

На правах рукописи



**Кохов Тимур Александрович**

**Топологическо-эвристическо-  
вычислительные алгоритмы и комплекс  
программ оптимизации  
энергоресурсоэффективности трассировки  
систем обогрева сложных технологических  
трубопроводов**

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 - 2018**

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

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

Научный  
консультант: академик РАН, доктор технических наук, профессор  
**Мешалкин Валерий Павлович**  
директор Международного Института Логистики  
Ресурсосбережения и Технологической Инноватики  
(НОЦ МИЛРТИ),  
заведующий кафедрой логистики и экономической  
информатики Российского химико-технологического  
университета имени Д. И. Менделеева

Официальные  
оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Холоднов Владислав Алексеевич**  
кафедра системного анализа и информационных  
технологий ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский  
государственный технологический институт  
(технический университет)

доктор технических наук, профессор  
**Филаретов Геннадий Федорович**  
кафедра управления и информатики ФГБОУ ВО  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая  
организация: ФГБОУ ВО Российский государственный  
университет нефти и газа (национальный  
исследовательский университет) имени И.М. Губкина

Защита состоится 19 июня 2018 года в 11:00 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 и на интернет-сайте: <http://diss.mustr.ru>.

Автореферат диссертации разослан \_\_\_\_\_ 2018 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Д 212.204.16

Дударов С.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Интенсификация производств нефтегазохимического комплекса (НГХК), представляющих собой сложные химико-технологические системы (ХТС), использование высоких температур и давлений, а также глубокого холода в химико-технологических процессах (ХТП) обуславливают необходимость обязательного наличия тепловой изоляции (ТИ) сложных технологических трубопроводов (СТТ), которая обеспечивает повышение показателей энергоресурсоэффективности ХТС за счет снижения тепловых потерь и уменьшения удельных расходов топлива и энергии.

Для большого класса ХТС наличие одной тепловой изоляции технологических трубопроводов (ТП) недостаточно для поддержания требуемого температурного режима изолируемого ТП. В таких случаях, кроме ТИ, применяют дополнительный обогрев технологического ТП, который необходим для ТП, транспортирующих на значительные расстояния вещества с заданной температурой или вещества, вязкость которых при остывании недопустимо возрастает. Для обогрева технологических ТП используют обогревающие трубопроводы-спутники с потоками пара или горячей воды. Общая протяженность в НГХК трубопроводов с обогревающими спутниками исчисляется сотнями километров. Можно утверждать, что из всего объема теплоизоляционных работ на объектах нефтегазохимического комплекса не менее 10 % приходится на трубопроводы со спутниками.

Процесс теплообмена в сложных теплотехнических системах (СТС) отличается большой сложностью и представляет собой совокупность трех основных видов переноса теплоты: теплообмен в условиях свободной конвекции, теплообмен излучением и теплопроводностью, причем, в рассматриваемом случае нельзя сказать о каком-либо преобладающем виде теплообмена в системе «обогревающий спутник – обогреваемый трубопровод – теплоизоляционный кожух» – все они играют значительную роль. Для теоретических и важных инженерно-технологических расчетов таких процессов теплообмена используют дорогостоящие мощные программы компьютерной гидродинамики типа Fluent (разработчик ANSYS).

К основным научно-исследовательским задачам эксплуатации и проектирования СТС относятся задачи гидродинамических и тепловых расчетов, а также задачи трассировки систем теплового обогрева СТТ.

Основные методы гидродинамического расчета СТС и отдельных трубопроводов предложены в работах отечественных ученых: член-корреспондента РАН Меренкова А.П.; профессоров Андрияшева М.М., Зоркальцева В.И., Лобачева В.Г., Новицкого Н.Н., Сухарева М.Г. и Хасилева В.Я.

Разработке математических моделей и методов гидродинамического расчета СТС посвящены работы отечественных ученых: академиков Нигматулина Р.И., Кутателадзе С.С., Кутепова А.М., Кафарова В.В. и Мешалкина В.П.; профессоров Бутусова О.Б., Васильева О.Ф., Воеводина А.Ф., Галиуллина З.Т., Кривошеина Б.Л., Лурье М.В., Мамаева В.А., Марона В.И., Медведева В.Ф., Полянина А.Д., Радченко В.П., Сарданашвили С.А., Селезнева В.Е., Сулейманова В.А., Темпеля Ф.Г., Фисенко В.В., Ходановича И.Е., Чарного И.А. и др.

Основные методы математического моделирования процессов теплообмена в сложных теплотехнических системах предложены в работах отечественных ученых: академика РАН Кафарова В.В., академика РАН Мешалкина В.П.; к.т.н. Миркина А.З., к.т.н. Усиньша В.В., к.т.н. Чионова А.М.; Хижнякова С. В., Гурьева В. В., Жолудова В. С., Петрова-Денисова В. Г., а также зарубежных ученых Mohinder L. Nayyar, J. Phillip

Ellenberger, Bob Wilson и др. Методы и алгоритмы расчета СТС изложены в материалах ряда специализированных организаций, главным образом, научно-исследовательского и проектного института АО «Теплопроект».

Основные методы определения оптимальной трассировки сложных ТТС химических производств (ХП) изложены в работах отечественных ученых: академика РАН Кафарова В.В., академика РАН Мешалкина В.П.; профессоров Егорова С.Я., Зайцева И.Д. и Малыгина Е.Н.; к.т.н. Образцова А.А., а также зарубежных ученых Georgiadis M.C., Papageorgiou L.G., Rotsteln G.E., Swaney R.E. В работах академика РАН Мешалкина В.П. и его учеников особое внимание придается разработке эвристическо-вычислительных алгоритмов оптимальной трассировки технологических ТП и компоновки ХП, в которых необходимо активное участие лица, принимающего решения (ЛПР) в диалоговом режиме с ЭВМ.

Анализ научных публикаций и нормативных документов по расчёту процессов теплообмена в СТС с неподвижным изотермическим продуктом показал, что используемая в них инженерно-техническая методика не учитывает, явным образом, влияние толщины и свойств материала стенки обогреваемого ТП на перепад температур по сечению трубопровода, что имеет важное значение при проектировании энергоресурсосберегающих ХП.

Также, как показал аналитический обзор автора, до сих пор не исследовано, какова требуемая точность используемой в нормативных документах классической инженерно-технической модели процесса теплообмена в СТС, и насколько такая модель температурного поля в конструкции соответствует реальности.

Методы оптимальной трассировки соединений совокупности объектов в трехмерном пространстве, включая оптимальную трассировку СТТ, мало освещены в научно-технической литературе, а адаптация и применение существующих методов трассировки на плоскости для решения трехмерной задачи, как правило, ведет к существенному росту вычислительной сложности задачи.

Из этого следует, задача разработки декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма и комплекса программ оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ с учетом математических моделей процессов теплообмена в сложных теплотехнических системах, а также инженерно-технологических, физико-химических и гидродинамических ограничений трассировки ТП для ХП, является новой актуальной научной задачей, решение которой позволит увеличить эффективность использования производственных площадей, а также минимизировать приведенные затраты на трубопроводные системы ХП, существенно уменьшить материалоемкость трубопроводов за счет уменьшения объема изоляции ТП, сокращения числа фасонных деталей и металлоконструкций для крепления ТП и энергозатраты на перекачку и обогрев технологических потоков, обеспечивая высокий уровень надежности и технологической безопасности ХП.

Актуальность решения сформулированной новой научной задачи также подтверждается тем, что 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 технологически 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 аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным изотермическим продуктом, а также декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма и комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТС.

Для реализации поставленной цели диссертации автором сформулированы и успешно решены **следующие основные задачи:**

1. Разработка аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в СТС из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным (период остановки продукта) изотермическим продуктом.
2. Проверка адекватности разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом.
3. Разработка наборов эвристических правил неформализованной задачи энергоресурсоэффективной трассировки трубопроводов, отображающих требуемые инженерно-технологические, физико-химические и гидродинамические ограничения при поиске рациональной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов.
4. Создание декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов.
5. Разработка комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем обогрева сложных технологических трубопроводов.

**Методы решения поставленных задач:** методы термодинамики, математического моделирования, вычислительной математики, математической физики; методы теории графов, теории матриц; численные методы решения дифференциальных уравнений; современные методы теории искусственного интеллекта; универсальные программные средства разработки комплексов программ.

#### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Разработана аппроксимационная математическая модель процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным (период остановки продукта) изотермическим продуктом, отличающаяся применением вместо сложной двумерной модели стационарного теплообмена упрощенной модели установившейся теплопроводности в круге (неподвижном продукте) и кольце (трубе) с краевыми условиями 3-го рода со специальными эффективными коэффициентами теплоотдачи для разных частей границы обогреваемой технологической трубы с изотермическим продуктом с воздушной прослойкой и изоляцией, использованием разложения решений уравнения Лапласа внутри круга (неподвижного продукта) и уравнения Лапласа в кольце (в стенке трубы) в ряд Фурье, что позволяет учитывать явным

образом влияние толщины и свойств материала стенки трубопровода на перепад температур по сечению трубопровода, обеспечивая высокую точность проектных инженерно-технических расчетов.

2. Проверена адекватность аппроксимационной математической модели процесса теплообмена с применением численного моделирования температурных полей на стационарных моделях теплопередачи методом конечных элементов с помощью универсального программного комплекса ELCUT на сложных теплотехнических системах различных конфигураций из нескольких технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным (период остановки продукта) изотермическим продуктом установки производства элементарной серы.

3. Сформулирована инженерно-технологическая постановка неформализованной задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов; разработаны наборы эвристических правил энергоресурсоэффективной трассировки, отображающих знания по теории процессов и аппаратов химической технологии, по требуемым технологическим, гидродинамическим, инженерным, физико-химическим ограничениям при поиске рациональной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов ХП, что позволяет выполнять эвристическо-вычислительную процедуру принятия решений и выбор очередности прокладки локальных трасс трубопроводов при поиске оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки.

4. Предложен декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов, отличающийся применением автоматизированных процедур построения топологической модели гидравлической цепи в виде гидравлического структурного графа, модифицированного алгоритма построения кратчайшего связывающего остова исходного гидравлического структурного графа, а также набора специальных производственных правил, которые отображают эвристические правила, что позволяет определять оптимальные энергоресурсоэффективные трассы прокладки сложных технологических трубопроводных систем с минимальными приведенными затратами.

5. Разработаны архитектура и режимы функционирования комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов, реализованного с использованием средств макроязыка программирования PML и объектно-ориентированной базы данных DABACON, а также компонентов инструментальной информационной системы автоматизированного проектирования AVEVA PDMS и системы управления проектными данными AVEVA Engineering, который успешно применен для трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установок производства элементарной серы.

### **Практическая значимость диссертационной работы**

1. Разработаны аппроксимационная математическая модель и упрощенный алгоритм расчета процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным (период остановки продукта) изотермическим продуктом, применение которых, позволяет при проектировании рассчитывать с достаточной степенью точности тепловые потоки от обогреваемых трубопроводов с учетом различных конструкций изоляционного кожуха и влияния диаметров, толщин и свойств материалов стенки на перепад температур по сечению трубопровода.

2. Применение разработанного комплекса программ оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов (с применением средств макроязыка программирования PML и объектно-ориентированной базы данных DABACON), позволяет сократить время принятия оптимальных проектных решений и выбора оптимальных энергоресурсоэффективных трасс проектируемых ХП.

3. С использованием разработанного комплекса программ получены оптимальные энергоресурсоэффективные трассы системы теплового обогрева сложных технологических трубопроводов шести установок производства элементарной серы.

4. Разработанный декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм оптимальной трассировки систем теплового обогрева может быть адаптирован к решению задач трассировки соединений печатных плат радиоэлектронных устройств, поиска оптимального маршрута в радиотелеметрических системах навигации, для прокладки инженерных коммуникаций, в современных интеллектуальных «электронных» («цифровых») производствах коммуникационно-информационных линий связи сложных технических систем и пр.

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

1. Инженерно-технологическая и математическая постановки задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов как неформализованной, или эвристическо-вычислительной, задачи.

2. Специальная аппроксимационная математическая модель и компьютерная модель процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным (период остановки продукта) изотермическим продуктом.

3. Алгоритм расчета процесса теплопередачи в СТС из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с изотермическим продуктом, с учетом различных конструктивных решений тепловой изоляции для трубопроводов различных диаметров.

4. Декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева, обеспечивающий с учетом требуемых физико-химических, инженерно-технологических и конструкционных ограничений минимизацию приведенных затрат на прокладку трасс сложных технологических трубопроводных систем.

5. Наборы эвристических правил энергоресурсоэффективной трассировки, отображающих знания по теории процессов и аппаратов химической технологии, требуемые технологические, гидродинамические, инженерные и физико-химические ограничения при поиске рациональных трасс систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов химических производств, что позволяет выполнять быстродействующую упорядоченную процедуру принятия решений и выбирать очередность прокладки локальных трасс трубопроводов при поиске оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки.

6. Архитектура и режимы функционирования комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов.

7. Результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности специализированной упрощенной математической модели процесса теплообмена в СТС

из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с движущимся изотермическим продуктом.

8. Результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности аппроксимационной математической модели и алгоритма расчета процесса теплообмена в СТС из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным (период остановки продукта) изотермическим продуктом.

9. Результаты автоматизированной оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов шести установок производства элементарной серы.

**Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов** подтверждена корректным использованием апробированных научных положений и методов исследования; обеспечена строгостью используемого математического аппарата, корректным применением методов теории искусственного интеллекта и теории графов, согласованностью новых научных результатов с теоретическими основами и подтверждается многочисленными вычислительными экспериментами, результаты которых доказывают адекватность созданной аппроксимационной математической модели и применимость разработанных алгоритмов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: VIII Российская конференция пользователей AVEVA, 2016 г., Москва, Event Hall DIGITAL OCTOBER; XII Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии МКХТ-2016-UCChT, 2016 г., Москва, РХТУ имени Д.И. Менделеева; XVII Научно-практическая конференция «Информационные технологии в инжиниринге», 2016 г., Тюмень, DoubleTree by Hilton Hotel Tyumen; Выставка «ЭЛЕКТРО 2017», Москва, Выставочный центр "Экспоцентр"; международная конференция CAE Conference 2017, Vicenza, Italy; Первая Всероссийская конференция с международным участием «Цифровые средства производства инженерного анализа», 2017, Тула, ТГПУ имени Л.Н. Толстого.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 научных трудах, в том числе 2-х статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ, и 2-х тезисах и докладах Международных и Российских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, глоссария основных терминов и понятий, приложений и библиографического списка из 145 наименований. Работа изложена на 204 страницах машинописного текста, содержит 6 таблиц и 87 рисунков.

## **Оглавление диссертации**

### **ВВЕДЕНИЕ**

## **Глава 1. Анализ современных алгоритмов и комплексов программ расчета теплогидродинамических процессов и оптимизации трассировки сложных технологических трубопроводов**

1.1 Аналитический обзор методов расчета теплогидродинамических процессов и оптимизации систем технологических трубопроводов

1.2 Взаимосвязь процедуры трассировки сложных технологических трубопроводов с расчетами гидродинамических и тепловых процессов

1.3 Аналитический обзор современных методов и алгоритмов оптимальной трассировки сложных технологических трубопроводов

1.4 Алгоритмы расчета и оптимизации теплоизоляционных конструкций сложных технологических трубопроводов

1.5 Общая характеристика современных методов и алгоритмов оптимальной трассировки проводников в радиоэлектронной аппаратуре

1.6 Выводы

**Глава 2. Разработка математических моделей процессов теплообмена и декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов**

2.1 Теплотехническая система обогрева технологических трубопроводов как объект математического моделирования и оптимизации

2.2 Инженерно-технологическая постановка неформализованной задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов

2.3 Математическое моделирование процессов теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом

2.3.1 Обоснование специализированной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева с движущимся изотермическим продуктом

2.3.2 Разработка математической и компьютерной моделей процесса теплообмена в системе теплового обогрева с неподвижным изотермическим продуктом

2.4 Компьютерное моделирование процесса теплопередачи в системах теплового обогрева различных конструкций

2.5 Предпосылки к разработке и сущность декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева

2.6 Разработка декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева

2.7 Выводы

**Глава 3. Разработка комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов**

3.1. Архитектура комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов «Обогрев технологических трубопроводов тепловыми спутниками»

3.2 Программное обеспечение комплекса программ

3.2.1 Логико-информационная структура основных программных модулей и информационного обеспечения

3.2.2 Программный модуль расчета количества тепловых спутников и их диаметров в системах теплового обогрева сложных технологических трубопроводов

3.2.3 Программный модуль оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов

3.2.4 Программный модуль выпуска аксонометрических чертежей систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов

3.2.5 Интерфейс передачи данных для оптимизации теплоизоляционных конструкций сложных технологических трубопроводов

3.3 Информационное обеспечение комплекса программ

3.4 Режимы функционирования и методика применения комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов

3.5 Проверка эффективности алгоритма теплогидродинамических расчетов сложных технологических трубопроводов

3.6 Выводы

**Глава 4. Автоматизированная разработка оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установки производства элементарной серы**

4.1. Инженерно-технологическая и математическая постановка задачи оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установки производства элементарной серы

4.2 Формирование набора эвристических правил и разработка базы знаний рациональной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установки производства элементарной серы

4.3 Результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом

4.4 Результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом

4.5 Результаты автоматизированной оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установок производства элементарной серы

4.6. Выводы

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Глоссарий основных терминов и понятий**

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

**Приложение 1.** Разработка и применение программно-информационного обеспечения построения 3D модели систем обогрева сложных технологических трубопроводов

**Приложение 2.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс проектирования обогрева технологических трубопроводов тепловыми спутниками для системы автоматизированного проектирования AVEVA PDMS» № 2017663546

**Приложение 3.** Акт об использовании результатов диссертационной работы в АО «Гипрогазоочистка»

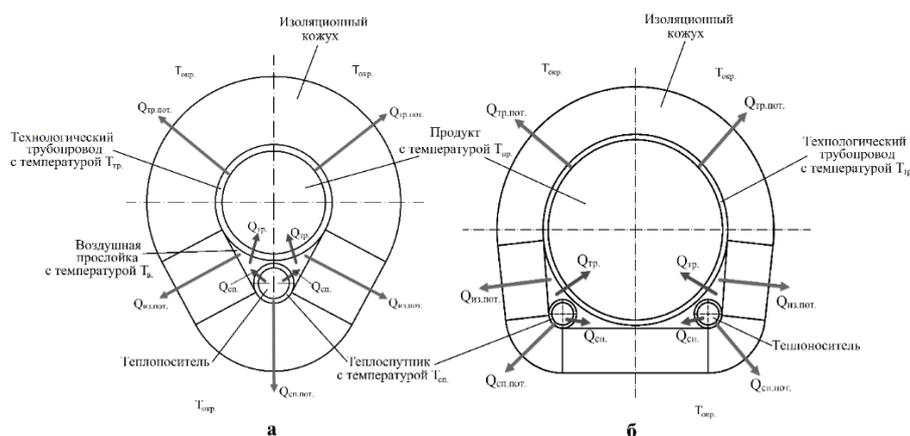
**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и основные задачи; приведены положения, выносимые на защиту; изложены научная новизна и практическая значимость результатов работы. Приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

**В первой главе «Анализ современных алгоритмов и комплексов программ расчета теплогидродинамических процессов и оптимизации трассировки сложных технологических трубопроводов»** изложен краткий аналитический обзор научных исследований по математическому моделированию и алгоритмизации расчетов теплогидродинамических процессов и оптимизации трассировки СТТ, а также существующих комплексов программ трассировки систем обогрева СТТ.

**Во второй главе «Разработка математических моделей процессов теплообмена и декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов»** изложена методика разработки оригинальной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным изотермическим продуктом (см. рис. 1), а также описан декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ.



**Рисунок 1.** Схемы процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе: а) с одним обогревающим спутником; б) с двумя обогревающими спутниками

Разработанная автором методика математического моделирования процесса теплообмена в СТС из нескольких параллельных технологических трубопроводов состоит из следующих основных этапов.

**Этап 1.** Отобразить поля температур в продукте (круге) и трубе (кольце) (см. рис. 2) в виде решения двумерной стационарной задачи теплопроводности о продукте в трубе в виде ДУ Лапласа в полярных координатах  $(r, \varphi)$ .

**Этап 2.** При постоянстве во времени коэффициентов  $\lambda_{пр}$  и  $\lambda_{тр}$  решение ДУ Лапласа внутри круга (неподвижного продукта), используя метод разделения переменных, можно представить в виде следующего разложения в ряд Фурье:

$$T_{пр} = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{r}{R_{вн.тр.}} \right)^n (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \quad (1)$$

, где  $T_0$  – температура продукта в центре обогреваемого ТП, К.

**Этап 3.** Определить аналитическое решение ДУ Лапласа для температуры стенки ТП (в кольце) в виде разложения в ряд Фурье:

$$T_{\text{тр}} = A_0 + B_0 \ln \frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^n (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{-n} (C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi) \quad (2)$$

**Этап 4.** Задать на поверхности обогреваемого ТП с воздушной прослойкой и изоляцией граничные условия 3-го рода и заменить сопротивление изоляции на эквивалентный эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{из}}$ , тогда справедливы соотношения:

$$\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} = -\alpha_{\text{тр}} (T_{\text{тр}} - T_{\text{в}}) \text{ при } r = R_{\text{нар.тр.}}, |\varphi| < \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} = -\alpha_{\text{из}} (T_{\text{тр}} - T_{\text{окр}}) \text{ при } r = R_{\text{нар.тр.}}, \frac{\alpha}{2} \leq |\varphi| \leq \pi \quad (4)$$

, где  $T_{\text{в}}$  – температура воздуха в воздушной прослойке, К;  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, К;  $\alpha_{\text{тр}}$  – коэффициент теплоотдачи между трубой и воздушной прослойкой, Вт/(м<sup>2</sup>×К);  $\alpha_{\text{из}}$  – эквивалентный эффективный коэффициент теплоотдачи между трубой и окружающим воздухом через изоляцию, Вт/(м<sup>2</sup>×К), рассчитываемый с учетом термического сопротивления изоляции;  $\alpha$  – угол обогрева, радиан.

**Этап 5.** Определить оставшиеся неизвестные коэффициенты разложения в ряд Фурье с учетом краевых условий (3) и (4). Умножая условия (3), (4) на  $\cos n\varphi$  и интегрируя по всей наружной поверхности трубы, получим при  $n = 0$ :

$$T_0 = \frac{\alpha T_{\text{в}} + (2\pi - \alpha)\gamma T_{\text{окр}}}{\alpha + (2\pi - \alpha)\gamma} - (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \frac{(1 - \gamma)}{\alpha + (2\pi - \alpha)\gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n \quad (5)$$

, где  $\alpha$  – угол обогрева, радиан; безразмерные величины  $\hat{a}_n = a_n / (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}})$  и  $\gamma = \alpha_{\text{из}} / \alpha_{\text{тр}}$ .

**Этап 6.** Проинтегрировать условия (3), (4) с учетом формулы (5) и получить величину теплового потока из воздушной прослойки к трубе  $Q_{\text{тр}}$  и равную ей величину теплового потока от трубы через изоляцию  $Q_{\text{пот}}^{\text{тр}}$ :

$$Q_{\text{тр}} = Q_{\text{тр}}^{\text{ДВ}} (1 - \Psi) \quad (6)$$

, где

$$\Psi = \frac{2\pi}{\alpha(2\pi - \alpha)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n \quad (7)$$

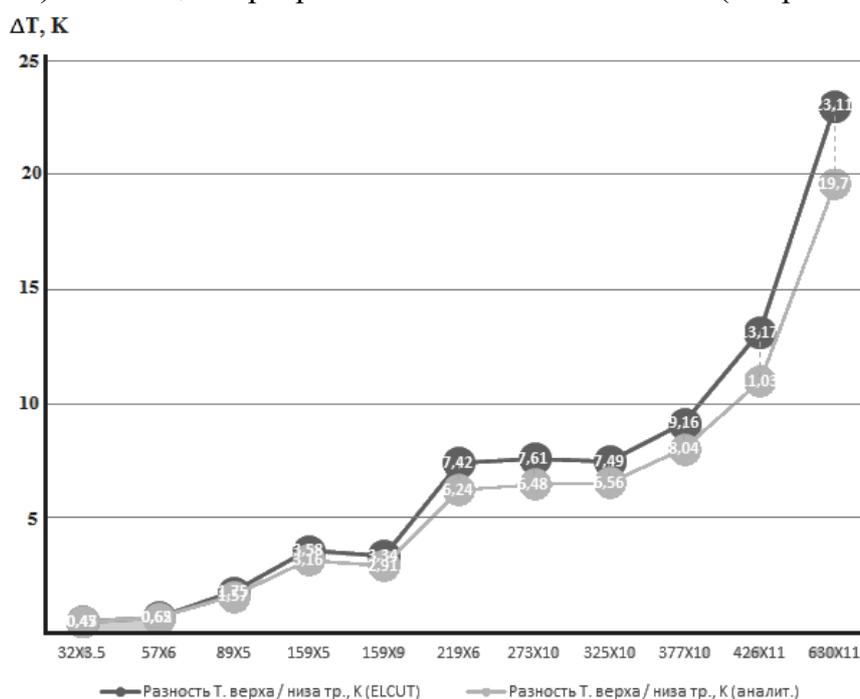
, где  $Q_{\text{тр}}^{\text{ДВ}}$  – тепловой поток для более простого случая движущегося продукта.

Таким образом, для случая неподвижного продукта в ТП температура воздушной прослойки (см. рис. 1) может быть рассчитана по формулам, что и для подвижного продукта, но с введением поправочного коэффициента  $\Psi$ , вычисляемого по формуле (7):

$$T_{\text{в}} = \frac{\frac{T_{\text{сп}}}{R_1} + \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1 - \Psi}{R_3 + R_4} \right) \cdot T_{\text{окр}}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1 - \Psi}{R_3 + R_4}} \quad (8)$$

, где  $R_1$  – удельное термическое сопротивление теплоотдаче от обогревающего трубопровода-спутника в воздушную прослойку;  $R_2$  – термическое сопротивление изоляционного слоя, граничащего с воздушной прослойкой;  $R_3$  – термическое сопротивление изоляционного слоя, граничащего с ТП;  $R_4$  – удельное термическое сопротивление теплоотдаче от воздушной прослойки к ТП.

Проверка адекватности аппроксимационной математической модели процесса теплообмена (3) – (8) выполнена в серии вычислительных экспериментов по определению температурных полей (5), (8) в СТС с неподвижным изотермическим продуктом установки производства элементарной серы с применением разработанной аппроксимационной математической модели (3) – (8) и сравнением аналитического решения с результатами компьютерного моделирования процесса теплообмена в СТС различных конфигураций на стационарных моделях теплопередачи методом конечных элементов (МКЭ) с помощью программного комплекса ELCUT (см. рис. 2).



**Рис. 2.** График сравнения результатов вычислительных экспериментов по проверке адекватности разработанной аппроксимационной математической модели (3) – (8)

Исходная содержательная постановка задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ формулируется следующим образом. Для заданной оптимальной технологической схемы ХТС, с учетом требований СНиП о необходимых стандартных строительных конструкциях ХП и зонах обслуживания СТТ; параметрах физико-химических свойств технологических потоков ХТС и результатов решения задачи оптимального размещения единиц оборудования (ЕО) ХП, при известных характеристиках насосов и компрессоров ХП необходимо определить такой оптимальный вариант трассировки систем теплового обогрева СТТ, при котором приведенные затраты (9) минимальны при обязательном соблюдении условий функционирования ХП по выпуску требуемых продуктов, требуемого количества и требуемого качества.

Для поиска решения указанной задачи, относящейся к широкому классу неформализованных задач химической технологии, при поиске смыслового, а затем и цифрового (численного) решения которых, необходимо, прежде всего, осуществлять

сбор и переработку разнообразных знаний об условиях функционирования систем теплового обогрева СТТ, процессов и аппаратов ХТС, о различных физико-химических, конструкционных и геометрических ограничениях.

Для определения оптимальной трассировки систем теплового обогрева СТТ используется технико-экономический критерий, в виде минимума приведенных затрат:

$$\Pi = \min_{K, \mathcal{E}} \sum_{i=1}^N \Pi_i(K_i, \mathcal{E}_i) =$$

$$= \min \left\{ \left[ \sum_{i=1}^{N_T} K_{T_i} + \sum_{j=1}^{N_T} C_{\text{фч}_j} + \sum_{k=1}^{N_{\text{Тиз}}} K_{\text{из}_k} \right] \cdot E_H + \sum_{l=1}^{N_H} \mathcal{E}_l + \sum_{j=1}^{N_T} (C_p + A_T)_j \right\} \quad (9)$$

, где  $K_i$  – величина капитальных затрат ХТС; где  $\mathcal{E}_i$  – величина эксплуатационных затрат ХТС;  $E_H$  – нормативный коэффициент окупаемости капиталовложений;  $K_{T_i}$  – затраты на  $i$ -ю трубу системы теплового обогрева СТТ;  $C_{\text{фч}_j}$  – стоимость фасонных частей  $j$ -го ТП;  $K_{\text{из}_k}$  – затраты на теплоизоляцию каждого  $k$ -го ТП;  $\mathcal{E}_l$  – затраты на перекачку потока  $l$ -м насосом;  $C_p$  – стоимость ремонта  $j$ -го ТП;  $A_T$  – амортизационные отчисления для  $j$ -го ТП;  $N_T$  – число ТП в СТТС;  $N_{\text{Тиз}}$  – число ТП с теплоизоляцией;  $N_H$  – число насосов.

Приведем основные предпосылки и специальные допущения при разработке и применении оригинального ДТЭ-алгоритма.

При поиске оптимальной трассы систем теплового обогрева СТТ, исходная задача трассировки –  $R^{\text{СТТ}}$  декомпозируется на ряд локальных подзадач прокладки трасс отдельных ТП –  $R_i^{\text{ТП}}(\text{ТП}_i)$ :

$$R^{\text{СТТ}}(\text{СТТ}) = R_1^{\text{ТП}}(\text{ТП}_1) \cup R_2^{\text{ТП}}(\text{ТП}_2) \cup \dots \cup R_n^{\text{ТП}}(\text{ТП}_n); \quad (10)$$

$$R_1^{\text{ТП}}(\text{ТП}_1) \cap R_2^{\text{ТП}}(\text{ТП}_2) \cap \dots \cap R_n^{\text{ТП}}(\text{ТП}_n) = \emptyset \quad (11)$$

, где  $R_i^{\text{ТП}}(\text{ТП}_i)$  – вариант трассировки  $i$ -го ТП;  $R^{\text{СТТ}}(\text{СТТ})$  – вариант трассировки системы теплового обогрева СТТ;  $n$  – число ТП в системе теплового обогрева СТТ.

Снижение размерности исходной задачи оптимальной трассировки систем теплового обогрева СТТ достигается также использованием в ДТЭ-алгоритме эффективных процедур отсечения неперспективных или нерациональных решений с применением метода ветвей и границ (МВГ).

Предложенный оригинальный ДТЭ-алгоритм состоит из следующих четырех этапов:

**Этап 1.** Гидравлический расчет систем теплового обогрева СТТ с использованием стандартных топологических алгоритмов анализа ГЦ.

**Этап 2.** Процедура эвристического выбора очередности прокладки локальных трасс каждого ТП.

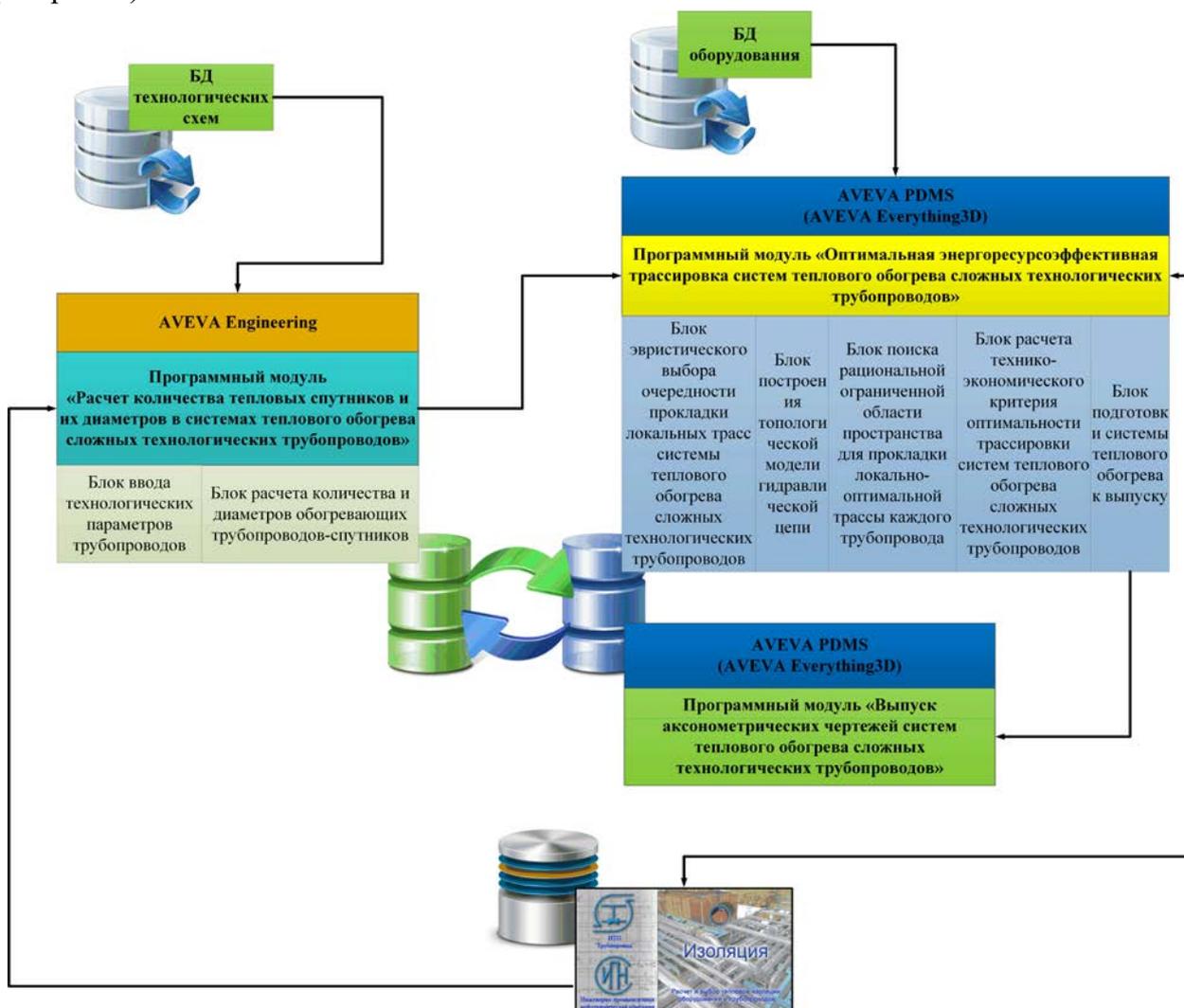
**Этап 3.** Построение топологической модели ГЦ в виде гидравлического структурного графа с учетом набора эвристических правил.

**Этап 4.** Топологическо-эвристический поиск рациональной ограниченной области пространства для прокладки локально-оптимальной трассы каждого ТП.

Кроме того, в главе обосновано применение существующей специализированной упрощенной математической модели для моделирования процесса теплообмена в системе

теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом.

В третьей главе «Разработка комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» описаны архитектура, программно-информационное обеспечение и режимы функционирования комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов с применением средств макроязыка программирования PML (Programmable Macro Language) и объектно-ориентированной базы данных DABACON (см. рис. 3).



**Рис. 3.** Упрощенная блок-схема интеграции ключевых модулей комплекса программ

Разработанный комплекс программ состоит из следующих программных модулей:

1. Модуль «Расчет количества тепловых спутников и их диаметров в системах теплового обогрева технологических трубопроводов».
2. Модуль «Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева технологических трубопроводов».
3. Модуль «Выпуск аксонометрических чертежей систем теплового обогрева технологических трубопроводов».

В диссертации подробно описано информационное обеспечение комплекса программ в виде базы продукционных правил, программно реализованных на макроязыке программирования PML. Для обоснования эффективности алгоритма теплогидродинамических расчетов СТТ проведено сравнение аппроксимационного аналитического и численного решений для математических моделей процесса теплообмена в СТС с неподвижным изотермическим продуктом с использованием критерия минимизации нормы разности между аналитическими и численными значениями температур  $T$  и плотностей тепловых потоков  $F$  :

$$\|R^{\text{ан}} - R^{\text{числ}}\| = \sum_{i=1}^N [R^{\text{ан}}(x_i, y_i) - R^{\text{числ}}(x_i, y_i)]^2 \quad (12)$$

, где  $R$  – значение  $T$  или  $F$ ;  $x_i, y_i$  – либо узлы конечно-элементной сетки, либо внутренние точки конечных элементов.

Приведено сравнение аналитического и численного решений для определения температуры нижней и верхней части поверхности трубопровода и температуры неподвижного продукта (см. рис. 4).

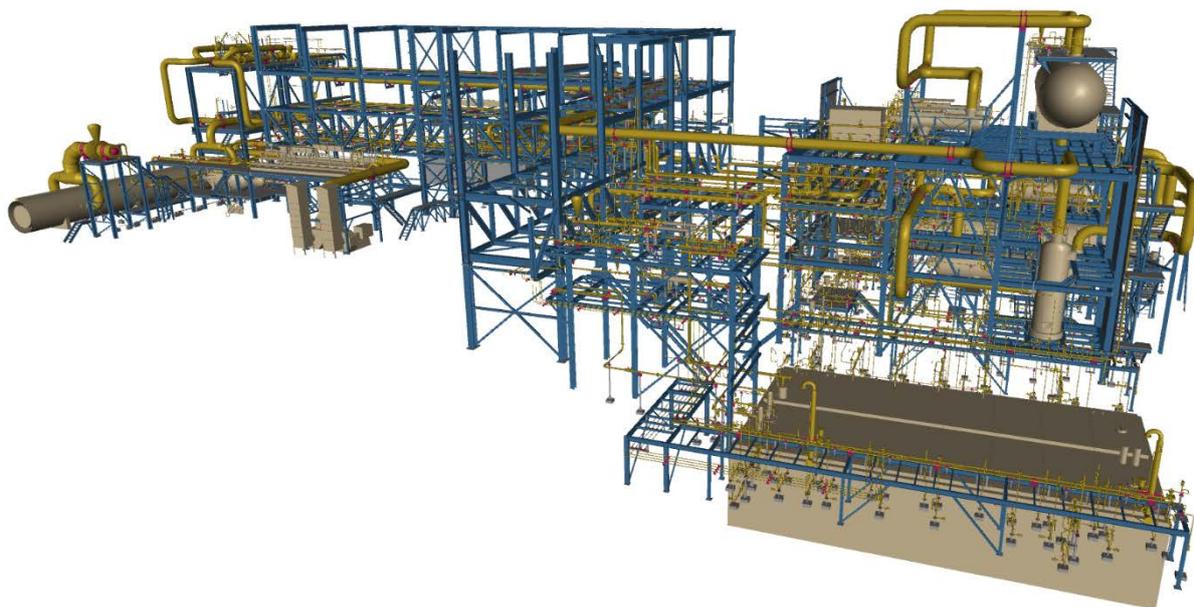


**Рис. 4.** График сравнения аналитического и численного решений для определения температуры: а – верхней части поверхности трубопровода; б – нижней части поверхности трубопровода; в – температуры остановленного продукта

В четвертой главе «Автоматизированная разработка оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установки производства элементарной серы» описаны инженерно-технологическая постановка и результаты решения практической задачи оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ установок производства элементарной серы.

Для поиска оптимального решения указанной задачи составлен набор 33 ЭП, отображающих физико-химические, технологические, гидродинамические и конструкционные ограничения прокладки трасс ТП.

Получена оптимальная энергоресурсоэффективная трасса систем теплового обогрева СТТ производства элементарной серы на НПЗ (см. рис. 5).



**Рис. 5.** Фрагмент оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установки производства элементарной серы

Описаны результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности традиционной специализированной математической модели процесса теплообмена и адекватности разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом. Приведено сравнение аналитического решения с результатами компьютерного моделирования процесса теплообмена в СТС различных конфигураций на стационарных моделях теплопередачи.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. Разработана аппроксимационная математическая модель процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным (период остановки продукта) изотермическим продуктом.

2. Проверена адекватность аппроксимационной математической модели процесса теплообмена с применением численного моделирования температурных полей на стационарных моделях теплопередачи методом конечных элементов.

3. Сформулирована инженерно-технологическая постановка задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ; разработаны наборы эвристических правил энергоресурсоэффективной трассировки.

4. Предложен декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ по минимуму приведенных затрат.

5. Разработан комплекс программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов, который успешно применен в АО «Гипрогазоочистка» для оптимальной трассировки систем теплового обогрева СТТ шести установок производства элементарной серы.

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

### В изданиях перечня ВАК:

1. **Кохов Т.А.** Автоматизированное проектирование обогрева технологических трубопроводов тепловыми спутниками // Химическая Промышленность сегодня. 2016. № 10. Москва. С. 44-51.
2. **Кохов Т.А.**, Гартман Т.Н., Корельштейн Л.Б. Программный комплекс проектирования обогрева технологических трубопроводов тепловыми спутниками для системы автоматизированного проектирования // Программные продукты и системы. 2015. № 4 (112). Тверь. С. 244-248.

### В других изданиях:

3. **Кохов Т.А.** Интегрированная система проектирования обогрева технологических трубопроводов тепловыми спутниками // Сборник статей к 25-летию ООО «НТП Трубопровод». 2017. Москва. С. 168-175.
4. **Кохов Т.А.**, Корельштейн Л.Б., Гартман Т.Н. Разработка комплексной системы проектирования обогрева технологических трубопроводов // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. XXX. №2. Москва. С. 135-136.
5. Корельштейн Л.Б., **Кохов Т.А.** Предварительные результаты проверки точности псевдо-одномерной модели при расчете тепловой изоляции трубопроводов с обогревающими спутниками // Сборник статей к 25-летию ООО «НТП Трубопровод». 2017. Москва. С. 156-165.
6. Корельштейн Л.Б., **Кохов Т.А.** Инженерный метод расчета трубопроводов с обогревающими спутниками для случая неподвижного продукта // Трубопроводная арматура и оборудование. 2017. №3 (90). Санкт-Петербург. С. 50-53.
7. Корельштейн Л.Б., **Кохов Т.А.** О методе численного решения задачи теплопроводности с нестандартными краевыми условиями при расчете теплообмена в теплоизоляционных конструкциях систем обогрева трубопроводов тепловыми спутниками // Цифровые средства производства инженерного анализа: Сб. материалов Первой всерос. конф. с междунар. участием. Электрон. дан. Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого. 2017. С. 121-137.
8. Корельштейн Л.Б., **Кохов Т.А.** О методе численного решения задачи теплопроводности с нестандартными краевыми условиями при расчете теплообмена в теплоизоляционных конструкциях систем обогрева трубопроводов тепловыми спутниками // Цифровые средства производства инженерного анализа: Тезисы докладов Первой всерос. конф. с междунар. участием. Электрон. дан. Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого. 2017. С. 45-46.

\*\*\*

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

*Автор выражает искреннюю признательность и глубокую благодарность: научному руководителю – профессору Гартману Томашу Николаевичу за постоянное внимание и ценные советы; научному консультанту – Академику РАН Мешалкину Валерию Павловичу за ценные научно-методические консультации и постоянную поддержку.*

*Автор благодарен заместителю директора по научной работе ООО «НТП Трубопровод», к.ф.-м.н. Корельштейну Леониду Бенционовичу за научные консультации и поддержку; директору департамента САПР АО «Гипрогазоочистка» Фролову Андрею Александровичу за обсуждение промежуточных результатов научных исследований и архитектуры комплекса программ; главному специалисту департамента САПР АО «Гипрогазоочистка», к.т.н. Кречко Юрию Андреевичу за поддержку и ценные организационно-технические советы; ведущему инженеру департамента САПР АО «Гипрогазоочистка» Абрамовой Наталье Алексеевне и инженеру Салихову Раилу Ришатовичу за активное участие в разработке компонентов комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем обогрева сложных технологических трубопроводов; ведущему инженеру ООО «НТП Трубопровод» Лисину С.Ю. за консультации при разработке интерфейса передачи данных для комплекса программ.*

*Автор искренне благодарит всех преподавателей кафедры информатики и компьютерного проектирования РХТУ имени Д.И. Менделеева за доброжелательное отношение и плодотворные научные дискуссии по результатам диссертационной работы, сотрудников компаний АО «Гипрогазоочистка» и ООО «НТП Трубопровод» за возможность использования материально-технической базы предприятий для разработки и тестирования комплекса программ.*