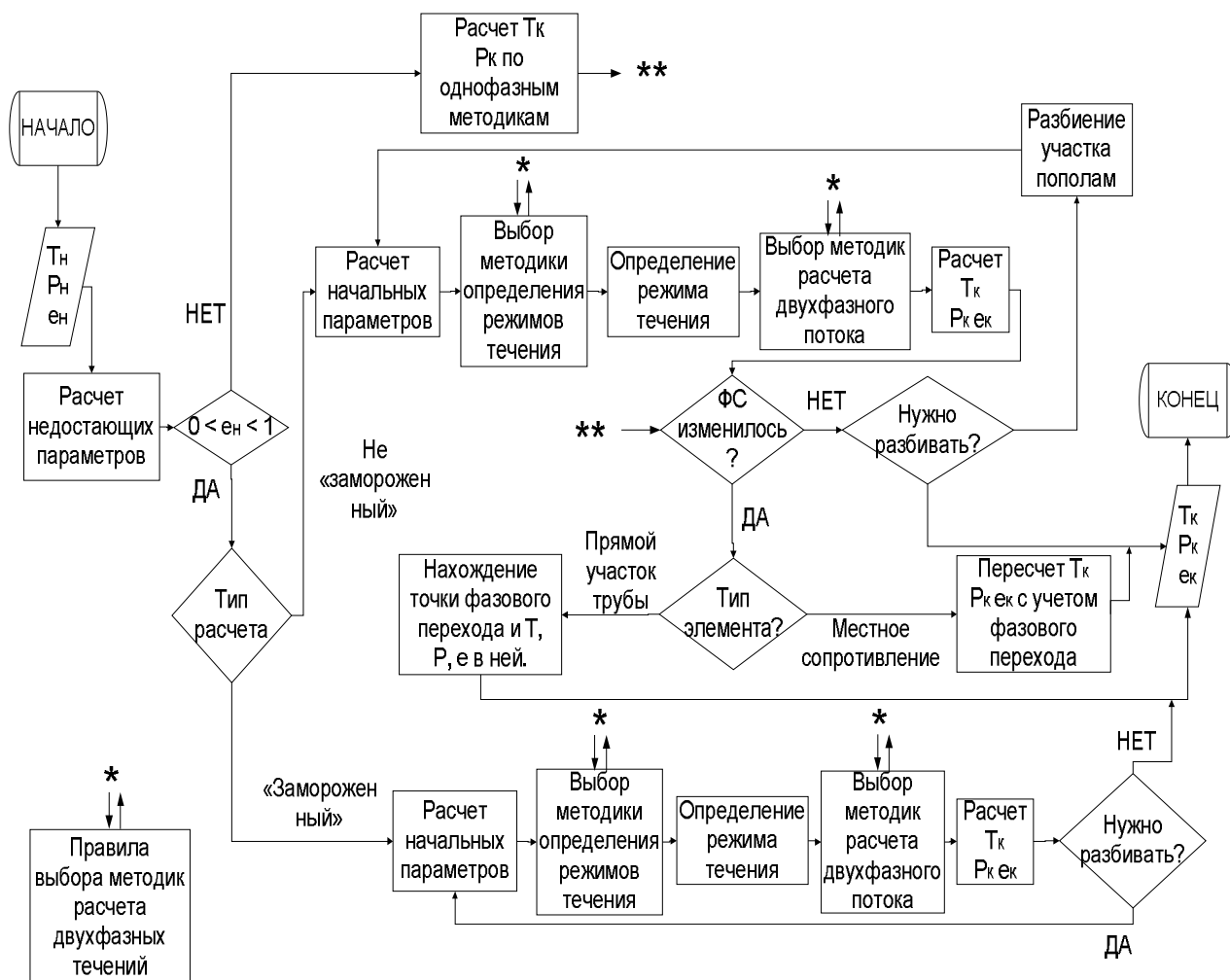


Рисунок 1. Блок-схема декомпозиционно-эвристического алгоритма расчета участков ТС

Также на каждом шаге отслеживаются смены фазового состояния продукта с автоматическим поиском фазовых переходов и переключением с методик расчета двухфазных течений на методики расчета однофазных течений и наоборот.

Расчет «замороженного» двухфазного течения

Основным отличием расчета «замороженного» двухфазного течения является пренебрежение массообменом между фазами. Это означает постоянство газосодержания по ходу течения двухфазной смеси по трубе. Примерами подобных систем являются, например, вода и воздух, нефть и попутный газ и др. Алгоритм расчета является упрощенной версией алгоритма расчета двухфазного течения. Подробно предложенный ДЭ-алгоритм описан в тексте диссертации.

Для решения задачи гидравлического и теплового расчета неразветвленных участков ТС с постоянным расходом предложен **адаптивный алгоритм**, отличающийся возможностью прямого (по направлению потока) и обратного (против направления потока) расчета с учетом возможного критического и околоскритического течения и автоматической адаптацией используемых моделей.

Прямой расчет ветви ТС

В случае задачи нахождения конечных параметров по заданным начальным параметрам выполняется прямой расчет. Прямой расчет является тривиальным, и заключается в последовательном расчете участков ветви с использованием декомпозиционно-эвристического алгоритма, описанного выше. При расчете каждого участка отслеживается число Маха. В случае если $m > 1$, расчет прекращается, и выводится соответствующее предупреждение.

Обратный расчет ветви ТС

Обратный расчет ветви не является тривиальным, поскольку возможно околоскритическое или критическое истечение, которые необходимо отслеживать, и адаптировать применяемые методики расчета. Для двухфазного газожидкостного течения неидеальных газа и жидкости, как правило, возможно лишь численное решение уравнений (1), (2). При этом в случае околоскритического течения использование в гидравлическом и тепловом расчете стандартного подхода, основанного на решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений по длине трубы стандартными численными методами, вызывает затруднения. Это связано с тем, что по мере приближения к критическому течению скорость изменения по длине трубы давления и других параметров продукта быстро возрастает и стремится к бесконечности при критическом истечении. При численном интегрировании уравнений это влечет за собой необходимость уменьшения шагов по длине, с постоянным пересчетом на каждом шаге теплофизических свойств продукта.

Однако если характеристики трубы, тепловой изоляции и окружающей среды на рассматриваемом участке можно считать постоянными, то все характеристики течения зависят только от термодинамических параметров продукта (давления и температуры или удельной энтальпии) в конкретном сечении трубы. Это позволяет записать уравнения течения как обыкновенные дифференциальные уравнения по давлению. В

этом случае сингулярность исчезает, и можно применить стандартные численные методы (в частности, автором для численного решения полученных уравнений используется сочетание метода Рунге-Кутты и квадратурных формул Симпсона). На основе уравнений² такого вида разработан алгоритм расчета околоскритического двухфазного течения. Блок-схема и подробное описание адаптивного предложенного алгоритма описано в тексте диссертации.

Для решения задачи расчета потокораспределения в сложных ТС с двухфазными потоками предложен *модифицированный глобально-градиентный алгоритм*, отличающийся возможностью гидравлического и теплового расчета «замороженного» двухфазного течения (рис. 2).

Рассмотрим уравнения гидравлической цепи:

$$A^T P = F(X) \quad (3)$$

$$AX = Q, \quad (4)$$

где: A – матрица инцидентий; P – вектор узловых давлений; F – вектор функций потерь потенциала по ветвям; X – вектор расходов по ветвям, Q – вектор притоков/оттоков в узлах.

Метод глобального градиента (GGA), предложенный профессором Todini³ для сетей водоснабжения, состоит в решении нелинейной системы уравнений (3), (4) методом Ньютона, не выражая P через X (как в методе контурных расходов) или наоборот (как в методе узловых давлений), а оставляя их независимыми переменными (отсюда слово «глобальный» в названии метода).

Предложенный автором модифицированный глобально-градиентный алгоритм основан на декомпозиции задачи расчета потокораспределения в ТС на две (в случае изотермического расчета) или три (в случае теплового расчета) подзадачи. В первом случае после каждой итерации метода GGA происходит обход трубопровода с пересчетом массовых газосодержаний в узлах смешения/разделения потока. Во втором случае добавляется обход трубопровода с пересчетом температур в узлах смешения/разделения потока. При этом уравнение (3) в случае двухфазного течения принимает вид:

$$A^T P = F(X, P, E, T), \quad (5)$$

где $f_j(x_j, p_{u,j}, e_{u,j}, T_{u,j}) = \Delta p_j$ – потери потенциала на j -той ветви, в данном случае зависящие от начального давления, газосодержания и температуры ветви. Подробно предложенный алгоритм описан в тексте диссертационной работы.

² Корельштейн Л. Б. Об одной форме уравнений околоскритического течения в трубах // Промышленный сервис. 2012. №3. С. 29-36.

³ Todini, E. Un metodo del gradiente per la verifica delle reti idrauliche // Bollettino degli Ingegneri della Toscana. 1979. n. 11. P.11-14.

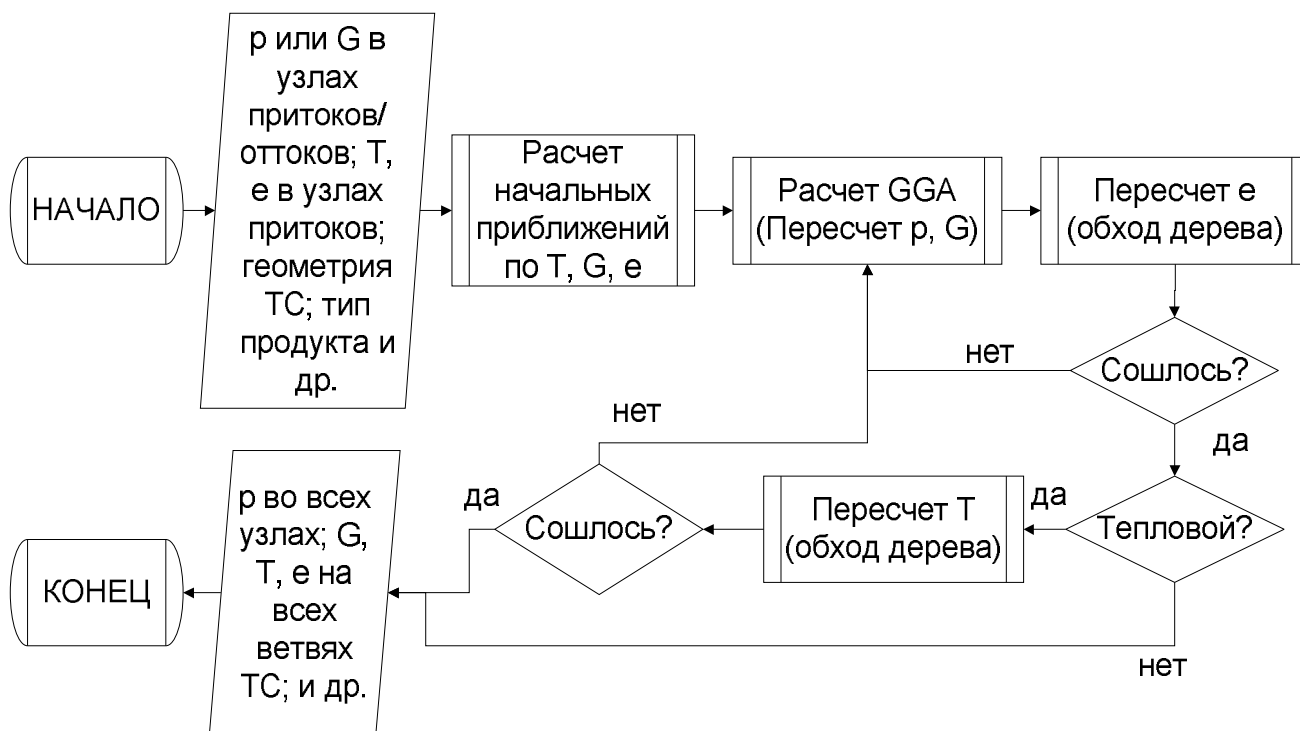


Рисунок 2. Блок-схема модифицированного глобально-градиентного алгоритма расчета потокораспределения в сложных ТС с двухфазными потоками

Третья глава «Архитектура и программно-информационное обеспечение комплекса программ анализа трубопроводных систем с двухфазными потоками» посвящена разработке на основе предложенных в Главе 2 математических моделей и алгоритмов комплекса проблемно ориентированных программ «Гидросистема» и «Предклапан». Также в Главе 3 изложены результаты вычислительного эксперимента по оценке эффективности предложенных автором алгоритмов.

Сложный комплекс программ ООО «НТП Трубопровод» включает в себя несколько программных комплексов: «Гидросистема» – предназначен для проведения на ПЭВМ выбора диаметров, *определения пропускной способности трубопроводов, теплового и гидравлического расчета разветвленных и неразветвленных трубопроводов, перекачивающих газы, жидкости и газо-жидкостные смеси*; «Предклапан» – предназначен для расчета проходного сечения предохранительных клапанов прямого действия, определения их числа, марки клапана, номера пружины, исполнения или массы и числа грузов, *гидравлического расчета подводящего и отводящего трубопровода и подбора их диаметра*, составления протокола расчета, экспликации предохранительных клапанов и спецификации.

Архитектура указанных комплексов программ спланирована таким образом, что на уровне разработчика фактически представляют собой единую программу. Каждому из вышеперечисленных комплексов программ соответствует своя опция препроцессора и свой набор библиотек динамической компоновки. Тем самым обеспечивается практически синхронное усовершенствование всех перечисленных выше программных комплексов. Ниже приведен перечень основных программных модулей, входящих в комплексы программ «Гидросистема» и «Предклапан»:

- Основной исполняемый модуль, содержащий графическую подсистему. Модуль написан на языке VC++ с использованием библиотек MFC, OpenGL и библиотеки GUI Prof-UIS;
- Библиотека базовых классов «classes.dll», содержащая описание классов свойств основных элементов трубопроводов. Библиотека содержит классы гидравлического и теплового (в т.ч. двухфазного) расчета ТС произвольной конфигурации.
- Модуль определения узловых давлений для оптимального выбора диаметров «mainline.dll». Реализует специально разработанный алгоритм, позволяющий найти начальный вариант оптимального выбора диаметров для сетей произвольной топологии;
- Библиотеки расчета теплофизических свойств продуктов, включающие монитор «inter444.dll» и библиотеки «СТАРС» (abecta.dll), «Свойства» (svlib.lib), «WaterSteamPro» (okawsp.dll), Simulis Thermodynamics, Gerg-2008.
- Библиотека доступа к базам данных «dbaccess.dll», написанная с использованием интерфейса OleDb;
- Программа просмотра и редактирования БД материалов изоляции «EditBase.exe»;
- Модули климатологии «Climat.exe», пьезометра «piezom.dll», экспорта в DXF «dxfExp.dll».

Кроме вышеуказанных программных модулей, в состав комплекса программ входят базы данных материалов изоляции, грунтов, материалов труб и климатологии. Эти базы данных поставляют информацию, необходимую для выполнения теплового расчета. В комплекс программ «Предклапан» дополнительно входит база данных предохранительных клапанов и переключающих устройств. В состав комплекса программ также входит база информационно-технологических знаний о выборе замыкающих соотношений для расчета ТС с двухфазными потоками.

В Главе 3 также приведены результаты вычислительного эксперимента по оценке эффективности модифицированного глобально-градиентного алгоритма расчета потокораспределения. Оценка проводилась в сравнении с известным методом расчета ТС – методом узловых давлений (МД). Данный метод был выбран для сравнения ввиду отсутствия необходимости предварительного формирования системы главных контуров, как и в предложенном модифицированном глобально-градиентном алгоритме.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма использована модельная ТС (транспортировка воды и воздуха, 3 ветви, ~30 участков). Оценкой эффективности алгоритмов являлось число итераций, затраченных на достижения относительной точности расчета потокораспределения по Р, Т, G во всех узлах и ветвях равной 0.05%.

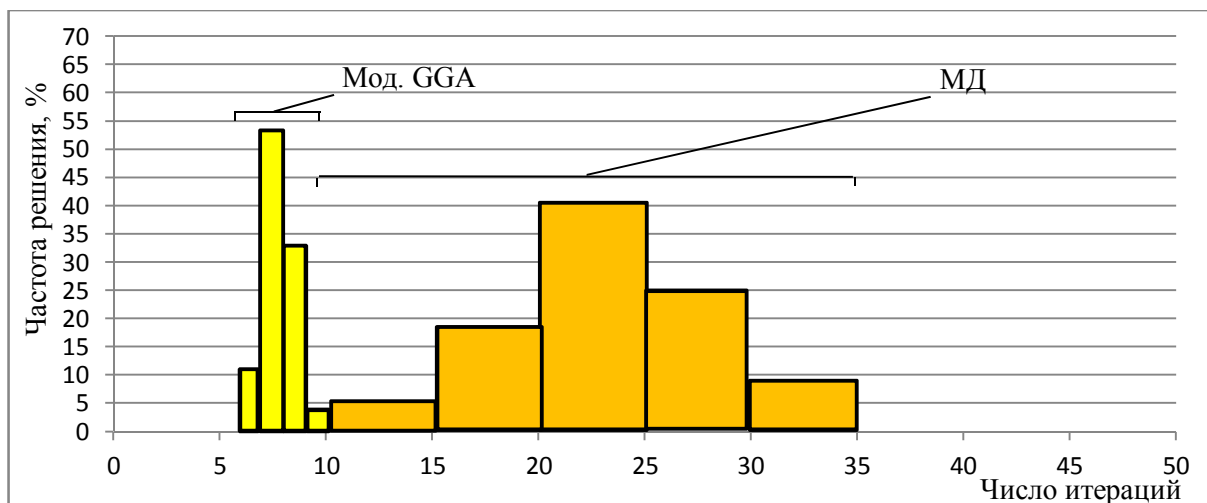


Рис. 3. Сравнение числа итераций модифицированного глобально-градиентного алгоритма (Мод. GGA) и метода узловых давлений (МД)

Как видно из Рис. 3, предложенный модифицированный глобально-градиентный алгоритм позволяет обеспечить существенное увеличение скорости сходимости расчета. Полученное увеличение скорости сходимости весьма важно, поскольку при расчете сложных ТС с двухфазными потоками каждая итерация связана с достаточно громоздкими вычислениями, которые могут занимать значительное время при анализе крупных ТС.

В **Четвертой главе** «Практическое применение комплекса «Гидросистема» для компьютерного анализа трубопроводных систем промышленных установок и предприятий» представлены результаты анализа трубопроводной системы промышленной ректификационной установки с двухфазным течением, проведенном в ЗАО «ИПН» совместно с автором. Целью анализа ТС было выявление причин возникновения и разработка рекомендаций по устранению вибраций в рассматриваемой ТС.

При расчете исходного варианта ТС выявлено несколько участков с перемежающимся течением. Перемежающееся течение в ТС крайне нежелательно, поскольку может стать причиной возникновения вибраций, что и произошло в данном трубопроводе. На основе результатов компьютерных расчетов ТС для устранения вибраций автором предложены следующие инженерно-технологические решения:

- уменьшение диаметра труб с перемежающимся течением на участках 24-6, 6-1, 6-2 с 253мм до 203 мм;
- изменение геометрии ветвей 6-1 и 6-2 для равномерного распределения потоков.

При последующем анализе ТС с принятыми изменениями перемежающегося течения обнаружено не было.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель течения двухфазных потоков в трубопроводе, отличающаяся использованием математической модели разделенного течения и гибким использованием различных корреляций для определения режимов течения, а так же замыкающих соотношений для расчета истинного газосодержания и гидравлических потерь в зависимости от параметров потока.
2. Предложен декомпозиционно-эвристический алгоритм теплового и гидравлического расчета двухфазных потоков в прямых участках труб и местных сопро-

тивлениях, отличающийся использованием редактируемых наборов эвристических правил выбора (в зависимости от режима течения, вязкости фаз, расхода, типа гидравлического сопротивления) методик расчета режимов течения, истинного газосодержания, потерь на трение, потерь в местных сопротивлениях, возможностью учета кипения или конденсации с поиском фазовых переходов и теплообмена с окружающей средой (в том числе в трубопроводах с тепловой изоляцией).

3. Предложен адаптивный алгоритм теплового и гидравлического расчета двухфазных течений в неразветвленных трубопроводах, отличающийся возможностью прямого (по направлению потока) и обратного (против направления потока) расчета с учетом возможного критического и околоскритического течения и автоматической адаптацией используемых моделей, что позволяет производить тепловой и гидравлический расчет ветвей трубопровода с докритическим, околоскритическим или критическим течением двухфазных потоков.
4. Предложен модифицированный глобально-градиентный алгоритм расчета потокораспределения в сложных ТС, отличающийся возможностью гидравлического и теплового расчета «замороженного» двухфазного течения.
5. Разработаны архитектура и режимы функционирования расчетной части комплексов программ «Гидросистема» и «Предклапан», реализующих предложенные математические модели и алгоритмы анализа трубопроводных систем с двухфазным течением, которые могут использоваться при решении задач проектирования и эксплуатации сложных ТС.
6. С использованием разработанных алгоритмов и комплексов программ проведен расчет промышленной ТС ректификационной установки и разработаны научно-обоснованные рекомендации по устранению вибраций в ТС с двухфазными потоками.

-----***-----

По мнению автора, настоящая диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно-обоснованные инженерно-технические разработки по созданию математических моделей, алгоритмов и комплексов программ расчета сложных ТС с двухфазными потоками, имеющие существенное значение для повышения экономической эффективности существующих и проектируемых промышленных предприятий.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях перечня ВАК

1. Бабенко А. В., Гартман Т. Н., Корельштейн Л. Б. Расчет потокораспределения для двухфазного газо-жидкостного течения в промышленных разветвленных трубопроводах // Технологии нефти и газа. 2012. №3. С. 29-33.
2. Бабенко А. В. Расчет потокораспределения для двухфазного газо-жидкостного течения в промышленных разветвленных трубопроводах. Неизотермический случай // Технологии нефти и газа. 2013. №2. С. 53-59.
3. Бабенко А.В., Корельштейн Л.Б., Гартман Т.Н. Математическое моделирование установившегося течения двухфазных газо-жидкостных потоков в промышленных трубопроводах. Расчет ветвей // Химическая технология. 2012. №7. С. 429-440

4. Бабенко А. В., Юдовина Е.Ф., Корельштейн Л. Б., Гартман Т. Н. Программная реализация модуля гидравлических расчетов двухфазных газожидкостных потоков // Программные продукты и системы. 2013. №1. С. 141-146.
5. Бабенко А.В., Кузнецова Т.В., Гартман Т.Н. Расчет трансферной трубопроводной системы промышленной ректификационной установки с двухфазным течением потоков между теплообменниками и колонным аппаратом // Химическая промышленность сегодня. 2013. № 10. С. 10-17.

В других изданиях

6. Юдовина Е.Ф., Бабенко А.В. Автоматизация выбора методик двухфазного расчета // CADmaster. 2011. №3. С. 82.
7. Бабенко А.В., Корельштейн Л.Б. Несправедливо забытый Pegasus, или «чему не учат в ВУЗах» // CADmaster. 2011. №3. С. 84-85.
8. Бабенко А.В., Лисин С.Ю. Методы расчета режимов течения в трубопроводах и их программная реализация // Труды XII семинара «Математическое моделирование трубопроводных систем энергетики». 2010. С. 165-173.

В совместно опубликованных работах А.В. Бабенко принадлежат следующие результаты: предложен модифицированный глобально-градиентный алгоритм расчета потокораспределения в сложных ТС с двухфазными потоками [1, 2], предложен декомпозиционно-эвристический алгоритм теплового и гидравлического расчета прямых участков труб и местных сопротивлений по и против направления потока [3, 6, 7, 8], разработана архитектура и режимы функционирования комплексов программ «Гидросистема» и «Предклапан» в части расчета двухфазного течения на основе предложенных математических моделей и алгоритмов [4], выполнена реализация расчетной части комплекса программ «Гидросистема» и настройка базы информационно-технологических знаний для расчета промышленной ТС ректификационной установки [5].

-----***-----

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить свою глубокую благодарность научному руководителю – профессору д.т.н., Гартману Томашу Николаевичу.

Автор выражает свою благодарность глубокоуважаемому члену-корреспонденту РАН, профессору, д.т.н., Мешалкину Валерию Павловичу за внимание и ценные научно-методические консультации.

Автор благодарит сотрудников ООО «НТП Трубопровод» Корельштейна Л.Б., Юдовину Е.Ф., Лисина С.Ю., Кузнецову Т.В. за ценные советы и огромную поддержку в написании диссертационной работы.

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

Список основных сокращений:

ТС – трубопроводная система

ХТС – химико-технологическая система

ТТ – технологический трубопровод

ХП – химическое предприятие

СТТ – система технологических трубопроводов

Заказ № 100

Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «____», г. Москва, _____