

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)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гартман Томаш Николаевич

Научный консультант: академик РАН,
доктор технических наук, профессор
Мешалкин Валерий Павлович

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	7
ВВЕДЕНИЕ.....	10
Глава 1. Анализ современных алгоритмов и комплексов программ расчета теплогидродинамических процессов и оптимизации трассировки сложных технологических трубопроводов.....	21
1.1 Аналитический обзор методов расчета теплогидродинамических процессов и оптимизации систем технологических трубопроводов	21
1.2 Взаимосвязь процедуры трассировки сложных технологических трубопроводов с расчетами гидродинамических и тепловых процессов	33
1.3 Аналитический обзор современных методов и алгоритмов оптимальной трассировки сложных технологических трубопроводов.....	36
1.4 Алгоритмы расчета и оптимизации теплоизоляционных конструкций сложных технологических трубопроводов	40
1.5 Общая характеристика современных методов и алгоритмов оптимальной трассировки проводников в радиоэлектронной аппаратуре	47
1.6 Выводы.....	48
Глава 2. Разработка математических моделей процессов теплообмена и декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов.....	51
2.1 Теплотехническая система обогрева технологических трубопроводов как объект математического моделирования и оптимизации.....	51
2.2 Инженерно-технологическая постановка неформализованной задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем обогрева сложных технологических трубопроводов	52

2.3 Математическое моделирование процессов теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом	53
2.3.1 Обоснование специализированной упрощенной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева с движущимся изотермическим продуктом	53
2.3.2 Разработка математической и компьютерной моделей процесса теплообмена в системе теплового обогрева с неподвижным изотермическим продуктом	55
2.4 Компьютерное моделирование процесса теплопередачи в системах теплового обогрева различных конструкций.....	68
2.5 Предпосылки к разработке и сущность декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева.....	75
2.6 Разработка декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева	77
2.7 Выводы.....	95
Глава 3. Разработка комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов.....	98
3.1. Архитектура комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов «Обогрев технологических трубопроводов тепловыми спутниками»	98
3.2 Программное обеспечение комплекса программ.....	99

3.2.1	Логико-информационная структура основных программных модулей и информационного обеспечения.....	99
3.2.2	Программный модуль расчета количества тепловых спутников и их диаметров в системах теплового обогрева сложных технологических трубопроводов.....	100
3.2.3	Программный модуль оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов.....	104
3.2.4	Программный модуль выпуска аксонометрических чертежей систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов.....	108
3.2.5	Интерфейс передачи данных для оптимизации теплоизоляционных конструкций сложных технологических трубопроводов	110
3.3	Информационное обеспечение комплекса программ	112
3.4	Режимы функционирования и методика применения комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов	113
3.5	Проверка эффективности алгоритма теплогидродинамических расчетов сложных технологических трубопроводов	118
3.6	Выводы.....	126
Глава 4.	Автоматизированная разработка оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установки производства элементарной серы	128
4.1.	Инженерно-технологическая и математическая постановка задачи оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установки производства элементарной серы.....	128

4.2 Формирование набора эвристических правил и разработка базы знаний рациональной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установки производства элементарной серы	131
4.3 Результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом	135
4.4 Результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом	148
4.5 Результаты автоматизированной оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установок производства элементарной серы.....	162
4.6. Выводы.....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	165
БЛАГОДАРНОСТИ.....	167
Глоссарий основных терминов и понятий	168
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	177
Приложение 1. Разработка и применение программно-информационного обеспечения построения 3D модели систем обогрева сложных технологических трубопроводов.....	177
Приложение 2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс проектирования обогрева	

технологических трубопроводов тепловыми спутниками для системы автоматизированного проектирования AVEVA PDMS» № 2017663546....	188
Приложение 3. Акт об использовании результатов диссертационной работы в АО «Гипрогазоочистка».....	189
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	190

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

РУССКИЕ СОКРАЩЕНИЯ

БД	— база данных
ВГ	— верхняя граница
ГСГ	— гидравлический структурный граф
ГЦ	— гидравлическая цепь
ДВР	— дерево вариантов решений
ДТЭ-алгоритм	— декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм
ДУ	— дифференциальное уравнение
ЕО	— единица оборудования
ИС	— информационная система
КОД	— кратчайшее остовное дерево
КП	— коммутационное поле
КЭ	— критерий эффективности
ЛПР	— лицо принимающее решение
МВГ	— метод ветвей и границ
МКЭ	— метод конечных элементов
НГ	— нижняя граница
НГХК	— нефтегазохимический комплекс

ОГКГ	– обобщенный гипотетический конструкционный граф
ОТТ	– обогрев технологических трубопроводов
РЭА	– радиоэлектронная аппаратура
САПР	– система автоматизированного проектирования
СБИС	– сверхбольшая интегральная схема
СТС	– сложная теплотехническая система
СТТ	– сложный технологический трубопровод
ТИ	– тепловая изоляция
ТК	– теплоизоляционная конструкция
ТП	– трубопровод
ХД	– хранилище данных
ХП	– химическое производство
ХТП	– химико-технологический процесс
ХТС	– химико-технологическая система
ЭВМ	– электронная вычислительная машина
ЭП	– эвристическое правило

АНГЛИЙСКИЕ АББРЕВИАТУРЫ

EDG	– Event-Driven Graphics
PDMS	– Plant Design Management System

- PML – Programmable Macro Language
- SST – Shortest Spanning Tree

ВВЕДЕНИЕ

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 [1, 2].

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 [2]. 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. [2, 3], академика РАН Мешалкина В.П. [2]; к.т.н. Миркина А.З., к.т.н. Усиныша В.В. [6]; к.т.н. Чионова А.М. [137-138] Хижнякова С. В. [4], Гурьева В. В., Жолудова В. С., Петрова-Денисова В. Г. [5], а также зарубежных ученых Mohinder L. Nayyar [14], J. Phillip Ellenberger [15], Bob Wilson [16] и др. Методы и алгоритмы расчета СТС изложены в материалах ряда специализированных организаций, главным образом, научно-исследовательского и проектного института АО «Теплопроект» [18-22].

Основные методы определения оптимальной трассировки сложных ТТС химических производств (ХП) освещены в работах отечественных ученых: академика РАН Кафарова В.В. [2, 7, 8, 10], академика РАН Мешалкина В.П. [2, 9-13]; профессоров Егорова С.Я. [23-26], Зайцева И.Д. [27] и Малыгина Е.Н. [23, 28-29]; к.т.н. Образцова А.А. [11, 30], а также зарубежных ученых Georgiadis M.C. [31, 32], Papageorgiou L.G. [33, 34], Rotsteln G.E. [35-37], Swaney R.E. [38]. В работах академика РАН Мешалкина В.П. и его учеников [2, 9, 10-13] особое внимание уделяется 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 [4, 5] и нормативных документов [18-22] 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 [18-22] 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 известных 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 СТТ.

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

1. Разработка аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в СТТ 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 продукционных 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 теплого 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 теплого 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.

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

В разделе приведено описание процесса теплообмена в СТС из нескольких технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе методами теоретической основы теплотехники. Процессы переноса теплоты и вещества в теплоизоляционных конструкциях при их взаимодействии с окружающей средой в процессе эксплуатации являются типичным случаем взаимодействия в термодинамических системах.

Процесс теплообмена в СТС технологического ТП происходит в основном через воздушную прослойку (межтрубное пространство) и представляет собой сложный процесс, включающий все три основных вида переноса теплоты: теплообмен в условиях свободной конвекции, теплообмен излучением и теплопроводностью.

А.В. Лыков, основываясь на законах переноса теплоты и массы, на законе сохранения вещества и энергии, получил систему уравнений, при постоянстве коэффициентов переноса теплоты и влаги, представленную в виде [52, 54]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 U + a_m \delta \nabla^2 T \quad (1.1.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \varepsilon \frac{r}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (1.1.2)$$

Теплоизоляционные материалы, применяемые для конструирования промышленных теплоизоляционных конструкций (ТК), содержат ничтожное количество влаги. Исходя из этого, процессы совместного тепло- и влагообмена при проектировании ТК не рассматриваются [52, 54].

Система дифференциальных уравнений теплопроводности

Для получения основного расчетного уравнения, описывающего теплообмен в конструкциях, не осложненных влагообменом, используют уравнение (1.1.2) из системы (1.1.1), (1.1.2), поскольку при отсутствии в конструкции влаги уравнение влагопереноса (1.1.1) не рассматривается. Из формулы (1.1.2) исключается также второй член правой части, учитывающий расход и выделение теплоты за счет испарения и конденсации влаги в материале. Поступая таким образом, получаем основное расчетное уравнение – уравнение теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T \quad (1.1.3)$$

, где ∇^2 – дифференциальный оператор Лапласа.

При практическом приложении теории теплообмена к анализу тепловой работы промышленной изоляции в подавляющем большинстве случаев [2, 4] процессы переноса теплоты идеализированно рассматривают как стационарные, а температурное поле в ТК полагают неизменным во времени.

Для стационарных условий, при которых производная температуры по времени (1.1.3) будет равна нулю, основное расчетное уравнение температурного поля примет весьма простой вид:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (1.1.4)$$

Геометрические характеристики ТК технологических ТП имеют ряд особенностей, анализируя которые можно существенно упростить расчетную схему теплообмена. Прежде всего толщина изоляции x обычно в несколько десятков раз меньше длины y или высоты z . Таким образом, практически всегда, изменением температур по одной из координат можно пренебречь, следовательно, и производную температуры по этой координате приравнять к нулю. В большинстве случаев и длина, и высота изолируемых сооружений значительно превышают толщину изоляции. Тогда задача еще более упрощается,

поскольку температура является функцией всего лишь одной координаты: x (плоская многослойная стенка), r (цилиндрическая многослойная стенка)

Поток тепла через плоскую многослойную стенку

Распространение тепла в однородной изотропной среде подчиняется основному закону теплопроводности – закону Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (1.1.5)$$

, где λ – величина коэффициента теплопроводности.

Рассмотрим классический одномерный случай, плоскую стенку толщиной δ , коэффициент теплопроводности λ которой постоянен. На наружных поверхностях однородной стенки поддерживаются постоянные температуры T_1 и T_2 . Изменение температуры происходит только по оси x , температурное поле, одномерно

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.1.6)$$

При стационарном тепловом режиме, плотность теплового потока q постоянна в любом из сечений, следовательно

$$T(x) = -\frac{q}{\lambda}x + C \quad (1.1.7)$$

Тогда, при известных значениях температур краев стенки и толщины δ , поток тепла через стенку записывается в виде

$$q = -\frac{\lambda}{\delta}(T_2 - T_1) \quad (1.1.8)$$

, где λ/δ – величина коэффициента теплопередачи, а обратная величина называется термическим сопротивлением $R = \delta/\lambda$.

Поток тепла для случая многослойной стенки можно представить в следующем виде:

$$q = - \left(\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)^{-1} (T_{n+1} - T_1) \quad (1.1.9)$$

, где i – номер слоя стенки, n – число слоев.

Поток тепла через цилиндрическую многослойную стенку

Рассмотренный выше случай хорошо применим для плоских стенок, но для описания стенки трубопровода, его можно принять только при условии, что $\delta/r \ll 1$. Рассмотрим однородный цилиндр (трубопровод). Длина цилиндра l , внутренний радиус r . Коэффициент теплопроводности материала $\lambda = \text{const}$. Температуры T_1 и T_2 постоянны. Тогда закон Фурье, для этого случая можно представить в виде:

$$Q = -\lambda F \frac{dT}{dr} = -2\lambda\pi r l \frac{dT}{dr} \quad (1.1.10)$$

Применяя метод разделения переменных:

$$dT = -\frac{Q}{2\pi\lambda l} \frac{dr}{r} \quad (1.1.11)$$

Интегрируя (1.1.11):

$$T = -\frac{Q}{2\pi\lambda l} \ln r + C \quad (1.1.12)$$

При $r = r_{\text{внутр}}$, $T = T_1$ и при $r = r_{\text{внешн}}$, $T = T_2$, исключая $C = \text{const}$:

$$Q = -\frac{2\pi\lambda l}{\ln \frac{r_{\text{внешн}}}{r_{\text{внутр}}}} (T_2 - T_1) = -\frac{\pi l (T_2 - T_1)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{внешн}}}{d_{\text{внутр}}}} \quad (1.1.13)$$

Расчетные формулы количества теплоты, проходящего через цилиндрическую стенку, имеют следующий вид:

- к единице длины l :

$$q_l = \frac{Q}{l} = - \frac{\pi(T_2 - T_1)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{\text{внешн}}}{d_{\text{внутр}}}} \quad (1.1.14)$$

- к единице внутренней $F_{\text{внутр}}$ поверхности ТП:

$$q_{F_{\text{внутр}}} = \frac{Q}{F_{\text{внутр}}} = \frac{Q}{\pi d_{\text{внутр}} l} = - \frac{(T_2 - T_1)}{\frac{1}{2\lambda} d_{\text{внутр}} \ln \frac{d_{\text{внешн}}}{d_{\text{внутр}}}} \quad (1.1.15)$$

- к единице внешней $F_{\text{внешн}}$ поверхности ТП:

$$q_{F_{\text{внешн}}} = \frac{Q}{F_{\text{внешн}}} = \frac{Q}{\pi d_{\text{внешн}} l} = - \frac{(T_2 - T_1)}{\frac{1}{2\lambda} d_{\text{внешн}} \ln \frac{d_{\text{внешн}}}{d_{\text{внутр}}}} \quad (1.1.16)$$

, где $d_{\text{внутр}}$ – внутренний диаметр ТП; $d_{\text{внешн}}$ – внешний диаметр ТП.

Расчетную формулу для цилиндрической многослойной стенки можно представить в следующем виде:

$$q_l = - \frac{\pi(T_{n+1} - T_1)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i\text{внешн}}}{d_{i\text{внутр}}}} \quad (1.1.17)$$

$$q_{F_{\text{внутр}}} = - \frac{(T_{n+1} - T_1)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} d_{i\text{внутр}} \ln \frac{d_{i\text{внешн}}}{d_{i\text{внутр}}}} \quad (1.1.18)$$

$$q_{F_{\text{внешн}}} = - \frac{(T_{n+1} - T_1)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} d_{i\text{внешн}} \ln \frac{d_{i\text{внешн}}}{d_{i\text{внутр}}}} \quad (1.1.19)$$

, где i – номер слоя стенки, n – число слоев.

Конвективный теплообмен

Конвективный теплообмен (теплоотдача) – процесс переноса теплоты между твердой поверхностью и жидкой средой.

Интенсивность конвективного теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи α :

$$Q = \alpha(T_{\text{ст}} - T_{\text{жидк}})F \quad (1.1.20)$$

, где Q – тепловой поток; F – поверхность теплообмена; $T_{\text{ст}}$ – температура стенки; $T_{\text{жидк}}$ – температура жидкости.

Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле Ньютона-Рихмана:

$$\alpha = \frac{Q}{(T_{\text{ст}} - T_{\text{жидк}})F} \quad (1.1.21)$$

Коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене определяется, обычно, экспериментально с использованием теории подобия, результаты выражаются в виде безразмерных зависимостей (критериальных уравнений).

В настоящее время теория конвективного теплообмена разработана весьма обстоятельно и доведена до удобных и простых инженерных формул. Необходимые сведения можно найти, например, в работах [53-55], до настоящего времени не потерявших оригинальности, простоты и наглядности физической интерпретации сложных теоретических вопросов.

В публикациях [4, 5] приводятся подробные рекомендации о применении коэффициента теплоотдачи в расчетах ТК.

Для внешней поверхности в расчетах обычно используют суммарные или эффективные коэффициенты теплоотдачи, включающие как конвективный, так и лучистый перенос теплоты. Со стороны среды, находящейся на внутренней поверхности за стенкой изолируемого аппарата, коэффициент теплоотдачи, обычно, настолько велик, что его принимают равным бесконечности, полагая температуру на внутренней поверхности изоляции равной температуре среды (сопротивлением переносу теплоты через стенку аппарата или трубопровода за его малостью, обычно, пренебрегают).

Анализ математических моделей теплообмена в сложной теплотехнической системе технологического трубопровода с окружающей средой

При проектировании конструкции ТИ трубопроводов, обогреваемых спутниками, обычно рассматривают два расчётных варианта:

- расчет толщины теплоизоляционного слоя обогреваемого спутником ТП с движущимся продуктом по условию сохранения заданной температуры продукта по всей длине трубопровода;
- расчет толщины теплоизоляционного слоя обогреваемого спутником ТП с неподвижным продуктом (период остановки продукта) по условию сохранения заданной температуры продукта по всей длине трубопровода [2, 4, 5].

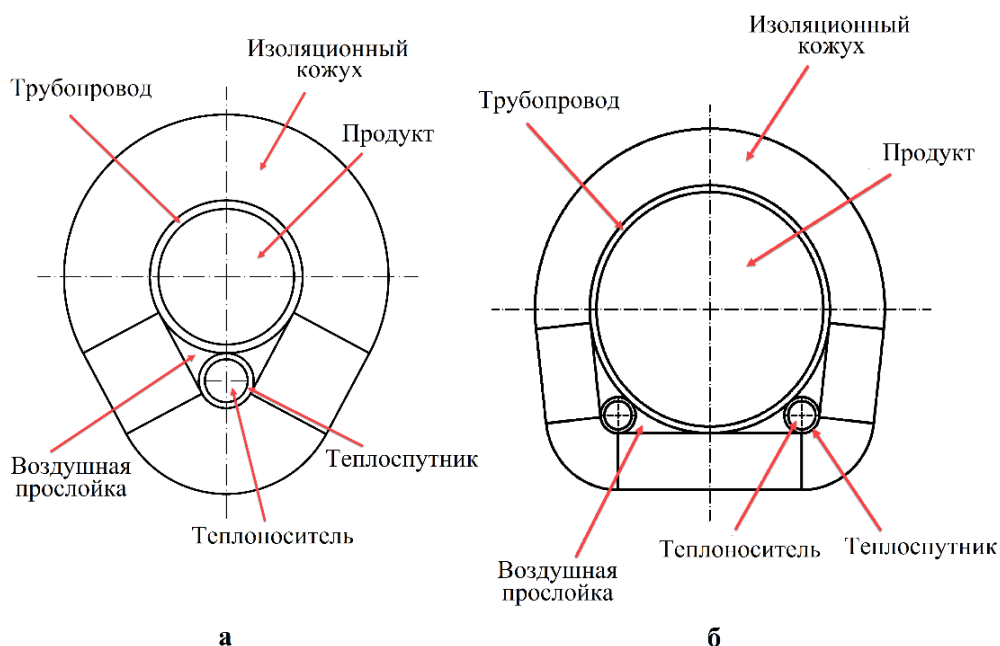


Рис. 1.1.1. Сложная теплотехническая система из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе (а – с одним обогревающим спутником, б – с двумя обогревающими спутниками)

При рассмотрении данных вариантов в числе других параметров предполагается известной и постоянной температура спутника.

Для упрощенного моделирования теплообмена через воздушную прослойку применяют два способа:

- моделирование через эффективную теплопроводность среды (данный подход описан, например, в [17]);
- моделирование через эффективные коэффициенты теплоотдачи. Данный метод является для данной задачи традиционным подходом, проповедуемым во всех известных нормативных документах [19-22] и пособиях [4, 5]. Такой подход дает возможность свести задачу к легко рассчитываемой так называемой «псевдо-одномерной» модели, при которой перепадом температуры воздуха в воздушной прослойке, продукта в ТП и теплоносителя в спутнике по сечению пренебрегают, а теплообмен между воздушной прослойкой, с одной стороны, и наружной поверхностью ТП, спутника, и внутренней поверхностью теплоизоляции описывают некоторыми эффективными коэффициентами теплоотдачи. При этом при расчете тепловых потоков через изоляцию в окружающую среду от ТП, спутника(-ов) и межтрубного пространства предполагается, что данные тепловые потоки можно рассчитывать по соответствующим одномерным моделям, и при расчете термических сопротивлений используют формулы, полученные при решении соответствующих плоской (для межтрубного пространства) и осесимметричной (для трубопровода и спутника(-ов)) задач теплопроводности. Данная модель рекомендована изменениями №1 к СП 61.13.330.2012 [18].

При составлении упрощенной математической модели процесса теплообмена с использованием эффективных коэффициентов [4, 5] теплоотдачи предполагают, что теплота от трубопровода-спутника $Q_{\text{сп}}$ передается воздуху, заключенному в межтрубном пространстве, образованном изоляцией и нижней поверхностью обогреваемого ТП (см. рис. 1.1.2).

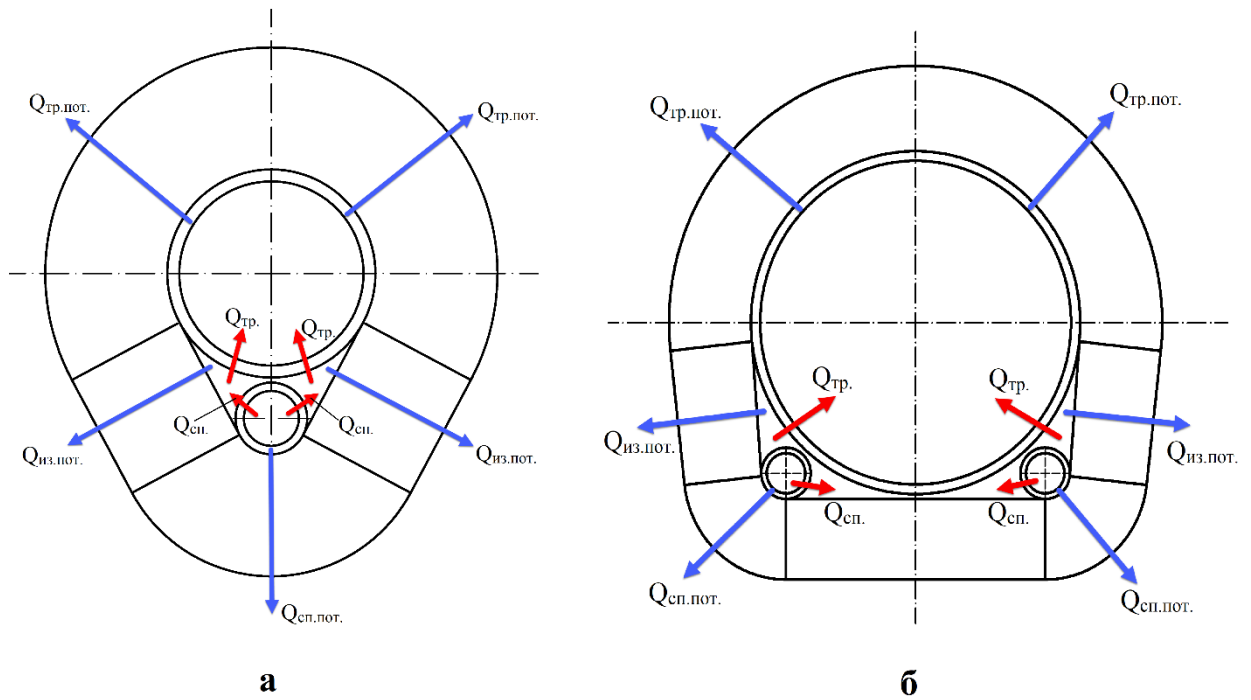


Рис. 1.1.2. Расчетные схемы процесса теплообмена в системе обогревающий спутник-трубопровод-изоляционный кожух-продукт (а – с одним обогревающим спутником, б – с двумя обогревающими спутниками)

От воздуха с температурой $T_{в}$ часть теплоты $Q_{тр}$ передается обогреваемому ТП, имеющему заданную температуру $T_{тр}$, а другая часть, $Q_{пот}^{из}$ через изоляционный кожух теряется в окружающую среду с температурой $T_{окр}$. Для того, чтобы температура обогреваемого ТП была постоянной, необходимо, во-первых, чтобы количество теплоты, передаваемой ТП – $Q_{тр}$, было равно количеству теплоты, теряемой верхней частью ТП в окружающую среду через участок плотно прилегающей к нему изоляции $Q_{пот}^{тр}$, а, во-вторых, чтобы количество теплоты, передаваемой обогревающим трубопроводом-спутником, $Q_{сп}$ было равно сумме $Q_{тр}$ и $Q_{пот}^{из}$. Таким образом, расчетные уравнения теплового баланса, соответствующие этой схеме теплообмена (см. рис. 1.1.2), имеют вид:

$$Q_{сп} = Q_{пот}^{из} + Q_{тр} \quad (1.1.22.1)$$

$$Q_{тр} = Q_{пот}^{тр} \quad (1.1.22.2)$$

, где

$$\begin{aligned} Q_{\text{сп}} &= \frac{(T_{\text{сп}} - T_{\text{в}})}{R_1}; Q_{\text{пот}}^{\text{из}} = \frac{(T_{\text{в}} - T_{\text{окр}})}{R_2} \\ Q_{\text{пот}}^{\text{тр}} &= \frac{(T_{\text{тр}} - T_{\text{окр}})}{R_3}; Q_{\text{тр}} = \frac{(T_{\text{в}} - T_{\text{тр}})}{R_4} \end{aligned} \quad (1.1.23)$$

, где $T_{\text{тр}}$ – температура продукта в трубопроводе; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающего воздуха; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха в межтрубном пространстве (воздушной прослойке); $T_{\text{сп}}$ – температура спутника;

R_1 – удельное термическое сопротивление теплоотдаче в межтрубное пространство от теплоспутника, рассчитывается по формуле:

$$R_1 = \frac{2}{(2\pi n - \alpha) \cdot \alpha_{\text{сп}} \cdot d_{\text{сп}}} \quad (1.1.24)$$

R_2 – термическое сопротивление изоляционного кожуха, граничащего с воздушной прослойкой, вычисляется по формуле:

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_{\text{из}}^{\text{вн}} \cdot l_{\text{из}}^{\text{вн}}} + \frac{\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}} \cdot l_{\text{из}}^{\text{сп}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{из}}^{\text{н}} \cdot l_{\text{из}}^{\text{н}}} \quad (1.1.25)$$

R_3 – термическое сопротивление изоляционного кожуха, граничащего с трубой, вычисляется по формуле:

$$R_3 = \frac{2\pi}{\beta} \left[\frac{1}{\alpha_{\text{из}}^{\text{н}} \pi (d_{\text{тр}} + 2\delta_{\text{из}})} + \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d_{\text{тр}} + 2\delta_{\text{из}}}{d_{\text{тр}}} \right] \quad (1.1.26)$$

R_4 – удельное термическое сопротивление теплоотдаче от межтрубного пространства к ТП, вычисляется по формуле:

$$R_4 = \frac{2}{\alpha_{\text{тр}} \alpha d_{\text{тр}}} \quad (1.1.27)$$

, где n – число трубопроводов-спутников; $d_{\text{сп}}$ – наружный диаметр трубопровода-спутника; $\delta_{\text{из}}$ – толщина изоляционного кожуха; $l_{\text{из}}^{\text{вн}}$ – длина внутренней части изоляции; $l_{\text{из}}^{\text{н}}$ – длина наружной части изоляции; $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности изоляционных материалов в ТК; α – угол, образующий участок ТП, обогреваемый воздухом внутри теплоизоляционного

кожуха (угол обогрева), град; $\beta = 2\pi - \alpha$ – угол, образующий участок ТП, на котором располагается изоляция, град; $\alpha_{\text{сп}}$ – коэффициент теплоотдачи трубопровода-спутника в межтрубное пространство; $\alpha_{\text{из}}^{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности изоляционного кожуха; $\alpha_{\text{из}}^{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляционного кожуха в окружающую среду; $\alpha_{\text{тр}}$ – коэффициент теплоотдачи от межтрубного пространства к обогреваемому ТП.

Таким образом, учитывая (1.1.23) – (1.1.27), определяются значения $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{тр}}$ через (1.1.22.1) и (1.1.22.2):

$$T_{\text{в}} = \frac{\frac{T_{\text{сп}}}{R_1} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} \right) \cdot T_{\text{окр}}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4}} \quad (1.1.28)$$

$$T_{\text{тр}} = \frac{T_{\text{в}} \cdot R_3 + T_{\text{окр}} \cdot R_4}{R_3 + R_4} \quad (1.1.29)$$

При составлении уравнений теплового баланса (1.1.22.1) и (1.1.22.2) не учитывают термическое сопротивление переносу теплоты через движущийся продукт и градиент температур по сечению ТП. Для имеющих в практике проектирования систем обогрева трубопроводов, скоростей движущегося продукта и длин обогреваемых участков эти допущения, как показали проверочные расчеты, вполне приемлемы.

На практике, однако, важное значение имеет случай временной остановки перекачки продукта, когда продукт в ТП неподвижен, и с помощью обогревающего трубопровода-спутника и изоляционного кожуха необходимо поддерживать его температуру в заданных пределах. В этих условиях предположение об отсутствии градиента температуры продукта и стенки трубы по сечению обогреваемого трубопровода неправомерно, особенно при его больших диаметрах и продуктах с низкой теплопроводностью. Необходимо более точно учитывать перенос теплоты в неподвижном продукте (t_1 , λ_1), в

металлической стенке продуктопровода (t_2, λ_2) и изоляции (t_3, λ_3) . Учитывая эти предположения и используя общую схему теплообмена, рассмотренную выше для движущегося продукта, теплообмен в конструкции обогревающий спутник – трубопровод – изоляционный кожух – продукт можно описать следующей системой уравнений:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \varphi^2} = 0 \quad \begin{pmatrix} -\pi \leq \varphi \leq \pi \\ 0 \leq r \leq r_0 \end{pmatrix} \quad (1.1.30)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_2}{\partial \varphi^2} = 0 \quad \begin{pmatrix} -\pi \leq \varphi \leq \pi \\ r_0 \leq r \leq r_{\text{тр}} \end{pmatrix} \quad (1.1.31)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t_3}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_3}{\partial \varphi^2} = 0 \quad \begin{pmatrix} -\pi \leq \varphi \leq \pi \\ r_0 \leq r \leq r_{\text{тр}} \end{pmatrix} \quad (1.1.32)$$

и граничными условиями

$$t_1 = t_2; \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r} \quad \begin{pmatrix} -\pi \leq \varphi \leq \pi \\ r = r_0 \end{pmatrix} \quad (1.1.33)$$

$$t_2 = t_3; \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial r} \quad \begin{pmatrix} -\beta/2 \leq \varphi \leq \beta/2 \\ r = r_{\text{тр}} \end{pmatrix} \quad (1.1.34)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r} = [T_{\text{в}} - t_2(r = r_{\text{тр}})] \alpha_{\text{тр}} \quad \begin{pmatrix} \pm\beta \leq \varphi \leq \pi \\ r = r_{\text{тр}} \end{pmatrix} \quad (1.1.35)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial r} = \alpha_{\text{из}}^{\text{н}} [t_3(r = r_{\text{тр}}) - T_{\text{окр}}] \quad \begin{pmatrix} -\beta/2 \leq \varphi \leq \beta/2 \\ r = r_{\text{из}} \end{pmatrix} \quad (1.1.36)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial t_3}{\partial r} = 0 \quad \begin{pmatrix} -\beta/2 \leq \varphi \leq \beta/2 \\ r_{\text{тр}} \leq r \leq r_{\text{из}} \end{pmatrix} \quad (1.1.37)$$

Неизвестная температура $T_{\text{в}}$ определяется из уравнения теплового баланса

$$Q_{\text{сп}} = Q_{\text{пот}}^{\text{из}} + Q_{\text{пот}}^{\text{тр}} \quad (1.1.38)$$

, где $Q_{\text{сп}}$ и $Q_{\text{пот}}^{\text{из}}$ рассчитываются по (1.1.23);

$$Q_{\text{пот}}^{\text{тр}} = \int_0^{2\beta r_{\text{из}}} \lambda_3 \frac{\partial t_3(r - r_{\text{из}})}{\partial r} ds \quad (1.1.39)$$

Перенос теплоты в продукте, находящемся в обогреваемом ТП, и происходящий в реальных условиях путем молекулярной теплопроводности и сложного конвективного переноса при свободной конвекции в цилиндрической полости, заменяется кондуктивным переносом через среду (продукт) с эффективной теплопроводностью в системе (1.1.30) – (1.1.39). Такой прием часто применяют в расчетах подобных сложных систем [2, 5].

Эффективную теплопроводность продукта в зависимости от диаметра ТП, перепада температур между нижней и верхней поверхностями трубопровода и вида продукта рассчитывают на основе теории конвективного теплообмена в замкнутых прослойках.

Все рассмотренные выше существующие способы моделирования процесса теплообмена в СТС технологического ТП с окружающей средой являются приближенными, т.к. основываются на решениях уравнения теплопроводности для стационарного случая и используют упрощающие предположения о характере исследуемых температурных полей.

Также, необходимо помнить об полноте и корректности исходных данных, которые, в ряде случаев могут вносить значительную погрешность для моделирования процесса теплообмена в СТС технологического ТП с окружающей средой.

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

Процедура трассировки систем теплового обогрева СТТ взаимосвязана с процедурами расчетов гидродинамических и тепловых процессов в СТС из нескольких технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе и сопровождается решением целого ряда задач, связанных с взаимным

расположением обогревающих и обогреваемых ТП – оптимизацией трассы обогрева, путем уменьшения числа обогревающих спутников и увеличения количества обогреваемых ТП в одном контуре обогрева; распределением системы подвода и отвода теплоносителя; комплексным учетом систем обогрева разных трубопроводов [107].

Для соответствия нормативным требованиям длины проектируемой трассы обогревающего спутника, при заданных температуре теплоносителя в трубопроводе-спутнике, температуре обогреваемого ТП и рассчитанных количестве обогревающих спутников обогрева, их диаметров и плотности теплового потока, с учетом тепловых потерь в окружающую среду, необходимо найти максимальную допустимую длину проектируемого (трассируемого) обогреваемого участка ТП L в зависимости от принятого вида теплоносителя в обогревающем спутнике в соответствии с прилагаемой формулой, заимствованной из СТО ИПН/НТП 17-02-2010 ЗАО «ИПН» и НТП «Трубопровод» [19] и «Методики расчета тепловой изоляции трубопровода с обогревающими спутниками ТР 22», разработанной ВНИПИнефтью в 1982 г.:

- при обогреве насыщенным или перегретым паром

$$L = \frac{0,9r \frac{\pi d_{\text{вн.сп}}^2}{4} \cdot V_{\text{п}} \cdot 3600 \cdot \gamma_{\text{п}}}{q_{\text{сп}}} \quad (1.2.1)$$

, где 0,9 – «коэффициент, учитывающий уменьшение теплосодержания пара за счет трения при движении по трубопроводу» [19];

r – «величина удельной теплоты парообразования» [19]:

$$r = -0,7343 \cdot t_{\text{сп}} + 613,656 \quad (1.2.2)$$

, где $d_{\text{вн.сп}}$ – внутренний диаметр спутника, м;

$V_{\text{п}}$ – скорость потока пара, м/с. Для перегретого пара принимается 15 м/с, для насыщенного пара принимается 10 м/с;

$\gamma_{\text{п}}$ – удельный вес пара, кг/м³, определяется по таблице 1 СТО ИПН/НТП 17-02-2010 ЗАО «ИПН» и НТП «Трубопровод» [19].

- при обогреве водой

$$L = \frac{n \cdot \gamma_{\text{в}} \cdot \frac{\pi d_{\text{вн.сп}}^2}{4} \cdot 3600 \cdot V_{\text{п}} \cdot C_p \cdot (t_{\text{сп}}^{\text{н}} - t_{\text{сп}}^{\text{к}})}{q_{\text{сп}}} \quad (1.2.3)$$

, где n – количество спутников;

$\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес воды, кг/м³;

$d_{\text{вн.сп}}$ – внутренний диаметр спутника, м;

$V_{\text{в}}$ – скорость обогревающего продукта, м/с. Для воды $V_{\text{в}} \sim 0,8$ м/с;

C_p – удельная теплоемкость воды, ~ 1 ккал/кг $\cdot$ °С;

$t_{\text{сп}}^{\text{н}}$ – начальная температура воды в спутнике, °С;

$t_{\text{сп}}^{\text{к}}$ – конечная температура воды в спутнике, °С;

Определение удельного веса воды:

$$\gamma_{\text{в}} = -0,74 \cdot t_{\text{сп}} + 1024,2 \quad (1.2.4)$$

Количество спутников, их диаметр зависят от температуры и диаметра обогреваемого трубопровода и подбираются в соответствии с Т-ТТ-06-85 [21]. По таблицам Т-ТТ-06-85 приведенных в приложении 1-4, производится ориентировочный выбор диаметров и количества спутников для технологических ТП:

- «при обогреве паром $t_{\text{сп}}$ принимается равной температуре насыщения при давлении пара в спутнике» [21-22];
- при обогреве водой:

$$t_{\text{сп}} = \frac{t_{\text{сп}}^{\text{н}} + t_{\text{сп}}^{\text{к}}}{2} \quad (1.2.5)$$

, где $t_{\text{сп}}^{\text{н}}$ и $t_{\text{сп}}^{\text{к}}$ – начальная и конечная температура теплоносителя;

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

Для решения задачи оптимальной трассировки существуют различные методы и алгоритмы. Известные методы трассировки подразделяются на две основные группы:

- *топографические (метрические) методы* – учитывают геометрические размеры соединений, оборудования и пространства трассировки, а также метрические ограничения на трассировку;
- *графотеоретические методы* – основаны на выборе допустимого расположения отдельных технологических соединений в пространстве с учетом ограничений на количество пересечений, число уровней и т.д.

Задача трассировки состоит из следующих последовательно выполняемых этапов:

1. определение очередности соединений;
2. прокладка отдельных ТП.

Анализ существующих алгоритмов трассировки соединений показал, что наиболее известными являются следующие алгоритмы:

- волновой алгоритм [56];
- модификации волнового алгоритма;
- эвристические алгоритмы.

Волновые алгоритмы позволяют получать оптимальные решения для ряда показателей, но требуют больших затрат времени на вычисления: порядка 90% времени используется для генерации волны и 10% времени, необходимо для построения оптимальной прокладки трассы [57-59]. Алгоритм встречной волны и лучевой алгоритм - известные модификации волнового алгоритма, в основном предназначены для улучшения скорости исходного алгоритма Ли [58-60].

Кроме того, при трассировке соединений часто используются одни из самых быстродействующих и простых алгоритмов – эвристические алгоритмы, основанные на учете специфических особенностей задачи и часто дают хорошие результаты решения за короткий промежуток времени. Однако, основная процедура построения трассы и обхода препятствий приводит к неоптимальному характеру результата. Описание некоторых возможных вариантов эвристических вариантов дано в [58, 60, 61].

Эвристический алгоритм оптимальной трассировки, с учетом особенностей прокладки ТП ХП представлен в работах [1, 2, 10]. Рассматриваемый алгоритм основывается на поэтапной прокладке каждой последовательной трассы ТП, используя наборы эвристических правил, отсекая неперспективные сегменты трасс и выделяя области пространства для возможной оптимальной трассировки ТП. Предложенный алгоритм состоит из четырех основных этапов: 1) эвристическо-вычислительный поиск ограниченного пространства оптимальной прокладки локальной трассы ТП; 2) эвристический выбор оптимального порядка трассировки ТП; 3) трассировка каждого ТП в рациональной области пространства; 4) уточнение длины и модернизация конфигурации трассы каждого ТП.

Для трассировки комбинации нескольких объектов требуется найти общую последовательность точек соединения.

Рассмотрим некоторые основные методы трассировки комбинации нескольких объектов.

Один из методов поиска оптимальной прокладки соединений основывается на определении порядка трассировки с применением алгоритмов Краскала или Прима [59, 60] и последующей прокладкой отдельных соединений.

Алгоритмы Краскала и Прима позволяют для исходного структурного графа трубопроводной системы, определяющего связи между соединяемыми объектами, находить кратчайшее остовное дерево (КОД), обладающее

минимальной стоимостью [62] и, с применением волнового алгоритма, найти полное решение задачи.

Однако, при наличии препятствий и областей, запрещенных для прокладки трасс в виде уже размещенных элементов ТП аппаратов и строительных конструкций, рассмотренный выше метод не обеспечивает оптимального решения, т.к. алгоритмами Краскала и Прима приведённые выше ограничения не учитываются.

Другой метод поиска оптимальной прокладки соединений основывается на построении минимальных деревьев Штейнера [57, 63-70]. Основным отличием является допустимость введения произвольного количества дополнительных узлов.

Алгоритмы, основанные на решении задачи Штейнера, принадлежащей к классу NP-полных задач [66], в большинстве случаев, не могут быть использованы для решения задач оптимальной прокладки соединений из-за недопустимой временной сложности [65, 69, 70]. В связи с этим было разработано большое число эвристических алгоритмов [65-67], в том числе и наиболее интересный для рассматриваемого типа задач, Iterated I-Steiner algorithm [63, 65, 66].

Анализ существующих эвристических алгоритмов трассировки показал, что в большинстве случаев для построения дерева Штейнера используется кратчайшее остовное дерево. Алгоритмы построения минимальных деревьев Штейнера без учета существования препятствий и областей, запрещенных для прокладки трасс ТП, представлены в [71, 72].

Как уже отмечалось выше, трассировка ТП ХП осуществляется при существовании разного рода ограничений, таких как запрещенные области пространства, соблюдение требуемых техникой безопасности и строительными нормами технологических расстояний между участками ТП, аппаратами и

строительными конструкциями. Методы построения деревьев Штейнера при наличии таких ограничений рассмотрены в работах [72-76].

В работе [73] представлен генетический алгоритм построения деревьев Штейнера, основанный на кодировании хромосомой последовательности соединения отдельных вершин и порядок введения дополнительной вершины исходного графа, приведено описание операций скрещивания и мутации. Для получения набора начальных решений на заданном графе соединений производится поиск КОД с использованием модифицированного алгоритма Краскала и строятся соответствующие им хромосомы, которые образуют начальную популяцию. Множество проведенных численных экспериментов показало, что данный метод построения минимальных деревьев Штейнера дает лучшие результаты, чем метод использования эвристик.

Использование муравьиных алгоритмов [77-79] для построения деревьев Штейнера приведено в работе [76]. В последующем эта идея усовершенствована в работах [80, 81], что позволило получать хорошие результаты за приемлемое время [81].

Применение метаэвристики для построения деревьев Штейнера, имитирующей целенаправленное поведение муравьиных колоний, для выбора направлений прокладки трасс в рассматриваемом графе рассмотрено в работе [11].

Модифицированные, применением аппарата нечетко-логических вычислений, полиномиальные алгоритмы муравьиных колоний для поиска маршрутов на графах с учетом неопределенности и неполноты информации, представлены в работах [12, 82-84].

Все рассмотренные подходы, модели, алгоритмы характеризуются точностью выполнения трассировки, скоростью работы алгоритма, количеством учитываемых ограничений и требований по проектированию трубопроводов.

1.4 Алгоритмы расчета и оптимизации теплоизоляционных конструкций сложных технологических трубопроводов

Прокладку трасс систем теплового обогрева СТТ осуществляют в общем с обогреваемым ТП изоляционном кожухе. Проектирование изоляционного кожуха технологических ТП представляет собой комплексную задачу. Методы расчетов тепловой изоляции, требования к применяемым теплоизоляционным материалам и конструкциям регламентированы соответствующими нормативными документами [18, 85-88].

В России и странах СНГ, в отличие от западной практики, большая часть работы по проектированию теплоизоляционных конструкций выполняется не поставщиками теплоизоляционных материалов, а инженерами проектных организаций. Проект тепловой изоляции включает в себя решение следующих задач:

- оптимальный выбор теплоизоляционных материалов с учетом различных технологических параметров, конструктивных особенностей и условий эксплуатации изолируемых объектов;
- расчет требуемой для обеспечения допустимых потерь тепла толщины теплоизоляционного слоя;
- подбор материалов для формирования требуемой ТК;
- расчет количества материалов ТК и объемов работ;
- выпуск документации по проекту теплоизоляции.

Для автоматизации проектирования тепловой изоляции в лаборатории трубопроводных систем института ВНИПИНефть (на основе которой впоследствии создано ООО «НТП Трубопровод») около 30 лет назад, была разработана программа "Изоляция", предназначенная для автоматизированного проектирования теплоизоляционной конструкции технологических ТП и оборудования.

Программа "Изоляция" является стандартом отечественного программного обеспечения для проектирования ТИ и полностью учитывает требования современных нормативных документов на проектирование изоляции.

Алгоритм программы основан на действующем СП 61.13330.2012 (с Изменением №1) [18] по проектированию тепловой изоляции, а также соответствующим отраслевым нормам НР 34-70-118-87 [85].

В программе использованы расчетные формы [86], методические и информационные материалы, подготовленные специалистами ОАО «Теплопроект», а также ряд методик, описанных в [4-6, 89], в том числе для расчета толщины изоляционного кожуха в СТС из нескольких ТП с движущимся или неподвижным (период остановки) изотермическим продуктом.

Рассмотрим основные этапы методики проектирования ТИ систем обогрева сложных технологических трубопроводов.

1.4.1 Требования к материалам и конструкциям тепловой изоляции

Расчет ТК должен проводиться, исходя из условий сохранения заданной температуры продукта по сечению ТП по всей его длине для следующих режимов его работы [22]:

- «при прекращении движения продукта более чем на 12 ч, как для неподвижного продукта» [22];
- «при остановке менее чем на 12 ч, а для диаметра ТП до 89 мм и в случае полной остановки, как для движущегося продукта» [22].

Тепловая изоляция систем обогрева СТС предусматривает совместную прокладку обогреваемых ТП и обогревающих их трубопроводов-спутников в едином теплоизоляционном кожухе. Конструктивные решения ТИ определяются количеством спутников и их взаимным расположением относительно ТП в ТК. Применение распорок и подкладок, обеспечивает максимальную теплоотдачу от поверхности трубопровода-спутника к

поверхности обогреваемого трубопровода в межтрубном пространстве, ограниченном ТК повышает эффективность теплообмена между спутником и ТП. Внутренние обкладки из алюминиевой фольги или фольгированных листовых и рулонных материалов применяют для минимизации тепловых потерь через участок ТК, граничащий с воздухом в межтрубном пространстве, за счет уменьшения радиационной составляющей теплового потока [18, 22].

В зависимости от требований, для изоляции систем обогрева СТТ, применяются конструктивные решения ТИ (рис. 1.4.1), которые обуславливают необходимую поверхность (угол) обогрева ТП, представляющие собой основной теплоизоляционный слой, покровный слой, детали крепления. Применяются ТК, предусматривающие полный (см. рис. 1.4.1, ж) и частичный (см. рис. 1.4.1, а, б, в, г, д, е) обогрев.

В системах обогрева СТТ используются ТК с естественным углом обогрева (см. рис. 1.4.1, а, б, в, г). ТК с полным и частичным обогревом (см. рис. 1.4.1, д, е, к) применяют лишь в случаях, когда к изоляционному кожуху ТП предъявляются требования, определённые технологией производства.

Для расчета изоляционного кожуха систем обогрева СТТ величина температуры окружающего воздуха принимает следующие значения:

- «на открытом воздухе – среднюю наиболее холодной пятидневки или в соответствии с заданием на проектирование» [22];
- «в помещении – в соответствии с заданием на проектирование, а при отсутствии указаний о температуре окружающего воздуха – 20°C» [22];
- «в тоннелях – 40°C» [22].

Расчетные температуры продукта в обогреваемом ТП и температуры теплоносителя в обогревающем трубопроводе-спутнике принимают на основании исходных данных на выполнение проекта теплоизоляции.

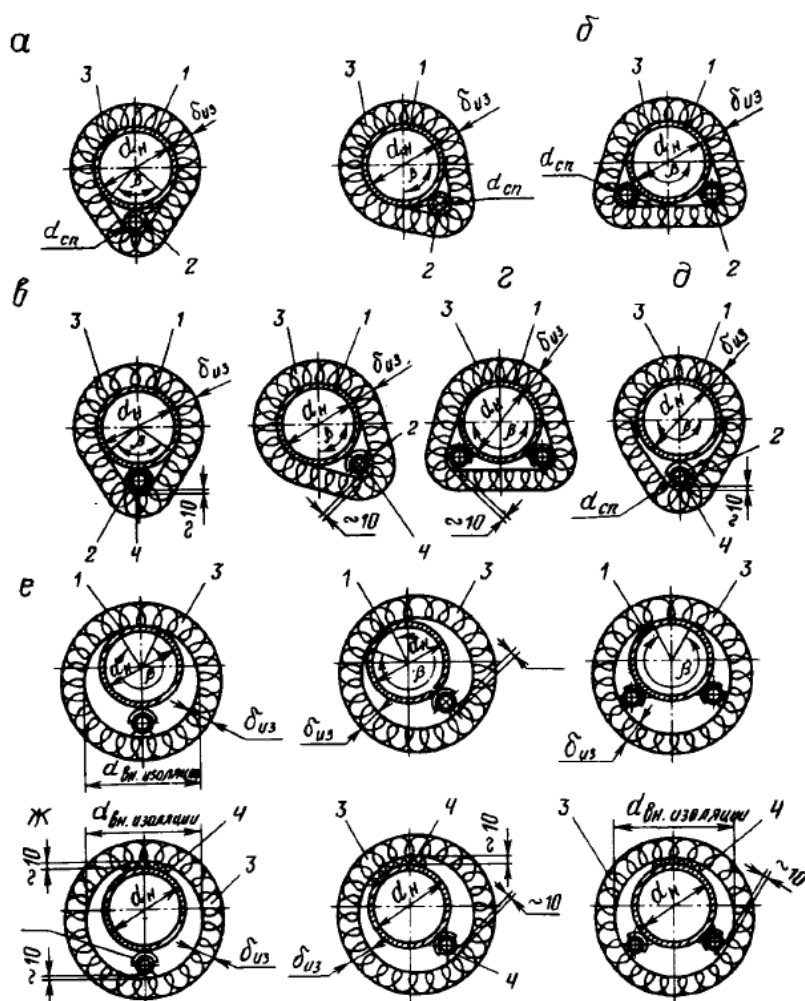


Рис. 1.4.1. Основные конструктивные решения изоляционного кожуха: «а - без подкладки, $b < 180^\circ$; б - без подкладки, $b \approx 180^\circ$; в - с подкладкой, $b < 180^\circ$; г - с подкладкой, $b \approx 180^\circ$; д - с подкладкой, $b = 180^\circ$; е - с подкладкой, $b > 180^\circ$; ж - предусматривающая полный обогрев, $b = 360^\circ$: 1 - обогреваемый ТП; 2 – обогревающий трубопровод-спутник; 3 - теплоизоляционный слой; 4 - подкладка; b - угол обогрева» [22]

1.4.2 Расчет тепловой изоляции систем обогрева сложных технологических трубопроводов

Проектирование системы теплового обогрева СТТ осуществляется на основании технико-экономических расчетов с учетом технологических требований к проектируемому объекту.

Подбор количества обогревающих трубопроводов-спутников и их диаметров, системы их теплоснабжения и схемы подключения производится исходя из результатов теплового и гидравлического расчетов системы обогрева СТТ с учетом выбранного вида теплоносителя, протяженности обогреваемого участка ТП (см. разд. 1.1-1.2) [22].

Проектирование изоляционного кожуха систем обогрева СТТ проводится с учетом технологических параметров обогреваемого ТП и обогревающих его спутников, выбранных конструктивных решений, а также с учетом расположения изолируемого объекта и заданных параметров окружающей среды.

Методика расчета основана на реализации математической модели теплообмена (см. рис. 1.1.2), рассмотренной в разделе 1.1.

Толщина теплоизоляционного кожуха рассчитывается методом последовательных приближений из совместного решения уравнений (1.1.22.1) и (1.1.22.2). Расчет состоит из следующих этапов:

Этап 1. Расчёт термических сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_4 по формулам (1.1.24) – (1.1.27).

Этап 2. Определение температуры воздуха в межтрубном пространстве – T_v по формуле (1.1.28).

Этап 3. Решение уравнения (1.1.22.2) методом последовательных приближений относительно $\ln d_{из}/d_{тр}$.

Температура обогреваемого трубопровода-спутника $T_{сп}$ в расчетах выбирается в соответствии с разделом 1.2.

Коэффициент теплоотдачи от обогревающего трубопровода-спутника в межтрубное пространство, определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{сп}} = \frac{Nu_{\text{эф}} 2t_{\text{сп}} \lambda_{\text{в}}}{(t_{\text{сп}} - t_{\text{тр}}) \cdot d_{\text{сп}}} \quad (1.4.1)$$

, где $Nu_{\text{эф}}$ – значение эффективного критерия Нуссельта; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К) [18].

Критерий $Nu_{\text{эф}}$ вычисляется по следующей эмпирической формуле

$$Nu_{\text{эф}} = 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,78} \quad (1.4.2)$$

, где $(Gr \cdot Pr)$ рассчитывается по формуле:

$$Gr \cdot Pr = \frac{g\beta d_{\text{сп}}^3}{\vartheta^2} \left(\frac{t_{\text{сп}} - t_{\text{тр}}}{2} \right) \cdot \frac{\vartheta}{\alpha} \quad (1.4.3)$$

, где Gr – критерий Грасгофа, вычисляемый по формуле:

$$Gr = \frac{g\beta d_{\text{сп}}^3}{\vartheta^2} \left(\frac{t_{\text{сп}} - t_{\text{тр}}}{2} \right) \quad (1.4.4)$$

, где Pr – критерий Прандтля, вычисляемый по формуле:

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha} \quad (1.4.5)$$

, где g – ускорение свободного падения, равное 9,807 м/с; β – коэффициент объемного расширения воздуха, равный $3,664 \cdot 10^{-3}$ 1/К; α – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с; ϑ – кинематическая вязкость воздуха, м²/с [18].

Средняя температура воздуха в теплоизоляционном кожухе, вычисляется по формуле

$$t_{\text{сп}} = \frac{t_{\text{сп}} + t_{\text{тр}}}{2} \quad (1.4.6)$$

Коэффициент теплопроводности материалов теплоизоляционного кожуха $\lambda_{\text{из}}$, Вт/(м·К), принимается в соответствии с таблицей Б.1 приложения Б СП 61.13330.2012 (с Изменением №1) [18] в зависимости от средней температуры теплоизоляционного кожуха:

$$t_{\text{ср}}^{\text{из}} = \frac{t_{\text{в}} + t_0}{2} \quad (1.4.7)$$

Коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри изоляционного кожуха, к внутренней поверхности изоляции $\alpha_{\text{из}}^{\text{вн}}$ в соответствии с рекомендациями [4, 5, 18] равен 11,6 Вт/м·°С.

Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного кожуха в окружающий воздух $\alpha_{\text{из}}^{\text{н}}$, Вт/(м·°С) выбирается в соответствии с таблицей В.2 СП 61.13330.2012 (с Изменением №1) [18].

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{тр}}$ от воздуха внутри изоляционного кожуха, к ТП в соответствии с рекомендациями [4, 5, 18] равен 17,4 т/(м·°С).

Расчет толщины теплоизоляционного кожуха определяется методом последовательных приближений по формуле:

$$\ln\left(\frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{тр}}}\right) = \ln\left(\frac{d_{\text{тр}} + 2\delta_{\text{из}}}{d_{\text{тр}}}\right) = 2\pi\lambda_{\text{из}}\left(\frac{R_3 \cdot \alpha}{2\pi} - \frac{1}{\alpha_{\text{из}}^{\text{н}}\pi(d_{\text{тр}} + 2\delta_{\text{из}})}\right) \quad (1.4.8)$$

Толщина теплоизоляционного кожуха $\delta_{\text{из}}$ определяется по формуле

$$\delta_{\text{из}} = \frac{d_{\text{н}}^{\text{ст}}\left(\frac{d_{\text{н}}^{\text{ст}} + 2d_{\text{из}}}{d_{\text{н}}^{\text{из}}} - 1\right)}{2} \quad (1.4.9)$$

, где $d_{\text{н}}^{\text{ст}}$ – наружный диаметр стенки изолируемого объекта, м; $d_{\text{н}}^{\text{из}}$ – наружный диаметр изоляционного кожуха, м.

Расчетная толщина теплоизоляционного кожуха определяется по формуле

$$\delta_{\text{расч}} = \delta_{\text{из}} \cdot K \cdot \Psi \quad (1.4.10)$$

, где K – коэффициент учета тепловых потерь через опоры и арматуру. В соответствии с рекомендациями [18], для ТП, «расположенных в помещении и тоннелях $K = 1,15 \div 1,2$; для ТП, расположенных на открытом воздухе, $K = 1,25 \div 1,3$; Ψ – поправочный коэффициент. При расчетах ТК с естественным углом обогрева без подкладки вводится $\Psi = 1,15$ » [18].

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

Трассировка соединительных трасс проводников представляется одной из наиболее сложных задач автоматизации проектирования электронных устройств. Во многом, это связано с многообразием различных способов реализации соединений.

Задача прокладки проводников в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) относится к общему классу задач геометрического построения на коммутационном поле (КП) всех цепей данной конструкции, координаты начала и конца которых определяются в момент размещения элементов.

Для решения задачи трассировки необходимо учитывать все возможные конструктивно-технические ограничения.

Прокладка трасс проводных соединений в большинстве случаев сводится к оптимизации трасс соединений отдельных цепей. Основные методы оптимизации трасс проводных соединений построены на применении алгоритмов построения минимальных связывающих деревьев.

При алгоритмическом решении задача трассировки сводится к построению оптимальных монтажных соединений для всех цепей схемы.

Согласно анализу, приведенному в разделе 1.3, задача трассировки имеет топологический и графотеоретический методы решения.

Для прокладки трасс соединений проводников разработано большое число алгоритмов – волновой алгоритм, модификации волнового алгоритма, алгоритмы трассировки по магистралям и каналам и др., ключевые отличия которых, заключаются в скорости и необходимом объеме памяти при его выполнении на ЭВМ и качестве получаемого результата. Подробный обзор современных методов и алгоритмов оптимальной трассировки приведен в разделе 1.3.

1.6 Выводы

1. Выполнен аналитический обзор результатов исследований, по изучению процесса теплообмена в СТС из нескольких технологических ТП в едином изоляционном кожухе. Из результатов обзора, следует, что это комплексная задача, сочетающая в себе следующие области фундаментальных знаний, такие как, теоретическая физика, уравнения математической физики, методы классической термодинамики, методы теоретической основы теплотехники, гидравлика, численные методы.

Проведен аналитический обзор и сравнительный анализ алгоритмов оптимальной трассировки соединений объектов в пространстве, их эффективности и программной реализации, оценена возможность их применения для решения задач оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ.

2. Насколько известно автору, до сих пор никто не исследовал, какова точность заложенной в нормативные документы [18-22] и пособия [4, 5] классической инженерно-технической модели процесса теплообмена в СТС, и насколько такая «псевдо-одномерная» модель температурного поля в конструкции соответствует реальности. Ведь в реальных конструкциях толщина тепловой изоляции имеет величину того же порядка, что и размеры спутника и воздушной прослойки (имеющих разную температуру, отличающуюся от температуры трубы). Поэтому в температурном поле неизбежно должны возникать краевые эффекты. Возникает естественное желание проверить заложенные в указанных нормативных документах [18-22] и пособиях [4, 5] методики моделирования процесса теплообмена в СТС и при необходимости модифицировать их для более удобной реализации в расчетных программах.

3. Используемая в практике инженерно-техническая модель процесса теплообмена в СТС с неподвижным (период остановки) изотермическим продуктом описана в [2, 4, 5]. Однако, указанная инженерно-техническая модель,

хотя и основывается на правильных исходных уравнениях, по конечным результатам ее применения при проектировании СТС, вызывает определенные сомнения, поскольку не учитывает явным образом влияние толщины и свойств материала стенки обогреваемого ТП на перепад температур по сечению трубопровода.

4. Основываясь на результатах проведенного анализа существующих методов и алгоритмов оптимальной трассировки систем теплового обогрева СТС сделаны следующие выводы:

- 1) задача оптимальной трассировки в трехмерном пространстве недостаточно проработана, это связано с тем, что методы и алгоритмы оптимальной трассировки в основном предназначены для решения прикладных двухмерных задач по разводке электрических соединений в печатных платах РЭА (трассировку многослойных печатных плат в полной мере нельзя назвать трассировкой в трехмерном пространстве);
- 2) в комплексе задач поиска оптимальных трасс связывающих сетей задача оптимальной трассировки слаборазветвленной сети ТП достаточно исследована, в то время как методы оптимальной трассировки сильноразветвленных сетей ТП с учетом существующих ограничений, практически не существует;
- 3) использование алгоритма, отличающегося применением автоматизированной процедуры построения топологической модели гидравлической цепи системы теплового обогрева СТС в виде гидравлического структурного графа, модифицированного алгоритма определения кратчайшего остова в исходном гидравлическом структурном графе и использованием набора эвристических правил, отображающих основные физико-химические, пространственно-геометрические и инженерно-технологические ограничения трассировки трубопроводных систем, что позволяет определять оптимальную энергоресурсоэффективную трассу систем теплового обогрева СТС с

минимальными приведенными затратами, представляется высокоперспективным методом решения задачи оптимальной трассировки ТП.

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

Совокупность в ХТС основного технологического ТП и параллельного обогревающего ТП – спутника, размещённых в общем изоляционном кожухе, представляет собой специальную сложную теплотехническую систему (см. рис. 2.1.1).

При проектировании такой СТС осуществляют два варианта теплотехнического расчета: толщины слоя изоляционного кожуха для ТП: с движущимся изотермическим продуктом; с неподвижным (период остановки) изотермическим продуктом [1, 2, 4, 5, 18-22].

Процесс теплообмена в рассматриваемой СТС (см. рис. 2.1.1), происходящий в основном через воздушную прослойку (межтрубное пространство), представляет собой совокупность типовых процессов: свободной конвекции, излучения и теплопроводности. Как известно, процесс теплопроводности в общем случае описывается дифференциальным уравнением (ДУ) Лапласа [53, 55, 90, 91]. Поскольку, СТС состоит из нескольких параллельных ТП (см. рис. 2.1.1), которые, как правило, функционируют в температурных режимах, близких к стационарным, процессы переноса теплоты можно идеализированно рассматривать как стационарные, а температурное поле в теплоизоляционных конструкциях также полагают стационарным.

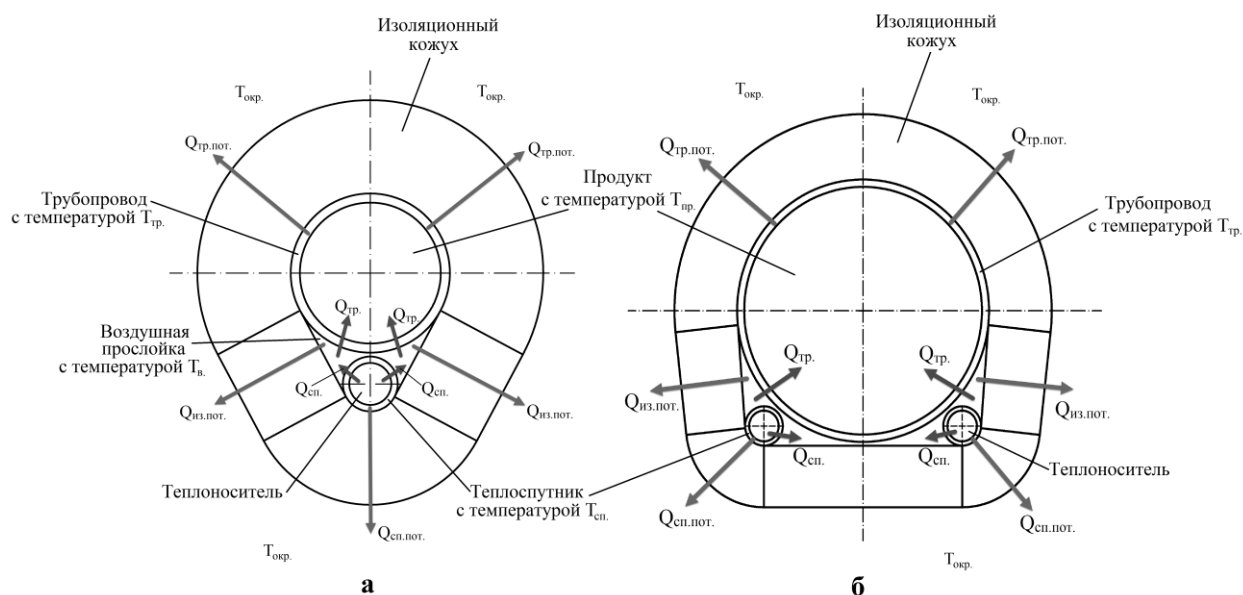


Рис. 2.1.1. Схемы процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе:

а) с одним обогревающим спутником; б) с двумя обогревающими спутниками

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

Исходная содержательная, или инженерно-техническая, постановка задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем обогрева СТТ формулируется следующим образом. Для заданной оптимальной технологической схемы ХТС [1, 2], с учетом требований СНиП о необходимых стандартных строительных конструкциях ХП и зонах обслуживания СТТ; параметров физико-химических свойств технологических потоков ХТС и результатов оптимального расположения единиц оборудования (ЕО) ХП [1, 13], при известных характеристиках насосов и компрессоров ХП необходимо определить такой оптимальный вариант трассировки системы обогрева СТТ, при котором приведенные затраты (2.6.4) минимальны при обязательном соблюдении условий функционирования ХП по выпуску требуемых продуктов, требуемого количества и требуемого качества.

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

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

Используемая в практике проектирования сложных теплотехнических систем специализированная упрощенная математическая модель процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом описана в нормативных документах [19-22] и пособиях [4, 5] и рекомендована изменениями №1 к СП 61.13.330.2012 [18] и рассмотрена в разделе 1.1.

Для проверки адекватности специализированной упрощенной математической модели («псевдо-одномерной» модели) процесса теплообмена были проведены серии вычислительных экспериментов по определению температурных полей и анализу распределения тепловых потоков в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом с использованием экспериментальных данных и сравнение аналитического решения с результатами компьютерного моделирования процесса теплообмена в системе теплового обогрева различных конфигураций на стационарных моделях теплопередачи МКЭ с помощью программного комплекса ELCUT (см. разд. 2.4) [92].

Для проведения вычислительных экспериментов были выбраны варианты обогрева трубопроводов паровыми и водяными спутниками в проекте установки производства элементарной серы. Данные по технологическим характеристикам трубопроводов и обогревающих спутников приведены в разделе 4.3 в таблице 4.3.1.

Значения коэффициентов теплопередачи от обогревающего трубопровода-спутника к воздуху внутри замкнутого межтрубного пространства, образованного изоляционным кожухом и нижней поверхностью ТП, от воздуха к обогреваемому ТП, от воздуха к внутренней поверхности изоляционного кожуха, от наружной поверхности изоляционного кожуха в окружающую среду были приняты в соответствии с рекомендациями [4, 5]. Данные рекомендации учитывают влияние не только конвективной составляющей, но и теплопередачи излучением. Теплопроводность изоляции (для упрощения расчетов и моделирования) была принята постоянной и равной $0,039 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$.

В результате расчета по специализированной упрощенной математической модели («псевдо-одномерной» модели) процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом были получены значения тепловых потоков (здесь и далее приводятся потоки на 1 м длины обогреваемого трубопровода и спутника(-ов)) приведенные в разделе 4.3 на рисунках 4.3.1-4.3.11.

Тепловые балансы (1.1.22.1) – (1.1.22.2), соответствующие схемам теплообмена, приведенным на рисунке 2.1.1, во всех случаях практически соблюдаются (температуры воздушной прослойки и поддерживаемой температуры продукта и были подобраны из условий соблюдения тепловых балансов) (см. рис. 2.3.1).

Максимальная погрешность расчета тепловых балансов (1.1.22.1) – (1.1.22.2) не превысила 0,05%, что подтверждает достаточную точность специализированной упрощенной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом.

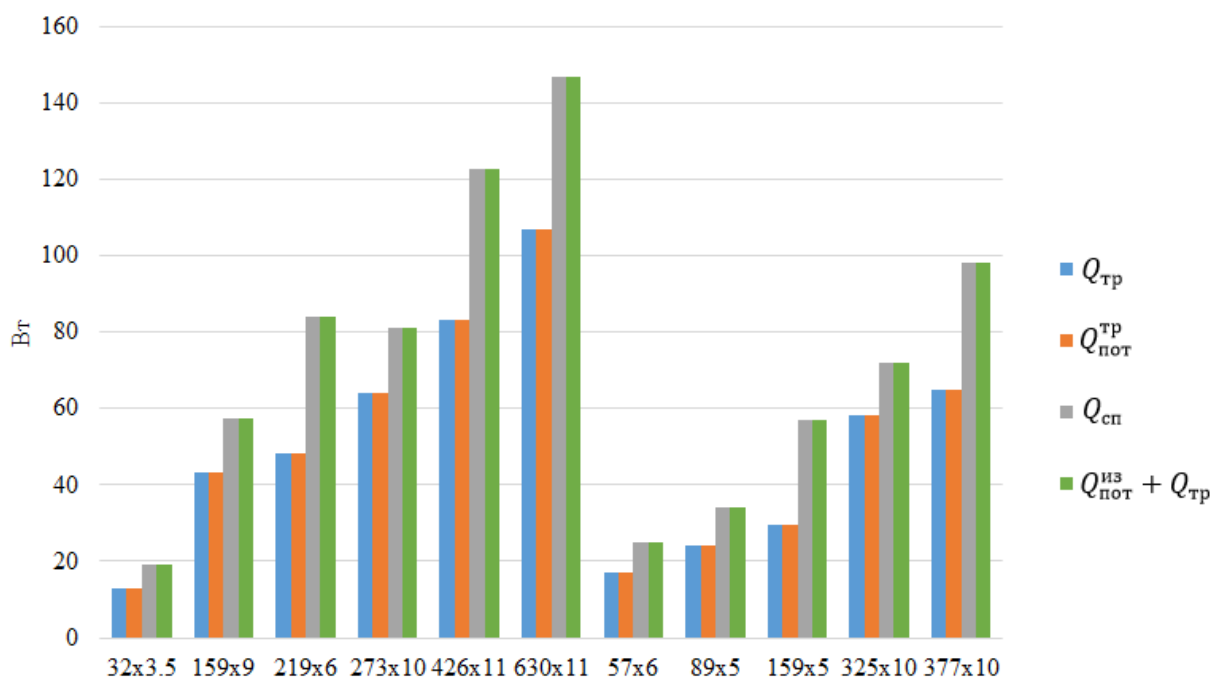


Рис. 2.3.1. График сопоставления тепловых балансов в сложных теплотехнических системах различных конфигураций с движущимся изотермическим продуктом

Результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности специализированной упрощенной математической модели («псевдо-одномерной» модели) процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом, приведенные в разделе 4.3, подтверждают ее достаточную точность и консервативность.

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

Используемая в практике проектирования инженерно-техническая модель процесса теплообмена в СТС с неподвижным (период остановки перекачки продукта) изотермическим продуктом описана в [2, 4, 5]. Однако, указанная инженерно-техническая модель, хотя и основывается на правильных исходных уравнениях, по конечным результатам ее применения при проектировании СТС,

вызывает определенные сомнения, поскольку не учитывает, явным образом, влияние толщины и свойств материала стенки обогреваемого ТП на перепад температур по сечению трубопровода. В связи с этим, была разработана новая аппроксимационная математическая модель процесса теплообмена в СТС (см. рис. 2.1.1) с неподвижным изотермическим продуктом. Разработанная аппроксимационная математическая модель описывает поле температур в продукте и трубе в виде решения двумерной стационарной математической модели теплопроводности «продукт в трубе» (см. рис. 2.3.2) с краевыми условиями 3-го рода с применением различных «аппроксимирующих» эффективных коэффициентов теплоотдачи на разных частях границы обогреваемой технологической трубы с изотермическим продуктом с воздушной прослойкой и изоляцией.

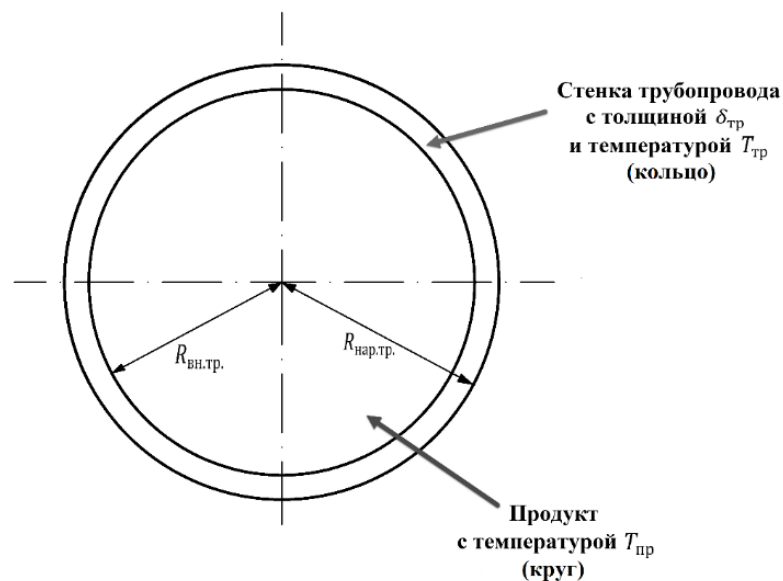


Рис. 2.3.2. Упрощенная схема процесса теплообмена в круге (неподвижный продукт) с заданным коэффициентом эффективной теплопроводности

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

Этап 1. Использовать исходное предположение, что стационарный источник тепла (обогревающий трубопровод-спутник) действует довольно продолжительное время, и переходные процессы, вызванные его включением, прекратились. При этом продукту приписывается некоторая величина аппроксимирующего коэффициента эффективной теплопроводности – для учета процесса свободной конвекции.

Этап 2. Отобразить поля температур в продукте (круге) и трубе (кольце) (см. рис. 2.3.2) в виде решения двумерной стационарной задачи теплопроводности о продукте в трубе (поскольку величины аппроксимирующего коэффициента эффективной теплопроводности¹ продукта – $\lambda_{\text{пр}}$ и коэффициента теплопроводности материала трубы – $\lambda_{\text{тр}}$ приближенно считать постоянными, поля температур в продукте ($r \leq R_{\text{вн.тр.}}$) и в стенке обогреваемого ТП ($R_{\text{вн.тр.}} \leq r \leq R_{\text{нар.тр.}}$) в виде ДУ Лапласа в полярных координатах (r, φ)):

- для круга:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{\text{пр}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T_{\text{пр}}}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (2.3.1)$$

- для кольца:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T_{\text{тр}}}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (2.3.2)$$

, где $R_{\text{нар.тр.}} = d_{\text{тр}}/2$ – наружный радиус обогреваемого ТП, м; $R_{\text{вн.тр.}} = (d_{\text{тр}}/2 - \delta_{\text{тр}})$ – внутренний радиус обогреваемого ТП, м; $T_{\text{пр}}$ – поле температур в продукте, К; $T_{\text{тр}}$ – поле температур в стенке обогреваемого ТП, К; $\delta_{\text{тр}}$ – толщина стенки обогреваемого ТП, м; $d_{\text{тр}}$ – наружный диаметр обогреваемого ТП, м.

¹ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме

Этап 3. Задать граничные условия на внутренней поверхности обогреваемого ТП (при $r = R_{\text{вн.тр.}}$) в виде равенства температур и тепловых потоков между продуктом и обогреваемым ТП (см. рис. 2.1.1):

$$T_{\text{тр}} = T_{\text{пр}} \quad (2.3.3)$$

$$\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} = \lambda_{\text{пр}} \frac{\partial T_{\text{пр}}}{\partial r} \quad (2.3.4)$$

, где $\lambda_{\text{тр}}$ – коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/(м×К); $\lambda_{\text{пр}}$ – коэффициент эффективной теплопроводности остановленного продукта в ТП, учитывающий конвективные эффекты, Вт/(м×К).

Этап 4. При постоянстве во времени коэффициентов $\lambda_{\text{пр}}$ и $\lambda_{\text{тр}}$ решение ДУ Лапласа (2.3.1) внутри круга (неподвижного продукта), используя метод разделения переменных, можно представить в виде следующего разложения в ряд Фурье [90, 91]:

$$T_{\text{пр}} = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^n (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \quad (2.3.5)$$

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

При этом

$$\frac{\partial T_{\text{пр}}}{\partial r} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{n-1} \frac{n}{R_{\text{вн.тр.}}} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \quad (2.3.6)$$

Этап 5. Определить аналитическое решение ДУ Лапласа (2.3.2) для температуры стенки ТП (в кольце) в виде разложения в ряд Фурье [90, 91]:

$$\begin{aligned} T_{\text{тр}} = & A_0 + B_0 \ln \frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^n (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{-n} (C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi) \end{aligned} \quad (2.3.7)$$

, откуда

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} = \frac{B_0}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{-n} \frac{n}{R_{\text{вн.тр.}}} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{-n} \frac{n}{R_{\text{вн.тр.}}} (C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi) \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

Этап 6. Применить граничные условия (2.3.3) и (2.3.4) к полученным разложениям в ряд Фурье (2.3.5) и (2.3.7) при $r = R_{\text{вн.тр.}}$, тогда выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) = \\ = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) \\ + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi) \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\lambda_{\text{пр}}}{R_{\text{вн.тр.}}} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \\ = \frac{\lambda_{\text{тр}} B_0}{R_{\text{вн.тр.}}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\lambda_{\text{тр}}}{R_{\text{вн.тр.}}} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\lambda_{\text{тр}}}{R_{\text{вн.тр.}}} (C_n \cos n\varphi + D_n \sin n\varphi) \end{aligned} \quad (2.3.10)$$

Этап 7. Из (2.2.7) и (2.2.8), приравнивая коэффициенты разложения в ряд Фурье, получим

$$A_0 = T_0, B_0 = 0 \quad (2.3.11)$$

$$A_n + C_n = a_n, B_n + D_n = b_n \quad (2.3.12)$$

$$A_n - C_n = \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} a_n, B_n - D_n = \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} b_n \quad (2.3.13)$$

Откуда

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) a_n, B_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) b_n, C_n = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) a_n, D_n \\ &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) b_n \end{aligned} \quad (2.3.14)$$

и

$$\begin{aligned} T_{\text{тр}} &= T_0 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^n (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \\ &+ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{-n} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \end{aligned} \quad (2.3.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{n-1} \frac{n}{R_{\text{вн.тр.}}} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \\ &- \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\lambda_{\text{пп}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{-(n+1)} \frac{n}{R_{\text{вн.тр.}}} (a_n \cos n\varphi \\ &+ b_n \sin n\varphi) \end{aligned} \quad (2.3.16)$$

, где T_0 – температура продукта в центре трубы, К.

В частности, на внешней поверхности трубы (при $r = R_{\text{нар.тр.}}$), тогда выполняются соотношения:

$$T_{\text{тр}}(R_{\text{нар.тр.}}, \varphi) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \quad (2.3.17)$$

$$\frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r}(R_{\text{нар.тр.}}, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{R_{\text{нар.тр.}}} d_n (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \quad (2.3.18)$$

, где

$$c_n = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) \left(\frac{R_{\text{нар.тр.}}}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^n + \left(1 - \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) \left(\frac{R_{\text{нар.тр.}}}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{-n} \right] \quad (2.3.19)$$

$$d_n = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) \left(\frac{R_{\text{нар.тр.}}}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^n - \left(1 - \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{тр}}} \right) \left(\frac{R_{\text{нар.тр.}}}{R_{\text{вн.тр.}}} \right)^{-n} \right] \quad (2.3.20)$$

Безразмерный параметр $\lambda_{\text{пр}}/\lambda_{\text{тр}}$ для металлических труб очень мал и имеет порядок от 0.1 (для жидкостей) до 0.01 и менее для газов. Для тонкостенных труб $R_{\text{нар.тр.}}/R_{\text{вн.тр.}} = 1 + \delta_{\text{тр.}}/R_{\text{вн.тр.}}$ и $\delta_{\text{тр.}}/R_{\text{вн.тр.}} \ll 1$ (обычно имеет порядок 0.1 и менее).

Таким образом, мы видим, что безразмерные параметры $\lambda_{\text{пр}}/\lambda_{\text{тр}}$, $\delta_{\text{тр.}}/R_{\text{вн.тр.}}$ должны управлять данной задачей.

Коэффициенты c_n и d_n имеют порядок

$$c_n \approx 1 + \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{тр}}} \frac{\delta_{\text{тр.}}}{R_{\text{вн.тр.}}} n \quad (2.3.21)$$

$$d_n \approx \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{тр}}} + \frac{\delta_{\text{тр.}}}{R_{\text{вн.тр.}}} n \quad (2.3.22)$$

Этап 8. 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:

$$\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} = -\alpha_{\text{тр}} (T_{\text{тр}} - T_{\text{в}}) \text{ при } r = R_{\text{нар.тр.}}, |\varphi| < \frac{\alpha}{2} \quad (2.3.23)$$

$$\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} = -\alpha_{\text{из}} (T_{\text{тр}} - T_{\text{окр}}) \text{ при } r = R_{\text{нар.тр.}}, \frac{\alpha}{2} \leq |\varphi| \leq \pi \quad (2.3.24)$$

, 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/(м² К); $\alpha_{из}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи между трубой и окружающим воздухом через изоляцию, Вт/(м²×К), рассчитываемый с учетом термического сопротивления изоляции $\alpha_{из} = 2/\beta d_{тр} R_3$, α – угол обогрева, радиан.

Этап 9. Поскольку задача симметричная, все $b_n = 0$. Для определения оставшихся неизвестных коэффициентов разложения в ряд Фурье необходимо учесть краевые условия (2.3.23) и (2.3.24).

Из (2.3.18) получаем для $n = 0$ и $n > 1$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \frac{\partial T_{тр}}{\partial r}(R_{нар.тр.}, \varphi) d\varphi = 0 \quad (2.3.25)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \frac{\partial T_{тр}}{\partial r}(R_{нар.тр.}, \varphi) \cos n\varphi d\varphi = \pi \frac{n}{R_{нар.тр.}} d_n a_n \quad (2.3.26)$$

С другой стороны, из условий (2.3.23), (2.3.24) и из (2.3.17) получаем

$$\begin{aligned} \lambda_{тр} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\partial T_{тр}}{\partial r}(R_{нар.тр.}, \varphi) d\varphi &= -2 \int_0^{\frac{\alpha}{2}} \alpha_{тр} (T_{тр} - T_в) d\varphi - 2 \int_{\frac{\alpha}{2}}^{\pi} \alpha_{из} (T_{тр} - T_{окр}) d\varphi \\ &= \alpha \alpha_{тр} T_в + (2\pi - \alpha) \alpha_{из} T_{окр} - [\alpha \alpha_{тр} + (2\pi - \alpha) \alpha_{из}] T_0 \\ &\quad - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} c_n (\alpha_{тр} - \alpha_{из}) \sin \frac{n\alpha}{2} a_n \end{aligned} \quad (2.3.27)$$

И в сочетании с (2.3.25)

$$T_0 = \frac{\alpha \alpha_{тр} T_в + (2\pi - \alpha) \alpha_{из} T_{окр}}{\alpha \alpha_{тр} + (2\pi - \alpha) \alpha_{из}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \frac{(\alpha_{тр} - \alpha_{из}) \sin \frac{n\alpha}{2}}{\alpha \alpha_{тр} + (2\pi - \alpha) \alpha_{из}} c_n a_n \quad (2.3.28)$$

Первый член уравнения (2.3.28) представляет собой псевдо-одномерное приближение.

Аналогично при $n > 1$ из условий (2.3.23), (2.3.24) и из (2.3.17) получаем

$$\begin{aligned}
& \lambda_{\text{тр}} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} (R_{\text{нар.тр.}}, \varphi) \cos n\varphi d\varphi \\
&= -2 \int_0^{\frac{\alpha}{2}} \alpha_{\text{тр}} (T_{\text{тр}} - T_{\text{в}}) \cos n\varphi d\varphi - 2 \int_{\frac{\alpha}{2}}^{\pi} \alpha_{\text{из}} (T_{\text{тр}} - T_{\text{окр}}) \cos n\varphi d\varphi \\
&= \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} (\alpha_{\text{тр}} T_{\text{в}} - \alpha_{\text{из}} T_{\text{окр}} - (\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}}) T_0) \\
&- c_n \left[\frac{\alpha_{\text{тр}}}{2} \left(\alpha + \frac{1}{n} \sin n\alpha \right) + \frac{\alpha_{\text{из}}}{2} \left(2\pi - \alpha - \frac{1}{n} \sin n\alpha \right) \right] a_n \\
&- \sum_{m>0, m \neq n} c_m \left[(\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}}) \left(\frac{1}{m+n} \sin \frac{(m-n)\alpha}{2} + \frac{1}{m-n} \sin \frac{(m-n)\alpha}{2} \right) \right] a_m \quad 2.3.29)
\end{aligned}$$

С учетом (2.3.26) и (2.3.29) получаем

$$\begin{aligned}
& \lambda_{\text{тр}} \pi \frac{n}{R_{\text{нар.тр.}}} d_n a_n \\
&= \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} \frac{2\pi \alpha_{\text{тр}} \alpha_{\text{из}}}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) + \frac{4}{n^2} \sin^2 \frac{n\alpha}{2} \frac{(\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}})^2}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} c_n a_n \\
&- \frac{1}{2n} (\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}}) \sin n\alpha c_n a_n - \frac{1}{2} [\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}] c_n a_n \\
&- \sum_{m>0, m \neq n} \left[(\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}}) \left(\frac{1}{m+n} \sin \frac{(m+n)\alpha}{2} + \frac{1}{m-n} \sin \frac{(m-n)\alpha}{2} \right) \right] c_m a_m \\
&+ \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} \sum_{m>0, m \neq n} \frac{2}{m} \sin \frac{m\alpha}{2} \frac{(\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}})^2}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} c_m a_m \quad (2.3.30)
\end{aligned}$$

Откуда для a_n получаем уравнение

$$\begin{aligned}
& \left\{ \lambda_{\text{тр}} \pi \frac{n}{R_{\text{нар.тр.}}} \frac{d_n}{c_n} + \frac{1}{2n} (\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}}) \sin n\alpha + \frac{1}{2} [\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}] \right. \\
& \left. - \frac{4}{n^2} \sin^2 \frac{n\alpha}{2} \frac{(\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}})^2}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} \right\} c_n a_n \\
& = \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} \frac{2\pi \alpha_{\text{тр}} \alpha_{\text{из}}}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \\
& - \sum_{m>0, m \neq n} \left[(\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}}) \left(\frac{1}{m+n} \sin \frac{(m+n)\alpha}{2} + \frac{1}{m-n} \sin \frac{(m-n)\alpha}{2} \right) \right] c_m a_m \\
& + \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} \sum_{m>0, m \neq n} \frac{2}{m} \sin \frac{m\alpha}{2} \frac{(\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}})^2}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} c_m a_m \tag{2.3.31}
\end{aligned}$$

Если ввести безразмерные величины $\hat{a}_n = a_n / (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}})$ и обозначить $\gamma = \alpha_{\text{из}} / \alpha_{\text{тр}}$, то (2.3.31) запишется в следующем безразмерном виде

$$K_n c_n \hat{a}_n = F_n + \sum_{m>0, m \neq n} K_{nm} c_m \hat{a}_m \tag{2.3.32}$$

, где

$$\begin{aligned}
K_n &= \pi n \frac{\lambda_{\text{тр}}}{\alpha_{\text{тр}} R_{\text{нар.тр.}}} \frac{d_n}{c_n} + \frac{1}{2} [\alpha + (2\pi - \alpha) \gamma] + \frac{1}{2n} (1 - \gamma) \sin n\alpha \\
& - \frac{4}{n^2} \sin^2 \frac{n\alpha}{2} \frac{(1 - \gamma)^2}{\alpha + (2\pi - \alpha) \gamma}, \\
F_n &= \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} \frac{2\pi \gamma}{\alpha + (2\pi - \alpha) \gamma},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_{nm} = & \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} \frac{(1-\gamma)^2}{\alpha + (2\pi - \alpha)\gamma} \sum_{m>0, m \neq n} \frac{2}{m} \sin \frac{m\alpha}{2} c_m \hat{a}_m \\
& - (1-\gamma) \\
& \times \sum_{m>0, m \neq n} \left[\frac{1}{m+n} \sin \frac{(m+n)\alpha}{2} \right. \\
& \left. + \frac{1}{m-n} \sin \frac{(m-n)\alpha}{2} \right] c_m \hat{a}_m
\end{aligned} \tag{2.3.33}$$

Информационно-разреженная система уравнений (2.3.32) при практических значениях параметров имеет информационную структуру с сильным диагональным преобладанием [2], и ее легко решить (например, с применением MS Excel) методом последовательных приближений, постепенно увеличивая количество рассматриваемых коэффициентов и во втором и третьем члене правой части (2.2.30), используя значения коэффициентов от предыдущей итерации, ограничивая при этом число членов разложения (как показали многочисленные вычислительные эксперименты, обычно уже пять членов дают очень точное (до долей процента) приближение к решению задачи):

$$\begin{aligned}
\hat{a}_n^{(0)} &= 0 \\
\hat{a}_n^{(i)} &= \frac{F_n + \sum_{m>0, m \neq n} (K_{nm} c_m \hat{a}_m^{(i-1)})}{K_n c_n}
\end{aligned} \tag{2.3.34}$$

Формула (2.3.28) соответственно может быть переписана в виде

$$\begin{aligned}
T_0 = & \frac{\alpha T_{\text{в}} + (2\pi - \alpha)\gamma T_{\text{окр}}}{\alpha + (2\pi - \alpha)\gamma} \\
& - (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \frac{(1-\gamma)}{\alpha + (2\pi - \alpha)\gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n
\end{aligned} \tag{2.3.35}$$

Этап 10. Проинтегрировать условия (2.3.23), (2.3.24) с учетом формул (2.3.17) и (2.3.35) и получить величину теплового потока из воздушной прослойки к трубе $Q_{\text{тр}}$ и равную ей величину теплового потока от трубы через изоляцию $Q_{\text{пот}}^{\text{тр}}$:

$$\begin{aligned}
Q_{\text{тр}} &= 2 \int_0^{\frac{\alpha}{2}} \alpha_{\text{тр}} (T_{\text{в}} - T_{\text{тр}}) R_{\text{нар.тр.}} d\varphi \\
&= 2 \int_0^{\frac{\alpha}{2}} \alpha_{\text{тр}} (T_0 - T_{\text{в}}) R_{\text{нар.тр.}} d\varphi - 2 \int_0^{\frac{\alpha}{2}} \alpha_{\text{тр}} R_{\text{нар.тр.}} \sum_{n=1}^{\infty} c_n a_n \cos n\varphi d\varphi \\
&= \alpha \alpha_{\text{тр}} R_{\text{нар.тр.}} T_{\text{в}} - \alpha \alpha_{\text{тр}} R_{\text{нар.тр.}} \frac{\alpha \alpha_{\text{тр}} T_{\text{в}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}} T_{\text{окр}}}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} \\
&\quad + \alpha \alpha_{\text{тр}} R_{\text{нар.тр.}} \frac{(\alpha_{\text{тр}} - \alpha_{\text{из}})}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n \\
&\quad - \alpha_{\text{тр}} R_{\text{нар.тр.}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n \\
&= \frac{\alpha \alpha_{\text{тр}} (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} R_{\text{нар.тр.}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \\
&\quad - \frac{2\pi \alpha_{\text{тр}} \alpha_{\text{из}}}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} R_{\text{нар.тр.}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n \\
&= \frac{\alpha \alpha_{\text{тр}} (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}}{\alpha \alpha_{\text{тр}} + (2\pi - \alpha) \alpha_{\text{из}}} R_{\text{нар.тр.}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \left[1 - \frac{2\pi}{\alpha (2\pi - \alpha)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n \right] \\
&= \frac{\alpha (2\pi - \alpha) \gamma}{\alpha + (2\pi - \alpha) \gamma} R_{\text{нар.тр.}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \left[1 \right. \\
&\quad \left. - \frac{2\pi}{\alpha (2\pi - \alpha)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n \right] \tag{2.3.36}
\end{aligned}$$

Заметим, что величины

$$T_0^{\text{дв}} = \frac{\alpha T_{\text{в}} + (2\pi - \alpha) \gamma T_{\text{окр}}}{\alpha + (2\pi - \alpha) \gamma} \tag{2.3.37}$$

$$Q_{\text{тр}}^{\text{дв}} = \frac{\alpha (2\pi - \alpha) \gamma}{\alpha + (2\pi - \alpha) \gamma} R_{\text{нар.тр.}} (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \tag{2.3.38}$$

, где $T_0^{\text{ДВ}}$ – это температура продукта и $Q_{\text{тр}}^{\text{ДВ}}$ – тепловой поток для более простого случая движущегося продукта.

Обозначая

$$\Psi = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin \frac{n\alpha}{2} c_n \hat{a}_n \quad (2.3.39)$$

Получаем в итоге

$$T_0 = T_0^{\text{ДВ}} - (T_{\text{в}} - T_{\text{окр}}) \frac{(1 - \gamma)}{\alpha + (2\pi - \alpha)\gamma} \Psi \quad (2.3.40)$$

$$Q_{\text{тр}} = Q_{\text{тр}}^{\text{ДВ}} \left[1 - \frac{2\pi}{\alpha(2\pi - \alpha)} \Psi \right] \quad (2.3.41)$$

Таким образом, для случая неподвижного продукта температура воздушной прослойки может быть рассчитана по тем же формулам (1.1.28), что и для подвижного, с введением поправочного коэффициента Ψ :

$$T_{\text{в}} = \frac{\frac{T_{\text{сп}}}{R_1} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1 - \Psi}{R_3 + R_4} \right) \cdot T_{\text{окр}}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1 - \Psi}{R_3 + R_4}} \quad (2.3.42)$$

Этап 11. Оценить порядок коэффициентов $\hat{a}_n$. Обычно $\gamma \ll 1$ и имеет порядок 0,1. Угол обогрева $\alpha \cong 2$. Соответственно 2, 3 и 4-е слагаемые в выражении для K_n имеют порядок 1. $\alpha_{\text{тр}}$ порядка 17 Вт/(м²×К), $\lambda_{\text{тр}}$ для стальных труб меняется в пределах от 20 до 90 Вт/(м×К). $R_{\text{нар.тр.}}$ для типичных труб от 0,05 до 0,3 м. d_n/c_n имеет порядок не ниже $\delta_{\text{тр}}/R_{\text{вн.тр.}}$, т. е. обычно порядка 0,1. Таким образом, первый член в выражении для K_n , как правило, доминирует и имеет порядок ~ 10 .

В первом приближении величину коэффициентов можно оценить, если опустить все члены кроме первых в правой и левой частях:

$$\hat{a}_n \approx \frac{\alpha_{\text{тр}} R_{\text{нар.тр.}}}{\lambda_{\text{тр}} d_n} \frac{2}{n^2} \sin \frac{n\alpha}{2} \frac{2\gamma}{\alpha + (2\pi - \alpha)\gamma} \quad (2.3.43)$$

Проверка адекватности разработанной автором аппроксимационной математической модели процесса теплообмена выполнена в результате серии вычислительных экспериментов по определению температурных полей в СТС с неподвижным изотермическим продуктом установки производства элементарной серы с применением разработанной модели на основе сравнения аналитического решения с результатами компьютерного моделирования процесса теплообмена в СТС различных конфигураций на стационарных моделях теплопередачи МКЭ с помощью программного комплекса ELCUT (см. разд. 4.4) [93].

Как показали результаты проведенных вычислительных экспериментов по проверке адекватности разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в СТС с неподвижным изотермическим продуктом (см. разд. 4.4), предложенная модель позволяет оценить перепад и величины температур в продукте с удовлетворительной инженерной точностью с погрешностью не более 2%.

2.4 Компьютерное моделирование процесса теплопередачи в системах теплового обогрева различных конструкций

Для проверки адекватности существующей специализированной упрощенной математической модели («псевдо-одномерной» модели) процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом и проверки адекватности разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом процесс распределения тепловых потоков при обогреве тепловыми спутниками был рассчитан на стационарных

моделях теплопередачи, построенных с помощью отечественного программного комплекса ELCUT версии 6.3 (разработка компании ООО «Тор», [94]).

ELCUT позволяет решать плоские задачи теплопроводности методом конечных элементов.

В качестве граничных условий на внешних и внутренних границах расчетной области были заданы:

- *Условие заданной температуры T_0* (граничные условия *первого рода*). Данные условия были заданы на внутренних границах трубы и спутника(-ов).
- *Граничное условие конвекции* – описывает конвективный теплообмен и определяется следующим образом:

$$F_n = \alpha(T - T_0) \quad (2.4.1)$$

, где α – коэффициент теплоотдачи, и T_0 – температура граничной среды.

Граничное условие этого типа называется *граничным условием третьего рода*. Данное условие было задано на границах изоляционного кожуха с окружающей средой, воздушной прослойкой, а также границах обогреваемого ТП и обогревающих спутника(-ов) с воздушной прослойкой.

При анализе результатов расчета температурного поля в ELCUT учитывались следующие локальные и интегральные физические величины

- Температура T ;
- Поток тепла через заданную поверхность

$$\Phi = \int F \cdot n ds \quad (2.4.2)$$

, где n – единичный вектор нормали к поверхности. Поверхность интегрирования задается контуром в плоскости модели, состоящим из отрезков и дуг окружностей [94].

Для быстрого изменения диаметров обогреваемого ТП и обогревающих трубопроводов-спутников, толщины тепловой изоляции, а также автоматического подбора температур и получения отчета по тепловым потокам отдельных частей поверхностей теплообмена был разработан алгоритм генерации параметрических моделей задач в ELCUT на языке программирования C#, с использованием технологии ActiveField. Интерфейс и блок-схема алгоритма представлены на рисунках 2.4.1 – 2.4.2.

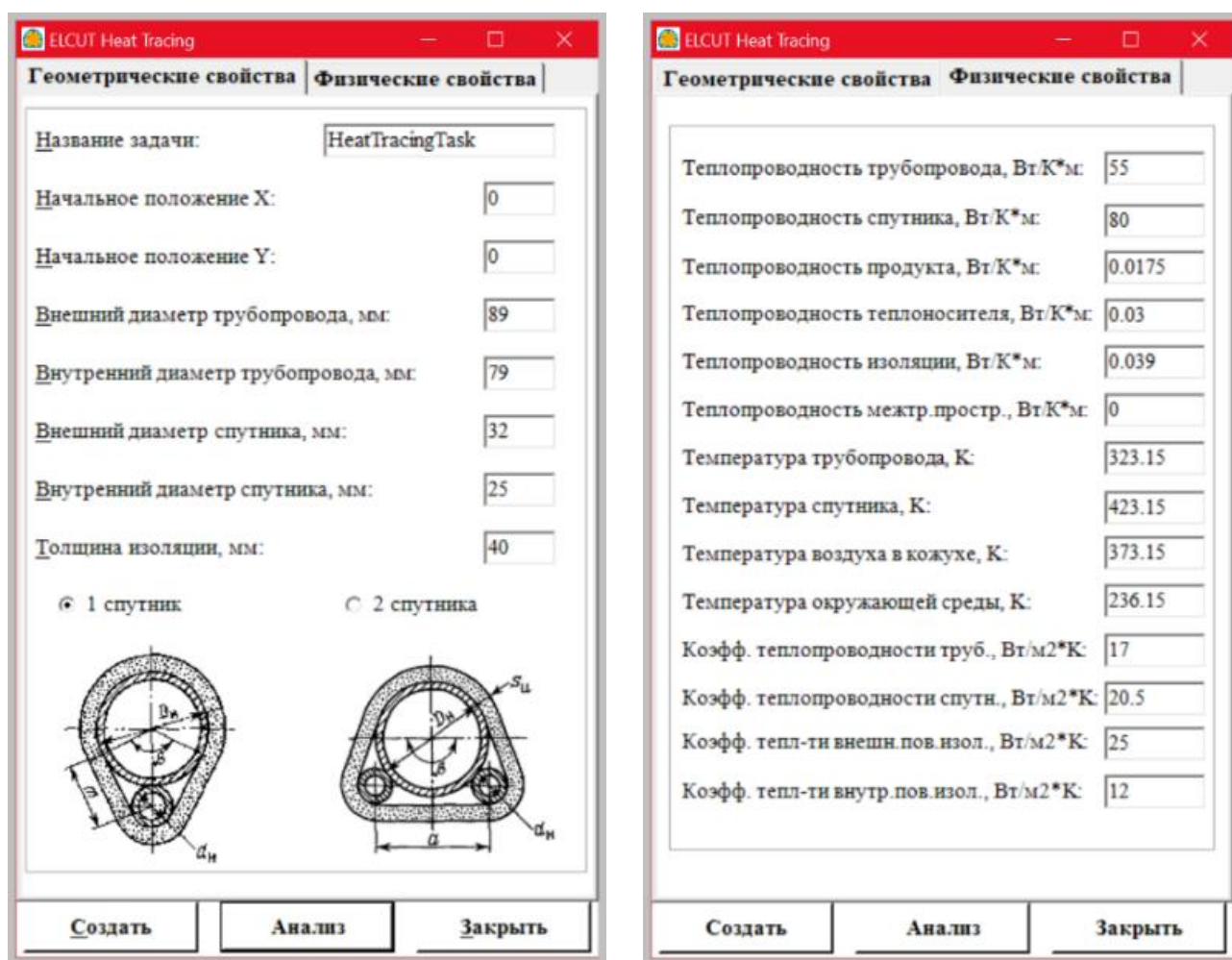


Рис. 2.4.1. Интерфейс алгоритма генерации параметрических моделей задач в ELCUT

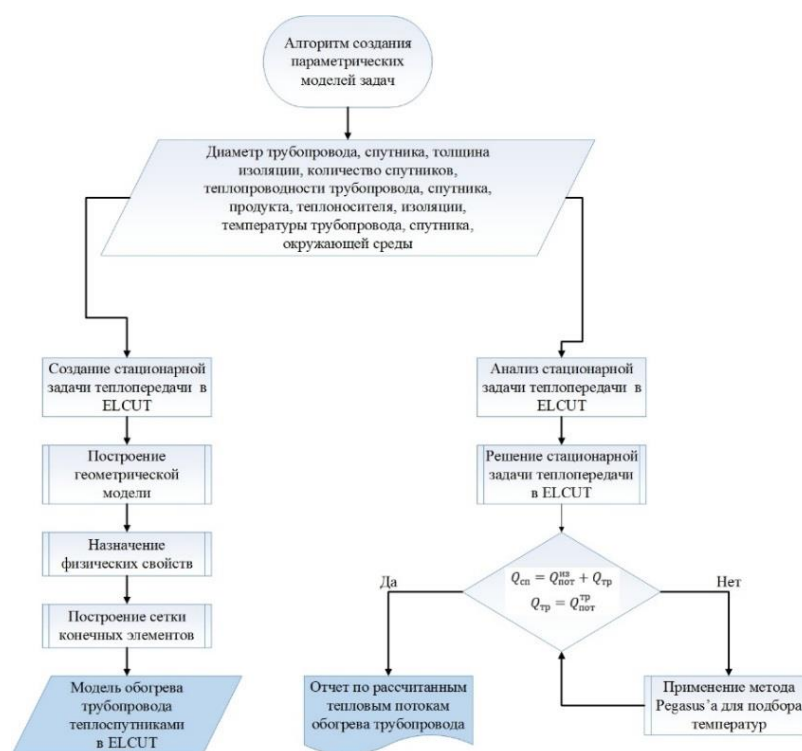


Рис. 2.4.2. Блок-схема алгоритма генерации параметрических моделей задач в ELCUT

Предложенный алгоритм состоит из следующих пяти этапов.

Этап 1. Генерация плоской стационарной задачи теплопроводности в ELCUT (рис. 2.4.3).

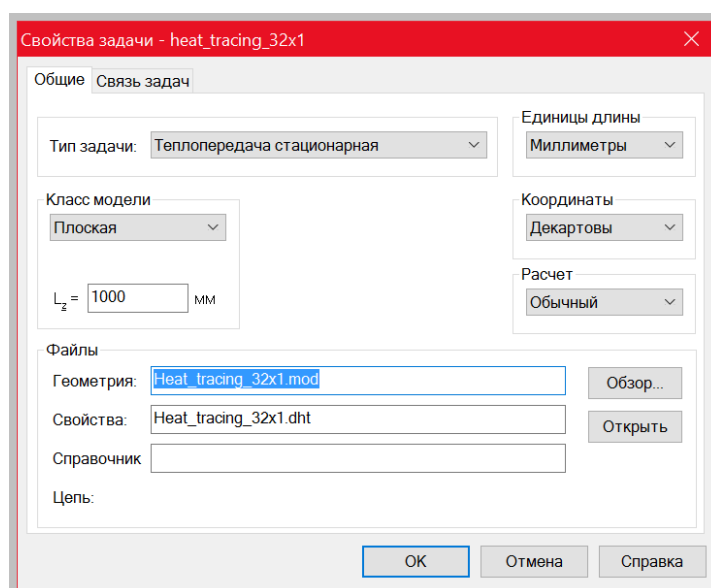


Рис. 2.4.3. Свойства генерируемой в ELCUT задачи

Этап 2. Построение геометрической модели (см. рис. 2.4.4) для выбранной конструкции изоляционного кожуха и заданных диаметров, толщин и свойств материалов стенки обогреваемого ТП и обогревающих спутников (см. табл. 2.3.1).

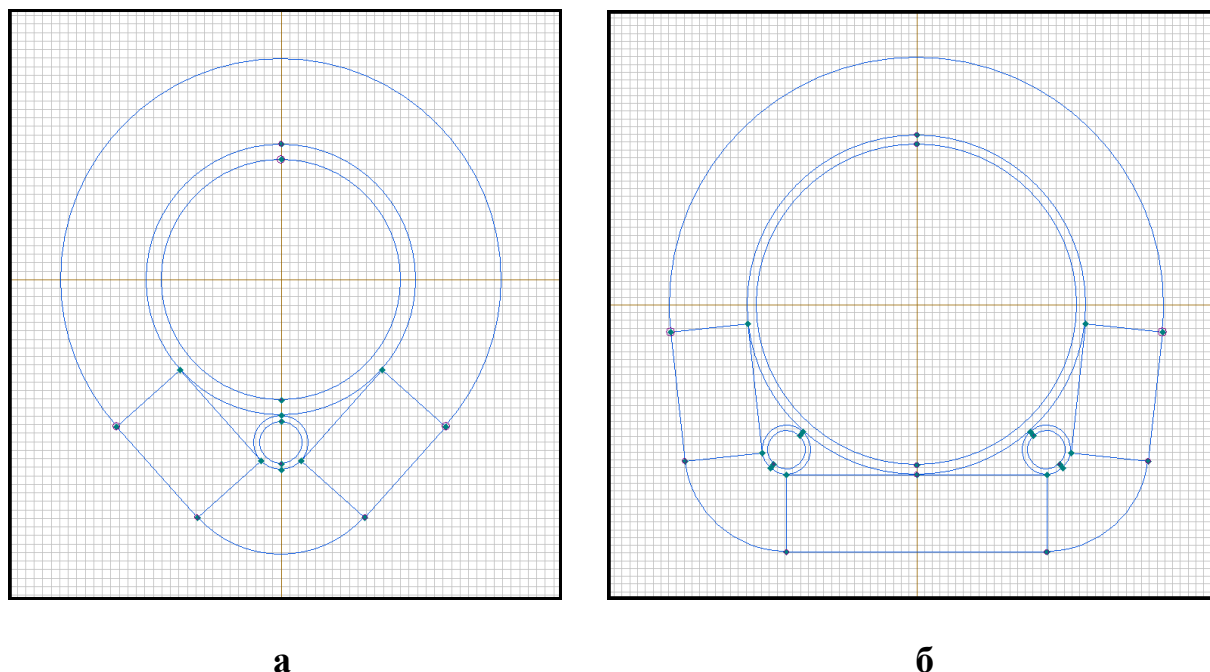


Рис. 2.4.4. Геометрические модели задач теплопроводности в ELCUT: а) с одним обогревающим спутником; б) с двумя обогревающими спутниками

Этап 3. Назначение физических свойств объектам геометрической модели (см. рис. 2.4.5) на основании данных для выбранных вариантов обогрева трубопроводов паровыми и водяными спутниками в проекте установки производства элементарной серы (см. табл. 2.3.1)

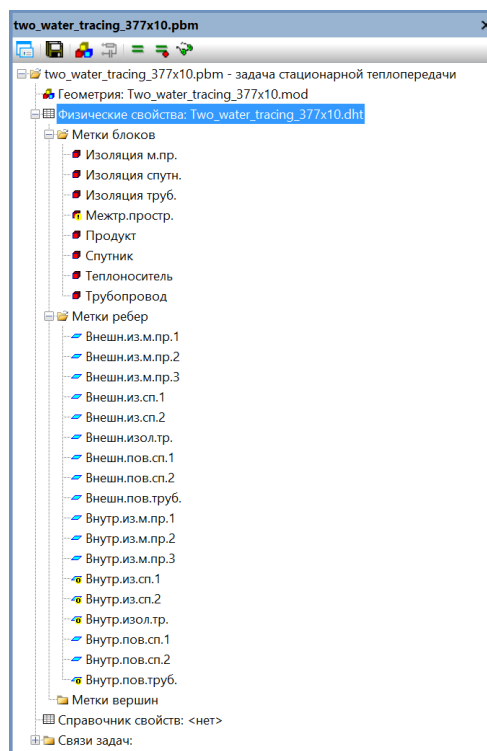
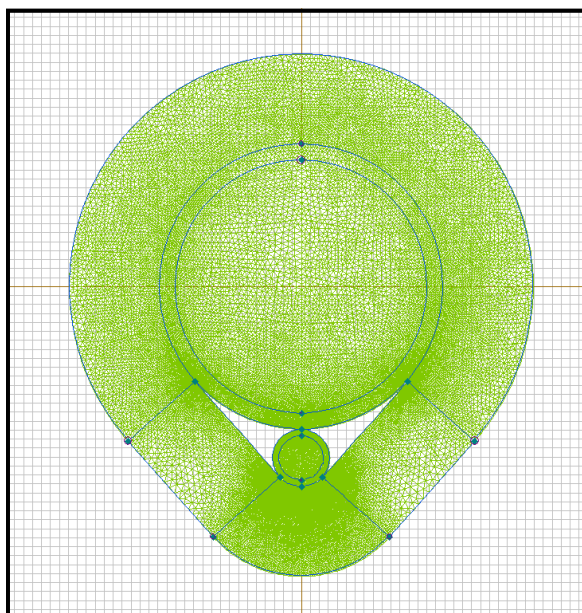
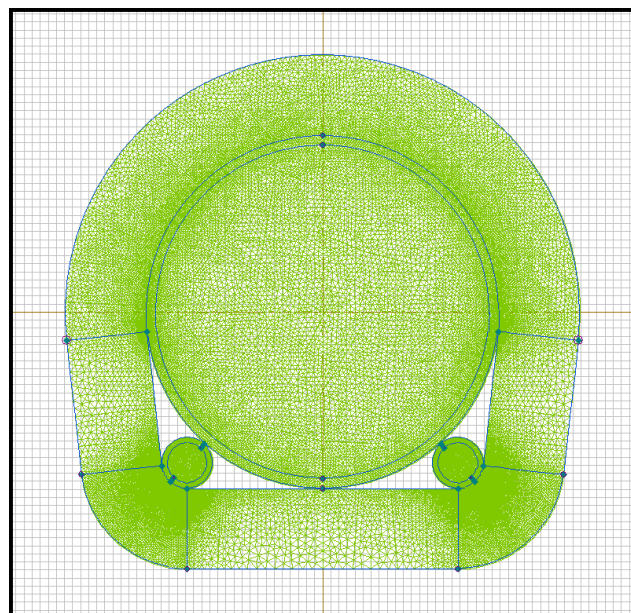


Рис. 2.4.5. Объекты геометрической модели задачи теплопроводности в ELCUT

Этап 4. Построение сетки конечных элементов для геометрической модели (см. рис. 2.4.6)



а



б

Рис. 2.4.6. Сетки конечных элементов геометрических моделей задач теплопроводности в ELCUT: а) с одним обогревающим спутником; б) с двумя обогревающими спутниками

Этап 5. Решение задачи теплопроводности.

Шаг 5.1. Проверка условий соблюдения тепловых балансов (1.1.22.1) – (1.1.22.2). Если равенства тепловых балансов соблюдаются, выводим отчет по рассчитанным тепловым потокам в системе теплового обогрева технологического трубопровода с изотермическим продуктом и картину температурного поля (см. рис. 2.4.7). Если равенства тепловых балансов не соблюдаются, переходим к шагу 5.2.

Шаг 5.2. Уточнение плотности разбивки на конечные элементы по погрешности тепловых балансов (1.1.22.1) – (1.1.22.2) через замкнутые контуры геометрической модели (см. рис. 2.4.6) и подбор температуры воздушной прослойки из условий соблюдения тепловых балансов с использованием метода Pegasus'a [95].

Шаг 5.3. Повторение шага 5.2 до тех пор, пока условие соблюдения тепловых балансов (1.1.22.1) – (1.1.22.2) не будет выполнено.

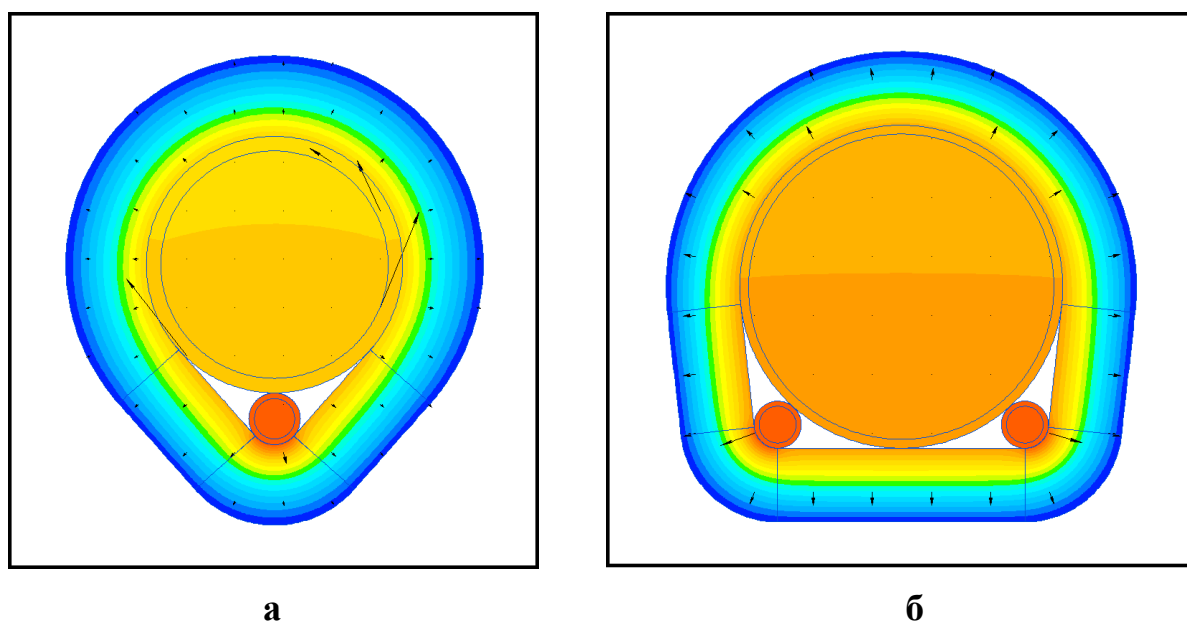


Рис. 2.4.7. Картина температурного поля задач теплопроводности в ELCUT: а) с одним обогревающим спутником; б) с двумя обогревающими спутниками

Компьютерное моделирование процесса теплопередачи в системах теплового обогрева различных конструкций показало, что имеет место передача

тепла от спутника(-ов) к обогреваемому ТП не только через воздушную прослойку, но и через тепловую изоляцию, и она имеет порядок 3-4% от тепла, передаваемого через воздушную прослойку. Результаты компьютерного моделирования процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом и с неподвижным изотермическим продуктом приведены в разделах 4.3 и 4.4 соответственно.

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

Сложная технологическая трубопроводная система (см. рис. 2.5.1) химического производства (ХП) – это совокупность взаимосвязанных труб различного диаметра, специальных фасонных частей, конфузоров, диффузоров, поворотных колен, тройников, а также опор и арматуры, обеспечивающая транспортировку рабочей среды между аппаратами, машинами и агрегатами ХП. Одним из важных специальных классов сложных технологических трубопроводных систем являются системы теплового обогрева сложных технологических трубопроводов ХП.

Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева СТТ является одной из актуальных научно-технических задач автоматизированного проектирования оптимальных энергоресурсоэффективных ХП, представляющих собой сложные ХТС [1, 2]. Оптимальная трассировка систем теплового обогрева СТТ позволяет минимизировать протяженность и упростить конструкцию ТП, 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, обеспечивая высокий уровень надежности и технологической безопасности ХП [1, 2, 96].

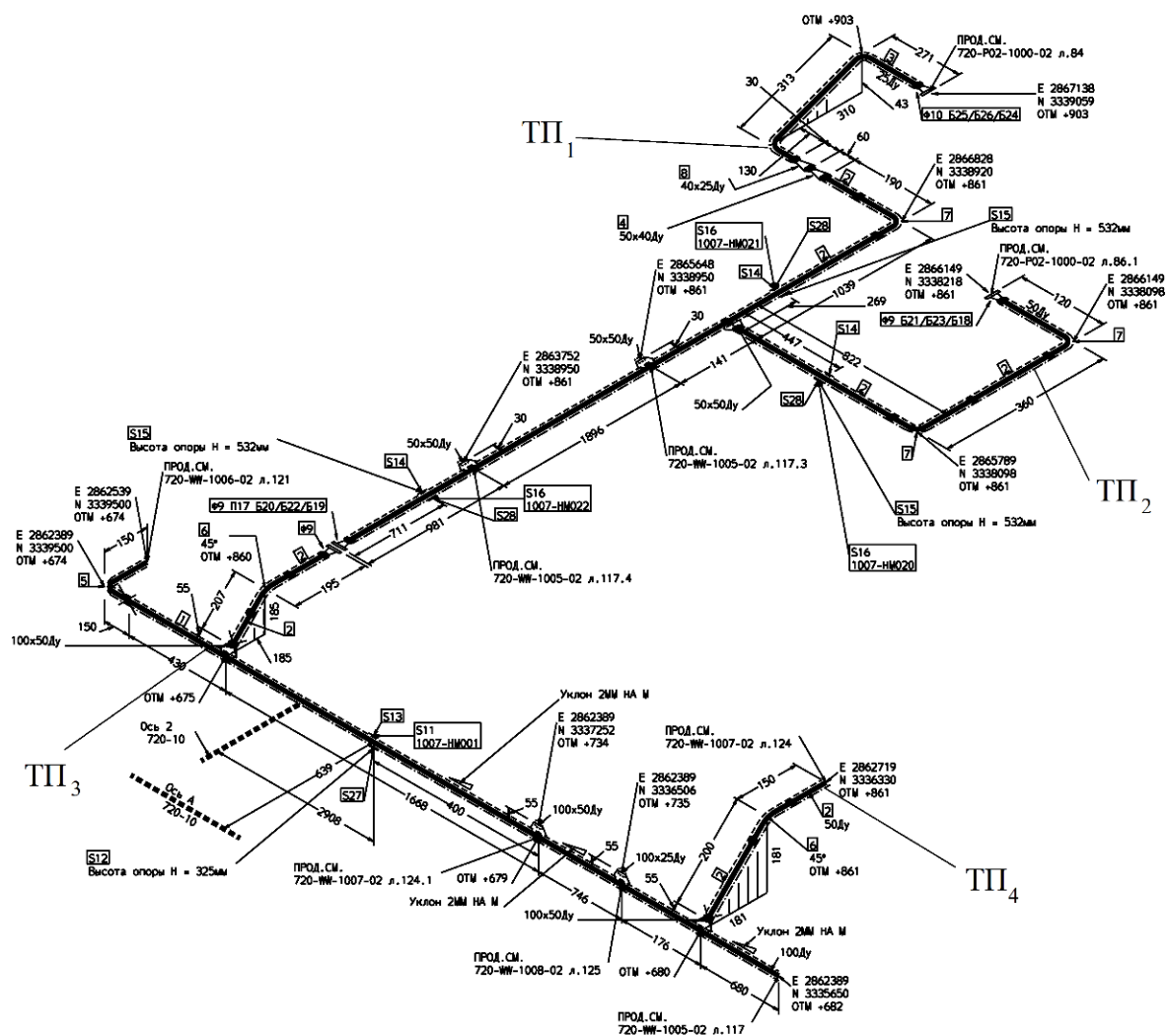


Рис. 2.5.1. Изометрический чертеж сложной технологической трубопроводной системы некоторого ХП

Задача оптимальной трассировки разнообразных инженерных коммуникаций, к которым относятся системы теплового обогрева СТТ, является типовой инжиниринговой задачей для различных отраслей промышленности. В ходе проведенного в разделе 1.3 анализа современных методов и алгоритмов оптимальной трассировки сложных технологических трубопроводов выявлено, что задача оптимальной трассировки в 3D-пространстве проработана слабо, во многом из-за того, что методы и алгоритмы оптимальной трассировки по большей части разработаны для решения прикладных двухмерных задач по прокладке соединений в печатных платах

радио-электронной аппаратуры (прокладку проводников в многослойных печатных платах в полном объеме нельзя отнести к задачам трассировки в 3D-пространстве). Некоторые виды специальных ограничений, которым должна удовлетворять трассировка электрических проводников, могут использоваться и при трассировке систем теплового обогрева СТТ [1, 10, 13, 23, 97-100].

Для определения оптимальных трасс сложных ТТС можно применять, с учетом наборов специальных эвристических правил, отображающих различные специальные физико-химические, гидродинамические и инженерно-технические ограничения, излагаемые в СНиП проектирования ХП, определенные модифицированные алгоритмы оптимальной трассировки магистральных, или межцеховых, трубопроводов ХТС, внутрицеховых трубопроводов ХП, а также оптимальной трассировки электрических проводников [1, 2].

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

Для решения задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ разработан оригинальный декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм (ДТЭА), отличающийся применением автоматизированной процедуры построения топологической модели гидравлической цепи (ГЦ) СТТ в виде гидравлического структурного графа (ГСГ) и модифицированного алгоритма определения кратчайшего остова в исходном ГСГ и использованием набора специальных эвристических правил, отображающих основные физико-химические, пространственно-геометрические и инженерно-технологические ограничения трассировки систем теплового обогрева СТТ, что позволяет определять оптимальную энергоресурсоэффективную трассу прокладки систем теплового обогрева СТТ с минимальными приведенными затратами [1, 2].

Предложенный оригинальный ДТЭ-алгоритм состоит из следующих четырех этапов, каждый из которых включает определенное число шагов:

Этап 1. Гидравлический расчет систем теплового обогрева СТТ с использованием стандартных топологических алгоритмов анализа ГЦ [2].

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.

Обоснование выбора вида целевой функции оптимизации трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов

Основными показателями качества трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов являются [9]:

- 1) малая материалоемкость;
- 2) минимальные гидравлические потери ТП;
- 3) высокий уровень надежности;
- 4) высокий уровень безопасности;
- 5) простота эксплуатации и технического обслуживания.

Задача оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ относится к широкому классу неформализованных задач химической технологии [1, 9] 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 [1, 2, 96]. Для определения оптимальной трассировки систем теплового обогрева СТТ используется технико-экономический критерий, в виде минимума приведенных затрат [1, 2]:

$$\begin{aligned} \Pi = \min_{K, \mathcal{E}} \sum_{i=1}^N \Pi_i(K_i, \mathcal{E}_i) = \\ = \min \left\{ \left[\sum_{i=1}^{N_T} K_{T_i} + \sum_{j=1}^{N_T} C_{\Phi \chi_j} + \sum_{k=1}^{N_{T_{из}}} K_{из_k} \right] \cdot E_H + \sum_{l=1}^{N_H} \mathcal{E}_l \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{N_T} (C_p + A_T)_j \right\} \end{aligned} \quad (2.6.4)$$

, 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; $C_{\Phi \chi_j}$ – стоимость фасонных частей j -го ТП; $K_{из_k}$ – затраты на теплоизоляцию каждого k -го ТП; $\mathcal{E}_l$ – затраты на перекачку потока l -м насосом; C_{p_j} – стоимость ремонта j -го ТП; A_{T_j} – амортизационные отчисления для j -го ТП; N_T – число трубопроводов в СТТС; $N_{T_{из}}$ – число трубопроводов с теплоизоляцией; N_H – число насосов.

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

$$R^{СТТ}(СТТ) = R_1^{ТП}(ТП_1) \cup R_2^{ТП}(ТП_2) \cup \dots \cup R_n^{ТП}(ТП_n); \quad (2.6.5)$$

$$R_1^{ТП}(ТП_1) \cap R_2^{ТП}(ТП_2) \cap \dots \cap R_n^{ТП}(ТП_n) = \emptyset \quad (2.6.6)$$

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

Решение исходной задачи оптимальной трассировки систем теплового обогрева СТТ определяется совокупностью решений всех локальных подзадач: $R_i^{*TP} (TP_{ij}^* \cup (A_i^* \cup A_j^*))$, где TP_{ij}^* соответствует ТП связи i -го и j -го аппаратов ХТС; A_i^*, A_j^* – множество координат пространства, соответствующее местоположению i -го и j -го аппаратов при оптимальном варианте их размещения. Тогда оптимальное решение задачи трассировки сложных ТТС соответствует минимуму аддитивно-сепарабельного общего критерия эффективности для СТТ в целом:

$$R_{\text{опт}}^{\text{СТТ}}(\text{СТТ}_{\text{опт}}) = \min_{\{R\}} \left[\sum_i \Pi_i(R_i^{*TP}) \right] =$$

$$= \min_{\{TP\}} \left[\sum_i \sum_j \Pi_{ij} (TP_{ij}^* \cup (A_i^* \cup A_j^*)) \right] \quad (2.6.6)$$

, где Π_{ij} – локальный КЭ в виде приведенных затрат (2.6.4), при $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}$ и выполнении основных геометрических ограничений задачи: 1) прокладка локальных трасс ТП должна осуществляться в зонах, свободных от ЕО, строительных конструкций объекта и зон, запрещенных для прокладки ТП:

$$TP_{ij} \cap (D \cup S_k \cup F(TP_{ij})) = \emptyset \quad (2.6.6.1)$$

, где D – множество координат пространства, запрещенных для размещения трасс ТП; S_k – множество координат зон размещения строительных конструкций; $F(TP_{ij})$ – множество координат пространства, запрещенных для прокладки трассы TP_{ij} в котором осуществляется трассировка систем теплового обогрева СТТ в соответствии с инженерно-технологическими и монтажно-конструкционными ограничениями задачи компоновки ХП, графически отображается в виде обобщенного гипотетического конструкционного графа (ОГКГ) [2, 13] (см. рис. 2.6.1).

2) взаимное непересечение геометрических объемов трассы ТП и ЕО:

$$ТП_i \cap A_i | \forall i, i = \overline{1, N} = \emptyset \quad (2.6.6.2)$$

, где $ТП_i$ – трасса i -го ТП системы теплового обогрева СТТ; A_i – множество координат пространства, соответствующее местоположению i -го аппарата ХТС (см. рис.2.6.1).

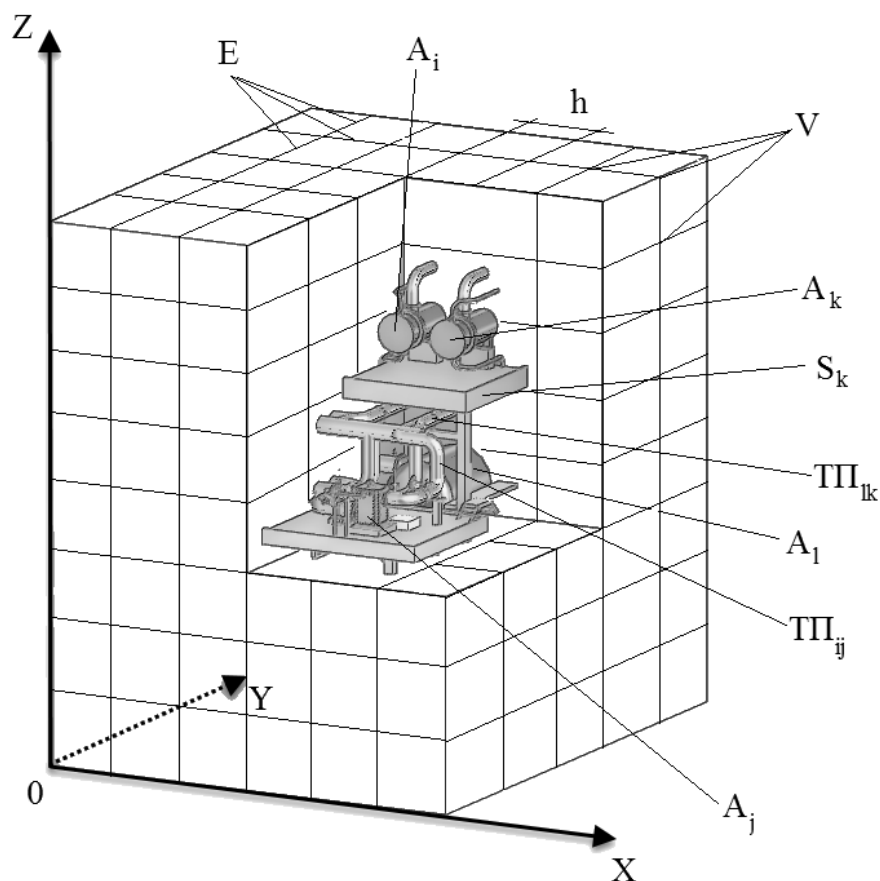


Рис. 2.6.1. Пример обобщенного гипотетического конструкционного графа, включающего некоторый технологический агрегат ХП: E – ребра графа; V – узлы графа; h – конструкционный шаг; $ТП_{ij}$ – трасса ТП, соединяющая i -й и j -й аппараты; $ТП_{lk}$ – трасса ТП, между l -м и k -м аппаратами; S_k – k -я строительная конструкция; A_i, A_j, A_k, A_l – i -й, j -й, k -й и l -й аппараты

3) взаимное непересечение трасс двух ТП:

$$ТП_{ij} \cap ТП_{lk} | \forall (l \neq i), (k \neq j) = \emptyset \quad (2.6.6.3)$$

, где $ТП_{ij}$ – трасса ТП, соединяющая i -й и j -й аппараты ХТС; $ТП_{lk}$ – ТП связи l -го и k -го аппаратов ХТС (см. рис.2.6.1).

4) необходимость размещения ЕО и прокладки трасс ТП в пределах, ограниченных наиболее целесообразной геометрической моделью пространства ХП в виде ОГКГ [1, 2]:

$$\text{ТП}_{ij} \subset P \quad (2.6.6.4)$$

, где ТП_{ij} – трасса ТП, соединяющая i -ю и j -ю ЕО; P – множество координат пространства, поставленное в соответствие ОГКГ (см. рис.2.6.1).

Рассмотрим сущность каждого этапа разработанного алгоритма:

Этап 1. Гидравлический расчет систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов на основе стандартных алгоритмов

Гидравлический расчет использует стандартные методики и алгоритмы, предложенные академиками РАН Кафаровым В.В. и Мешалкиным В.П. [2].

1.1. Построение ГСГ с применением данных о расходах и давлениях, заданных компоновкой технологической схемой ХТС, а также с применением базы данных (БД) физико-химических и термодинамических свойств веществ, а также гидравлической структуры стандартных элементов систем теплового обогрева СТТ [2].

1.2. Разработка математической модели системы теплового обогрева СТТ с применением топологического метода анализа ГЦ [2].

1.3. Расчет диаметра и толщины стенки каждого i -го ТП системы теплового обогрева СТТ в первом приближении D_i^* :

$$D_i^* = \sqrt{4Q_i / \pi \cdot \vartheta_i} \quad (2.6.7)$$

, где D_i^* – внутренний диаметр i -го ТП; Q_i – расход жидкости i -м ТП; ϑ_i – скорость жидкости в i -м ТП.

Задаваясь несколькими значениями допустимой по инженерно-технологическим условиям скорости движения жидкости ϑ_i по i -му ТП, по

формуле (2.6.7) определить расчетное значение соответствующих диаметров для каждого i -го трубопровода системы теплового обогрева СТТ.

Этап 2. Эвристический выбор очередности прокладки локальных трасс трубопроводов

Этап эвристического выбора очередности прокладки локальных трасс каждого ТП состоит из следующих шагов:

2.1. Использовать в диалоговом режиме сформулированную базу эвристических правил (ЭП), отображающих технологические, гидродинамические, инженерные, физико-химические, конструкционные и технико-экономические ограничения расположения трасс ТП, в соответствии со СНиП [9]. Каждое ЭП представляется в упорядоченной нотации продукционных правил вида:

ЭП- i : {ЕСЛИ (некоторые условия), ТО (определенные действия)}.

Для отображения инженерно-технических и гидродинамических ограничений на этапах алгоритма использовать в диалоговом режиме набор сформулированных ЭП, которые перерабатывают знания о монтажно-технологических операциях и сущности физико-химических процессов, определенных ЛПР, в формализованные данные по размещению конкретного объекта.

Так, с учетом знаний о инженерно-монтажных операциях трассировки ТТС с применением ЭП вычисляются минимальная и максимальная высоты размещения каждого ТП [1, 2, 96].

Сформированная база ЭП содержит следующие подмножества ЭП.

ЭП-1 – выбор места размещения оборудования:

ЭП-1.1: {ЕСЛИ («тип ЕО – «Насос»»), ТО («расположение ЕО проводится на нулевой высотной отметке для снижения виброопасности»)}.

ЭП-1.2: {ЕСЛИ («существуют строительные конструкции и тип оборудования «Насос»»), ТО («оборудование можно располагать на любой высоте»)}.

ЭП-1.3: {ЕСЛИ («тип аппарата – «Емкость» и строительные конструкции отсутствуют»), ТО («расположение ЕО производится на нулевой высотной отметке»)}.

ЭП-1.4: {ЕСЛИ («тип ЕО – «Емкость» и существуют строительные конструкции»), ТО («расположение ЕО производится на любой высоте»)}.

ЭП-2 – выбор расположения пространства для обслуживания и ремонта аппаратов ХП:

ЭП-2.1: {ЕСЛИ («тип ЕО — «Насос»»), ТО («обслуживание производится постоянно»)}.

ЭП-2.2: {ЕСЛИ («аппарат обслуживается часто»), ТО («запретить размещение ТП в зоне обслуживания оборудования»)}.

ЭП-3 – выбор мест расположения строительных конструкций:

ЭП-3.1: {ЕСЛИ ((«тип строительной конструкции – «Эстакада»») и («строительная конструкция пересекается с автомобильными дорогами и проездами»)), ТО ((«свободная высота над проезжей частью дороги») и («проезд должен составлять не менее 5 м при условии, что просвет между наиболее возвышенной частью специализированных самоходных средств и низом сооружений должен быть не менее 1 м»)))}.

ЭП-3.2: {ЕСЛИ («тип строительной конструкции – «Внутрицеховая технологическая эстакада между установками»»), ТО ((«эстакада может примыкать к одной установке») и («расстояние между эстакадой и другой установкой должно быть не менее 15 м от крайнего трубопровода эстакады»)))}.

ЭП-3.3: {ЕСЛИ («тип строительной конструкции – «Открытая крановая эстакада»), ТО ((«эстакаду следует располагать на горизонтальной площадке) и (должен предусматриваться отвод атмосферных вод с площадки за счет устройства местных уклонов»))}.

ЭП-4 – определение параметров систем теплового обогрева технологического трубопровода:

ЭП-4.1: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Паровой»»), ТО («распределительный и сборный коллекторы выполняются условным диаметром D_y 50 мм»)}.

ЭП-4.2: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Паровой»»), ТО («к распределительному и сборному коллекторам может быть подключено не более 8 обогревающих трубопроводов-спутников условным диаметром D_y не менее 20 мм»)}.

ЭП-4.3: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Паровой»»), ТО ((«подводящий трубопровод пара к распределительному коллектору должны быть условным диаметром D_y 50») и («отводящий трубопровод парового конденсата от сборного коллектора мм D_y 32 мм»))}.

ЭП-4.4: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Паровой»»), ТО ((«расчетная длина каждого спутника должна выбираться в зависимости от схемы подключения, расположения обогреваемого продуктопровода, температуры продукта обогреваемого трубопровода, давления в падающей линии) и (должна быть не более 150 м для пара низкого давления») и («не более 250 м для пара среднего давления»))}.

ЭП-4.5: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Водяной»»), ТО (((«распределительный коллектор выполняется условным диаметром D_y 50 мм при подключении $2 \div 4$ спутников») и («условным диаметром D_y 80 мм – при подключении $5 \div 8$ спутников»)) и ((«сборный коллектор выполняется условным диаметром D_y 50 мм при подключении $2 \div 4$ спутников») и («условным диаметром D_y 80 мм – при подключении $5 \div 8$ спутников»))))}.

ЭП-4.6: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Водяной»»), ТО (((«подводящий трубопровод к распределительному коллектору должен быть условным диаметром D_y 50 мм при подключении 2÷4 спутников») и (« D_y 80 мм – при подключении 5÷8 спутников»)) и ((«отводящий трубопровод от сборного коллектора должен быть условным диаметром D_y 50 мм при подключении 2÷4 спутников») и (« D_y 80 мм – при подключении 5÷8 спутников»)))).

ЭП-4.7: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Водяной»»), ТО («к распределительному и сборному коллекторам может быть подключено не более 8 спутников условным диаметром D_y 20 мм»)}.

ЭП-4.8: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Водяной»»), ТО ((«расчетная длина каждого спутника должна выбираться в зависимости от схемы подключения, вида и температуры теплоносителя, расположения обогреваемого продуктопровода, давления в падающей линии») и («должна быть не более 250-300 м - для промтеплофикационной и теплофикационной воды») и («не более 200-250 м - для водных растворов гликолей»))}).

ЭП-5 – определение параметров технологических потоков, между ЕО:

ЭП-5.1: {ЕСЛИ ((«ТП с пульсирующим потоком среды») и («необходимо максимально снизить гидравлические потери ТП»)), ТО («применяют гнутые отводы, изготавливаемые из бесшовных труб»)}.

ЭП-5.2: {ЕСЛИ («ТП испытывается на прочность и плотность совместно с ЕО»), ТО («ТП испытывают по наименьшему давлению каждого из элементов испытываемой системы»)}.

ЭП-5.3: {ЕСЛИ («тип ТП – «Напорный» (после насосов, компрессоров, газодувок»)), ТО («за расчетное давление в ТП принимают максимальное давление, развиваемое центробежной машиной при закрытой задвижке со стороны нагнетания»)}.

ЭП-5.4: {ЕСЛИ («ТП защищен предохранительными клапанами»), ТО («за расчетное давление в ТП принимают максимально возможное рабочее

давление, возникающее при отклонении от нормального технологического режима и определяемое решением по технологии производства или эксплуатации проектируемого объекта, с учетом противодействия при сбросе»)).

ЭП-6 – выбор направления прокладки локальной трассы ТП:

ЭП-6.1: {ЕСЛИ («ТП групп А, Б»), ТО («прокладка должна быть надземной на несгораемых конструкциях, эстакадах, этажерках, стойках, опорах»))}.

ЭП-6.2: {ЕСЛИ («ТП вертикальный»), ТО («прокладка ТП осуществляется только с учетом несущей способности поверхностей ЕО или строительных конструкций»))}.

ЭП-6.3: {ЕСЛИ («ТП горизонтальный»), ТО («прокладка осуществляется в сформированных каналах»))}.

ЭП-6.4: {ЕСЛИ («прокладывается локальная трасса изолированного ТП»), ТО ((«расстояние между осями смежных ТП») и («от ТП до строительных конструкций, принимается «с учетом возможности сборки, ремонта, осмотра, нанесения изоляции, а также величины смещения трубопровода при температурных деформациях»)))}.

ЭП-7 – определение гидродинамических режимов движения технологических потоков в ТП:

ЭП-7.1: {ЕСЛИ ((«ТП круглого сечения») и («критерий (число) Рейнольдса $Re < 2320$ »)), ТО («режим течения – ламинарный – слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсаций скоростей и давлений»))}.

ЭП-7.2: {ЕСЛИ («ТП круглого сечения») и («критерий (число) Рейнольдса $Re > 10000$ »), ТО («режим течения – развитый турбулентный – сопровождается интенсивным перемешиванием жидкости и пульсациями скоростей и давлений»))}.

ЭП-8 – выбор условий функционирования ХТС и условий нормальной эксплуатации оборудования ХП:

ЭП-8.1: {ЕСЛИ («компонент – наиболее «агрессивный» по воздействию»), ТО («данный компонент должен выводиться из системы в первую очередь»)}.

ЭП-8.2: {ЕСЛИ («потоки являются источниками энергии в системе»), ТО («данные потоки могут быть объединены только с потоками – потребителями энергии»)}.

ЭП-8.3: {ЕСЛИ («бетонные и железобетонные конструкции сооружений, подвергающиеся систематическому увлажнению атмосферными осадками»), ТО («конструкции должны иметь на горизонтальных элементах (карнизах, полках и т.д.) гидроизоляцию и сливы, обеспечивающие свободный сток воды»)}.

ЭП-9 – определение группы и категории опасности ТП:

ЭП-9.1: {ЕСЛИ («тип объекта – «Трубопровод»»), ТО ((«ТП в зависимости от класса опасности транспортируемого вещества (взрыво-, пожароопасность и вредность) подразделяются на группы среды (А, Б, В)) и (в зависимости от расчетных параметров среды - на пять категорий (I, II, III, IV, V)»)}.

ЭП-9.2: {ЕСЛИ («содержание одного из компонентов в смеси, транспортируемой по ТП, превышает среднюю смертельную концентрацию в воздухе²»), ТО («группу смеси следует определять по этому веществу»)}.

ЭП-9.3: {ЕСЛИ ((«ТП, транспортирует вещества с рабочей температурой, равной или большей температуры их самовоспламенения») и

² Согласно ГОСТ 12.1.007. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности

(«негорючие, трудногорючие и горючие вещества, которые при взаимодействии с водой или кислородом воздуха могут быть пожаровзрывоопасными»)), ТО («ТП следует относить к I категории опасности»)}.

Приведены ЭП необходимые для решения практической задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ, всего сформулировано 33 уникальных ЭП для трассировки систем теплового обогрева СТТ. Однако в приведенный набор ЭП могут быть включены и другие ЭП.

2.2. Для анализа очередности размещения трасс i -го ТП применяется эвристический коэффициент конкуренции трасс или предпочтения очередности прокладки трасс [2]:

$$R_i^* = aK_i + bB_i + cD_i \quad (2.6.8)$$

, где K_i – коэффициент перекрытия i -й трассы ТП; B_i – балл трубопровода; D_i – внешний диаметр ТП; a, b, c – эмпирические весовые коэффициенты.

Коэффициент K_i определяет насыщенность области прокладки i -го ТП, другими ТП. K_i принимается равным числу трасс, входящих в параллелепипед, описанный на начальной и конечной точках локального ТП (см. рис.2.6.1). Другой фактор, оказывающий влияние на порядок трассировки ТП – это группа и категория ТП, определяемые в соответствии с эвристическим правилом из набора ЭП-9.

2.3. Каждому ТП ставится в соответствие определенный балл B_i в соответствии с группой и категорией трубопровода. Если ТП соответствует высокий балл B_i , то ТП трассируется таким образом, чтобы он имел минимально возможное число изгибов, что позволяет снизить опасность при его эксплуатации и минимизировать тепловые потери и потери давления в ТП. Трассировка ТП с высоким баллом B_i осуществляется в первую очередь, пока резерв пространства для прокладки трасс еще большой [2].

Наружный диаметр i -го ТП D_i – это третий фактор, оказывающий существенное влияние на выбор порядка трассировки ТП. Прокладка ТП с большим наружным диаметром начинает быть затруднительной, поскольку увеличивается число изгибов трассы и количество обходов препятствий.

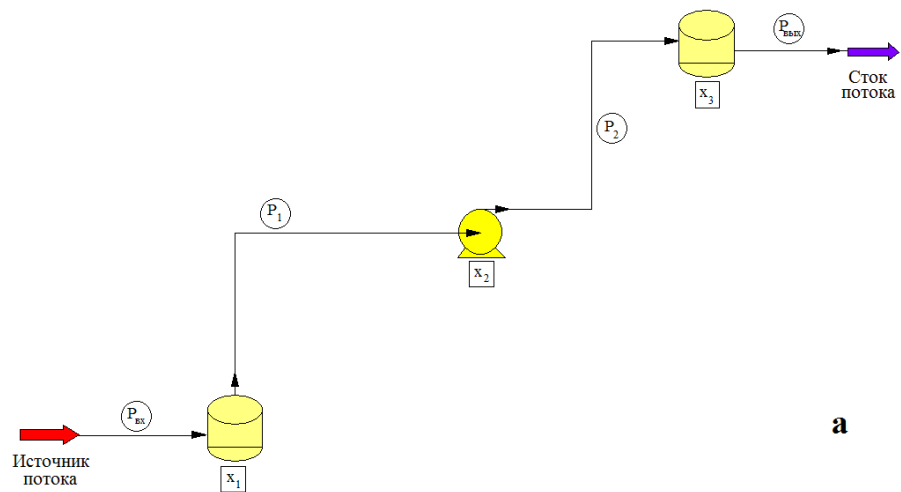
Этап 3. Построение топологической модели гидравлической цепи в виде гидравлического структурного графа с учетом инженерно-технических и гидродинамических ограничений

Гидравлический структурный граф системы теплового обогрева СТТ (см. рис. 2.6.2) представляет собой взвешенный связный неориентированный граф $G = (X, E)$, где среди множества вершин графа (множества $X = \{x_i; x_j; \dots; x_n\}$) выделяется три подмножества вершин: В-1 – *вершины-источники*, для которых $\rho'(a) = 0$ и $\rho''(b) \neq 0$; В-2 – *вершины-стоки*, для которых $\rho''(b) = 0$ и $\rho'(a) \neq 0$; В-3 – *смешанные (промежуточные) вершины*, для которых $\rho'(l) \neq 0$ и $\rho''(l) \neq 0$, где $\rho'(a)$ – *входная степень вершины*, равная числу входных ребер, инцидентных этой a -й вершине, $\rho''(b)$ – *выходная степень вершины*. Множество ребер (дуг) графа (множество E) имеют веса, физический смысл которых – это либо гидравлическое сопротивление, либо длина участка и диаметр трассы ТП [5, 6].

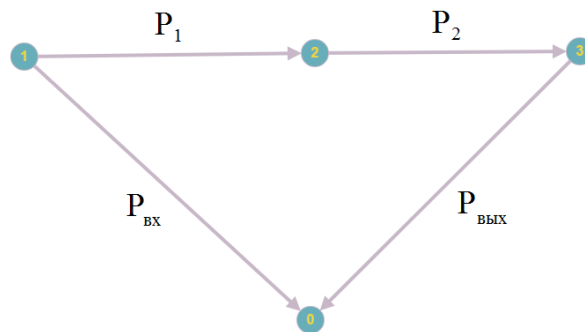
Для отображения ГСГ (см. рис. 2.6.2) используют двухстрочную матрицу дуг графа $[L]$ с дополнительной строкой рангов:

$$[L] = \begin{matrix} & \text{Н} \\ \begin{matrix} \text{К} \\ \text{Р} \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_1 & x_1 & x_2 & x_3 \\ x_0 & x_2 & x_3 & x_0 \\ P_{\text{вх}} & P_1 & P_2 & P_{\text{вых}} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2.6.9)$$

, где $P_{\text{вх}}; P_1; P_2; P_{\text{вых}}$ – веса дуг ГСГ.



а



б

Рис. 2.6.2. Пример простейшей гидравлической цепи, состоящей из насоса и двух емкостей (а), и отображающего её гидравлического структурного графа (б): x_1, x_3 – емкости; x_2 – насос; $P_{вх}, P_1, P_2, P_{вых}$ – давления; узел 0 является базовым; узлы 1-3 соответствуют давлениям в элементах x_1, x_2, x_3

Из большого числа остовов графа [2] необходимо найти один – оптимальный кратчайший остов (Shortest Spanning Tree (SST)) соответствующего ГСГ, у которого сумма весов ребер минимальная [62].

Для построения остова ГСГ авторами предложен модифицированный алгоритм Краскала [106], отличающийся применением процедуры проверки образования цикла при добавлении ребра в графе T . Эта процедура выполняется путем сравнения с использованием алгоритма расстановки пометок (3.3.1-3.3.2):

3.1. Построить несвязный граф T , содержащий n вершин.

3.2. Упорядочить ребра графа G в порядке возрастания их весов.

3.3. Начать с первого ребра в полученном на шаге 2 списке, добавлять ребра в графе T , соблюдая условие: такое добавление не должно приводить к появлению цикла в T .

3.3.1. Приписать вершинам графа пометки: (r_i, p_i) , где $r_i = x_i$ и $p_i = 0$, $\forall x \in X, k = 1$.

3.3.2. Выбрать для анализа некоторое произвольное ребро из множества упорядоченных по весу ребер графа G . Например, $c_k = (x_i, x_j)$. Если $k \leq m$, где m – число ребер ГСГ и если $r_i = r_j$, то это означает, что вершины x_i и x_j принадлежат одному и тому же подостову и добавление ребра c_k приведет к появлению цикла. Отбросить ребро c_k , т. е. положить $k = k + 1$ и вернуться к выбору следующего ребра; если $r_i \neq r_j$, то ребро c_k можно добавить к ребрам построенных подостовов.

3.4. Повторять шаг 3 до тех пор, пока число ребер в T не станет равным $(n - 1)$. Сгенерированное дерево является кратчайшим остовом SST графа G .

Блок-схема модифицированного алгоритма Краскала приведена на рисунке 2.6.3.

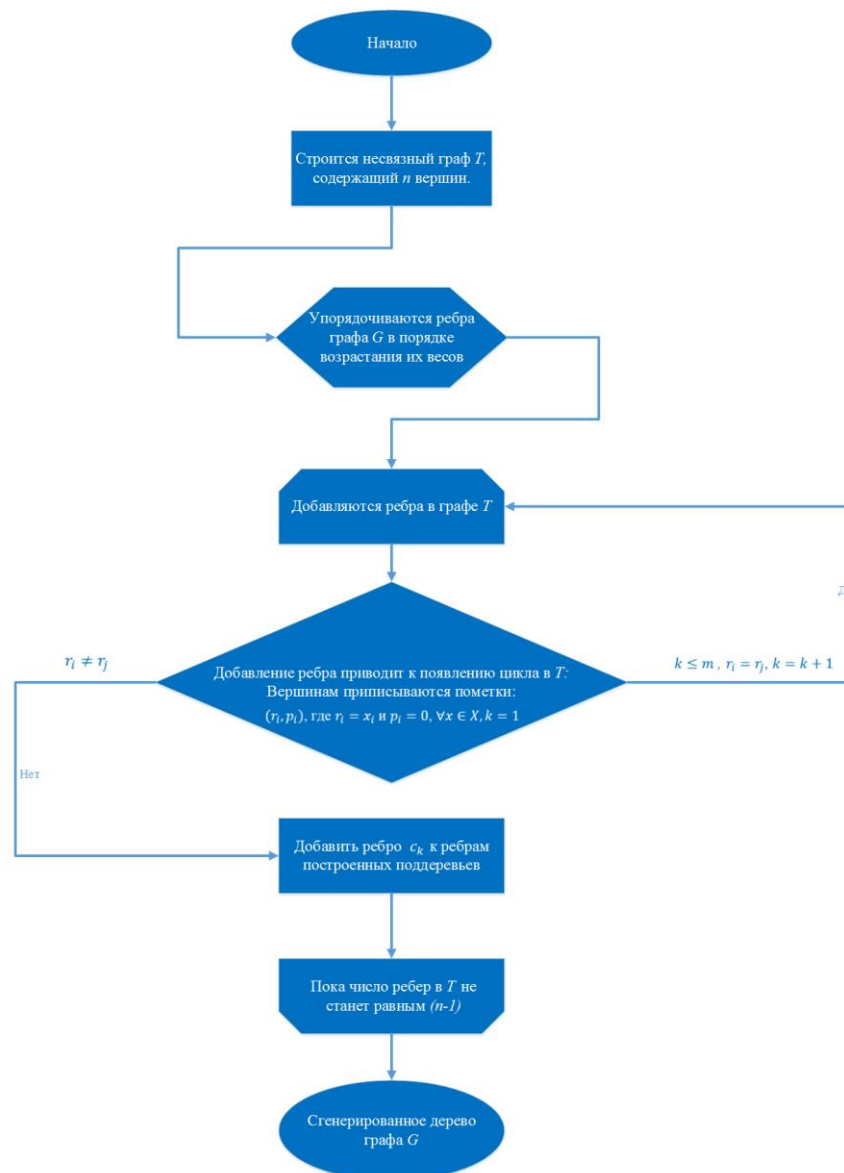


Рис. 2.6.3. Блок-схема модифицированного алгоритма Краскала

Этап 4. Упорядоченный топологическо-эвристический поиск рациональной ограниченной области пространства для прокладки локально-оптимальной трассы каждого трубопровода

На этом этапе осуществляется поиск рациональной ограниченной области для прокладки трассы в виде каналов и зон с использованием обобщенного гипотетического конструкционного графа. «Каналы – это совокупность ребер ОГКГ (см. рис. 2.6.1), отображающих участок площади ХП, в которых могут прокладываться трассы. Зона – это подмножество сформированных каналов, граничные точки которых представляют собой вершины ОГКГ, только через

которые может прокладываться трасса каждого ТП» [1, 2]. В выбранных каналах и зонах затем прокладывают локально-оптимальную трассу СТТС.

4.1. Сформировать с применением метода ветвей и границ (МВГ) [1, 2, 9] ортогональные каналы на горизонтальных плоскостях в соответствии с геометрическими границами ХП, а также в соответствии с границами геометрических объемов ЕО.

Для быстрого поиска канала или зоны прокладки трассы СТТС осуществляется процедура ограниченного перебора альтернативных вариантов трасс с применением метода ветвей и границ [1, 2, 9] с лучевой стратегией ветвления на дереве вариантов решений (ДВР).

4.2. Выделить в совокупности решений R комбинаторной задачи подмножество перспективных решений R^* , которое содержит оптимальное решение, что дает возможность ограничить перебор. Подмножество R в процессе определения оптимального решения ограничивается, т. к. за счет применения МВГ на ДВР отсекаются неперспективные решения.

При определении оптимального решения задачи начальное значение верхней границы (ВГ) $\bar{Q}_0$ равно значению КЭ (2.6.4) для любого произвольного решения задачи.

Значение нижней границы (НГ) $\underline{Q}$ равно значению КЭ (2.6.4) как для любого предварительного незавершенного, так и для некоторого завершенного альтернативного варианта решения задачи.

4.3. Выбрать в качестве действующей вершины ДВР одну из висячих вершин финального, полученного, при декомпозиции исходной задачи слоя вершин ДВР. После окончания генерации цепи ДВР – т.е. генерации до любого альтернативного варианта решения или просмотра всех висячих вершин любого слоя вершин ДВР выбрать активную вершину на предыдущем слое. При этом

анализ вершин каждого слоя ведется в строго заданном порядке: «слева — направо» или «справа — налево».

4.4. Если на определенном n -м этапе решения задачи величина $\text{НГ} = \underline{Q_n^*} > \bar{Q}_0$, то все решения комбинаторной задачи, получаемые в процессе развития этого варианта, будут неоптимальными, из чего следует, что, они исключаются из множества R^* .

Если для определенного n -го заверщенного варианта прокладки всех ТП заданного объекта величина $\text{НГ} = \underline{Q_n^*} < \bar{Q}_0$, то это n -е решение – наилучшее на текущем этапе. Для следующего $(n + 1)$ -го этапа определения оптимального решения задачи пересчитывают новое значение ВГ: $\bar{Q}_0(n + 1) = \underline{Q_n^*}$.

Процесс определения оптимального решения на ДВР с применением МВГ прекращается, когда проанализированы все допустимые промежуточные и завершенные рациональные варианты, среди которых определено оптимальное решение по минимуму критерия (2.6.4).

2.7 Выводы

1. Проанализирована возможность использования аналитических методов их исследования и 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 аппроксимационной модели установившейся теплопроводности в круге (неподвижном продукте) и кольце (трубе) с краевыми условиями 3-го рода, со специальными эффективными коэффициентами теплоотдачи отличающимися на разных частях границы обогреваемой технологической трубы с изотермическим продуктом с воздушной прослойкой и изоляцией, применением 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.

Кроме того, было обосновано применение существующей специализированной упрощенной математической модели для моделирования процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом.

2. С использованием серии вычислительных экспериментов выполнена проверка адекватности существующей специализированной упрощенной математической модели («псевдо-одномерной» модели) процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом и проверка адекватности разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом с применением компьютерного моделирования температурных полей на стационарных моделях теплопередачи МКЭ с помощью программного комплекса ELCUT на сложных теплотехнических системах различных конфигураций установки производства элементарной серы.

3. Сформулирована инженерно-технологическая постановка неформализованной задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов.

4. Обоснован выбор вида целевой функции оптимизации трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов, выражающего экономию как материалоемкости за счет минимизации длины ТП, так и энергоемкости за счет оптимизации гидравлических сопротивлений в сложных технологических трубопроводных системах.

5. Разработаны наборы эвристических правил неформализованной задачи энергоресурсоэффективной трассировки в виде знаний по теории процессов и аппаратов химической технологии, по требуемым технологическим, гидродинамическим, инженерным, физико-химическим ограничениям при поиске рациональной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов химических производств, что позволяет выполнять процедуру принятия решений и выбор очередности прокладки локальных трасс трубопроводов при поиске оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки.

6. Разработан 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 и использованием набора специальных продукционных правил, отражающих физико-химические, пространственно-геометрические и инженерно-технологические ограничения трассировки трубопроводных систем, что позволяет определять оптимальные энергоресурсоэффективные трассы прокладки систем теплового обогрева СТТ с минимальными приведенными затратами.

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»

Разработанный комплекс программ состоит из трех базовых модулей. Программный модуль «Расчет количества тепловых спутников и их диаметров в системах теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» предназначен для расчета количества труб обогрева (спутников) и их диаметров на основании заданных технологических параметров. Программный модуль «Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» предназначен для выполнения оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ параметров потока газа в трубопроводе. В модулях «Расчет количества тепловых спутников и их диаметров в системах теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» и «Проектирование обогревающих спутников технологических трубопроводов» реализован алгоритм, описанный в разделе 2.3. Программный модуль «Выпуск аксонометрических чертежей систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» предназначен для выпуска аксонометрических чертежей оптимальных энергоресурсоэффективных трасс систем теплового обогрева отдельным комплектом «Обогрев технологических трубопроводов (ОТТ)».

3.2 Программное обеспечение комплекса программ

3.2.1 Логико-информационная структура основных программных модулей и информационного обеспечения

Взаимодействие базовых модулей комплекса программ представлено на рисунке 3.2.1.

- 1. Программный модуль «Расчет количества тепловых спутников и их диаметров в системах теплового обогрева сложных технологических трубопроводов»** служит для ввода исходных данных по технологическим параметрам обогреваемых трубопроводов и трубопроводов-спутников, и расчета количества труб обогрева (спутников) и их диаметров. Благодаря встроенным функциям синхронизации, актуальная информация о данных необходимых для проектирования обогрева технологических трубопроводов тепловыми спутниками передается в программный модуль «Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов».
- 2. Программный модуль «Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов»** интегрирован в систему автоматизированного проектирования AVEVA PDMS (AVEVA Everything 3D). Это позволяет определять оптимальные энергоресурсоэффективные трассы прокладки систем теплового обогрева СТТ с минимальными приведенными затратами с учетом физико-химических, пространственно-геометрических и инженерно-технологических ограничений трассировки трубопроводных систем. В модуле реализован интерфейс передачи данных в расчетную программу «Изоляция» для оптимизации теплоизоляционных конструкций технологических трубопроводов.
- 3. Программный модуль «Выпуск аксонометрических чертежей систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов»**

осуществляет автоматизированный выпуск конечных документов отдельным комплектом ОТТ – чертежи трасс систем теплого обогрева СТТ выполняются в аксонометрическом виде с применением приложения Draft AVEVA PDMS (приложения Draw AVEVA Everything 3D).

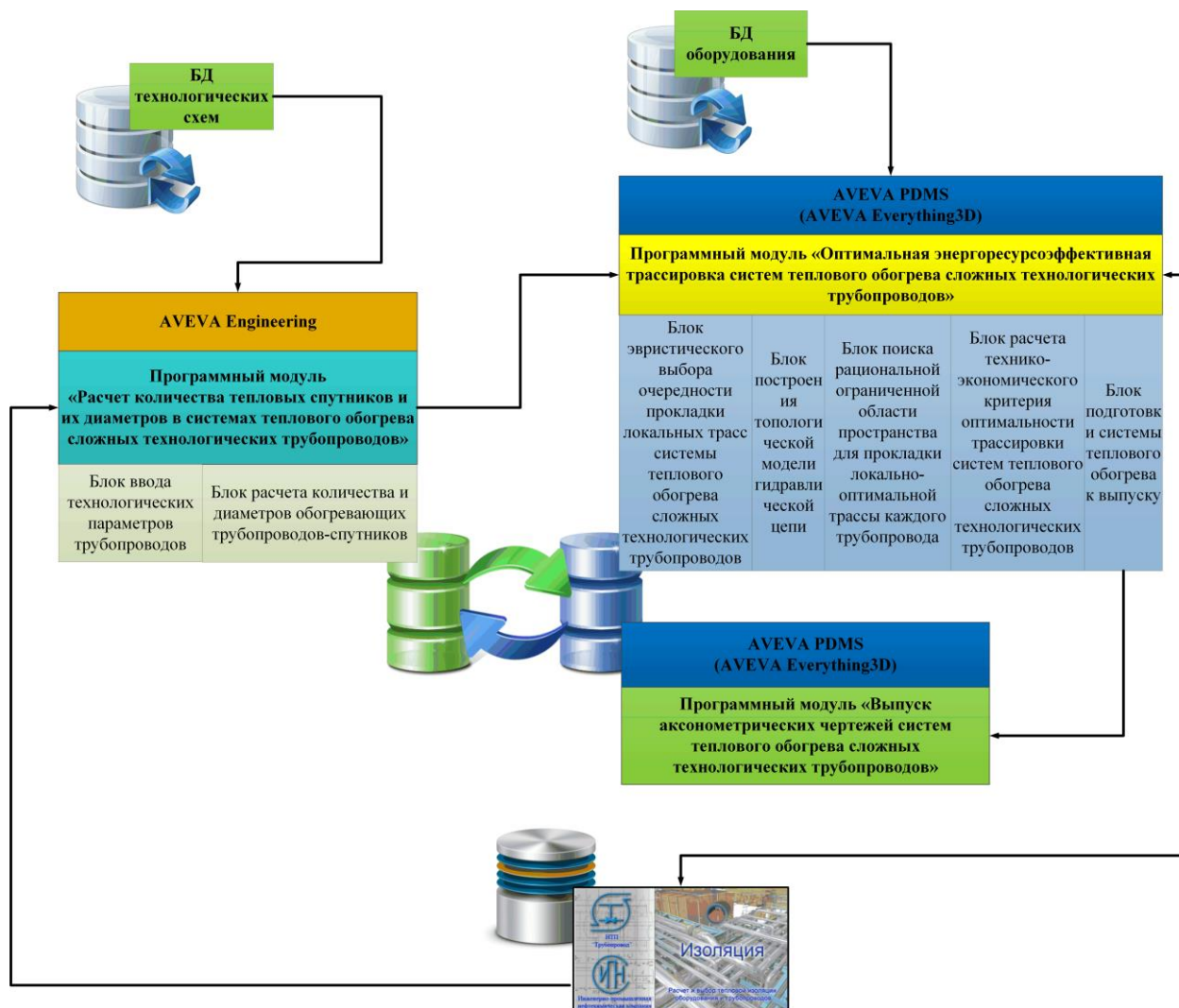


Рис. 3.2.1. Упрощенная блок-схема интеграции ключевых модулей комплекса программ.

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

В программном модуле «Расчет количества тепловых спутников и их диаметров в системах теплого обогрева сложных технологических

трубопроводов» реализован этап гидравлического расчета систем теплового обогрева СТТ разработанного декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки.

Программный модуль «Расчет количества тепловых спутников и их диаметров в системах теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» реализован в виде справочников на платформе AVEVA Engineering (система управления проектными данными по технологическим объектам), представляет собой базу данных DABACON, в которой хранятся введенные данные по технологическим параметрам обогреваемых трубопроводов и трубопроводов-спутников и разработанный алгоритм расчета количества труб обогрева (спутников) и их диаметров.

Расчет количества труб обогрева (спутников) и их диаметров производится системой на основании следующих технологических параметров:

- тип обогрева;
- назначение обогрева;
- номинальный диаметр линии;
- температура рабочая.

Блок-схема алгоритма расчета количества и диаметров спутников представлена на рисунке 3.2.2.

Для корректного расчета количества и диаметров обогревающих трубопроводов-спутников у обогреваемого технологического трубопровода должны быть заполнены все указанные выше параметры (см. рис. 3.2.3 – 3.2.4).

Затем система анализирует «Справочник типов спутников» (см. рис. 3.2.5) и определяет количество спутников и их диаметры, подставляя значения перечисленных выше параметров в справочник.

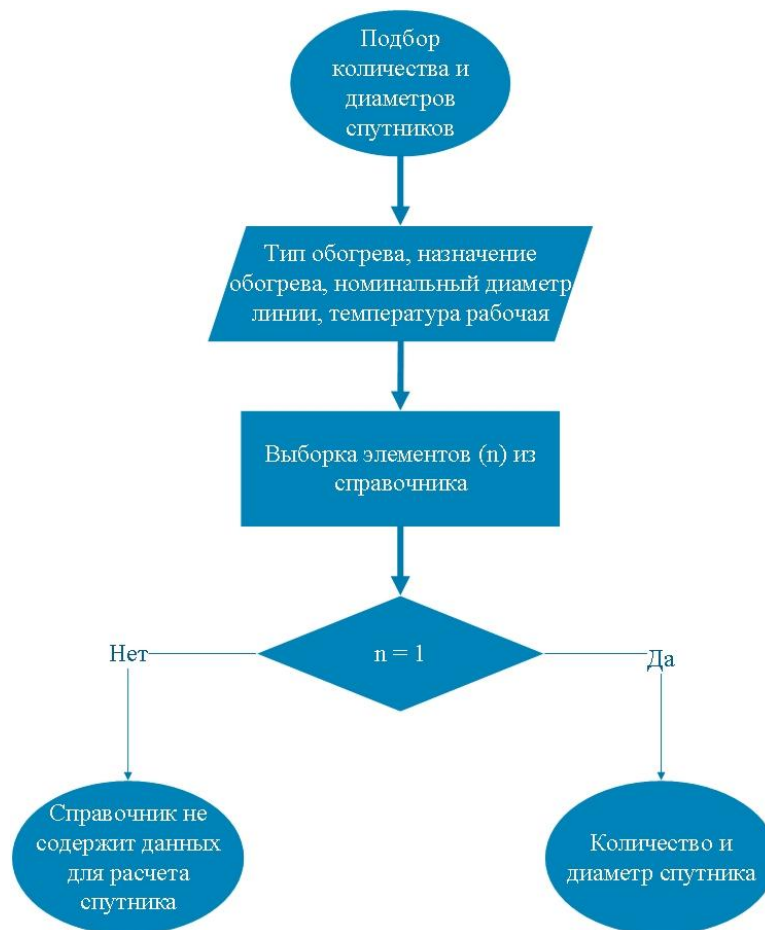


Рис. 3.2.2. Блок-схема алгоритма расчета количества и диаметров спутников

Project Home Manage View Утилиты ГТО AVEVA NET Admin								
Document Explorer	TO - СП	Manage	Cut	New	Datasheet	Select All	Clear Filters	Reports
Isolations	Isolations	Open	Copy	Claim	Datasheets	Vertical View	Reset Cell Feedback	Previous
			Paste	Delete		Auto Size Columns	Quick Report	Next
			Clipboard	Records		Grid Actions	Reporting	Find

Isolations								
Drag a column header here to group by that column.								
Номер линии	Описание обогрева	Обогрев	Периодичность обогрева	Характеристика обогрева	Назначение обогрева	Описание изоляции	Изоляция	
CA-5018	Паровой спутник СД	МТ	Постоянный	25x1...	Поддержание температуры	Изоляция от теплопотерь	HI	
CA-5019	Паровой спутник СД	МТ	Постоянный	25x1...	Поддержание температуры	Изоляция от теплопотерь	HI	
CA-5020	Паровой спутник СД	МТ	Постоянный	25x1...	Поддержание температуры	Изоляция от теплопотерь	HI	
SG-5017	Паровой спутник СД	МТ	Постоянный	20x1...	Поддержание температуры	Изоляция от теплопотерь	HI	
SG-5018	Паровой спутник СД	МТ	Постоянный	20x1...	Поддержание температуры	Изоляция от теплопотерь	HI	
SG-5019	Паровой спутник СД	МТ	Постоянный	20x1...	Поддержание температуры	Изоляция от теплопотерь	HI	
OO-5016	Паровой спутник СД	МТ	Постоянный		Поддержание температуры	Изоляция от теплопотерь	HI	
SL-5005								

Диаметры в линии members of SG-5018			
Номинальный диаметр, мм	Диаметр рубашки, мм	Диаметр труб обогрева, мм	Количество труб обогрева, шт.
80		25	1
25		20	1

Рис. 3.2.3. Технологические параметры обогреваемого трубопровода

Project	Home	Manage	View	Утилиты ГГО	AVEVA NET	Admin
Document Explorer	TO - СП Справочник об	Manage Open	Cut Copy Paste	Clipboard	New Claim Delete	Datasheet
Lists and Schedules						
Records						
Datasheets						

Тип обогрева	Описание обогрева	Аббревиатура
WT	Водяной спутник	W
SJ	Паровая рубашка	J
ET	Электрообогрев	E
ST	Паровой спутник	S
MT	Паровой спутник СД	S

Рис. 3.2.4. Справочник типов обогрева

Project	Home	Manage	View	Утилиты ГГО	AVEVA NET	Admin
Document Explorer	TO - СП Справочник ти	Manage Open	Cut Copy Paste	Clipboard	New Claim Delete	Datasheet
Lists and Schedules						
Records						
Datasheets						

Тип обогрева	Описание типа обогрева	Назначение обогрева	Номинальный диаметр, мм	Т раб., °C (от)	Т раб., °C (до)	Спутник ДУ, мм	Кол-во спутников
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	15	101.00	360.00	20	1
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	20	101.00	360.00	20	1
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	25	101.00	360.00	20	1
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	32	101.00	360.00	25	1
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	40	101.00	360.00	25	1
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	50	101.00	360.00	25	1
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	65	101.00	360.00	25	1
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	80	101.00	360.00	25	1
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	100	101.00	360.00	25	2
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	125	101.00	360.00	25	2
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	160	101.00	360.00	25	2
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	200	101.00	360.00	25	2
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	250	101.00	360.00	25	3
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	300	101.00	360.00	25	3
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	350	101.00	360.00	25	3
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	400	81.00	360.00	25	4
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	500	101.00	360.00	25	4
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	800	101.00	360.00	25	10
MT	Паровой спутник СД	Поддержание температуры	600	81.00	360.00	25	4

Рис. 3.2.5. Справочник типов спутников

Рассчитанные данные по количеству труб обогрева (спутников) и их диаметры передаются в программный модуль «Проектирование обогревающих спутников технологических трубопроводов» с использованием встроенных функций синхронизации.

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

В программном модуле «Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» реализованы основные этапы работы разработанного декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ.

Функционально, программный модуль состоит из нескольких блоков:

Блок 1. «Эвристический выбор очередности прокладки локальных трасс системы теплового обогрева сложных технологических трубопроводов». Блок предоставляет доступ ко всей необходимой перед началом проектирования информации, используя в диалоговом режиме набор сформулированных ЭП, которые перерабатывают знания о монтажно-технологических операциях и сущности физико-химических процессов, определенных лицом, принимающим решения (ЛПР), в формализованные данные по размещению конкретного объекта.

Блок 2. «Построение топологической модели гидравлической цепи». Блок осуществляет построение топологической модели гидравлической цепи в виде гидравлического структурного графа с учетом инженерно-технических и гидродинамических ограничений. Процесс построения топологической модели гидравлической цепи основан на использовании режима Event-Driven Graphics (EDG) [111].

Блок 3. «Поиск рациональной ограниченной области пространства для прокладки локально-оптимальной трассы каждого трубопровода». Блок выполняет определение рациональной ограниченной области для размещения локально-оптимальной трассы системы теплового обогрева технологических трубопроводов в виде каналов и зон с использованием процедуры

ограниченного перебора альтернативных вариантов трасс с применением метода ветвей и границ [1, 2, 9] с лучевой стратегией ветвления на ДВР.

Блок 4. «Расчет технико-экономического критерия оптимальности трассировки систем теплого обогрева сложных технологических трубопроводов». Блок осуществляет расчет капитальных затрат, учитывающих материалоемкость систем теплого обогрева технологических трубопроводов, определяемую длиной и диаметром обогревающих трубопроводов-спутников и эксплуатационных затрат на транспортировку технологических потоков по ТП. Расчеты выполняются с применением критерия приведенных затрат (2.6.4), который не учитывает затраты на стоимость и монтаж ЕО, а также амортизационные отчисления на ЕО. Также блок проводит уточненный расчет диаметров и толщин стенок трубопроводов-спутников после завершения трассировки систем теплого обогрева СТТ. Исходя из результатов уточненного расчета выбираются экономически обоснованные диаметры и толщины стенок ТП, отвечающие минимуму капитальных и эксплуатационных затрат.

Блок 5. «Подготовка системы теплого обогрева к выпуску». Блок используется для подготовки трасс к выпуску аксонометрических чертежей систем теплого обогрева СТТ и передачи данных для оптимизации теплоизоляционных конструкций СТТ.

Структура и интерфейс программного модуля «Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплого обогрева сложных технологических трубопроводов» представлены на рисунках 3.2.6-3.2.7.

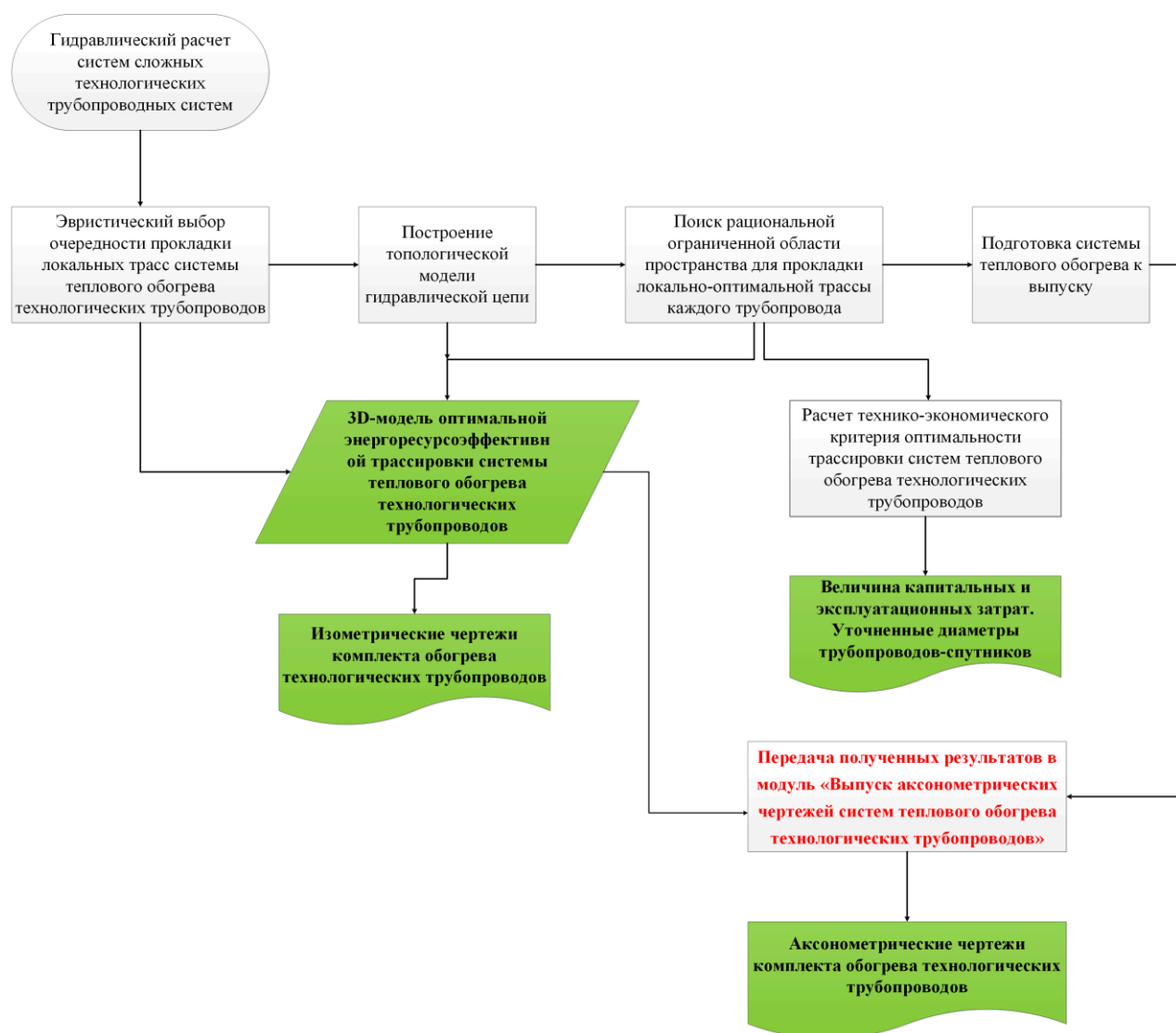


Рис. 3.2.6. Структура программного модуля «Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов»



Рис. 3.2.7. Интерфейс программного модуля «Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов»

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

Программный модуль «Выпуск аксонометрических чертежей систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» используется для выпуска конечных документов отдельным комплектом «Обогрев технологических трубопроводов».

Общие указания по рабочим чертежам оформляются на первом листе комплекта ОТТ. В нем должна содержаться следующая информация:

- план расположения гребенок;
- перечень систем обогрева;
- схемы крепления;
- эскизы обогрева типовых узлов;
- расшифровка условных обозначений;
- расшифровка специальных условных обозначений;
- расшифровка обозначения трубопроводов;
- общие примечания к данному комплекту чертежей.

Чертежи трасс систем теплового обогрева СТТ выполняются в аксонометрическом виде с применением приложения Draft AVEVA PDMS PDMS (приложения Draw AVEVA Everything 3D). Контур системы теплового обогрева отображается на отдельном листе. На чертежах указываются следующие обозначения и информация:

- позиции обогревающих трубопроводов-спутников;
- позиции обогреваемых ТП;
- позиции ЕО;
- маркировка распределительных гребёнок;
- номера запиток / распиток систем теплового обогрева;

- информация о прокладке обогревающего трубопровода-спутника в общей изоляции с обогреваемым ТП;
- диаметр и число обогревающих трубопроводов-спутников;
- таблица порядка обогрева трубопроводов.

Интерфейс модуля «Выпуск аксонометрических чертежей систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов» представлен на рисунках 3.2.8.

Формирование документов марки ОТТ

Построить таблицу Установить направление вида Установить направление потока Справка WIKI Закрыть

Список штуцеров систем обогрева Таблица обогрева

Drag a column header here to group by that column.

Поз.	Описание	Позиция линии обогрева	Позиция обогреваемого трубопровода	Длина, м
1	Запитка т.с. от ЗВРГ № 40-1.1	HWS-323-0006-03	-	17.0
2	Запитка т.с. к Р-323-0002-03	-	Р-323-0002-03	24.4
3	Распитка т.с. от Р-323-0002-03	-	Р-323-0002-03	0.0*
4	Запитка т.с. к Р-323-0002-02	-	Р-323-0002-02	11.9
5	Распитка т.с. от Р-323-0002-02	-	Р-323-0002-02	0.0*
6	Запитка т.с. к Р-323-0002-08	-	Р-323-0002-08	7.5
7	Распитка т.с. от Р-323-0002-08	-	Р-323-0002-08	0.0*
8	Запитка т.с. к Р-323-0002-02	-	Р-323-0002-02	1.2
9	Распитка т.с. от Р-323-0002-02	-	Р-323-0002-02	0.0*
10	Запитка т.с. к Р-323-0002-07	-	Р-323-0002-07	0.8
11	Распитка т.с. от Р-323-0002-07	-	Р-323-0002-07	0.0*
12	Запитка т.с. к Р-323-0002-07	-	Р-323-0002-07	0.3
13	Распитка т.с. от Р-323-0002-07	-	Р-323-0002-07	0.0*
14	Запитка т.с. к Р-323-0002-02	-	Р-323-0002-02	4.4
15	Распитка т.с. от Р-323-0002-02	-	Р-323-0002-02	0.0*
16	Запитка т.с. к Р-323-0002-01	-	Р-323-0002-01	15.4
17	Распитка т.с. от Р-323-0002-01	HWS-323-0006-07	-	5.0
18	Запитка т.с. к Р-323-0002-09	-	Р-323-0002-09	3.6
19	Распитка т.с. от Р-323-0002-09	HWS-323-0006-08	-	5.6
20	Запитка т.с. к Р-323-0009-03	-	Р-323-0009-03	3.4
21	Распитка т.с. от Р-323-0009-03	HWS-323-0006-09	-	6.0
22	Запитка т.с. к Р-323-0009-01	-	Р-323-0009-01	35.9
23	Разворот т.с. на Р-323-0009-01	-	Р-323-0009-01	0.0*
24	Разворот т.с. на Р-323-0009-01	-	Р-323-0009-01	35.9
25	Распитка т.с. от Р-323-0009-01	HWS-323-0006-10	-	4.8
26	Запитка т.с. к Р-323-0009-03	-	Р-323-0009-03	3.5
27	Распитка т.с. от Р-323-0009-03	HWS-323-0006-11	-	5.5
28	Запитка т.с. к Р-323-0002-09	-	Р-323-0002-09	3.7

Total Items = 40

Рис. 3.2.8. Интерфейс модуля «Выпуск аксонометрических чертежей систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов»

3.2.5 Интерфейс передачи данных для оптимизации теплоизоляционных конструкций сложных технологических трубопроводов

Для оптимизации теплоизоляционных конструкций СТТ, обогреваемых тепловыми спутниками, выбрана программа «Изоляция». Программа разработана ООО НТП «Трубопровод» для расчета и выбора тепловой изоляции трубопроводов, арматуры и оборудования, автоматического формирования проектных документов на тепловую изоляцию.

Алгоритм программы основан на действующем СП 61.13330.2012 (с Изменением №1) [18] по проектированию тепловой изоляции, а также соответствующим отраслевым нормам НР 34-70-118-87 [85].

В программе использованы расчетные формы [86], методические и информационные материалы, подготовленные специалистами ОАО «Теплопроект», а также ряд методик, описанных в [4-6, 89], в том числе для расчета толщины изоляционного кожуха в СТС из нескольких трубопроводов с движущимся или неподвижным (период остановки) изотермическим продуктом.

В программе «Изоляция» имеется возможность импортировать данные из текстовых файлов формата .csv (разделители – точки с запятой). Для этого необходимо выбрать соответствующую команду подменю Файл основного меню и выбрать файл проекта для загрузки. По окончании работы программы импорта в дереве проектов будет создан новый проект. Если в процессе синтаксического контроля файла обнаружатся ошибки, их перечень будет представлен пользователю в диалоговом окне. Элементы, при импорте которых возникли различного рода ошибки или предупреждения, можно отметить в дереве проекта галочками, чтобы затем пустить на расчет только их или же, наоборот, исключить их из перечня рассчитываемых объектов.

В силу иерархической структуры данных программы «Изоляция», открытый формат представляет собой совокупность связанных таблиц (рис. 3.2.9).

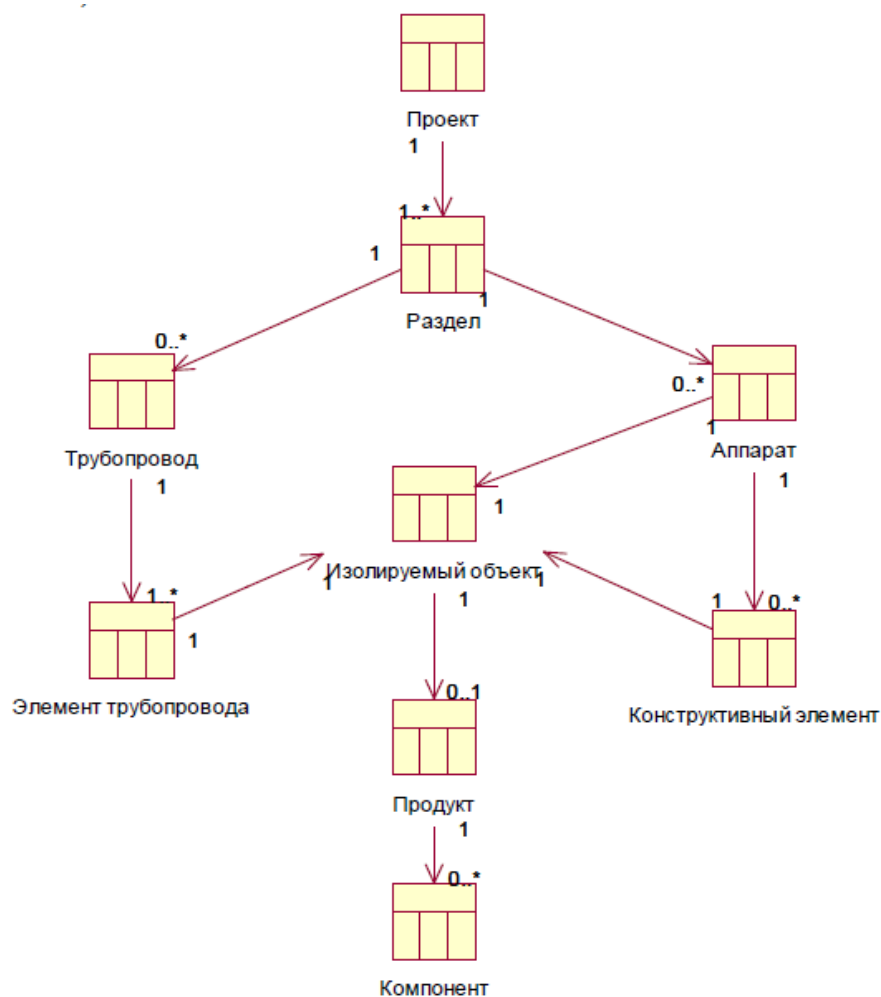


Рис. 3.2.9. Структура файла открытого формата

Каждая таблица представляет собой файл формата .csv, в котором в качестве разделителя используется точка с запятой. Структура каждого из файлов приведена в [112].

После завершения этапа проектирования системы теплого обогрева, составляется список трубопроводов для оптимизации теплоизоляционных конструкций СТТ. Далее элементы СТТ из списка разбираются на составляющие простейшие элементы: участки труб, фитинги, арматуру и т.п. При этом каждому простейшему элементу сопоставляются элементы, описанные в структуре файлов открытого формата ПО «Изоляция», элементы со сходными характеристиками (внешний диаметр, температура, наименование и др.) в рамках одного элемента трубопровода суммируются: участки труб – по длине,

арматура – по количеству. Гнутые отводы и тройники представляются соответствующими им по длине участками труб [112].

Далее полученные массивы элементов записываются в файлы project.csv, Section.csv, Pipeline.csv, Pipe.csv, Insul_obj.csv в соответствии со структурой файлов открытого формата ПО «Изоляция» и передаются оптимизации теплоизоляционных конструкций СТТ (см. рис. 3.2.10).

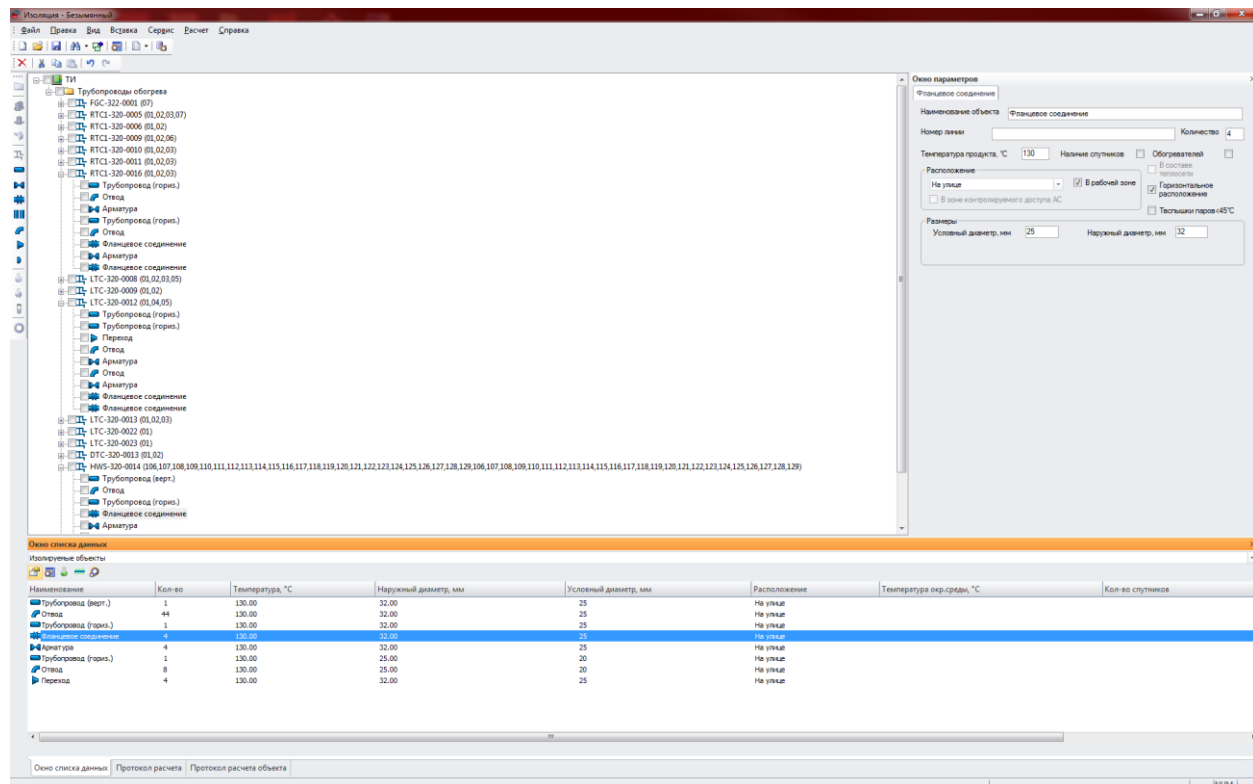


Рис. 3.2.10. Оптимизация теплоизоляционных конструкций СТТ в ПО «Изоляция»

3.3 Информационное обеспечение комплекса программ

Инженерно-технические и гидродинамические ограничения на этапах разработанного декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ в диалоговом режиме отображены в виде сформулированных ЭП (см. разд. 2.6), которые перерабатывают знания о монтажно-технологических операциях и сущности физико-химических процессов, определенных лицом,

принимающим решения (ЛПР), в формализованные данные по размещению конкретного объекта.

При использовании объектно-ориентированного программирования каждое ЭП представляет собой некоторую функцию (Function) [113], имеющую следующую структуру:

```
define function !!rule_i ()  
  
    IF (some !conditions) THEN  
  
        (certain !actions)  
  
    endfunction  
  
call !!rule_i ()
```

Функции ЭП программно реализованы на макроязыке программирования RML [113]. При вызове RML-функции, она загружается автоматически из исходного файла в каталоге, объявленном с помощью переменной среды.

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

Разработанный комплекс программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ позволяет выполнять следующие функции:

- 1) формировать ЭП, отражающих требуемые технологические, гидродинамические, инженерные, конструкционные, физико-химические и технико-экономические ограничения размещения трасс ТП, в соответствии со СНиП;
- 2) выполнять автоматизированную трассировку систем теплового обогрева СТТ с учетом запрещенных зон, заданных пользователем;
- 3) разрабатывать пространственной модели систем теплового обогрева СТТ (см. рис. 3.4.1);

- 4) выполнять трассировку систем теплового обогрева СТТ на конечной стадии разработки проектной документации, учитывая все последние изменения в проекте;
- 5) контроль за изменениями при трассировке систем теплового обогрева;
- 6) выпуск изометрических (см. рис. 3.4.2) и аксонометрических (см. рис. 3.4.3-3.4.4) чертежей оптимальных энергоресурсоэффективных трасс систем теплового обогрева, спецификации изделий и материалов (см. рис. 3.4.5) и спецификации по теплоизоляционной конструкции (см. рис. 3.4.6) систем теплового обогрева СТТ.

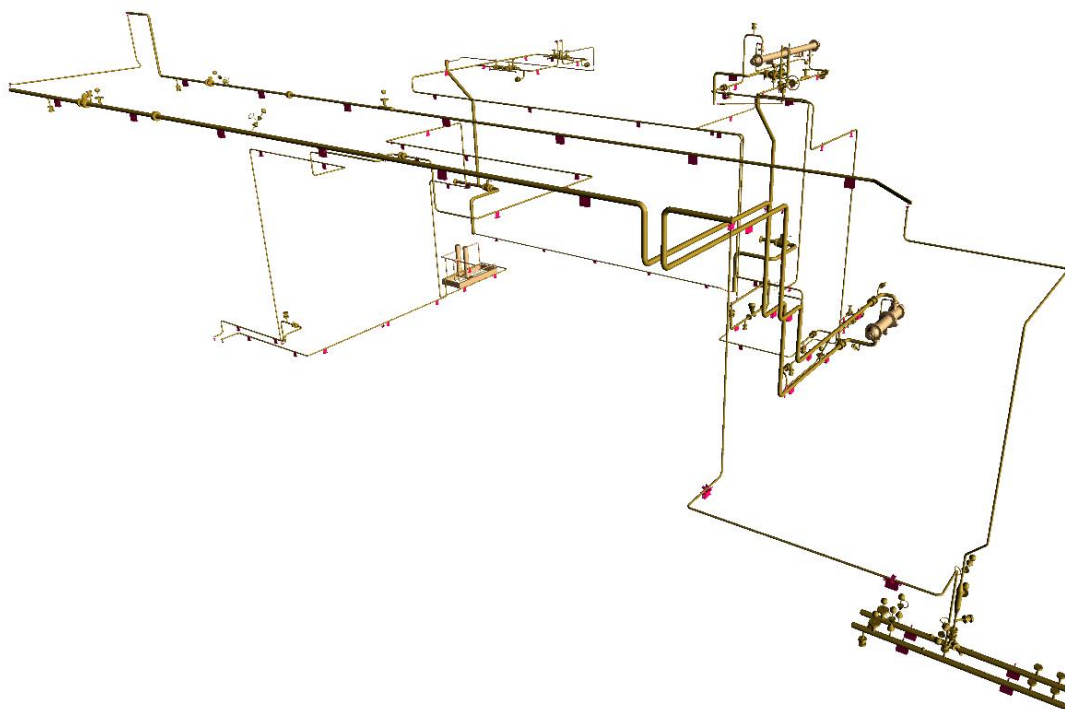


Рис. 3.4.1. Пример оптимальной трассировки системы теплового обогрева СТТ

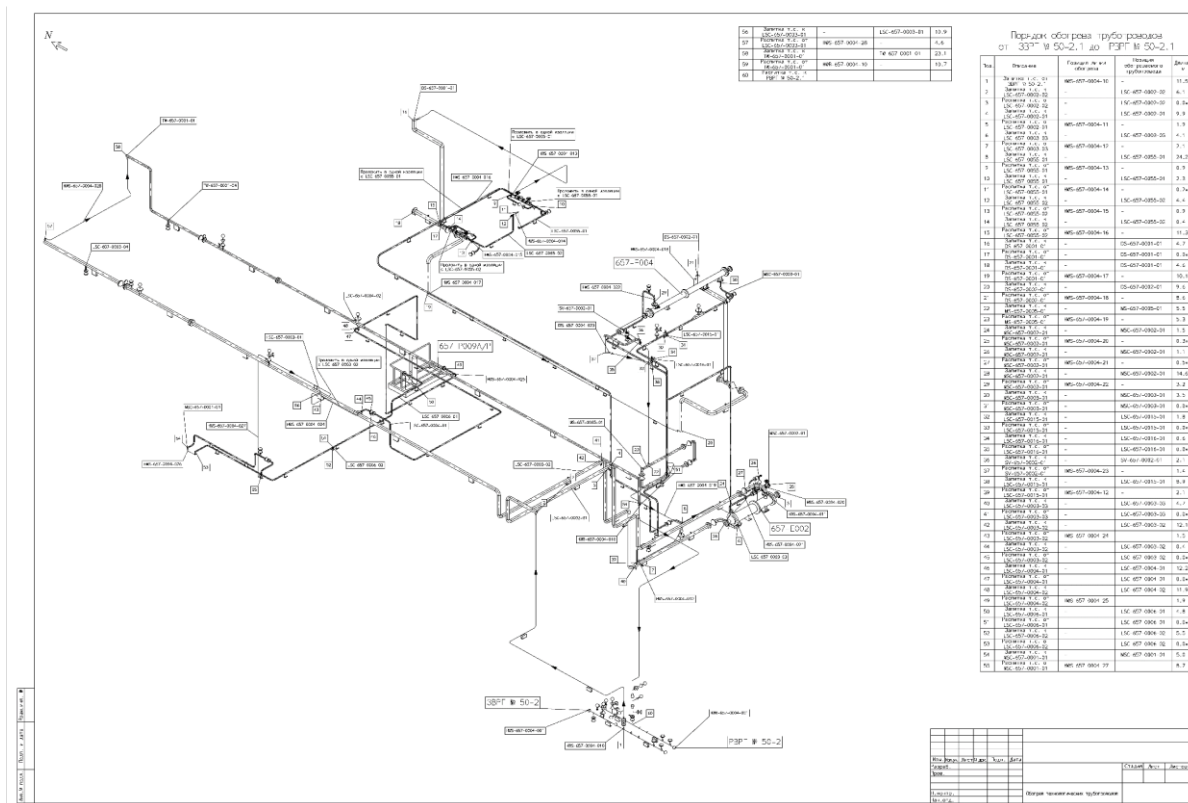


Рис. 3.4.4. Пример чертежа марки ОТТ системы теплового обогрева СТТ

Позиция	Наименование и техническая характеристика	Тип, марка, обозначение документа, опросного листа	Код оборудования, изделия, материала	Завод, изготовитель	Единица измерения	Количество	Масса, кг	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Дополнительные материалы для обогрева технологических трубопроводов							
	1 Краны шаровые	Кран						
	1.1 Кран шаровой, фланцевый исп.1, PN1.6 МПа. Материал корпуса Сталь 20 ГОСТ 1050-88. Класс герметичности затвора - А по ГОСТ Р 54888-2011							
	PN20 КШ 20.16.3110				шт.	18	3.15	
	2 Трубы	ГОСТ 8734-75						
	2.1 Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Группа «В». Сталь 20 ГОСТ 8733-74. Гидравлические испытания по ГОСТ 3845-75. Технологические испытания по ГОСТ 8733-74 пп. 1.10, 1.11, 1.12, 1.13							
	25х3.5				м	45.1	1.86	
	32х3.5				м	2.1	2.46	
	3 Переходы	ОСТ 56-44-81						
	3.1 Переходы формованные сварные. Сталь 20 ГОСТ 1050-88							
	25х20х3.5				шт.	37	24	
	4 Фланцы	ГОСТ 12821-80						
	4.1 Фланцы стальные приварные встык. Сталь 20 ГОСТ 1050-88							
	1-20-16				шт.	18	1.05	
	5 Заглушки	АТК 24.200.02-90						
	5.1 Заглушки фланцевые. Сталь 20 ГОСТ 1050-88							
	1-20-4.0				шт.	18	1.	
	6 Прокладки	ТУ 5728-006-93878201-2008						
	6.1 Прокладки уплотнительные из термостойкого графита, с внутренним и внешним защитными кольцами, МП-2-212 по ТУ 5728-004-93878201-2007							
	ПУТТ-А-2-212-04-20-1-6-2.0(20-2)				шт.	36		
	7 Крепеж	ОСТ 26-2040-96						
	7.1 Шпильки резьбовые. Сталь 35 ГОСТ 1050-88							
	2-1-M12-49x70.35				шт.	144		
	7.2 Гайки. Сталь 20 ГОСТ 1050-88	ОСТ 26-2041-96						

Рис. 3.4.5. Пример спецификации изделий и материалов системы теплового обогрева СТТ

Позиция	Наименование и техническая характеристика	Тип, марка обозначение документа, описного листа	Код оборудования, изделия, материала	Завод-изготовитель	Единица измерения	Количество	Масса единицы, кг	Примечание																																																																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																																								
1	Маты теплоизоляционные "ТЕХ МАТ" из минеральной ваты ТЕХ МАТ-5000.1000.50	ТУ 5762-007-45757203-00 с изм. 1,2,3		Rockwool-Russia - SAO "Минеральная вата"	м3	0.193	50.000																																																																									
2	Цилиндры напыленные ROCKWOOL 100 из каменной ваты на синтетическом связующем Цилиндры напыленные ROCKWOOL 100, 32 x 30	ТУ 5762-038-45757203-13	57 6292	Rockwool-Russia - SAO "Минеральная вата"	м	6.661																																																																										
3	Сталь тонколистовая оцинкованная в том числе: Лист ОЦ- 0.50x800x1000 Лист ОЦ- 0.80x800x1000 Лист ОЦ- 1.00x800x1000	ГОСТ 14918-80*	11 1110		м2	19.361																																																																										
4	Фольга алюминиевая для технических целей	ГОСТ 618-73*	18 1119		кг	0.947																																																																										
5	Фольга ДПРМ 0.10x500 НД АД1М	ГОСТ 6292-85*	23 1712		кг	0.002																																																																										
6	Краска масляная густотертая	ГОСТ 12085-88	57 4314		кг	0.0008																																																																										
7	Мел природный обогащенный	ГОСТ 12085-88	57 4314		кг	0.0008																																																																										
8	Мел ИМС	ГОСТ 12085-88	57 4314		кг	0.0008																																																																										
9	Смесь "Оксоль"	ГОСТ 180-78	23 1831 0100		кг	0.014																																																																										
10	Клей казеиновый в порошке. Марка "Обыкновенный"	ГОСТ 3056-90	92 1943		кг	0.0004																																																																										
11	Клей ОБ	ГОСТ 3056-90	92 1943		кг	0.0004																																																																										
12	Белила цинковые густотертые	ГОСТ 482-77*	23 1711		кг	0.016																																																																										
13	Белила МА-011	ГОСТ 482-77*	23 1711		кг	0.016																																																																										
14	Асбокартон марки КАОН - 3 (общего назначения) КАОН-3 - 8.0-1000x800	ТУ 2576-05778230-3-99			кг	0.019																																																																										
15	Лента стальная горячекатаная	ГОСТ 6009-74*	9 3500		кг	0.132																																																																										
16	Лента 3x30	ГОСТ 6009-74*	9 3500		кг	0.132																																																																										
17	Лента стальная упаковочная из ст. 3	ГОСТ 3560-73*	12 3100		кг	3.058																																																																										
18	Лента 0,7x20	ГОСТ 3560-73*	12 3100		кг	3.058																																																																										
19	Винты самонарезающие с полукруглой головкой 4x10-01 из стали	ГОСТ 10621-80*	12 8400		кг	0.342																																																																										
20	Болт с шестигранной головкой в том числе:	ГОСТ 7798-70	12 8200		кг	0.394																																																																										
<table border="1"> <tr> <td colspan="6">ТИ-01-002-ТИ.С</td><td colspan="3"></td></tr> <tr> <td colspan="6">Комплексное производство</td><td colspan="3"></td></tr> <tr> <td>Изм.</td><td>Разр.</td><td>Исп.</td><td>Внес.</td><td>Соглас.</td><td>Дата</td><td colspan="3"></td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="3"></td></tr> <tr> <td colspan="6">Утверждена</td><td>Страниц</td><td>Лист</td><td>Листов</td></tr> <tr> <td colspan="6"></td><td>Р</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr> <td colspan="6">Спецификация</td><td colspan="3"></td></tr> <tr> <td colspan="6"></td><td colspan="3"></td></tr> </table>									ТИ-01-002-ТИ.С									Комплексное производство									Изм.	Разр.	Исп.	Внес.	Соглас.	Дата													Утверждена						Страниц	Лист	Листов							Р	1	3	Спецификация																	
ТИ-01-002-ТИ.С																																																																																
Комплексное производство																																																																																
Изм.	Разр.	Исп.	Внес.	Соглас.	Дата																																																																											
Утверждена						Страниц	Лист	Листов																																																																								
						Р	1	3																																																																								
Спецификация																																																																																

Рис 3.4.6. Пример спецификации по теплоизоляционной конструкции системы теплового обогрева СТТ

В соответствии с разработанной архитектурой комплекса программ (см. разд. 3.2) следует выделить приведенные ниже основные этапы по трассировке систем теплового обогрева СТТ:

- 1) этап гидравлического расчета систем теплового обогрева СТТ; По окончанию трассировки систем теплового обогрева осуществляется окончательный расчет диаметров ТП;
- 2) этап эвристического выбора очередности прокладки локальных трасс системы теплового обогрева СТТ, используя в диалоговом режиме набор сформулированных ЭП, которые перерабатывают знания о монтажно-технологических операциях и сущности физико-химических процессов, определенных ЛПР, в формализованные данные по размещению конкретного объекта;

- 3) этап построения топологической модели гидравлической цепи в виде гидравлического структурного графа с учетом инженерно-технических и гидродинамических ограничений;
- 4) этап определения рациональной ограниченной области пространства для размещения локально-оптимальной трассы каждого ТП в виде каналов и зон с использованием процедуры ограниченного перебора альтернативных вариантов трасс с применением МВГ с лучевой стратегией ветвления на ДВР;
- 5) этап расчета технико-экономического критерия оптимальности (2.6.4) трассировки систем теплого обогрева СТТ;
- 6) этап выпуска изометрических и аксонометрических чертежей оптимальных энергоресурсоэффективных трасс систем теплого обогрева, спецификации изделий и материалов;
- 7) этап передачи данных для оптимизации теплоизоляционных конструкций СТТ выпуска спецификации по теплоизоляционной конструкции систем теплого обогрева СТТ.

3.5 Проверка эффективности алгоритма теплогидродинамических расчетов сложных технологических трубопроводов

Для обоснования эффективности алгоритма теплогидродинамических расчетов СТТ проведены сравнения аппроксимирующего аналитического и численного решений моделирования 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 :

$$\|R^{\text{ан}} - R^{\text{числ}}\| = \sum_{i=1}^N [R^{\text{ан}}(x_i, y_i) - R^{\text{числ}}(x_i, y_i)]^2 \quad (3.5.1)$$

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

Значения коэффициентов теплопередачи от обогревающего трубопровода-спутника к воздуху внутри замкнутого межтрубного пространства, образованного изоляционным кожухом и нижней поверхностью ТП, от воздуха к обогреваемому ТП, от воздуха к внутренней поверхности изоляционного кожуха, от наружной поверхности изоляционного кожуха в окружающую среду были приняты в соответствии с рекомендациями [4, 5]. Данные рекомендации учитывают влияние не только конвективной составляющей, но и теплопередачи излучением. Теплопроводность изоляции (для упрощения расчетов и моделирования) была принята постоянной и равной $0,039 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$.

На графиках ниже показано сравнение аналитического и численного решений для определения температуры нижней и верхней части поверхности ТП, температуры неподвижного продукта, определения и плотностей тепловых потоков.

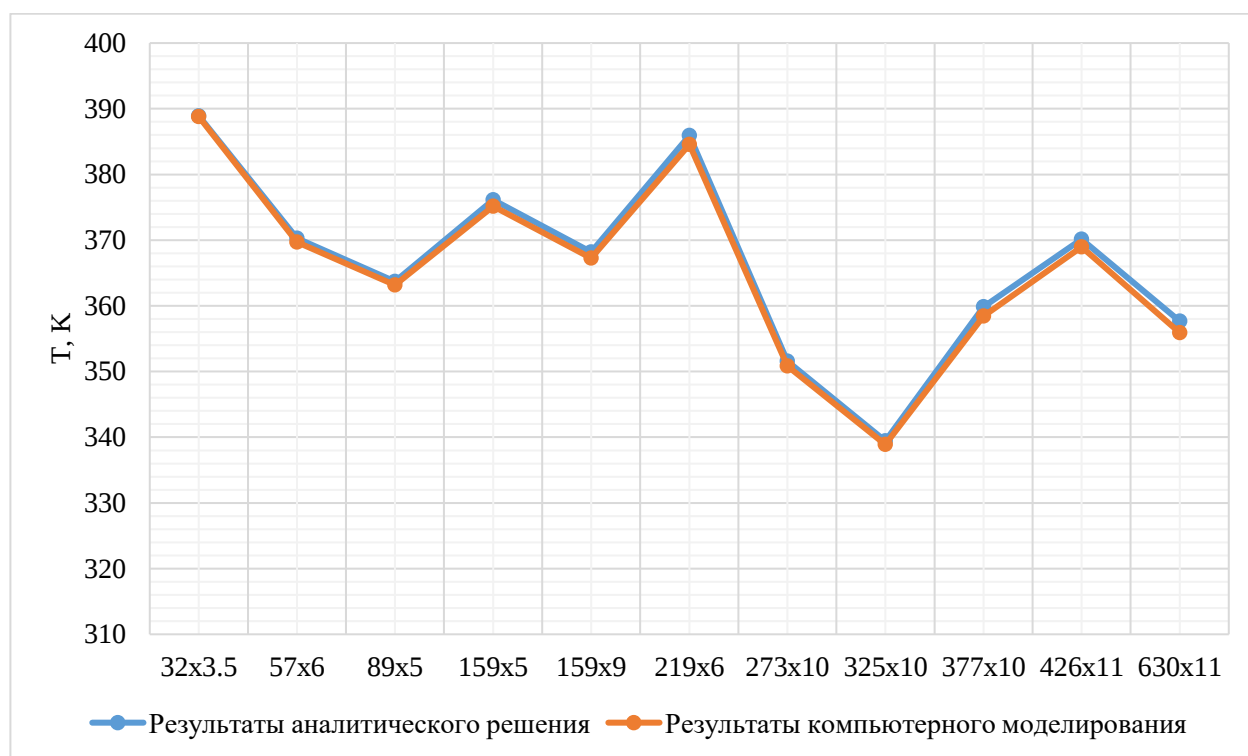


Рис. 3.5.1. График температуры верхней части поверхности ТП

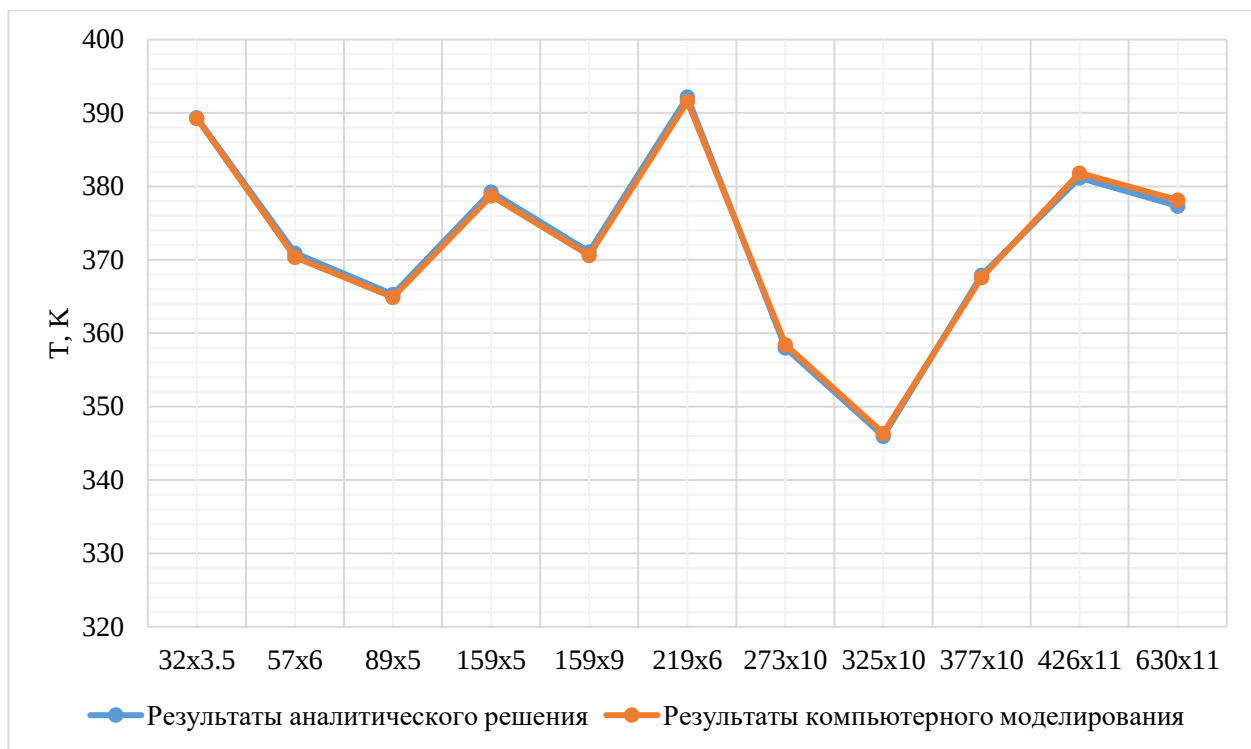


Рис. 3.5.2. График температуры нижней части поверхности ТП

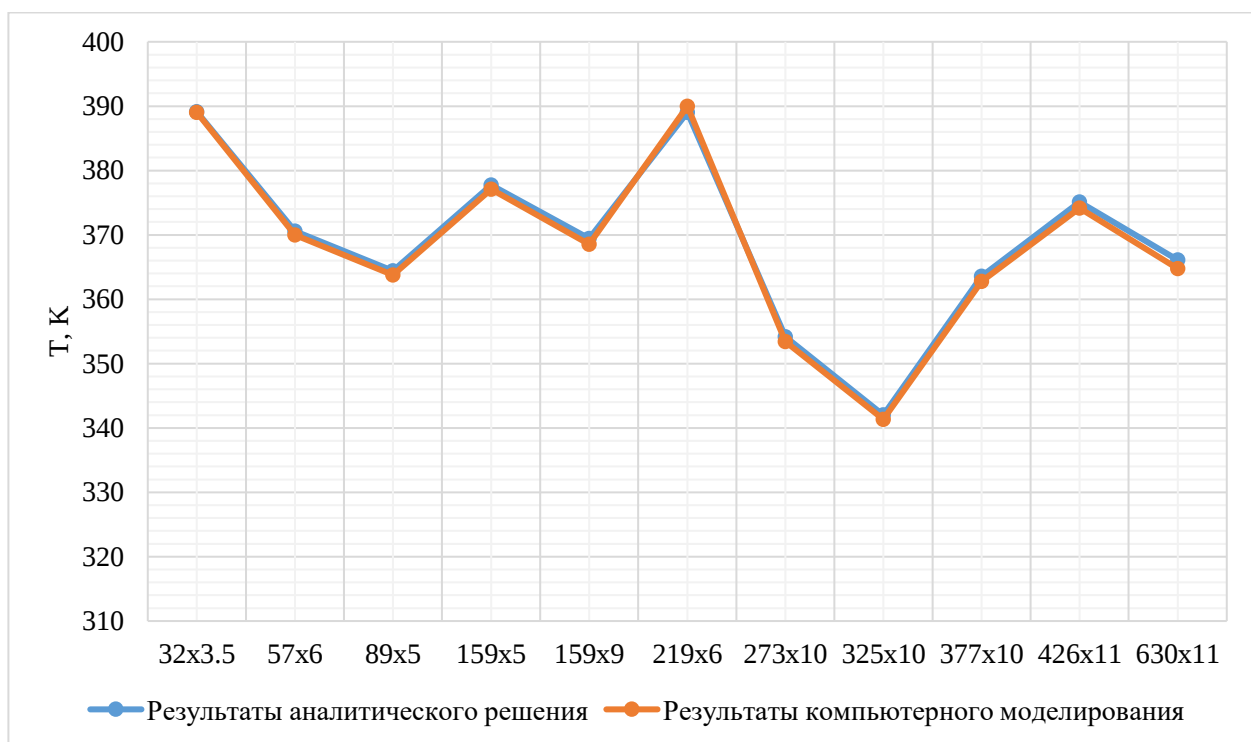


Рис. 3.5.3. График температуры остановленного продукта

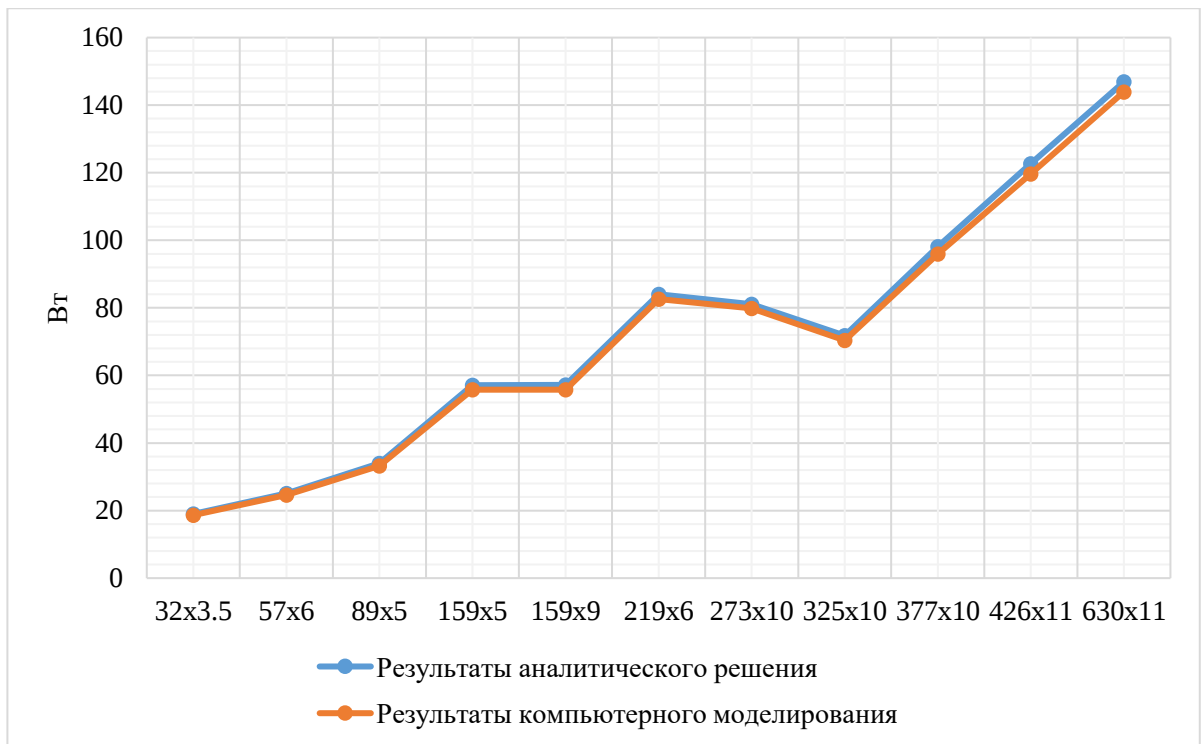


Рис. 3.5.4. График плотности теплового потока от обогревающего трубопровода-спутника к межтрубному пространству

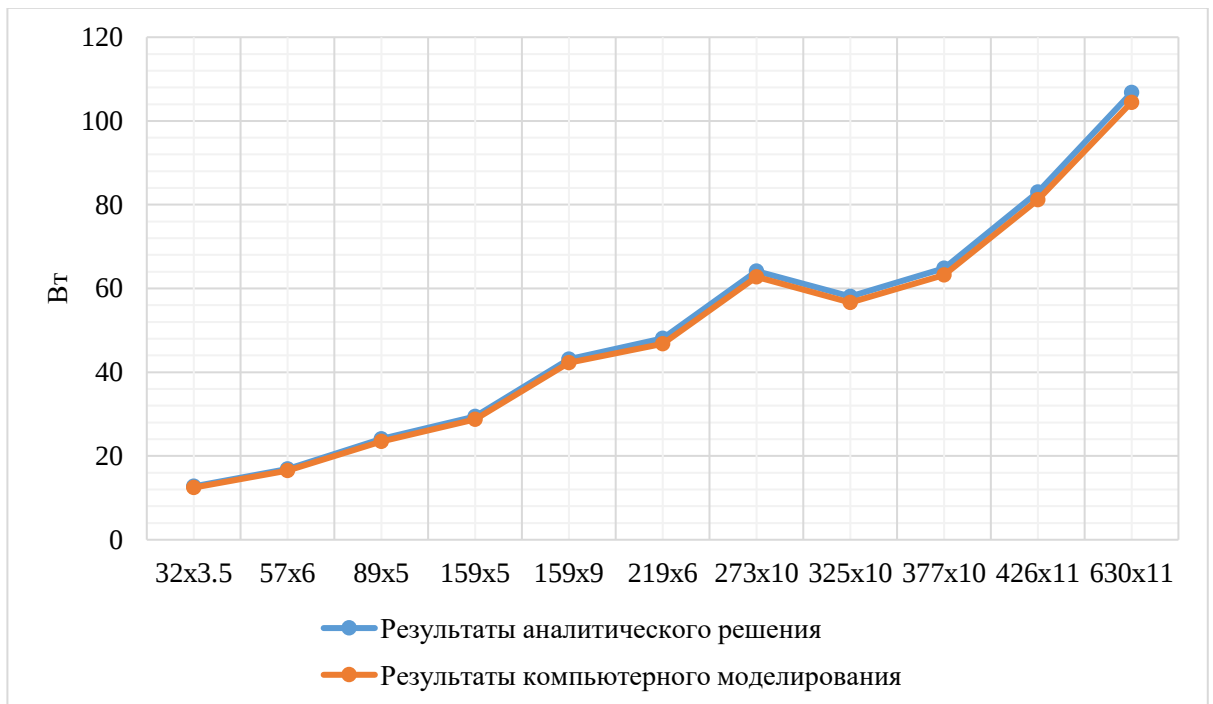


Рис. 3.5.5. График плотности теплового потока от межтрубного пространства к ТП

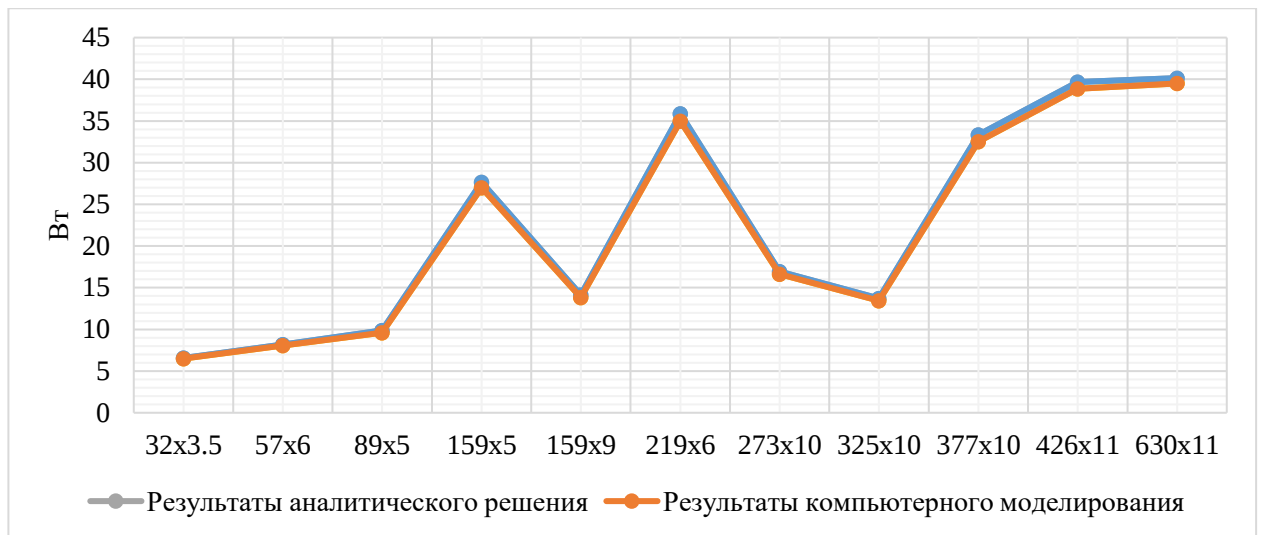


Рис. 3.5.6. График плотности теплового потока от межтрубного пространства через изоляцию в окружающую среду

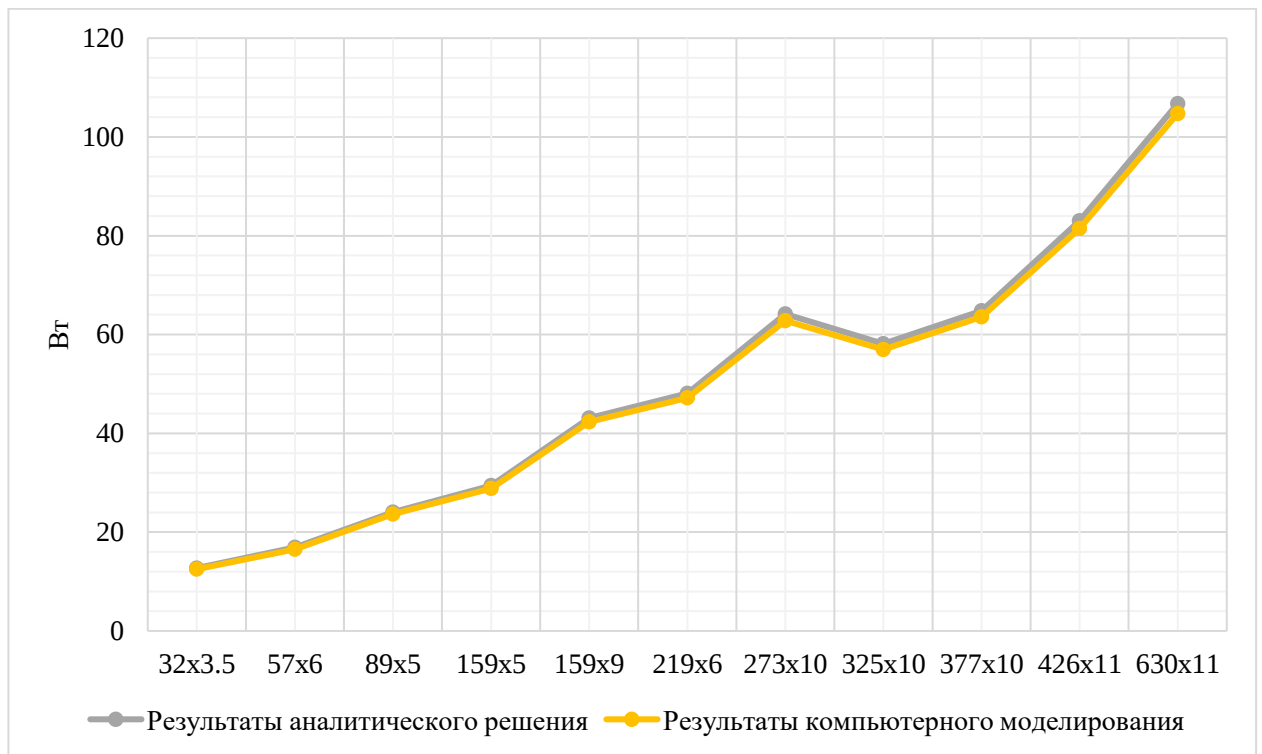


Рис. 3.5.7. График плотности теплового потока от ТП через изоляцию в окружающую среду

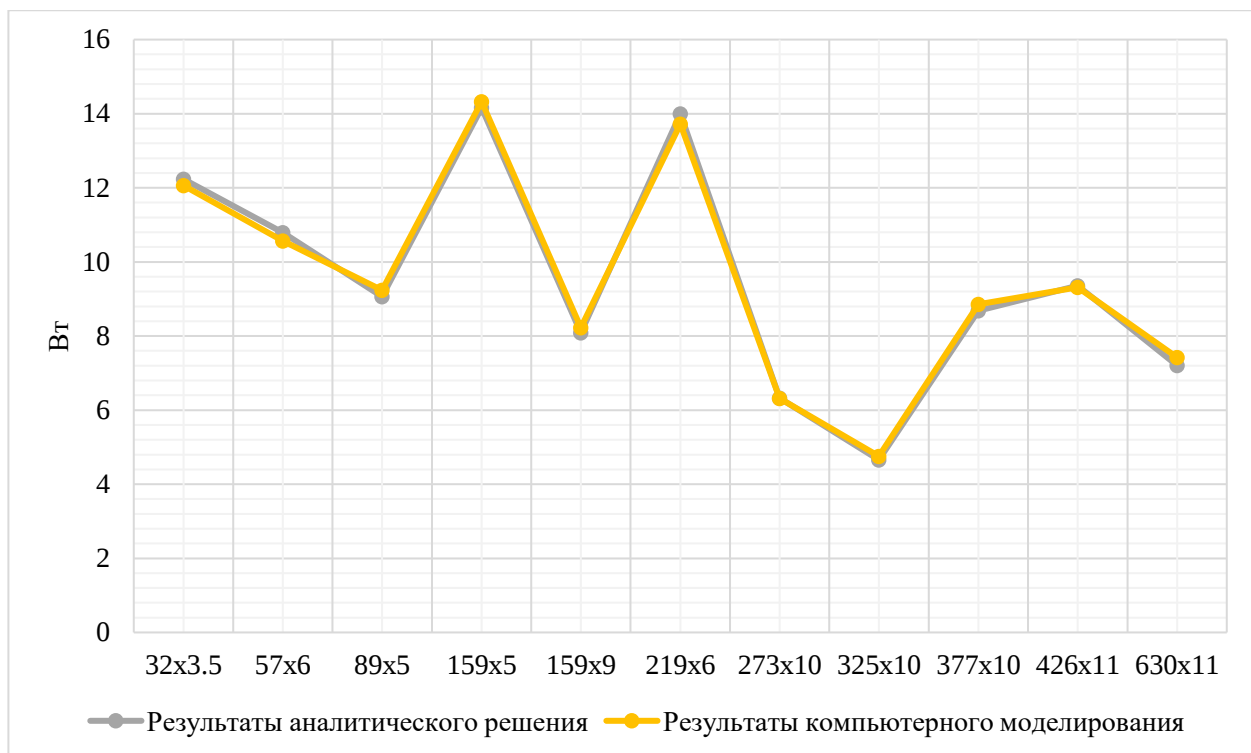


Рис. 3.5.8. График плотности теплового потока от обогревающего трубопровода-спутника через изоляцию в окружающую среду

Результаты аналитического и численного решений представлены в таблицах ниже:

Таблица 3.5.1. Абсолютные отклонения температур нижней и верхней части поверхности ТП и температуры неподвижного продукта

Наружный диаметр X Толщина стенки	$\Delta T_{\text{верх.части тр.}}$ К	$\Delta T_{\text{нижн.части тр.}}$ К	$\Delta T_{\text{неподв.прод.}}$ К
32x3.5	0.13	0.1	0.12
57x6	0.59	0.56	0.61
89x5	0.55	0.36	0.65
159x5	0.95	0.53	0.66
159x9	0.92	0.5	0.85

219x6	1.37	0.6	0.97
273x10	0.73	0.4	0.72
325x10	0.54	0.39	0.67
377x10	1.41	0.29	0.78
426x11	1.17	0.67	0.97
630x11	1.71	0.81	1.338

Таблица 3.5.2. Относительные отклонения температур нижней и верхней части поверхности ТП и температуры неподвижного продукта.

Наружный диаметр X Толщина стенки	$\delta T_{\text{верх.части тр.}}$ %	$\delta T_{\text{нижн.части тр.}}$ %	$\delta T_{\text{неподв.прод.}}$ %
32x3.5	0.033	0.026	0.031
57x6	0.159	0.151	0.165
89x5	0.151	0.099	0.178
159x5	0.253	0.140	0.175
159x9	0.250	0.135	0.230
219x6	0.355	0.153	0.249
273x10	0.208	0.112	0.203
325x10	0.159	0.113	0.196
377x10	0.392	0.079	0.215
426x11	0.316	0.176	0.259
630x11	0.478	0.215	0.365

Таблица 3.5.3. Абсолютные отклонения плотностей тепловых потоков.

Наружный диаметр X Толщина стенки	$\Delta F_{\text{сп.}}$, Вт	$\Delta F_{\text{тр.}}$, Вт	$\Delta F_{\text{из.пот.}}$, Вт	$\Delta F_{\text{тр.пот.}}$, Вт	$\Delta F_{\text{сп.пот.}}$, Вт
32x3.5	0.36	0.292	0.067	0.238	0.173
57x6	0.504	0.393	0.111	0.374	0.23
89x5	0.732	0.563	0.269	0.407	0.17
159x5	1.315	0.683	0.672	0.578	0.168
159x9	1.429	0.821	0.308	0.78	0.143
219x6	1.346	1.357	0.889	0.932	0.276
273x10	1.238	1.446	0.293	1.369	0.011
325x10	1.478	1.482	0.296	1.14	0.098
377x10	2.193	1.593	0.8	1.28	0.17
426x11	3.042	1.836	0.805	1.517	0.049
630x11	2.944	2.308	0.636	2.022	0.223

Таблица 3.5.4. Относительные отклонения плотностей тепловых потоков.

Наружный диаметр X Толщина стенки	$\delta F_{\text{сп.}}$, %	$\delta F_{\text{тр.}}$, %	$\delta F_{\text{из.пот.}}$, %	$\delta F_{\text{тр.пот.}}$, %	$\delta F_{\text{сп.пот.}}$, %
32x3.5	1.894	2.292	1.021	1.868	1.414
57x6	2.007	2.323	1.356	2.210	2.131
89x5	2.157	2.340	2.722	1.692	1.875

159x5	2.304	2.322	2.430	1.965	1.187
159x9	2.498	1.906	2.179	1.811	1.769
219x6	1.603	2.821	2.478	1.937	1.972
273x10	1.527	2.253	1.731	2.133	0.174
325x10	2.057	2.550	2.156	1.962	2.104
377x10	2.234	2.457	2.401	1.974	1.957
426x11	2.480	2.212	2.028	1.828	0.524
630x11	2.004	2.162	1.584	1.894	3.096

Графики иллюстрируют хорошее совпадение численного и аналитического решений по определению температуры нижней и верхней части поверхности ТП и температуры неподвижного продукта во всех случаях и определения плотностей тепловых потоков, что подтверждает корректность разработанных алгоритмов.

3.6 Выводы

1. Разработана архитектура комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ. Описаны структура и программные реализации программных модулей в составе комплекса программ;
2. Описаны режимы функционирования и методика работы с комплексом программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ;
3. Разработано информационное обеспечение комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ в виде базы эвристических правил, программно реализованных на макроязыке программирования PML;

4. Обоснована эффективность разработанного алгоритма теплогидродинамических расчетов СТТ на основе проведенной серии вычислительных экспериментов.

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

С применением разработанного комплекса программ (см. гл. 3) была решена задача оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ установки производства элементарной серы. Оптимальная трассировка систем теплового обогрева СТТ обеспечивает: снижение капитальных затрат на ТП за счет уменьшения их протяженности, упрощением конфигурации трассы и выбором оптимальных диаметров и толщин стенок ТП; снижением энергозатрат на транспортировку технологических потоков насосным оборудованием.

«На нефтеперерабатывающих заводах серу получают из технического сероводорода. На отечественных НПЗ сероводород в основном выделяют с помощью 15 %-ного водного раствора моноэтаноламина из соответствующих потоков с установок гидроочистки и гидрокрекинга. Блоки регенерации сероводорода из насыщенных растворов моноэтаноламина монтируют на установках гидроочистки дизельного топлива, керосина или бензина, гидрокрекинга или непосредственно на установках производства серы, куда собирают растворы моноэтаноламина, содержащие сероводород, с большой группы установок. Регенерированный моноэтаноламин возвращается на установки гидроочистки, где вновь используется для извлечения сероводорода» [114]. Технологическая схема установки производства серы приведена на рисунке 4.1.1 [114].

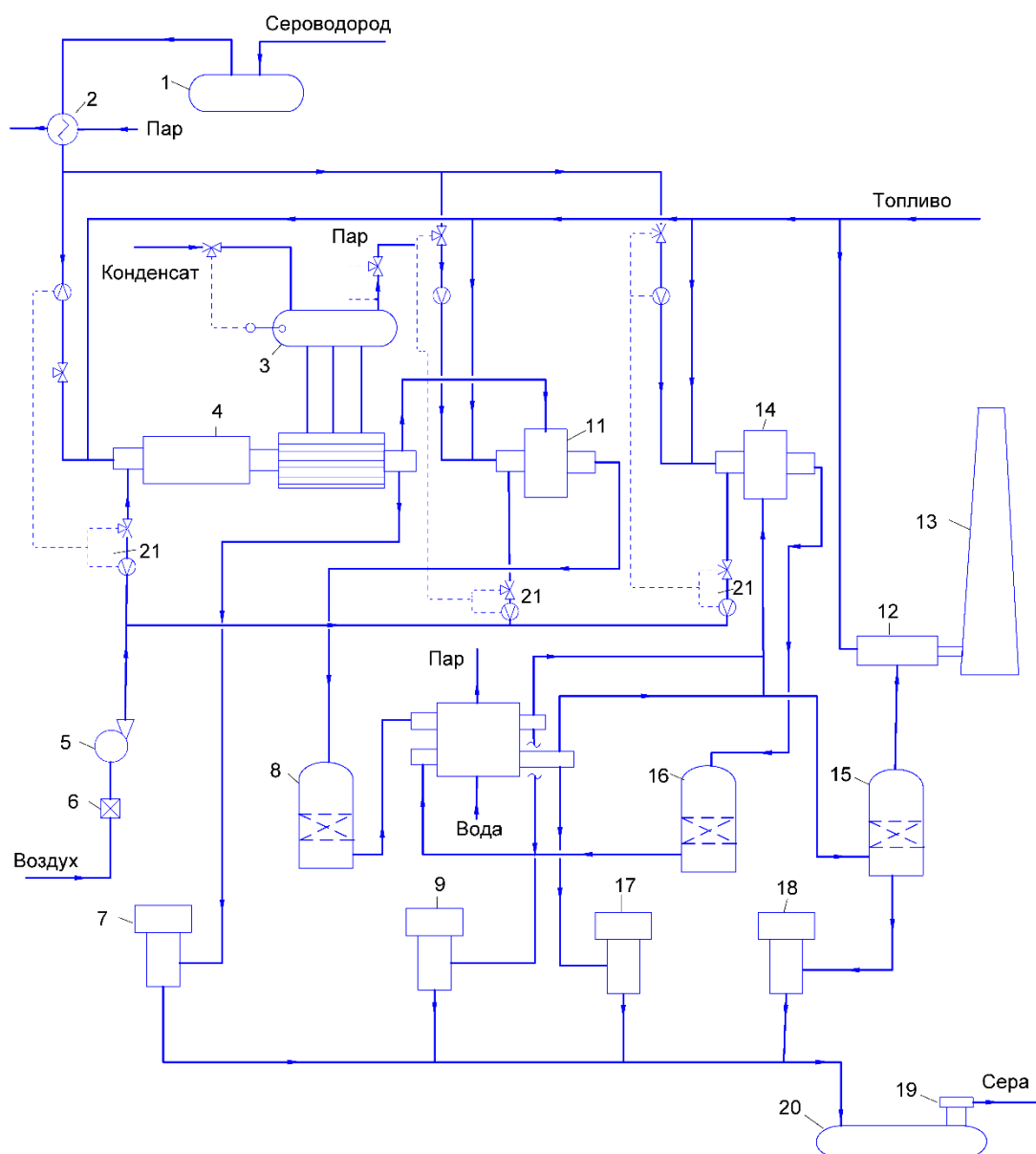


Рис. 4.1.1. Технологическая схема установки производства серы из технического сероводорода: «1 – приемник; 2 – паровой подогреватель; 3 – деаэратор; 4, 11, 14 – топки; 5 – воздуходувка; 6 – фильтр; 7, 9, 17, 18 – гидравлические затворы; 8, 16 – реакторы; 10 – конденсатор-генератор; 12 – печь дожита; 13 – дымовая труба; 15 – сероуловитель; 19 – насос; 20 – хранилище серы; 21 – регуляторы расхода с блоками соотношения воздух; сырье» [114]

Основополагающим фактором бесперебойной работы установки производства элементарной серы является поддержание температуры жидкой серы в интервале 130-150°C в ТП, ЕО и хранилище.

Особенностью проекта комплекса производства элементарной серы является большой объем работ по выполнению проекта ОТТ. В проекте, для обогрева СТТ применяются обогревающие трубопроводы-спутники (около 77% от общего числа обогреваемых труб).

Проведенный количественный анализ показал, что практически 40% ТП в проектах такого типа должны обогреваться трубопроводами-спутниками. Если перевести это в км, это около 30 км ТП. А в некоторых блоках, например, в блоке переработки хвостовых газов, этот показатель достигает порядка 50% (см. рис. 4.1.2). Такие большие объемы работ по трассировке обогревающих трубопроводов-спутников требуют оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ установки производства элементарной серы.

	Блок переработки хвостовых газов	Проект
Общее количество труб, шт.	1026	7717
Количество труб, обогреваемых теплоспутниками, шт.	455	2776
Общая длина труб, м (км)	7267 (7,3)	72094 (72,1)
Длина труб, обогреваемых теплоспутниками, м (км)	3326 (3,3)	27249 (27,2)
Соотношение длины труб, обогреваемых теплоспутниками к общей длине труб, %	45,8	37,8

Рис. 4.1.2. Количественный анализ ТП, обогреваемых трубопроводами-спутниками при проектировании установки производства элементарной серы

Задача оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ по критерию минимума приведенных затрат (2.6.4) на проектирование установки производства элементарной серы состоит из следующих подзадач:

- 1) гидравлический расчет для выбора диаметров ТП систем теплового обогрева проектируемого ХП;
- 2) определение оптимальных трасс систем теплового обогрева СТТ.

Таким образом, для заданной оптимальной технологической схемы (см. рис. 4.1.1) ХТС [1, 2], с учетом требований СНиП о необходимых стандартных строительных конструкциях ХП и зонах обслуживания ТП; параметрах физико-химических свойств технологических потоков ХТС и результатов решения задачи оптимального размещения единиц оборудования ХП [1, 13], при известных характеристиках насосов и компрессоров ХП необходимо определить такой оптимальный вариант трассировки систем теплового обогрева СТТ, при котором приведенные затраты (2.6.4) минимальны при обязательном соблюдении условий функционирования ХП по выпуску требуемых продуктов, требуемого количества и требуемого качества.

Для решения данных подзадач используется разработанный декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ, реализованный в составе комплекса программ, описанного в главе 3.

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

При определении оптимального варианта трассировки систем теплового обогрева СТТ в качестве исходных данных установлены: технологическая схема производства, типоконструкции и местоположение размещения ЕО ХП, характеристики насосов и компрессоров ХП, существующие в проекте ограничения на трассировку, технологические параметры ТП и параметры физико-химических свойств технологических потоков ХТС. При выполнении

трассировки ТП необходимо учитывать специфику технологического процесса, условия обслуживания ЕО и соблюдать условия техники безопасности.

Для поиска трассировки систем теплового обогрева СТТ используется набор ЭП, отражающих требуемые технологические, гидродинамические, инженерные, конструкционные, физико-химические и технико-экономические ограничения размещения трасс ТП, в соответствии со СНиП. Представим основные ЭП:

ЭП-1 – выбор места размещения оборудования. Например, ЭП-1.1: *{ЕСЛИ («тип ЕО – «Насос»»), ТО («расположение ЕО проводится на нулевой высотной отметке для снижения виброопасности»)}.*

ЭП-1.2: *{ЕСЛИ («тип аппарата – «Емкость» и строительные конструкции отсутствуют»), ТО («расположение ЕО производится на нулевой высотной отметке»)}.*

ЭП-1.3: *{ЕСЛИ («тип ЕО – «Емкость» и существуют строительные конструкции»), ТО («расположение ЕО производится на любой высоте»)} и т.д.*

ЭП-2 – выбор расположения пространства для обслуживания и ремонта аппаратов ХП. Например, ЭП-2.1: *{ЕСЛИ («аппарат обслуживается часто»), ТО («запретить размещение ТП в зоне обслуживания оборудования»)} и т.д.*

ЭП-3 – выбор мест расположения строительных конструкций. Например, ЭП-3.1: *{ЕСЛИ ((«тип строительной конструкции – «Эстакада»») и («строительная конструкция пересекается с автомобильными дорогами и проездами»)), ТО ((«свободная высота над проезжей частью дороги») и («проезд должен составлять не менее 5 м при условии, что просвет между наиболее возвышенной частью специализированных самоходных средств и низом сооружений должен быть не менее 1 м»)))}* и т.д.

ЭП-4 – определение параметров систем теплового обогрева технологического трубопровода. Например, ЭП-4.1: *{ЕСЛИ («тип обогрева –*

«Паровой»)), ТО («распределительный и сборный коллекторы выполняются условным диаметром D_y 50 мм»)).

ЭП-4.2: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Паровой»)), ТО («к распределительному и сборному коллекторам может быть подключено не более 8 обогревающих трубопроводов-спутников условным диаметром D_y не менее 20 мм»))}.

ЭП-4.3: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Паровой»)), ТО ((«подводящий трубопровод пара к распределительному коллектору должны быть условным диаметром D_y 50») и («отводящий трубопровод парового конденсата от сборного коллектора мм D_y 32 мм»))}.

ЭП-4.4: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Паровой»)), ТО ((«расчетная длина каждого спутника должна выбираться в зависимости от схемы подключения, расположения обогреваемого продуктопровода, температуры продукта обогреваемого трубопровода, давления в падающей линии) и (должна быть не более 150 м для пара низкого давления») и («не более 250 м для пара среднего давления»))}.

ЭП-4.5: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Водяной»)), ТО (((«распределительный коллектор выполняется условным диаметром D_y 50 мм при подключении 2÷4 спутников») и («условным диаметром D_y 80 мм – при подключении 5÷8 спутников»)) и ((«сборный коллектор выполняется условным диаметром D_y 50 мм при подключении 2÷4 спутников») и («условным диаметром D_y 80 мм – при подключении 5÷8 спутников»)))).

ЭП-4.6: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Водяной»)), ТО (((«подводящий трубопровод к распределительному коллектору должен быть условным диаметром D_y 50 мм при подключении 2÷4 спутников») и (« D_y 80 мм – при подключении 5÷8 спутников»)) и ((«отводящий трубопровод от сборного коллектора должен быть условным диаметром D_y 50 мм при подключении 2÷4 спутников») и (« D_y 80 мм – при подключении 5÷8 спутников»)))).

ЭП-4.7: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Водяной»»), ТО («к распределительному и сборному коллекторам может быть подключено не более 8 спутников условным диаметром D_y 20 мм»))}.

ЭП-4.8: {ЕСЛИ («тип обогрева – «Водяной»»), ТО ((«расчетная длина каждого спутника должна выбираться в зависимости от схемы подключения, вида и температуры теплоносителя, расположения обогреваемого продуктопровода, давления в падающей линии») и («должна быть не более 250-300 м - для промтеплофикационной и теплофикационной воды») и («не более 200-250 м - для водных растворов гликолей»))} и т.д.

ЭП-5 – определение параметров технологических потоков, между ЕО. Например, ЭП-5.1: {ЕСЛИ ((«ТП с пульсирующим потоком среды») и («необходимо максимально снизить гидравлические потери ТП»)), ТО («применяют гнутые отводы, изготавливаемые из бесшовных труб»))}.

ЭП-5.2: {ЕСЛИ («ТП испытывается на прочность и плотность совместно с ЕО»), ТО («ТП испытывают по наименьшему давлению каждого из элементов испытываемой системы»))} и т.д.

ЭП-6 – выбор направления прокладки локальной трассы ТП. Например, ЭП-6.1: {ЕСЛИ («ТП вертикальный»), ТО («прокладка ТП осуществляется только с учетом несущей способности поверхностей ЕО или строительных конструкций»))}.

ЭП-6.2: {ЕСЛИ («ТП горизонтальный»), ТО («прокладка осуществляется в сформированных каналах»))}.

ЭП-6.3: {ЕСЛИ («прокладывается локальная трасса изолированного ТП»), ТО ((«расстояние между осями смежных ТП») и («от ТП до строительных конструкций, принимается «с учетом возможности сборки, ремонта, осмотра, нанесения изоляции, а также величины смещения трубопровода при температурных деформациях»))} и т.д.

ЭП-7 – определение группы и категории опасности ТП. Например, ЭП-7.1: {ЕСЛИ («тип объекта – «Трубопровод»»), ТО ((«ТП в зависимости от класса опасности транспортируемого вещества (взрыво-, пожароопасность и вредность) подразделяются на группы среды (А, Б, В)) и (в зависимости от расчетных параметров среды - на пять категорий (I, II, III, IV, V)»))}.

ЭП-7.2: {ЕСЛИ ((«ТП, транспортирует вещества с рабочей температурой, равной или большей температуры их самовоспламенения») и («негорючие, трудногорючие и горючие вещества, которые при взаимодействии с водой или кислородом воздуха могут быть пожаровзрывоопасными»)), ТО («ТП следует относить к I категории опасности»))} и т.д.

Автор приводит только необходимые для решения данной практической задачи оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ правила, всего использовано около 30 уникальных ЭП для трассировки систем теплового обогрева установки производства элементарной серы, остальные правила формируются комбинацией исходных. Однако приведенный набор ЭП может быть дополнен другими правилами ЭП.

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

Традиционный способ моделирования процесса теплообмена, как уже указывалось в обзоре (см. разд. 1.1), в СТС из нескольких трубопроводов в изоляционном кожухе с движущимся изотермическим продуктом, состоит в применении специализированной упрощенной математической модели – так называемой «псевдо-одномерной» модели (см. разд. 2.3.1).

В данном разделе будут приведены результаты вычислительных экспериментов, проведенных с применением традиционного способа

моделирования процесса теплообмена в СТС из нескольких трубопроводов в изоляционном кожухе с движущимся изотермическим продуктом и компьютерного моделирования процесса теплообмена на стационарных моделях теплопередачи, построенных с помощью отечественного программного комплекса ELCUT [92].

Для проведения вычислительных экспериментов были выбраны варианты обогрева СТТ паровыми и водяными спутниками в проекте установки производства элементарной серы. Данные по технологическим характеристикам СТТ и обогревающих спутников приведены в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1. Параметры обогрева СТТ паровыми и водяными спутниками

Среда	Наружный диаметр	Толщина стенки	Диаметр × количество спутников	Т. раб. от, К	Толщина изоляции	Описание обогрева	Т. раб. от, К	Т. окр. ср., К
Кислый газ амина	32	3,5	25x1	313,15	50	Паровой спутник	425,15	248,15
Кислый газ амина	159	9	25x1	313,15	50	Паровой спутник	425,15	248,15
Газ технологический	219	6	25x2	313,15	50	Паровой спутник	425,15	248,15
Кислый газ амина	273	10	25x1	313,15	50	Паровой спутник	425,15	248,15
Кислый факел	426	11	25x2	313,15	60	Паровой спутник	425,15	248,15
Кислый факел	630	11	25x2	313,15	70	Паровой спутник	425,15	248,15
Насыщенный раствор МДЭА	57	6	25x1	315,15	50	Водяной спутник	403,15	248,15
Регенерированный раствор МДЭА	89	5	25x1	313,15	50	Водяной спутник	403,15	248,15

Регенерированный раствор МДЭА	159	5	25x2	313,15	50	Водяной спутник	403,15	248,15
Насыщенный раствор МДЭА	325	10	25x1	338,15	60	Водяной спутник	403,15	248,15
Насыщенный раствор МДЭА	377	10	25x2	338,15	60	Водяной спутник	403,15	248,15

На рисунках ниже показаны графики сравнения по распределению тепловых потоков в СТС различных конфигураций с движущимся изотермическим продуктом.

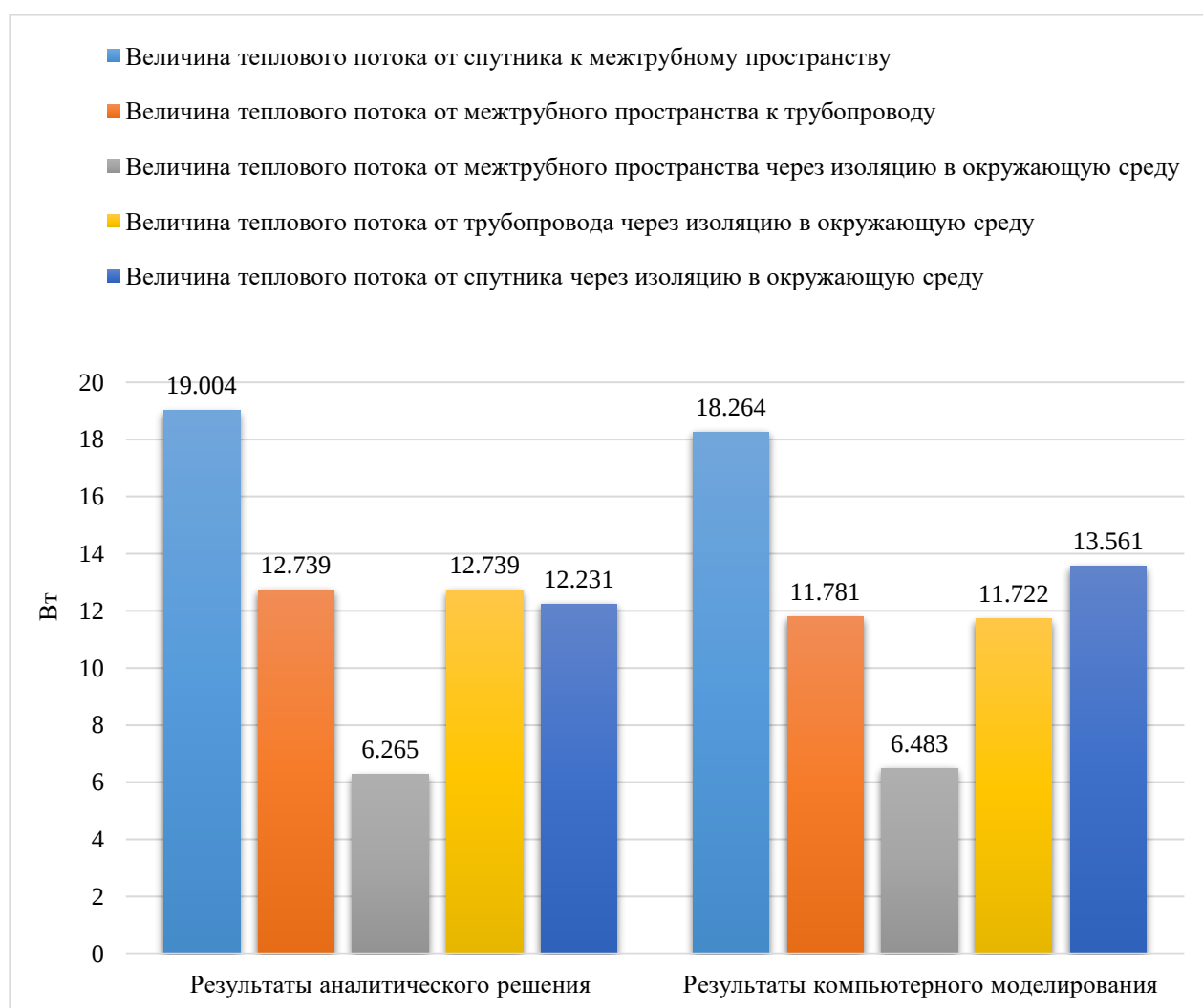


Рис. 4.3.1. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным

диаметром 32 мм с толщиной стенки 3,5 мм и одного парового спутника
номинальным диаметром 25 мм

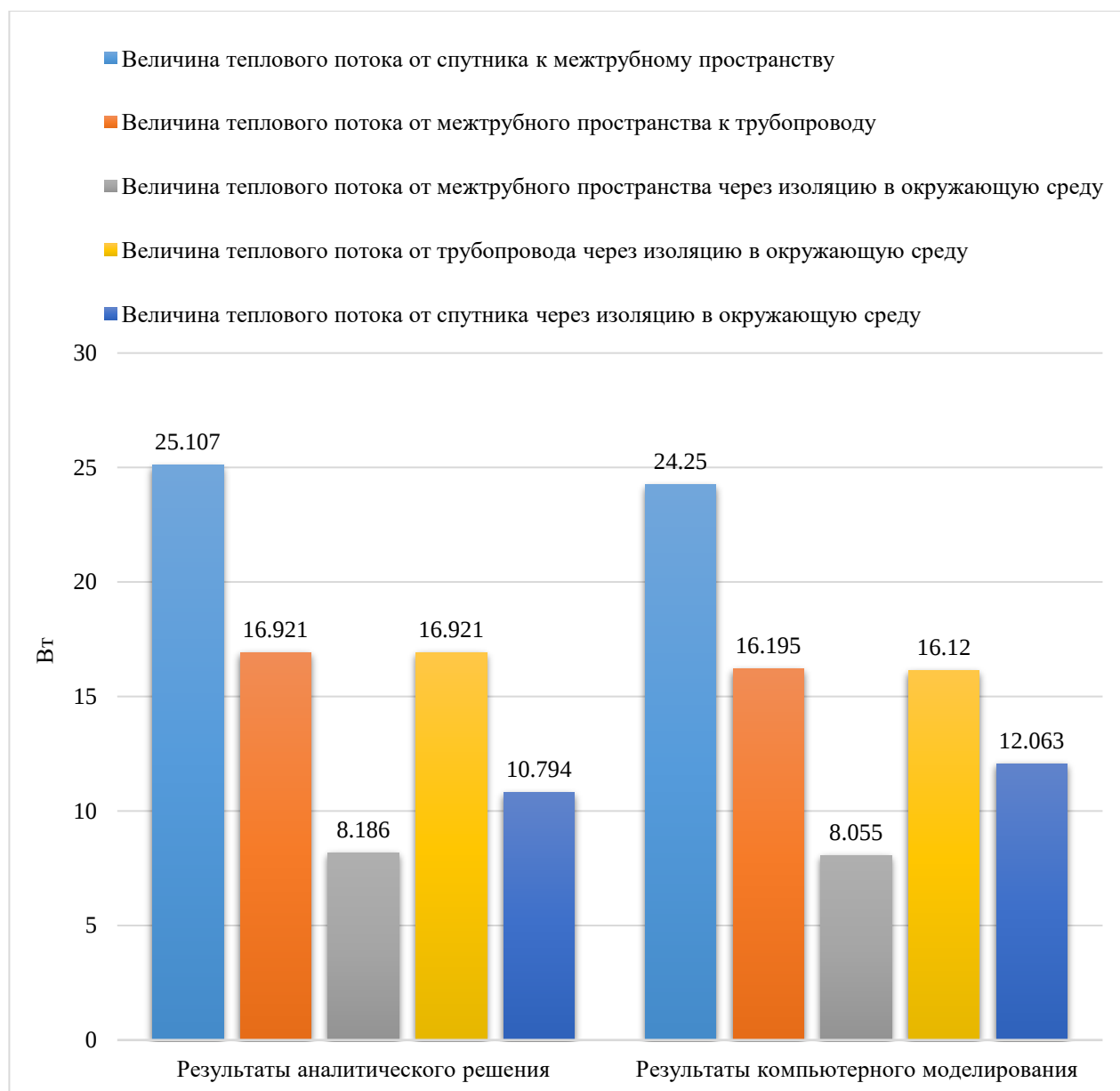


Рис. 4.3.2. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 57 мм с толщиной стенки 6 мм и одного водяного спутника номинальным диаметром 25 мм

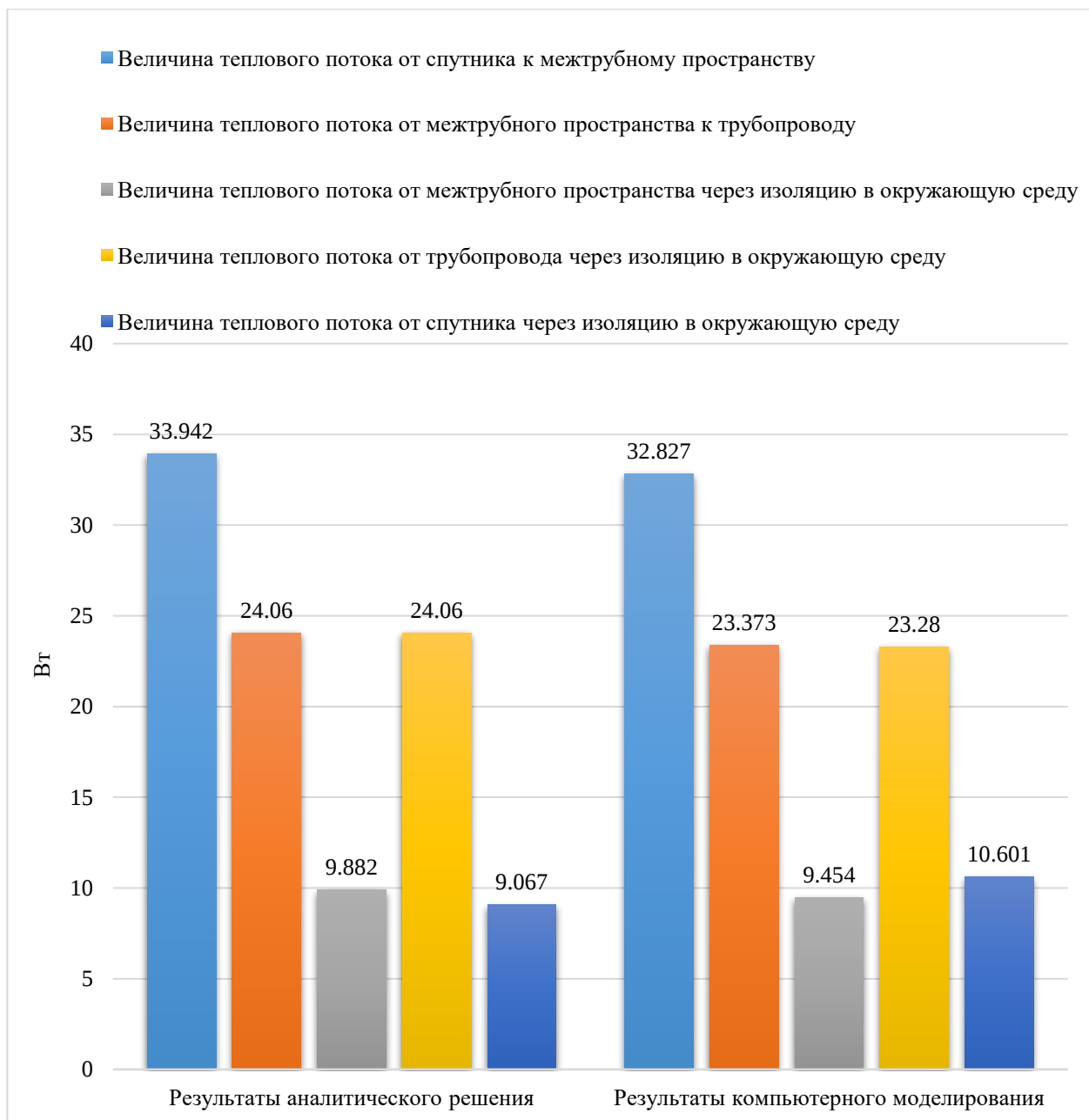


Рис. 4.3.3. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 89 мм с толщиной стенки 5 мм и одного водяного спутника номинальным диаметром 25 мм

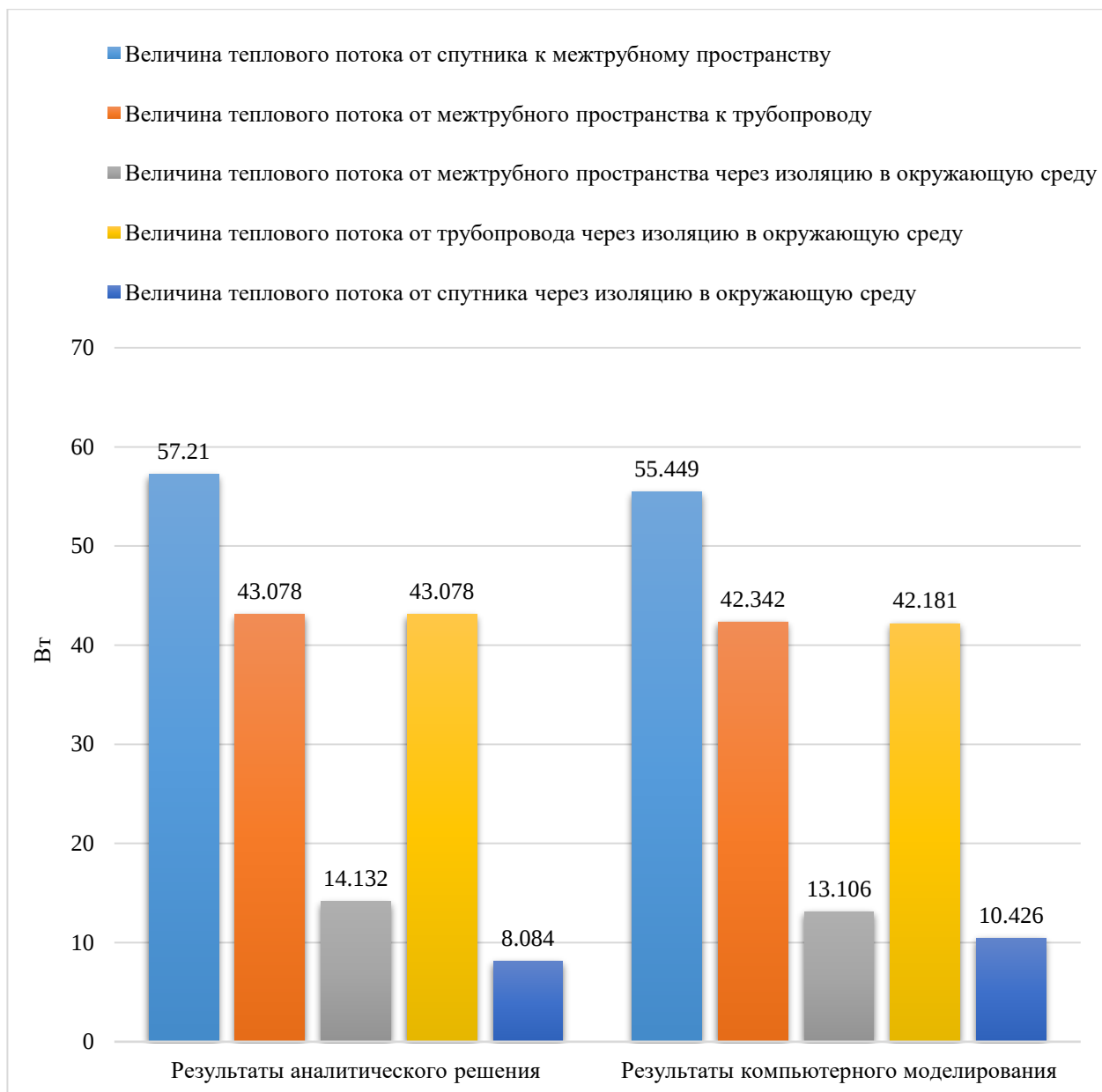


Рис. 4.3.4. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 159 мм с толщиной стенки 9 мм и одного парового спутника номинальным диаметром 25 мм

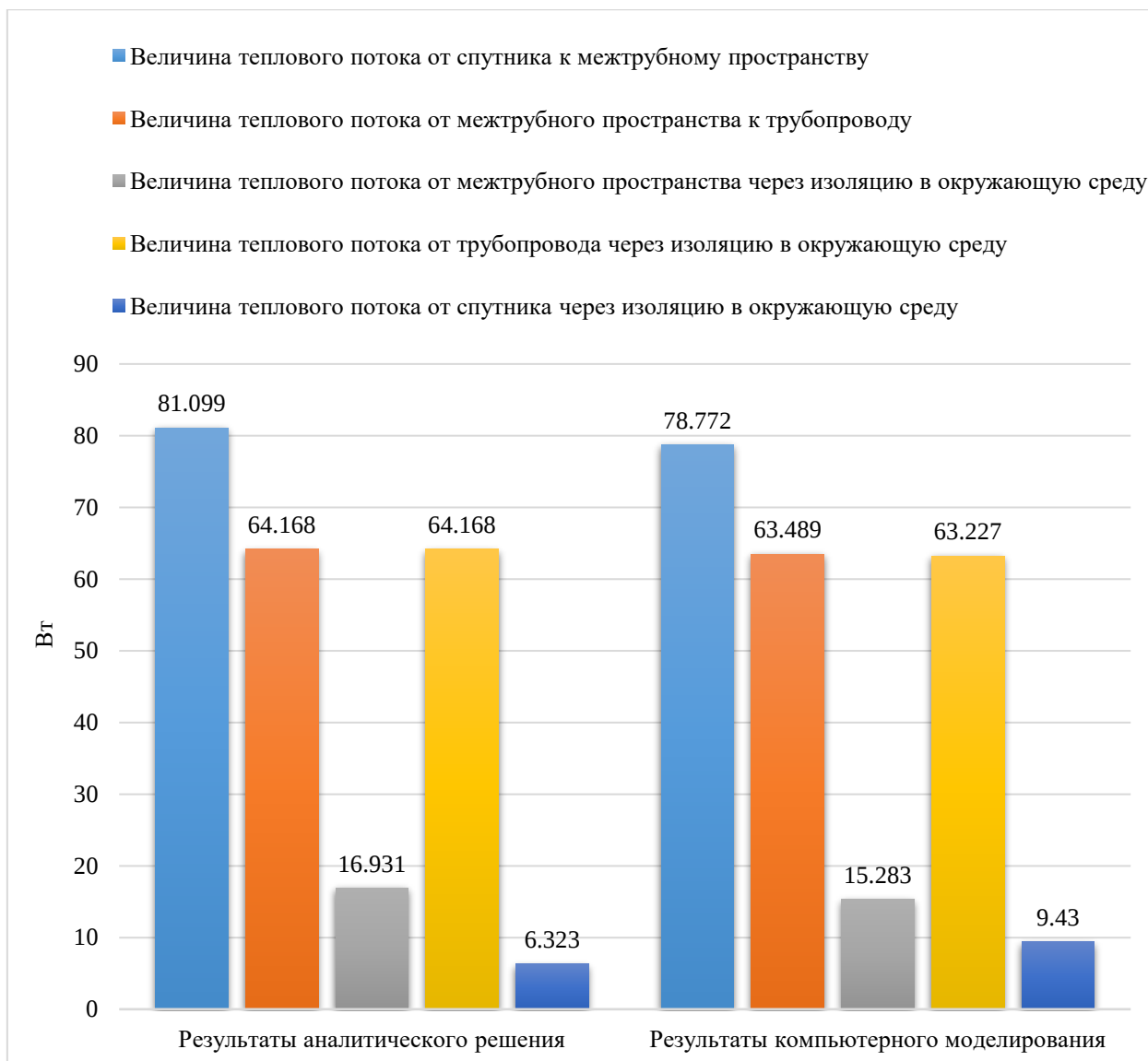


Рис. 4.3.5. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 273 мм с толщиной стенки 10 мм и одного парового спутника номинальным диаметром 25 мм

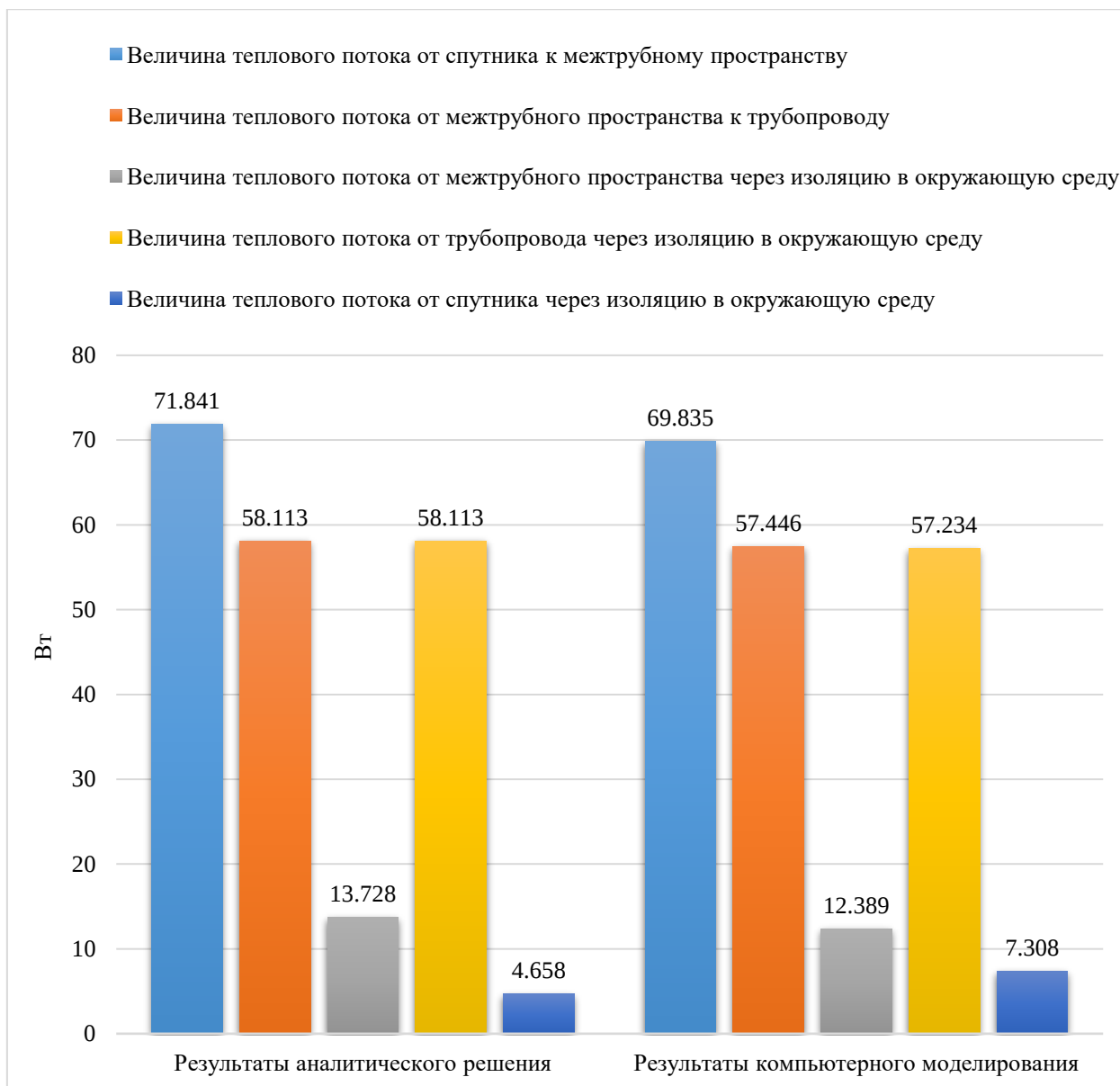


Рис. 4.3.6. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 10 мм и одного водяного спутника номинальным диаметром 25 мм

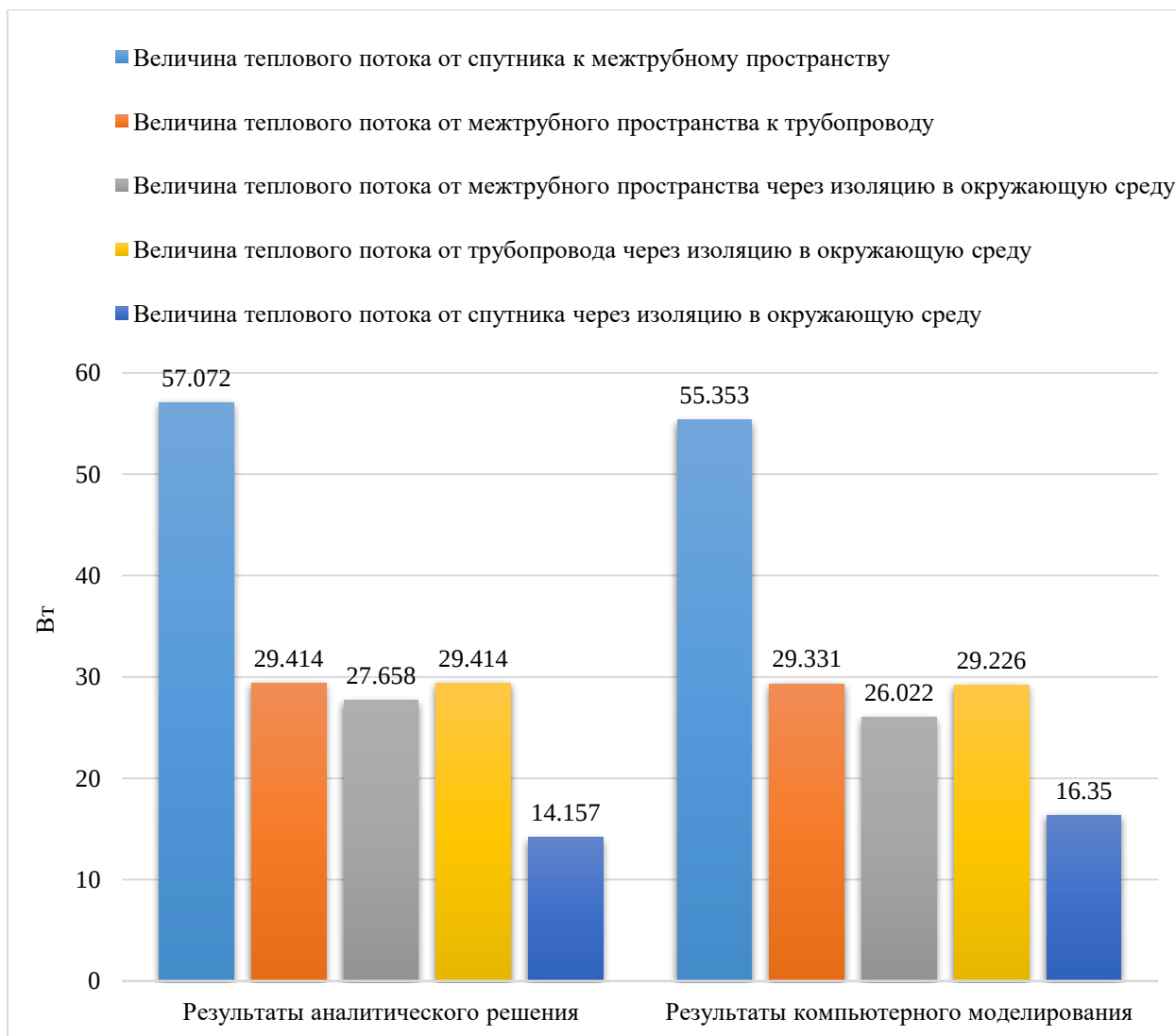


Рис. 4.3.7. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 159 мм с толщиной стенки 5 мм и двух водяных спутников номинальным диаметром 25 мм

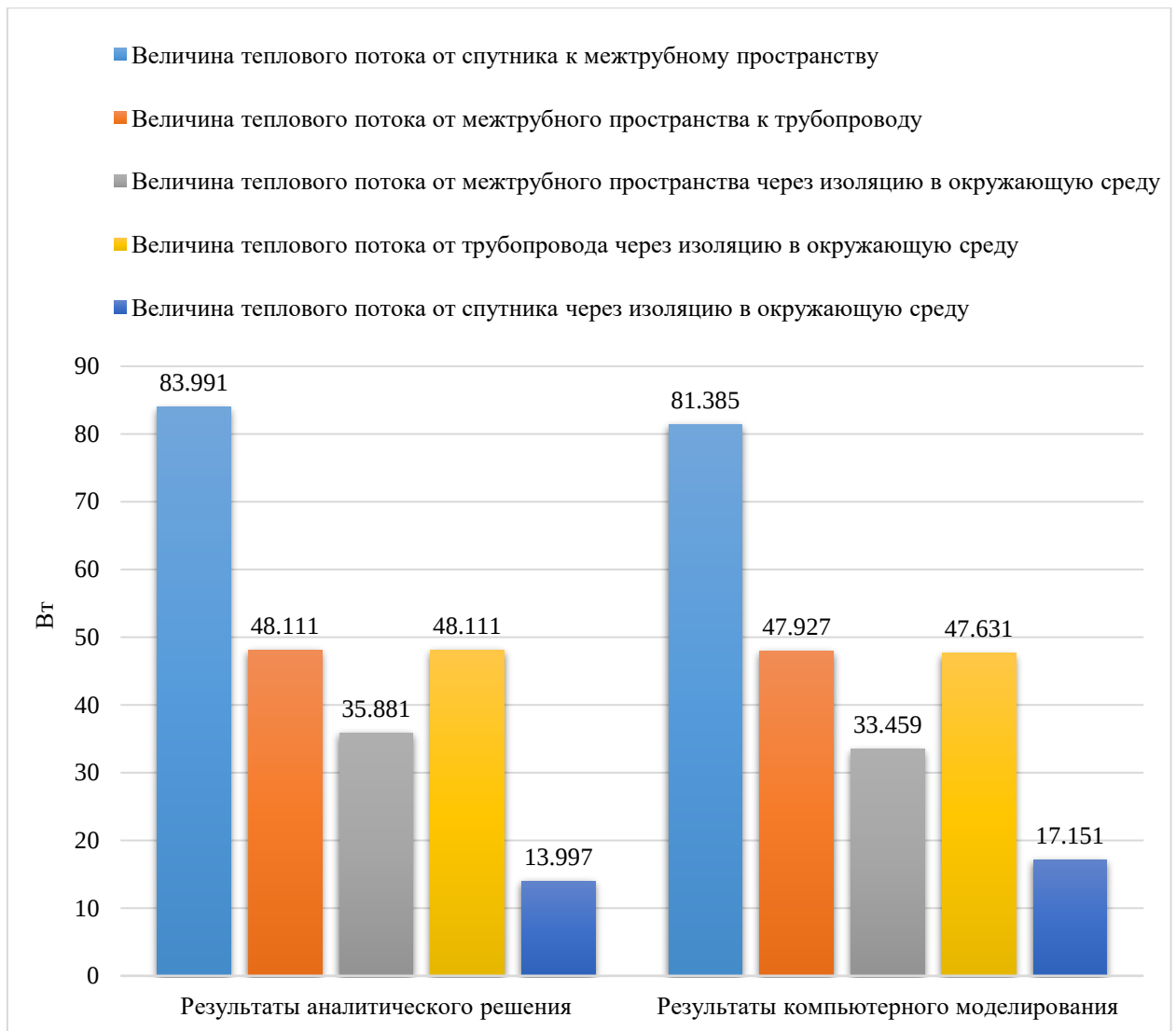


Рис. 4.3.8. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 219 мм с толщиной стенки 6 мм и двух паровых спутников номинальным диаметром 25 мм

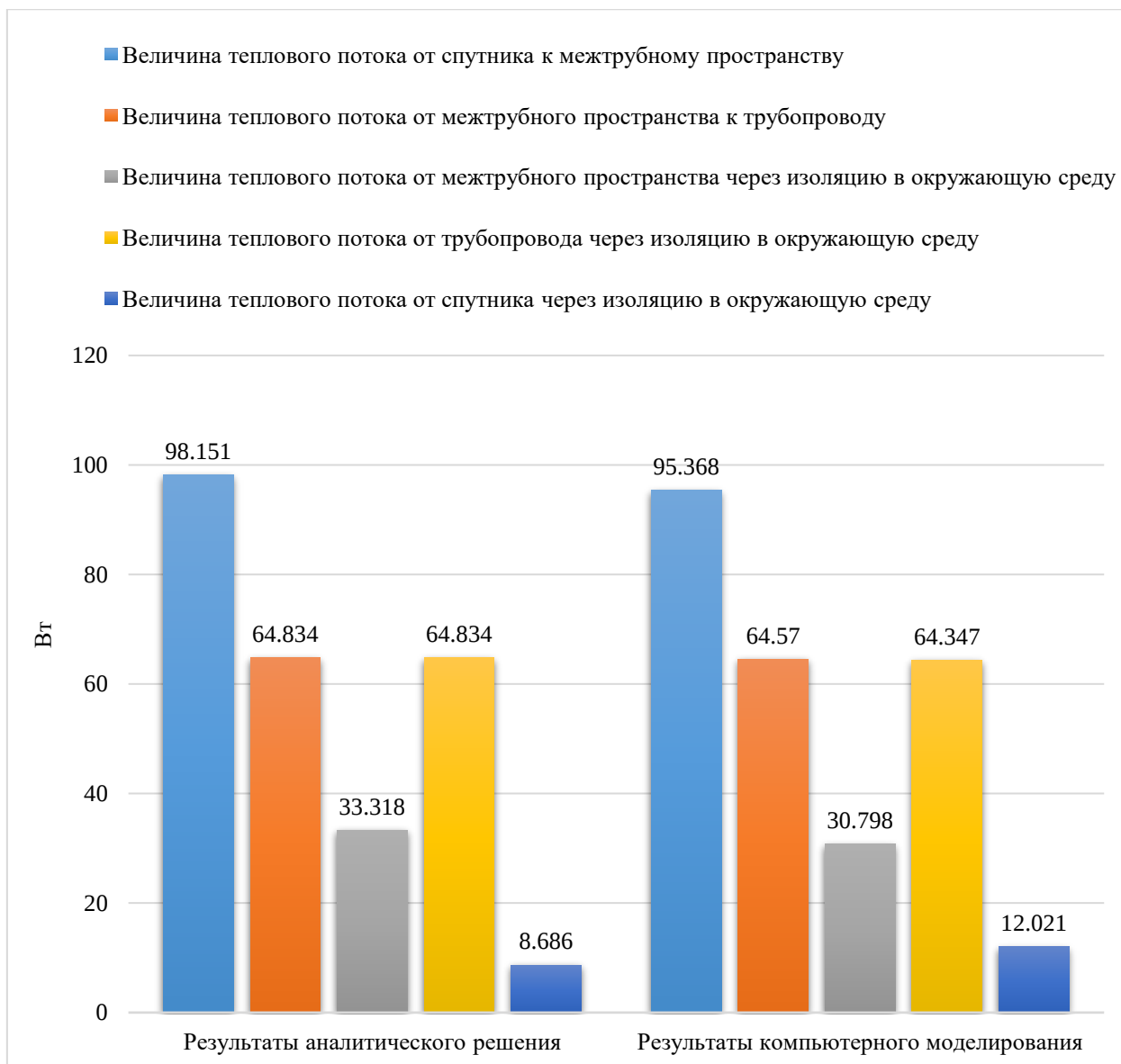


Рис. 4.3.9. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 377 мм с толщиной стенки 10 мм и двух водяных спутников номинальным диаметром 25 мм

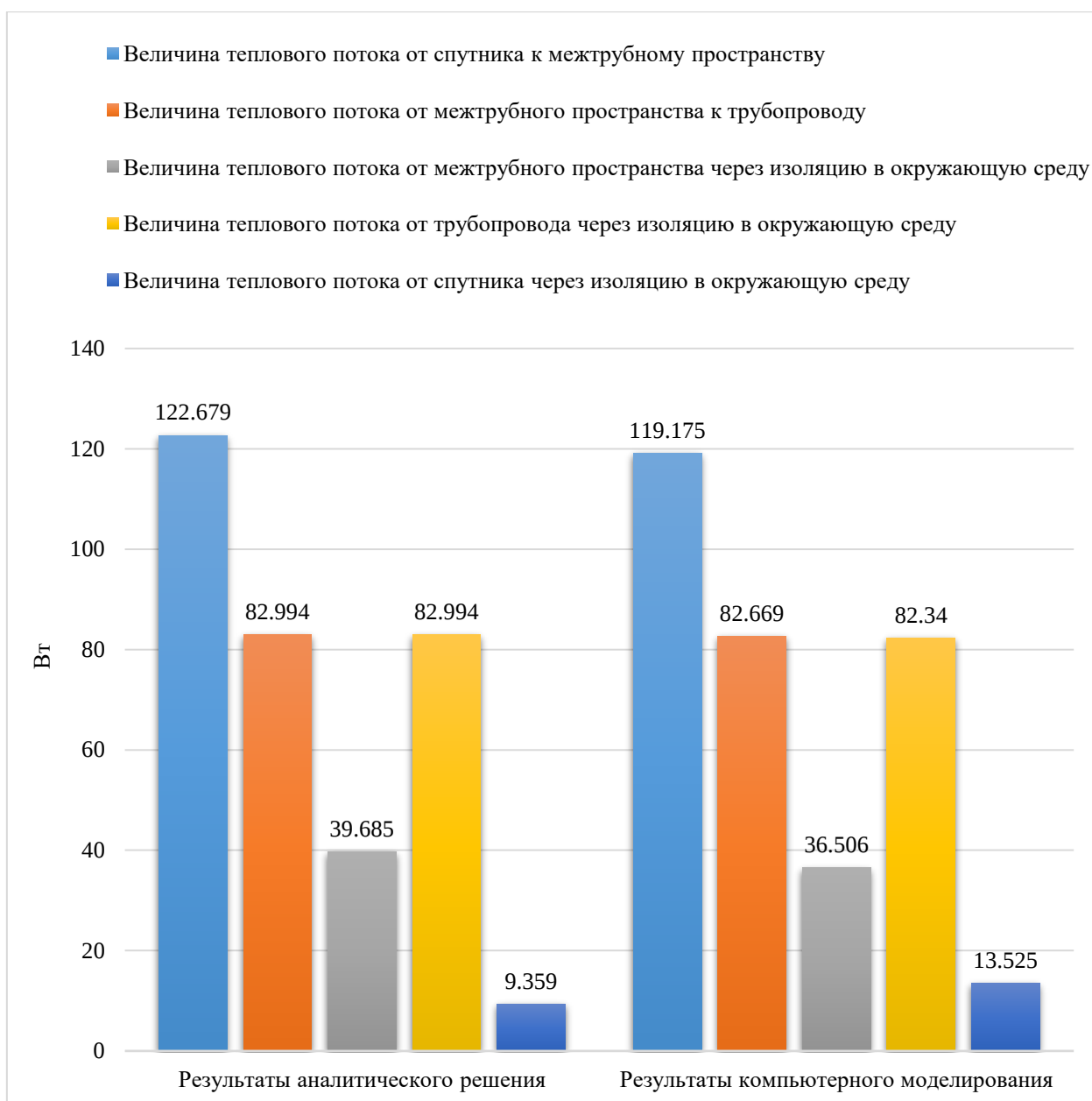


Рис. 4.3.10. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 426 мм с толщиной стенки 11 мм и двух паровых спутников номинальным диаметром 25 мм

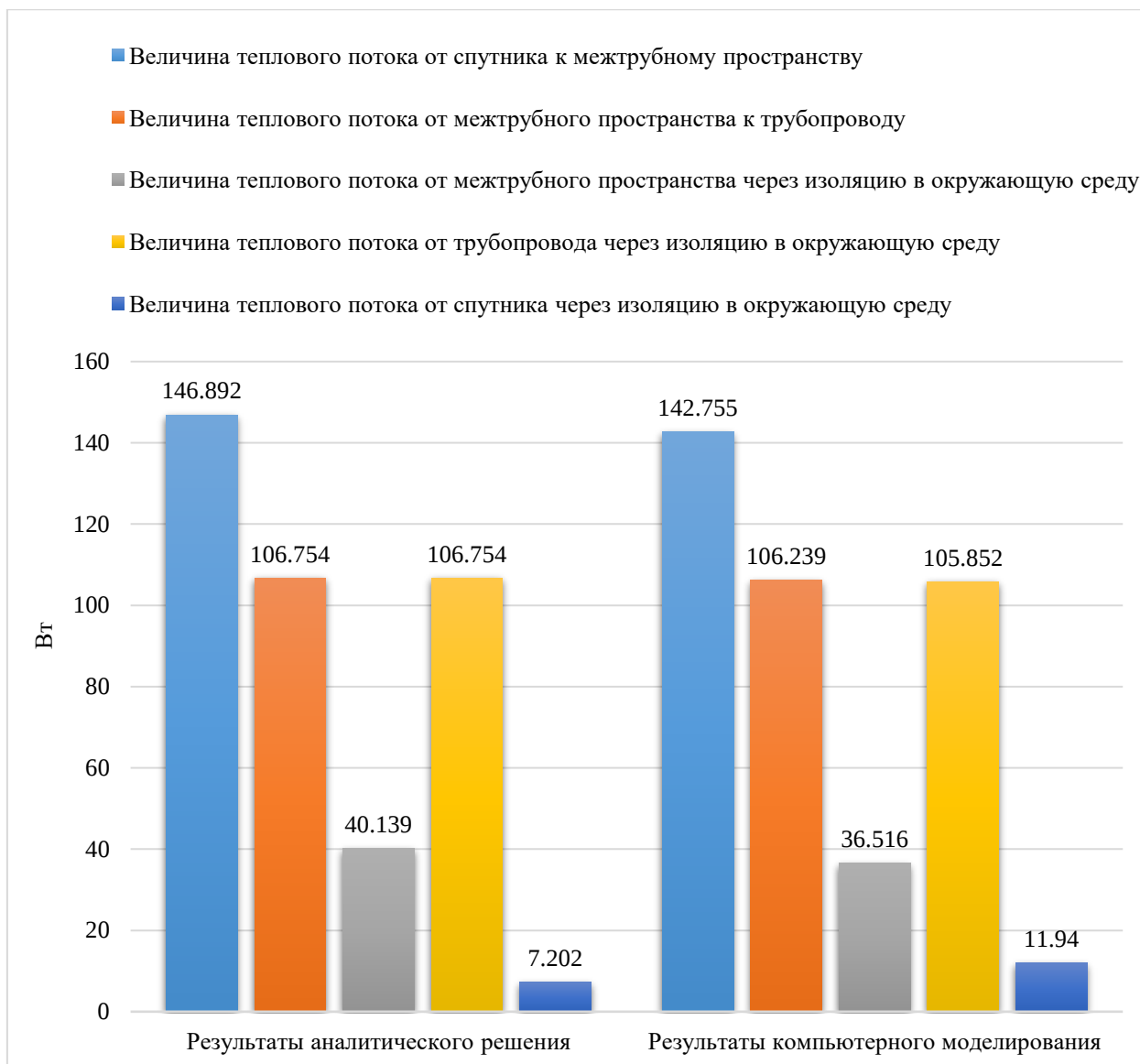


Рис. 4.3.11. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с движущимся изотермическим продуктом наружным диаметром 630 мм с толщиной стенки 11 мм и двух паровых спутников номинальным диаметром 25 мм

Проведенные в разделе расчеты показали следующее. Тепловые потоки через отдельные части тепловой изоляции, рассчитанные с применением компьютерного моделирования, достаточно заметно отличаются от рассчитанных по специализированной упрощенной математической модели. Однако эти отклонения компенсируют друг друга, и суммарные тепловые потери в окружающую среду практически не отличаются от рассчитанных по специализированной упрощенной математической модели. При этом

компьютерное моделирование в ELCUT показало, что имеет место передача тепла от спутника(-ов) к ТП не только через воздушную прослойку, но и через тепловую изоляцию, и она имеет порядок 3-4% от тепла, передаваемого через воздушную прослойку.

Результаты расчетов также подтверждают достаточную точность и консервативность «специализированной» упрощенной математической модели.

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

Используемая в практике проектирования инженерно-техническая модель процесса теплообмена в СТС с неподвижным (период остановки перекачки продукта) изотермическим продуктом, описанная в [2, 4, 5], не учитывает явным образом влияние толщины и свойств материала стенки обогреваемого ТП на перепад температур по сечению трубопровода. В связи с этим, была разработана новая аппроксимационная математическая модель процесса теплообмена в СТС с неподвижным изотермическим продуктом.

В данном разделе будут проведены результаты вычислительных экспериментов, проведенных с применением разработанной методики моделирования процесса теплообмена в СТС из нескольких трубопроводов в изоляционном кожухе с неподвижным (период остановки перекачки продукта) изотермическим продуктом (см. разд. 2.3.2) и компьютерного моделирования процесса теплообмена на стационарных моделях теплопередачи, построенных с помощью отечественного программного комплекса ELCUT [93].

Для проведения вычислительных экспериментов были использованы данные выбранных в разделе 4.3 вариантов обогрева СТП паровыми и водяными спутниками в проекте установки производства элементарной серы (см. табл. 4.3.1).

На рисунках ниже показаны графики сравнения по распределению тепловых потоков в СТС различных конфигураций с неподвижным изотермическим продуктом.

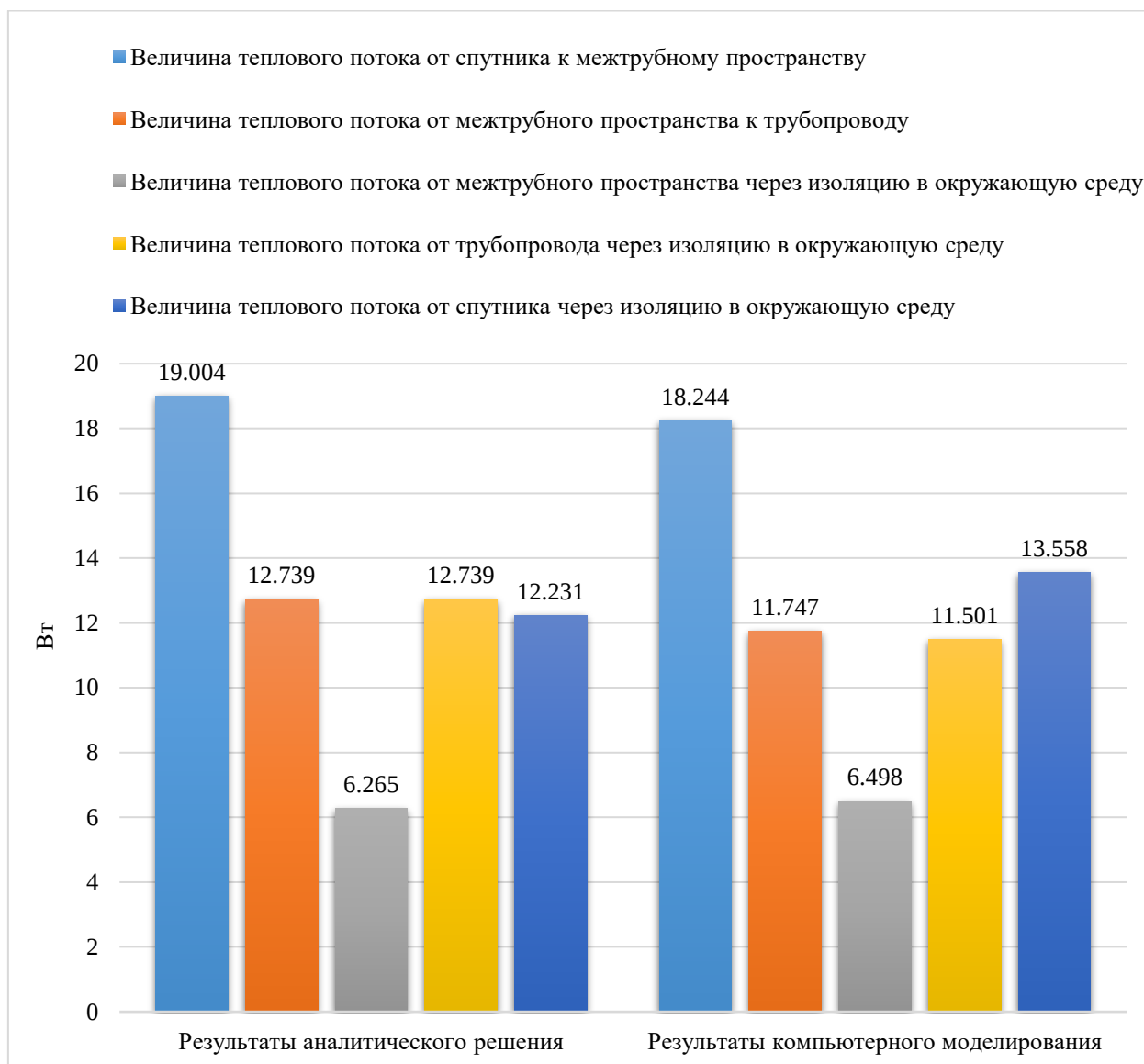


Рис. 4.4.1. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 32 мм с толщиной стенки 3,5 мм и одного парового спутника номинальным диаметром 25 мм

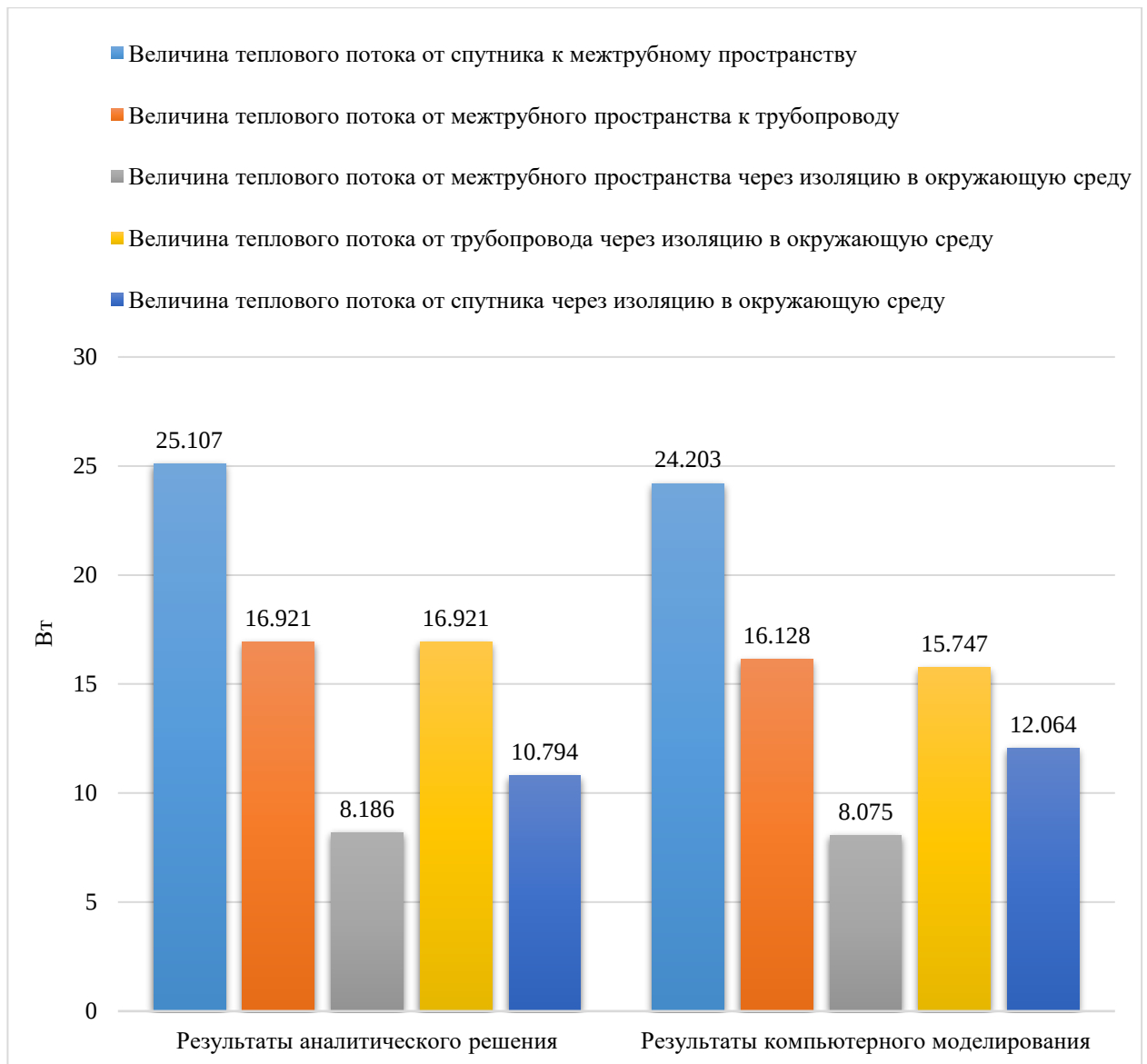


Рис. 4.4.2. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 57 мм с толщиной стенки 6 мм и одного водяного спутника номинальным диаметром 25 мм

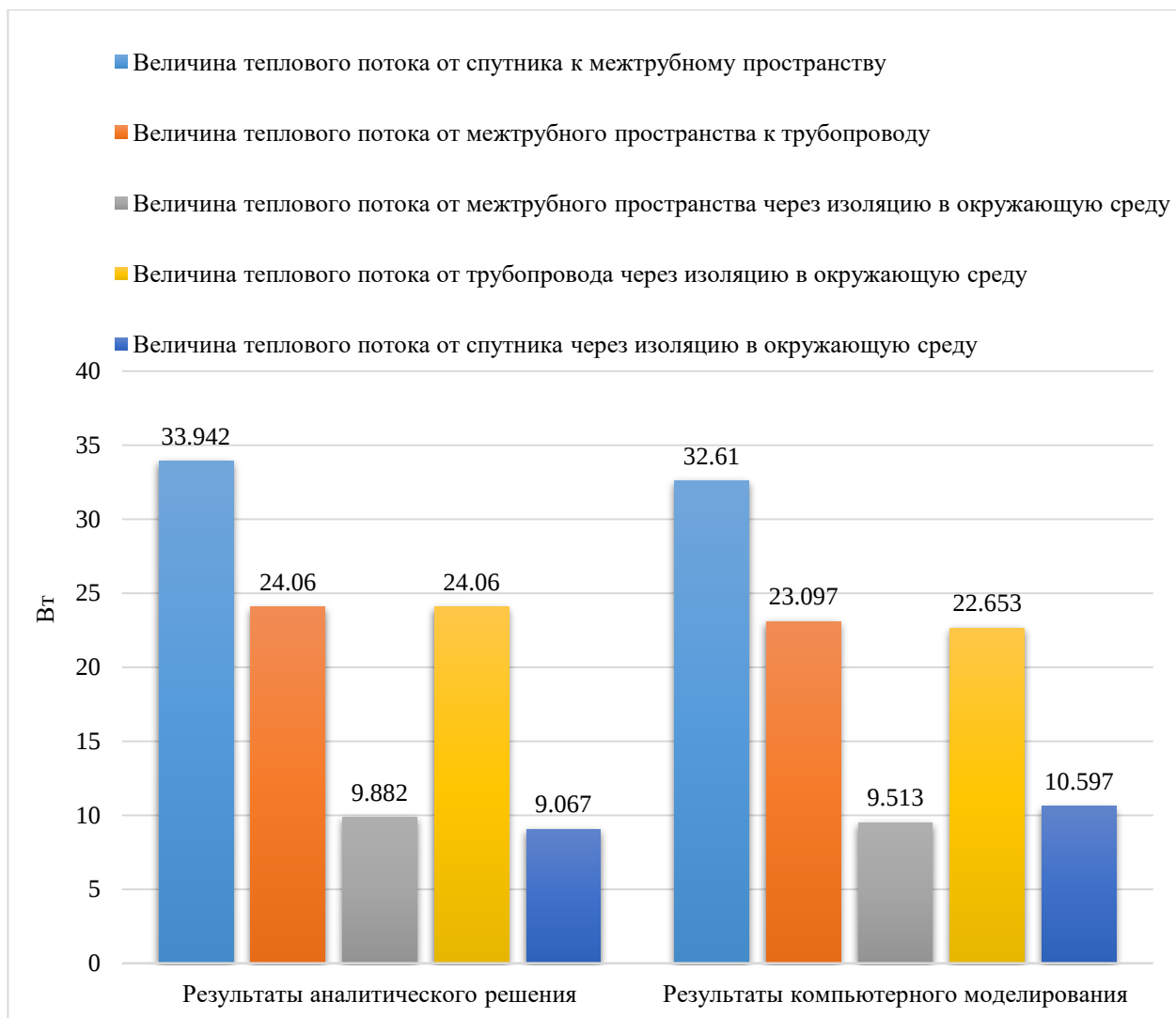


Рис. 4.4.3. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 89 мм с толщиной стенки 5 мм и одного водяного спутника номинальным диаметром 25 мм

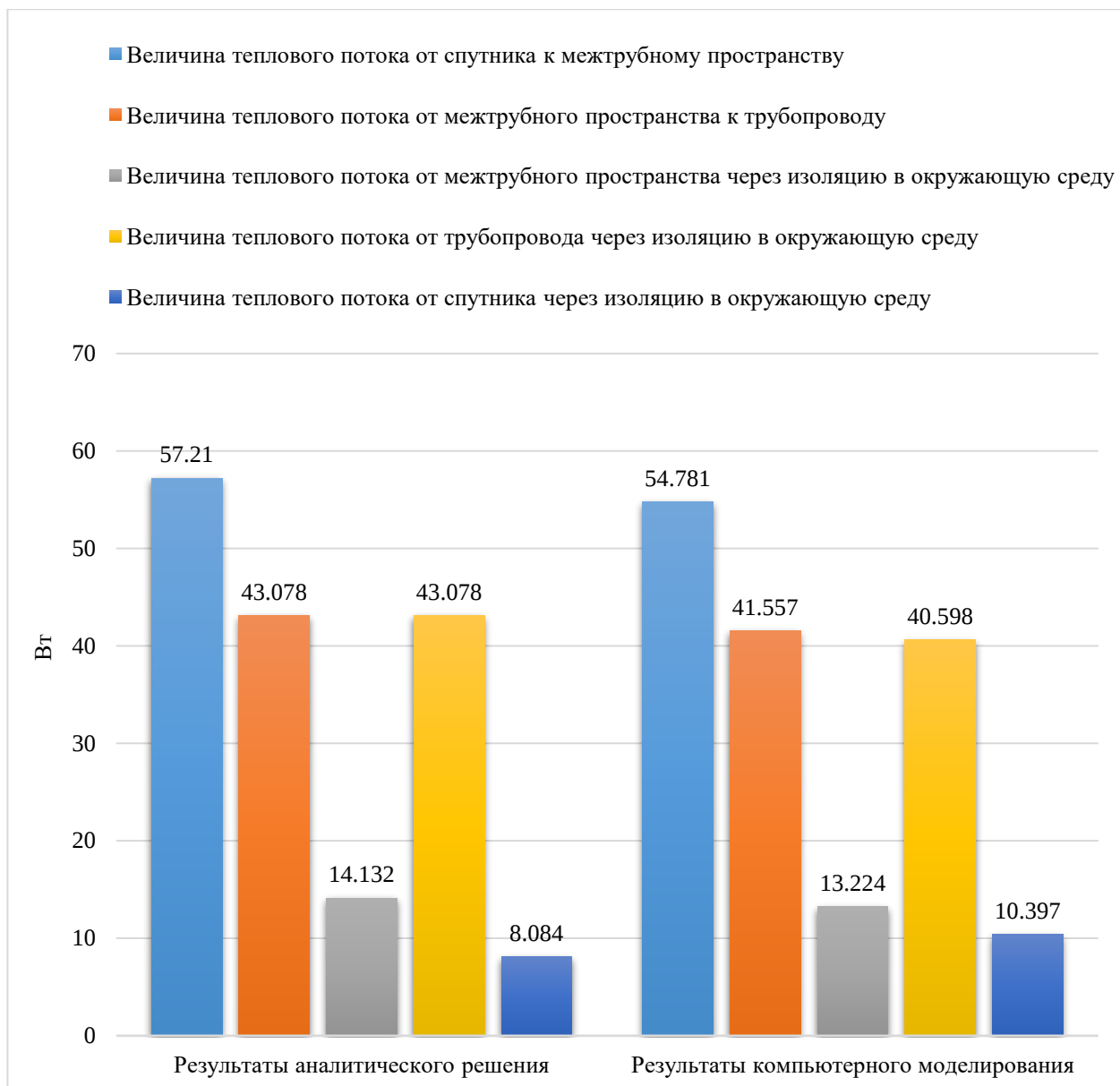


Рис. 4.4.4. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 159 мм с толщиной стенки 9 мм и одного парового спутника номинальным диаметром 25 мм

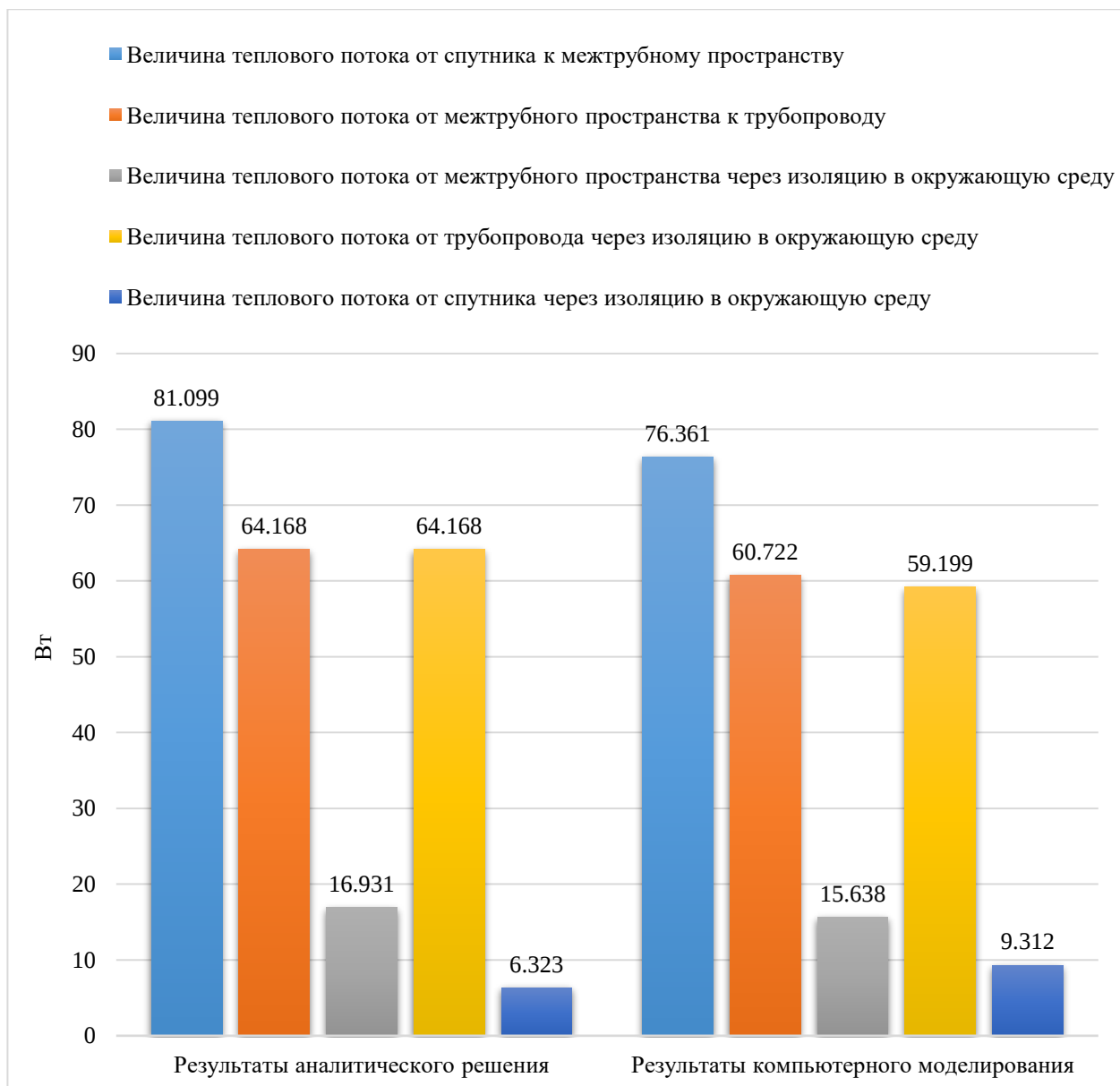


Рис. 4.4.5. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 273 мм с толщиной стенки 10 мм и одного парового спутника номинальным диаметром 25 мм

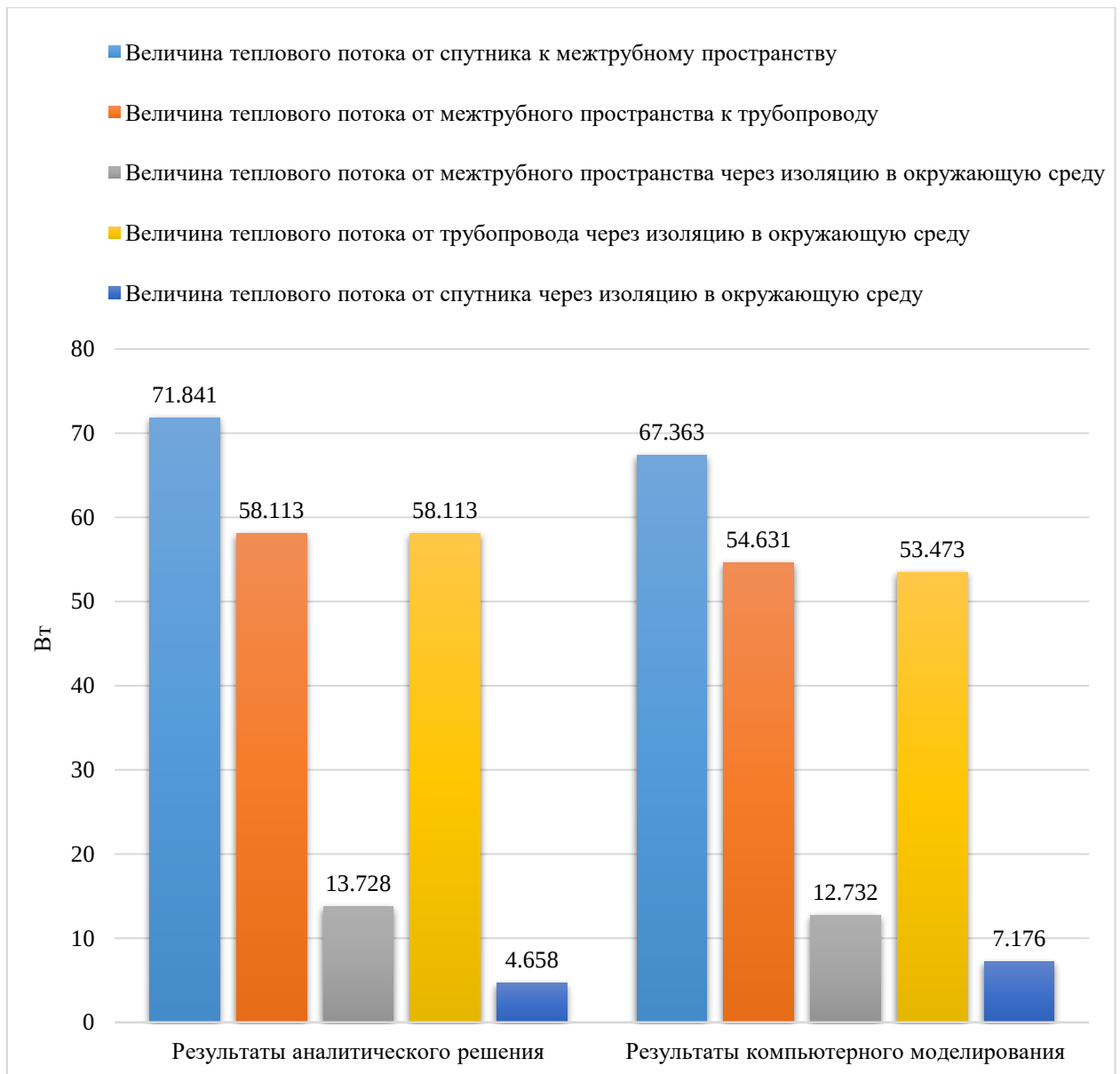


Рис. 4.4.6. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 10 мм и одного водяного спутника номинальным диаметром 25 мм

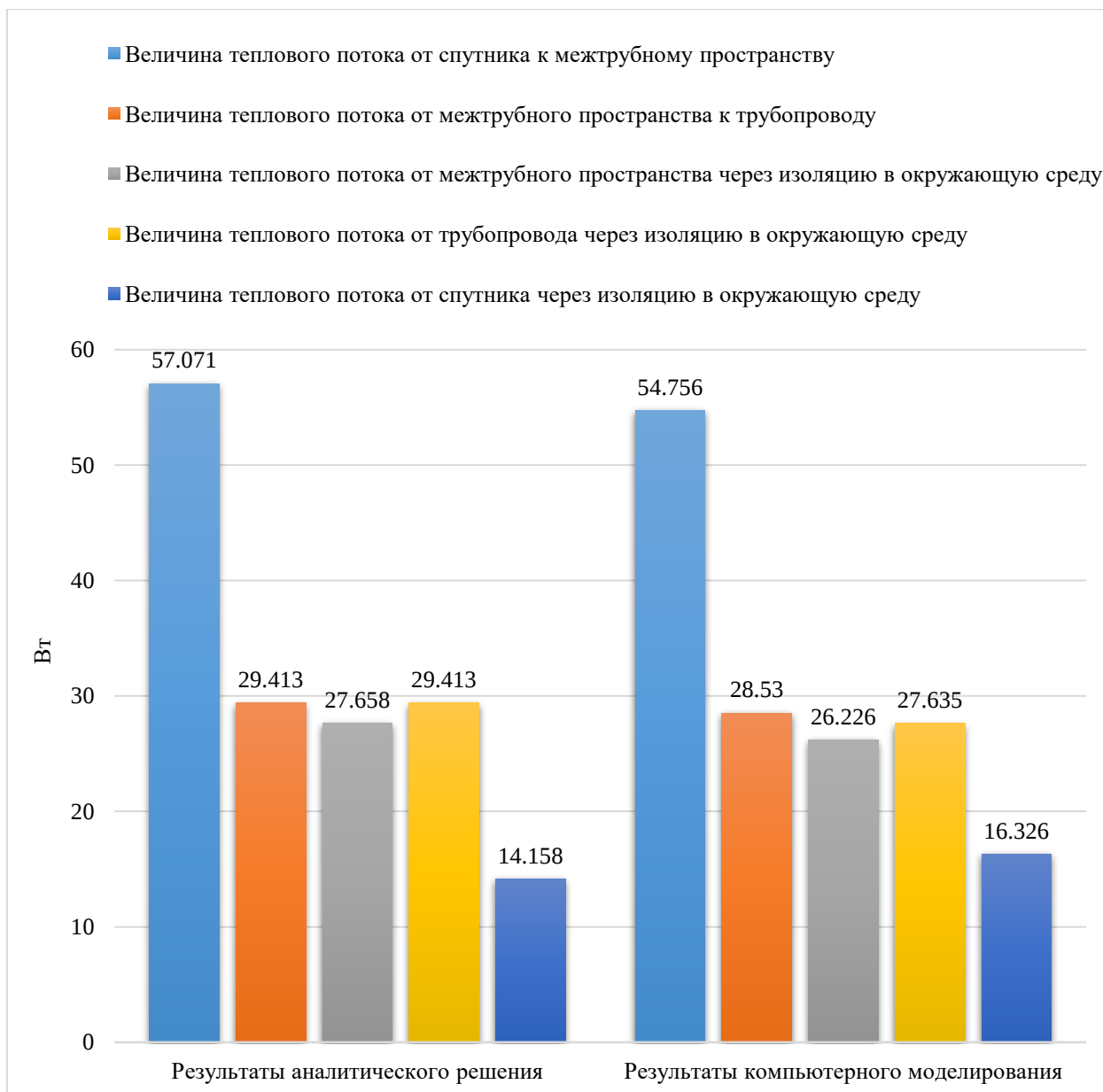


Рис. 4.4.7. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 159 мм с толщиной стенки 5 мм и двух водяных спутников номинальным диаметром 25 мм

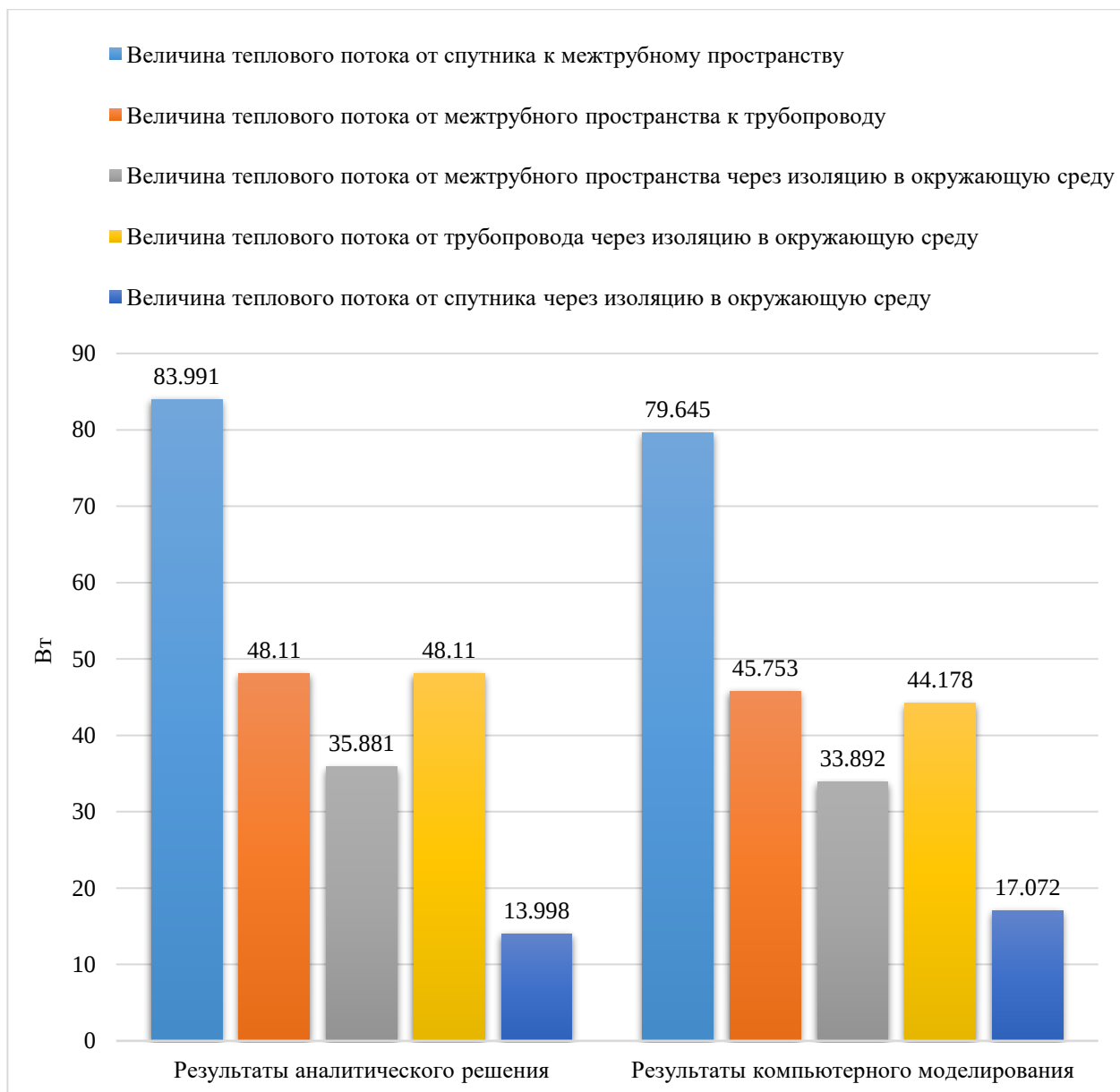


Рис. 4.4.8. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 219 мм с толщиной стенки 6 мм и двух паровых спутников номинальным диаметром 25 мм

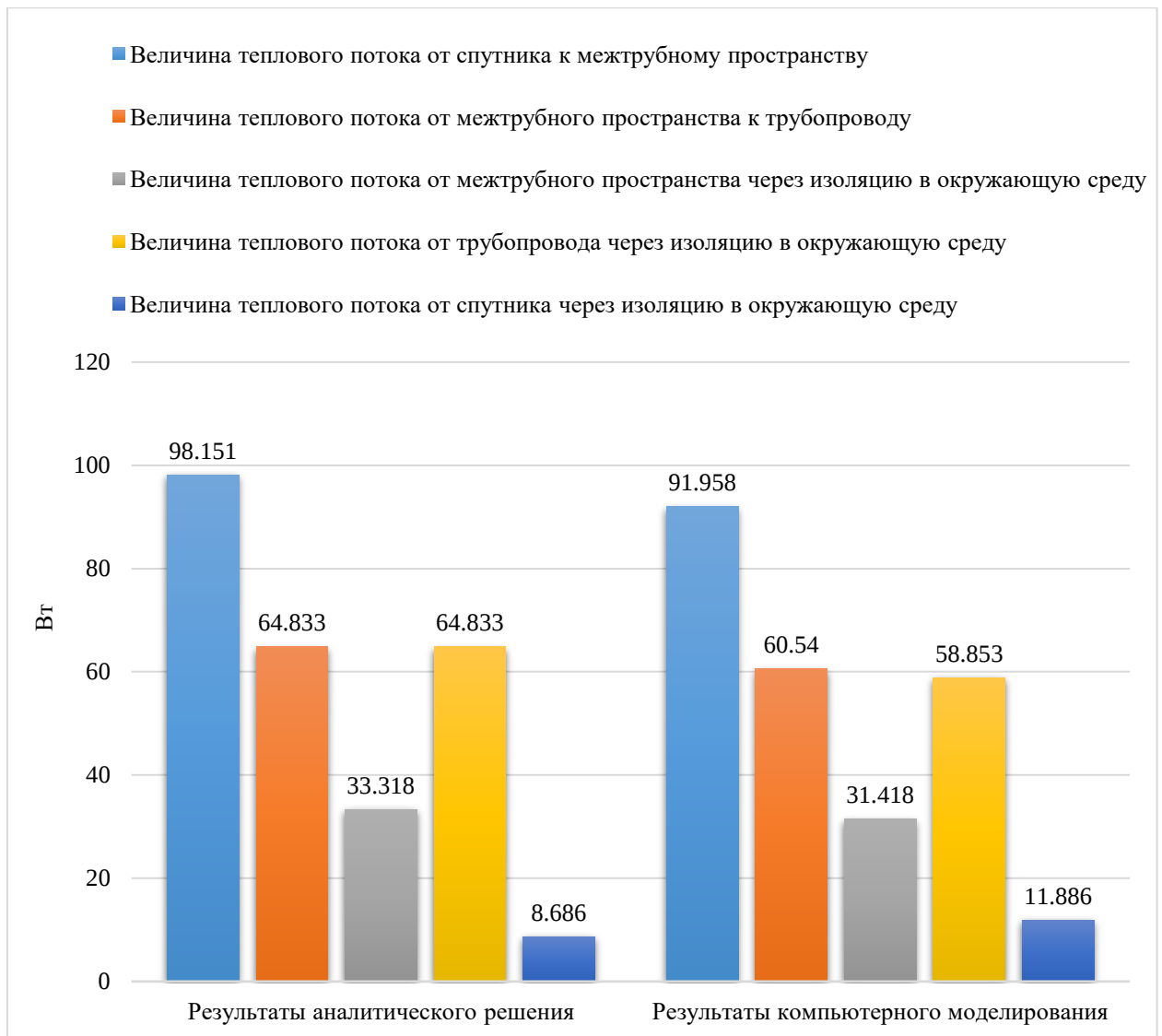


Рис. 4.4.9. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 377 мм с толщиной стенки 10 мм и двух водяных спутников номинальным диаметром 25 мм

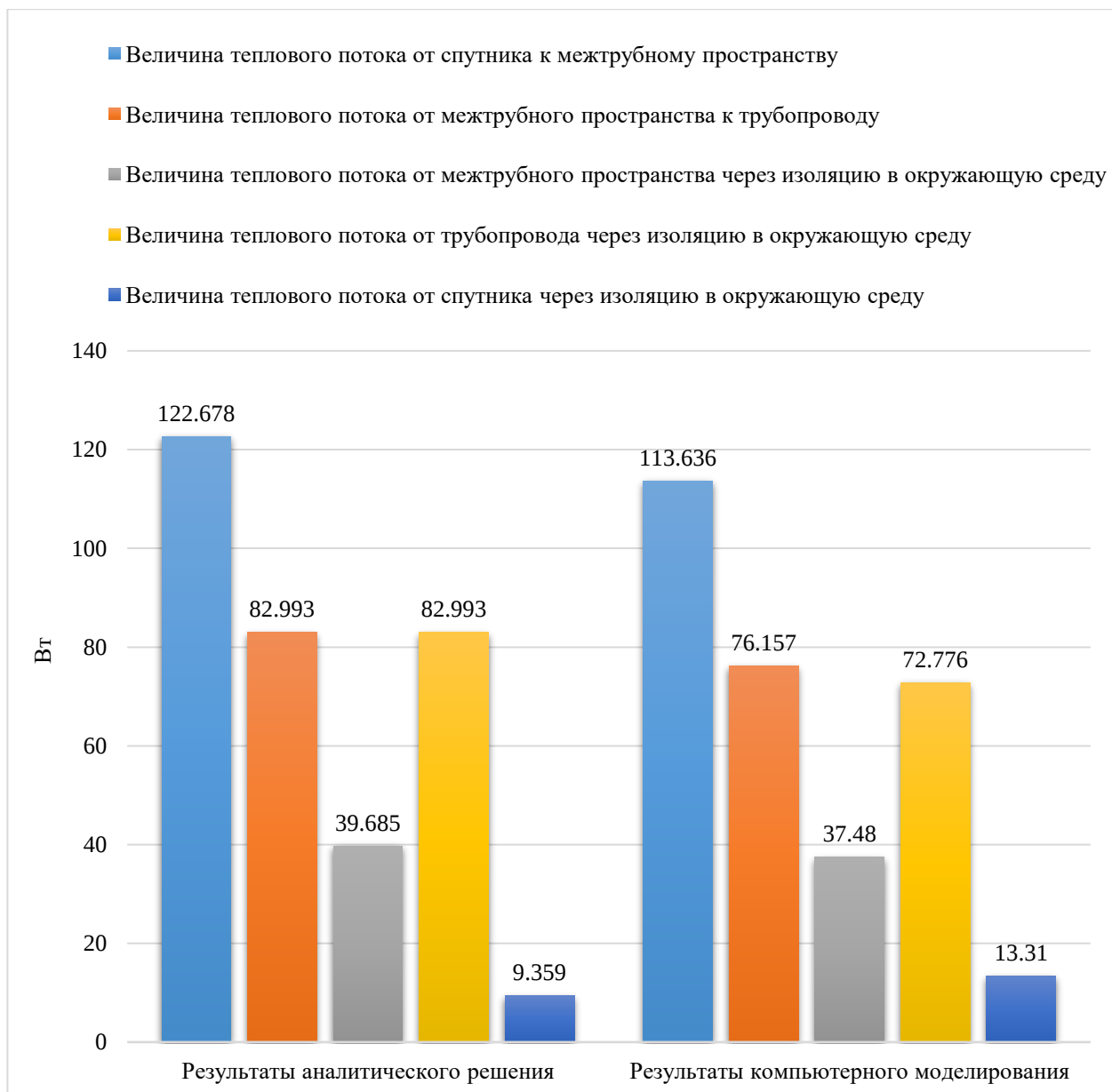


Рис. 4.4.10. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 426 мм с толщиной стенки 11 мм и двух паровых спутников номинальным диаметром 25 мм

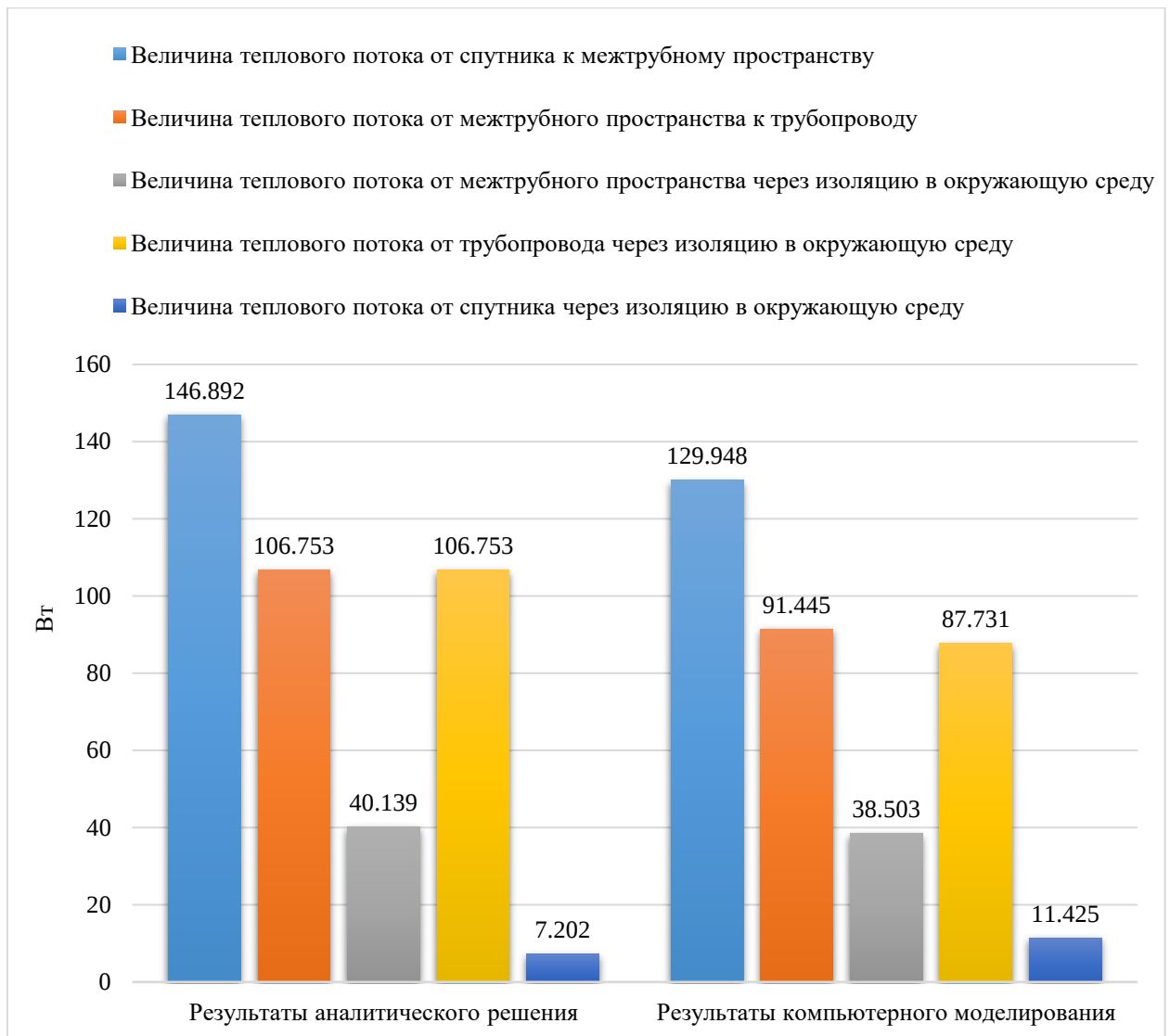


Рис. 4.4.11. График сравнения по распределению тепловых потоков в СТС из обогреваемого ТП с неподвижным изотермическим продуктом наружным диаметром 630 мм с толщиной стенки 11 мм и двух паровых спутников номинальным диаметром 25 мм

Сравнение аналитического решения и результатов компьютерного моделирования процесса теплообмена дало следующие результаты по распределению температур в СТС различных конфигураций из нескольких ТП в изоляционном кожухе с неподвижным изотермическим продуктом (см. табл. 4.4.1.).

Таблица 4.4.1. Результаты расчетов поля температур в СТС различных конфигураций из нескольких ТП в изоляционном кожухе с неподвижным изотермическим продуктом

Наружный диаметр	Толщина стенки	Диаметр × количество спутников	Т межтр. пр., К (ELCUT)	Т межтр. пр., К (аналит.)	ΔТ межтр. пр.	Мин. Т прод., К (ELCUT)	Мин. Т прод., К (аналит.)	ΔТ прод.	Разность Т. верха / низа тр., К (ELCUT)	Разность Т. верха / низа тр., К (аналит.)
32	3,5	25x1	404,17	404,26	0,09	389,01	389,13	0,12	0,47	0,45
159	9	25x1	388,82	389,39	0,57	368,16	369,41	1,25	3,34	2,91
219	6	25x2	399,99	399,86	0,13	387,61	389,02	1,41	7,42	6,24
273	10	25x1	378,25	378,10	0,15	352,42	354,14	1,72	7,61	6,48
426	11	25x2	391,94	390,19	1,75	373,44	375,10	1,66	13,17	11,03
630	11	25x2	388,46	385,92	2,54	362,25	366,09	3,84	23,11	19,70
57	6	25x1	383,28	383,69	0,41	369,96	370,58	0,62	0,65	0,62
89	5	25x1	379,05	379,49	0,44	363,77	364,42	0,65	1,75	1,57
159	5	25x2	384,99	385,05	0,06	377,08	377,74	0,66	3,58	3,16
325	10	25x1	362,63	362,39	0,24	340,33	342,01	1,68	7,49	6,56
377	10	25x2	375,94	375,62	0,32	361,77	363,55	1,78	9,16	8,04

Для сравнения аппроксимационного аналитического и численного решений использовался критерий минимизации нормы разности (3.5.1) между

определёнными аналитическими значениями и численными значениями температур T и плотностей тепловых потоков F .

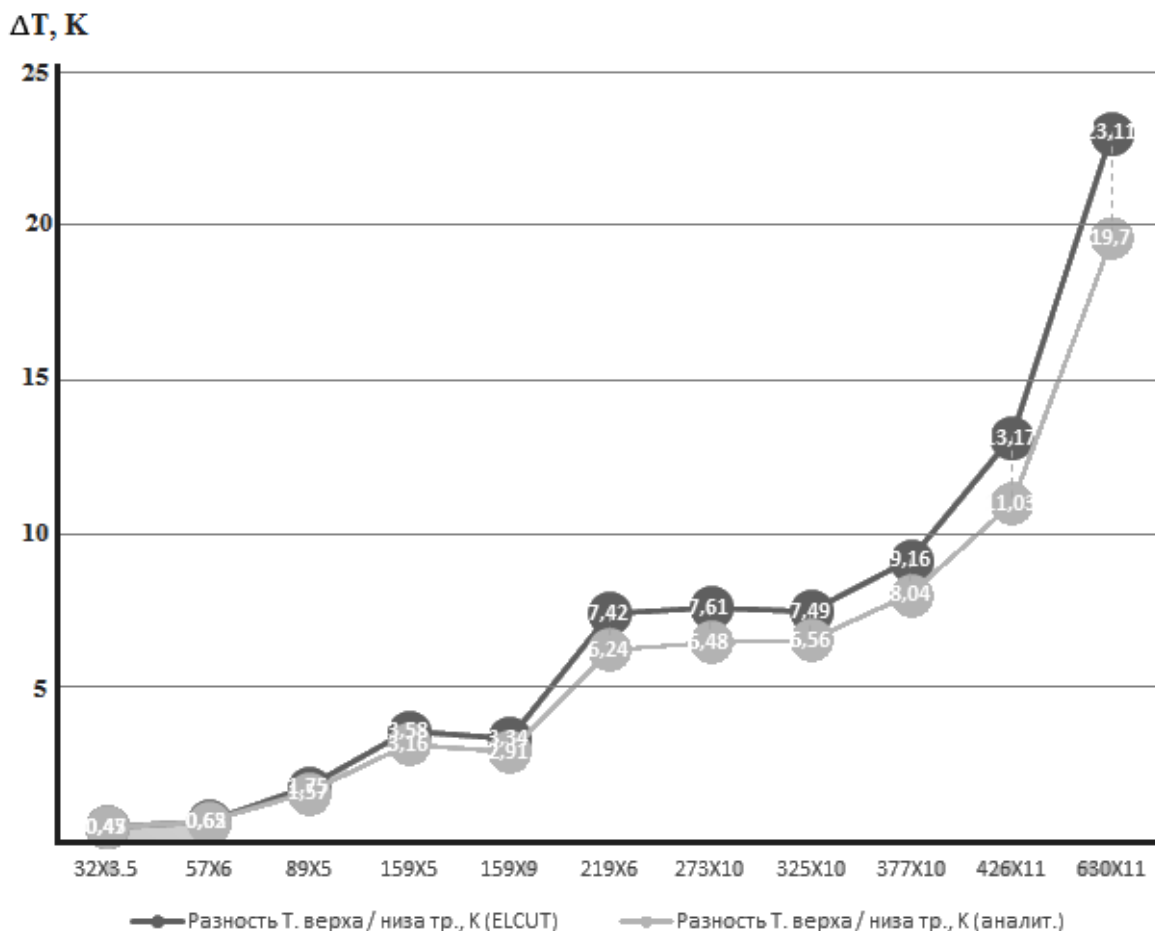


Рис. 4.4.12. График сравнения результатов вычислительных экспериментов по проверке адекватности разработанной аппроксимационной математической модели

Как показали результаты проведенных вычислительных экспериментов значение толщины стенки ТП оказывает решающее влияние на перепад температур по сечению трубопроводов для диаметров более 200 мм и на больших диаметрах этот перепад может достигать порядка 20 К (см. рис. 4.4.12).

Результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в СТС с неподвижным изотермическим продуктом показали, что предложенная, в разделе 2.3.2, аппроксимационная математическая модель

позволяет оценить перепад и величины температур в продукте с удовлетворительной инженерной точностью с погрешностью не более 2%.

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

Фрагмент разработанной оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ типовой установки производства элементарной серы представлен на рисунке 4.5.1. На рисунке также показаны результаты решения задачи размещения ЕО и необходимых строительных конструкций ХП.

Начальное решение получается из последовательности размещения. На рисунке 4.5.2 представлено начальное размещения оборудования и необходимых строительных конструкций схемы установки производства элементарной серы.

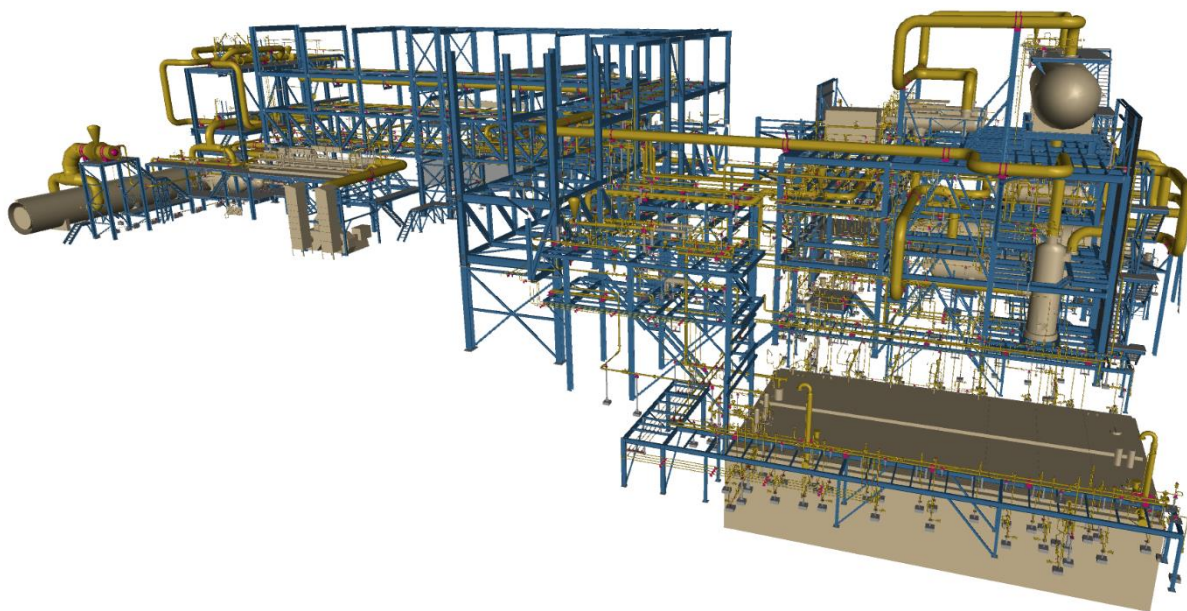


Рис. 4.5.1. Фрагмент оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ установки производства элементарной серы

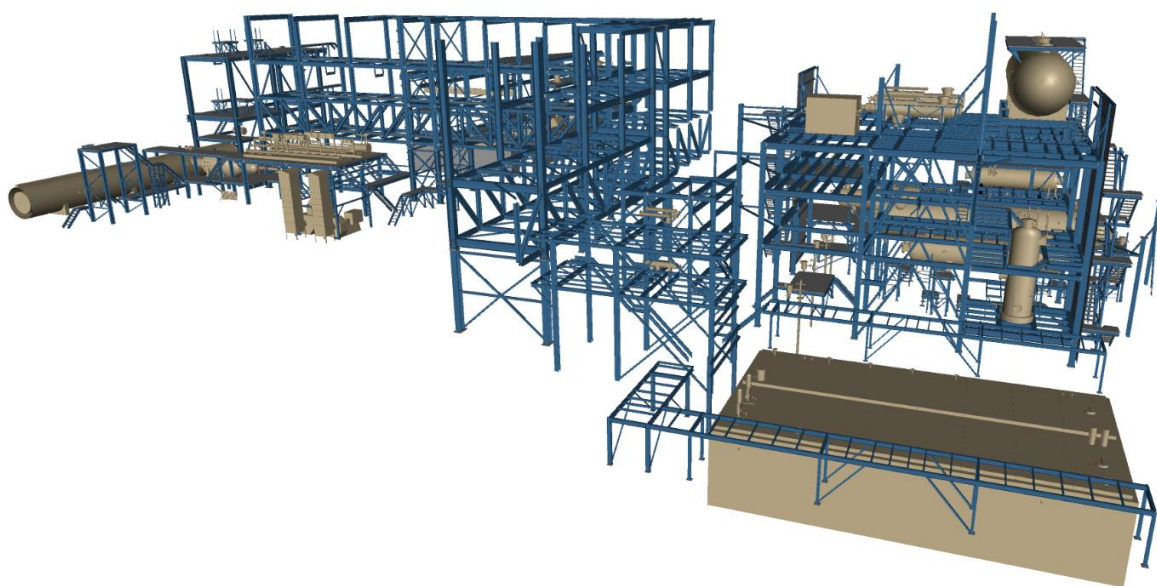


Рис. 4.5.2. Начальное размещение ЕО и необходимых строительных конструкций схемы установки производства элементарной серы

Оптимальная энергоресурсоэффективная трассировка систем теплового обогрева СТТ установки производства элементарной серы с учетом ограничений, полученная с применением разработанного комплекса программ, представлена на рисунке 4.5.3.

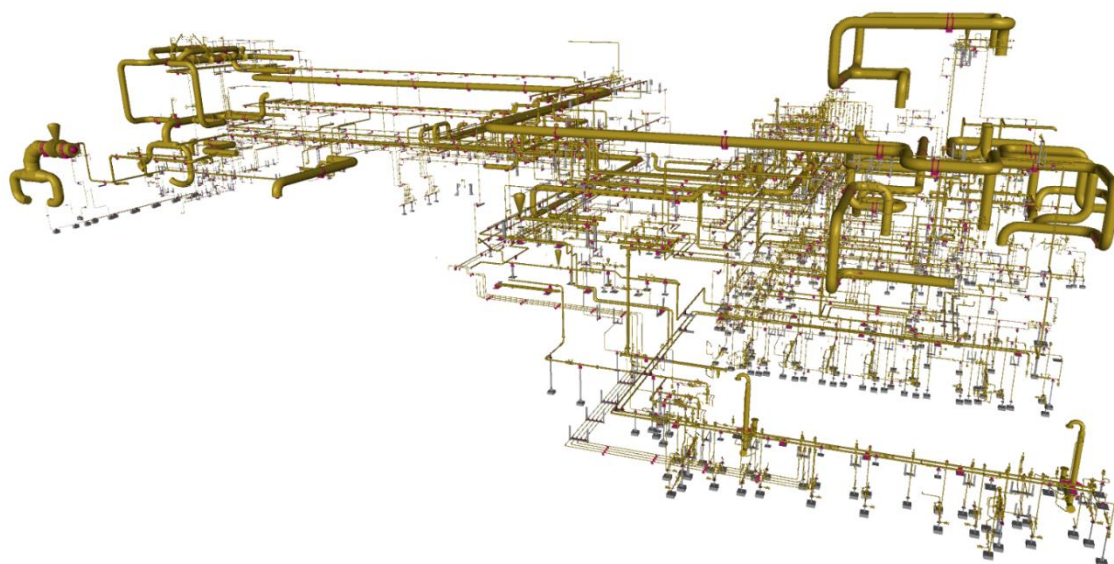


Рис. 4.5.3. Пример оптимальной трассировки системы теплового обогрева СТТ установки производства элементарной серы

Использование разработанного ДТЭ-алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки позволило сократить размеры связывающей сети систем теплового обогрева СТТ и площадь, отведенную под размещение ЕО.

Объем капитальных и эксплуатационных затрат для оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ установки производства элементарной серы не приводится из коммерческих соображений.

Трудозатраты на трассировку систем теплового обогрева технологических трубопроводов сократились в 1,2 – 1,5 раза.

4.6. Выводы

1. Изложены инженерно-технологическая постановка и результаты решения задачи оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ установок производства элементарной серы;
2. Разработаны основные эвристические правила, отражающие технологические, гидродинамические, инженерные, физико-химические и конструкционные ограничения трассировки ТП;
3. Приведены результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности существующей специализированной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом и результатов вычислительных экспериментов по проверке адекватности разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом и сравнения аналитического решения с результатами компьютерного моделирования процесса теплообмена в СТС различных конфигураций на стационарных моделях теплопередачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

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 аппроксимирующей модели установившейся теплопроводности в круге (неподвижном продукте) и кольце (трубе) с краевыми условиями 3-го рода, со специальными эффективными коэффициентами теплоотдачи, которая позволяет учитывать явным образом влияние толщины и свойств материала стенки трубопровода на перепад температур по сечению трубопровода.

2. Проверена адекватность аппроксимационной математической модели процесса теплообмена с применением численного моделирования температурных полей на стационарных моделях теплопередачи методом конечных элементов, которая подтверждает достаточную точность разработанной аппроксимационной математической модели.

3. Сформулирована инженерно-технологическая постановка неформализованной задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ; разработаны наборы эвристических правил энергоресурсоэффективной трассировки, отображающие знания по теории процессов и аппаратов химической технологии, по требуемым технологическим, гидродинамическим, инженерным, физико-химическим ограничениям при поиске рациональной трассировки.

4. Предложен декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева СТТ, который позволяет определять оптимальные энергоресурсоэффективные трассы прокладки сложных технологических трубопроводных систем с минимальными приведенными затратами.

5. Разработан комплекс программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов, который позволяет решать инженерно-техническую задачу трассировки систем теплового обогрева СТТ установок производства элементарной серы.

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

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.

Глоссарий основных терминов и понятий

Информатика и вычислительная техника

1. **Информационная система (ИС)** – совокупность содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих ее обработку информационных технологий и технических средств [139]; компьютерная система, предназначенная для хранения, поиска и обработки информации и использующая организационные ресурсы (трудовые, технические, финансовые и т. д.), которые накапливают, перерабатывают и распространяют информацию [140].
2. **Автоматизированная система** – система, состоящая из персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующая информационные инструменты выполнения установленных функций [141].
3. **Автоматизированное проектирование** – проектирование, при котором отдельные преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представления описаний на различных языках осуществляется взаимодействием человека и ЭВМ [142].
4. **Электронная вычислительная машина (ЭВМ)** – вычислительная машина, основные функциональные устройства которой выполнены на электронных компонентах [142].
5. **База данных (БД)** – структурированная иерархическая совокупность данных, хранимых в соответствии с информационной моделью схемы данных, преобразование и обработку которых выполняют в соответствии с правилами средств представления и управления данными.
6. **Хранилище данных (ХД, англ. Data Warehouse)** – предметно-ориентированная многомерная информационная база данных, специально разработанная и предназначенная для подготовки отчётов и бизнес-анализа с целью поддержки принятия решений в организации.
7. **Система автоматизированного проектирования (САПР, англ. computer-aided design, CAD)** – автоматизированная система, реализующая

автоматизированную, сложную информационную процедуру выполнения функций проектирования, которая представляет собой сложную организационно-техническую человеко-машинную систему, предназначенную для автоматизации процесса проектирования, состоящую из персонала и комплекса аппаратурно-технических, программно-информационных и средств автоматизации проектной деятельности.

8. **Комплекс программ** – набор взаимодействующих компьютерных программ: согласованных по функциям и форматам; имеющих единообразные, точно определенные интерфейсы; составляющих полное инструментальное средство для решения определенного типа задач.
9. **Интеграция** (от лат. **integratio** – «соединение») – процесс объединения отдельных частей в целое.
10. **Интеграция программных систем и продуктов** – это обусловленный взаимосвязанный процесс обмена данными между системами с возможной последующей их обработкой.
11. **Интеллектуальная обработка данных** (англ. **Data Mining**) – это собирательное название, используемое для обозначения совокупности методов обнаружения в данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности.
12. **Итерация** – повторное применение вычислительной операции (с измененными данными) при решении вычислительных задач для постепенного приближения к требуемому результату.
13. **Блок-схема** – тип схем или графических моделей, описывающих структуры, алгоритмы или процессы, в которых отдельные этапы, или шаги, отображаются в виде блоков различной формы, соединенных между собой ориентированными или направленными линиями.
14. **Язык программирования C# (C Sharp)** – язык объектно-ориентированного программирования, язык разработки приложений для

платформы Microsoft .NET Framework, впоследствии стандартизирован как ECMA-334 [144] и ISO/IEC 23270 [145].

15. **AVEVA (ABEBA)** – британская компания AVEVA является разработчиком комплексных ИКТ решения для проектирования, инжиниринга и управления проектами в нефтегазовой, энергетической, химической и судостроительной промышленности.
16. **AVEVA Engineering** – инструментальный комплекс программ для совместной разработки, специалистами разных отделов, базы данных всех технических объектов со всеми ключевыми атрибутами.
17. **AVEVA PDMS (Plant Design Management System - система управления проектированием завода)** – программно-информационный комплекс для решения проектных задач с централизованным хранением данных, предназначенных для трехмерного проектирования промышленных производств.
18. **PML (Programmable Macro Language - макроязык программирования)** – *макроязык программирования*, используемый в комплексе программ AVEVA PDMS.
19. **DABACON** – объектно-ориентированная база данных специально разработанная для операций проектирования с использованием AVEVA PDMS.
20. **EDG (Event-Driven Graphics - управляемая событиями графика)** – библиотека объектно-ориентированных программ, которая позволяет инженерам решать задачи программного управления, визуализации, анимации и доступа к сложным трехмерным объектам.
21. **ELCUT** – комплекс программ для компьютерного моделирования инженерных задач электромагнитных, тепловых и механических процессов с использованием метода конечных элементов.
22. **Технология ActiveField (технология активного поля)** – компьютерная технология, позволяющая разрабатывать собственные программные

приложения, взаимодействующие с ядром ELCUT посредством COM Automation.

23. **COM Automation** (ранее известен как **OLE Automation**) – компьютерное инструментальное средство компании Microsoft, позволяющее обращаться к COM-объектам из интерпретаторов скриптовых языков.
24. **Программный продукт «Изоляция»** – комплекс программ, предназначенный для расчета и выбора тепловой изоляции, формирования теплоизоляционной конструкции изоляционного кожуха трубопроводов, арматуры и оборудования, а также для автоматизированной подготовки проектных документов на тепловую изоляцию.
25. **3D-модель** – это трёхмерная компьютерная модель объекта. Задача 3D-моделирования – разработать визуальный объёмный образ исследуемого объекта. При этом модель может соответствовать реальным или абстрактным объектам.

Химическое производство и химико-технологические системы

26. **Трассировка трубопровода** – процедура прокладки труб для транспортировки жидких и газообразных сред, используемых в определенных технологических процессах.
27. **Задача оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки сложных технологических трубопроводных систем** – неформализованная (эвристическо-вычислительная) задача прокладки трасс технологических трубопроводов, при котором приведенные затраты на проектируемый трубопровод минимальны, с обязательным соблюдением условий функционирования химико-технологических процессов обеспечения промышленной и экологической безопасности при выпуске требуемых продуктов.
28. **Технологический трубопровод** – трубопровод, предназначенный для транспортирования в пределах промышленного производства (установки) различных веществ (сырья, полуфабрикатов, реагентов, а также

промежуточных и конечных продуктов, полученных или используемых в технологических процессах и др.), необходимых для проведения технологических процессов или эксплуатации оборудования некоторого производства (установки).

29. **Сложная технологическая трубопроводная система (СТТС)** – совокупность взаимосвязанных трубопроводов различного диаметра и фасонных частей, опор, арматуры, которая обеспечивает перемещение некоторой рабочей среды между компонентами.
30. **Тепловой спутник (теплоспутник)** – специальный трубопровод для теплоносителя, прокладываемый параллельно в одном изоляционном кожухе с технологическим трубопроводом.
31. **Теплоизоляционная конструкция (ТК)** – сложная конструкция, применяемая для тепловой изоляции аппаратов, трубопроводов, газоходов и воздухопроводов, состоящая из одного или нескольких слоев теплоизоляционного материала (изделия), кровельного слоя и крепежных деталей.
32. **Теплоноситель** – движущаяся жидкая или газообразная среда, используемая для осуществления процесса теплообмена.
33. **Теплообмен** – самопроизвольный процесс переноса теплоты, обусловленный градиентом температуры. Различают следующие виды переноса теплоты, или теплообмена: теплопроводность, конвекция, лучистый теплообмен, теплообмен при фазовых превращениях; на практике теплообмен часто осуществляется одновременно несколькими видами переноса теплоты.
34. **Температурное поле** – совокупность значений температуры, распределенных во всех точках какой-либо пространственной области в данный момент времени. Различают нестационарное температурное поле (изменяется во времени) и стационарное (постоянное).
35. **«Псевдо-одномерная» модель теплообмена** – математическая модель процесса теплообмена, в которой пренебрегают перепадом температуры воздуха в воздушной прослойке, продукта в трубе и теплоносителя в спутнике

по сечению, а теплообмен между воздушной прослойкой, с одной стороны, и наружной поверхностью трубы, спутника, и внутренней поверхностью теплоизоляции описывают некоторыми специальными обобщенными эффективными коэффициентами теплоотдачи.

Математическое моделирование и алгоритмы оптимизации химико-технологических систем

36. **Метод конечных элементов (МКЭ)** – численный метод решения дифференциальных уравнений в частных производных, а также интегральных уравнений в прикладных задачах. Метод широко используется для решения задач математического моделирования в механике деформируемого твёрдого тела (сопромата), процессов теплообмена, гидродинамики и электродинамики.
37. **Граничные условия** – условия, специально определяющие на границе применимости математической модели объекта значения параметров, характеризующих допустимое состояние моделируемого объекта.
38. **Уравнение Лапласа** – дифференциальное уравнение эллиптического типа в частных производных, содержащее неизвестные функции нескольких переменных и их частные производные, описывающее стационарные процессы различной физической природы (колебания, теплопроводность, диффузия и др.).
39. **Ряд Фурье** – ряд синусоидальных и косинусоидальных функций, с помощью которого можно представить разложение всех периодических функций.
40. **Метод Pegasus'a** – метод поиска корня соответствующего нелинейного уравнения.
41. **Компьютерное моделирование** – проведение серии вычислительных экспериментов на программно-реализованной математической модели объекта, целью которых является расчет показателей, анализ, интерпретация и сопоставление результатов вычислительных экспериментов с показателями

- реального функционирования изучаемого объекта и, при необходимости, последующее уточнение вида и параметров математической модели и т. д.
42. **Геометрическая модель** – модель, отображающая геометрические размеры исследуемого объекта.
43. **Математическая модель объекта** – математическое описание структуры, свойств и режимов функционирования объекта.
44. **Математическое моделирование** – процесс разработки (создания, или построения) и изучения характеристик математических моделей.
45. **Лицо, принимающее решение (ЛПР)** – субъект решения, наделённый определёнными компетенциями, или полномочиями, который несет ответственность за последствия принятого и реализованного решения.
46. **Постановка задачи** – точная формулировка условий рассматриваемой прикладной задачи с описанием ограничений входной и выходной информации.
47. **Критерий эффективности** – специальный показатель качества решения задачи, достижения требуемого результата решения, по значению которого оценивается оптимальность использования некоторых ресурсов для достижения наилучшего решения, удовлетворяющего поставленным требованиям или ограничениям.
48. **Аналитическая математическая модель** – математическая (абстрактная) модель реального объекта, формально отображающая структуру и режимы функционирования некоторого объекта, процесса или явления в виде алгебраических, дифференциальных и других уравнений.
49. **Гидравлическая цепь (ГЦ)** – идеальная физическая модель системы технологических трубопроводов (СТТ), используемая для формализации и алгоритмизации гидравлических расчетов СТТ при исследовании разнообразных стационарных и нестационарных гидродинамических процессов и явлений в установившихся (статических) и неустойчивых

(переходных и динамических) режимах потокораспределения транспортируемых веществ. Представляет собой один из классов транспортно-коммуникационных систем, обеспечивающих перемещение определенного вида веществ в соответствии с общими законами гидродинамики, сохранения массы и энергии [1, 2].

50. **Эвристический алгоритм** – алгоритм решения некоторой неформализованной задачи, обеспечивающий поиск некоторого рационального решения задачи, не являющегося гарантированно точным или оптимальным, но достаточным для решения поставленной задачи.

Теория графов

51. **Алгоритм построения кратчайшего связывающего остова (КСО)** – алгоритм, построения оптимального остова исходного графа с взвешенными ребрами, имеющего оптимальный возможный суммарный вес ребер остова в целом.
52. **Алгоритм Краскала (англ. Kruskal's algorithm)** – алгоритм построения минимального остова исходного взвешенного связного неориентированного графа. Модифицированный алгоритм Краскала – алгоритм, отличающийся применением процедуры проверки образованию цикла в графе T при добавлении ребра.
53. **Алгоритм Прима** – алгоритм построения минимального остова исходного взвешенного связного графа.
54. **Метод ветвей и границ (англ. branch and bound)** – метод полного перебора с отсевом подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных решений, для поиска оптимальных решений различных задач оптимизации.
55. **Граф** – это топологическая фигура, или конфигурация, представляющая собой совокупность вершин V и набора соединяющих некоторые из них направленных или ненаправленных отрезков E , свойства которой не изменяются при любых непрерывных и взаимно-однозначных

(топологических) пространственных преобразованиях, производимых без разрывов и склеиваний. Граф формально обозначается $G_T(V, E)$.

- 56. **Ребро** – ненаправленный отрезок, соединяющий пару вершин графа.
- 57. **Дуга** – направленный отрезок, соединяющий пару вершин графа.
- 58. **Гидравлический структурный граф** – это взвешенный ориентированный циклический граф, отображающий структуру гидравлической цепи, а также особенности распределения расходов транспортируемых веществ и давлений между элементами гидравлической цепи.
- 59. **Дерево** – это связный ациклический граф, в котором любая пара вершин соединена только одной цепью или одним путем.
- 60. **Остов исходного графа** – это подграф в виде дерева, которому принадлежат все вершины исходного графа.

Специальные инженерно-технические термины задачи трассировки трубопроводов

- 1. **Запитка** – место подвода теплоспутника к технологическому трубопроводу.
- 2. **Распитка** – место отвода теплоспутника от технологического трубопровода.
- 3. **Перекидка** – переход теплоспутника от одного обогреваемого трубопровода к другому.
- 4. **Распределительная гребенка** – специальный трубопровод, обеспечивающий равномерное распределение теплоносителя в системе обогрева. По типу гребенки бывают запиточные или распиточные.

ПРИЛОЖЕНИЯ

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

Разработка 3D-модели трассировки обогревающих спутников начинается с анализа исходной информации, передаваемой в модуль Design системы автоматизированного проектирования AVEVA PDMS, используя меню 1 – «Работа с обогреваемыми трубами» (интерфейс представлен на рисунке П.1.1) программного комплекса. Этот блок позволяет:

- Выбирать обогреваемые трубы в зависимости от типа обогрева;
- Подсвечивать трубопроводы в зависимости от количества спутников;
- Выполнять оценочные расчеты длин спутников и числа переходов.

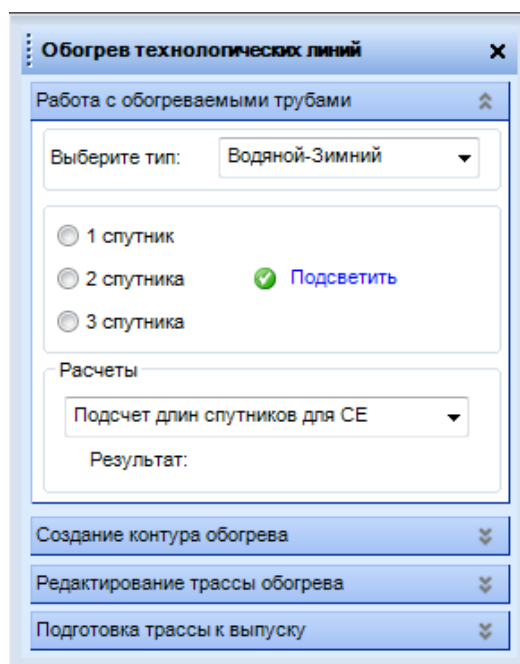


Рис. П.1.1. Меню «Работа с обогреваемыми трубами»

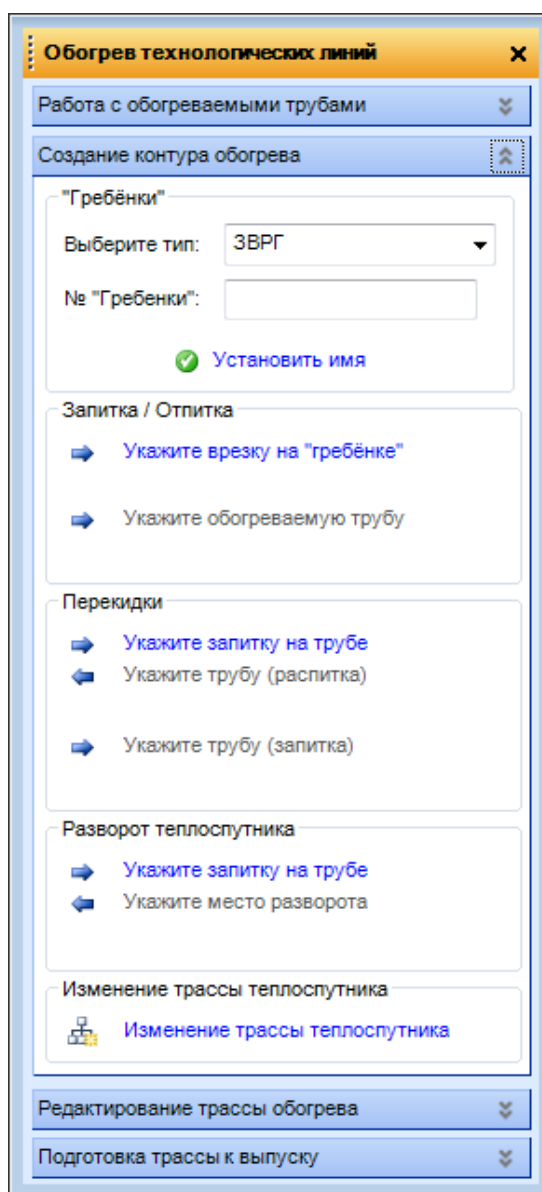


Рис. П.1.2. Меню «Создание контура обогрева»

Для создания контура обогрева, на этапе эскизного проектирования, используется меню «Создание контура обогрева» (интерфейс представлен на рисунке П.1.2):

- Назначается тип и номер гребенки - трубопровода, обеспечивающего равномерное распределение теплоносителя. По типу гребенки бывают запиточные или распиточные (пример, РВРГ - распиточная водяная распределительная гребенка). В модели распределительные гребенки должны иметь первый порядковый номер линии (пример, HWR-657-0003-001, HWS-657-0005-001 и т.д.). Так же, для удобства поиска и упорядочения, гребенки

должны быть пронумерованы в формате «номер секции - номер гребенки по порядку» (пример, ЗВРГ №50-1).

- Строится трасса первой перекидки от запиточной «гребёнки» и трассы последней перекидки к распиточной «гребёнке» (см. рис. П.1.3):

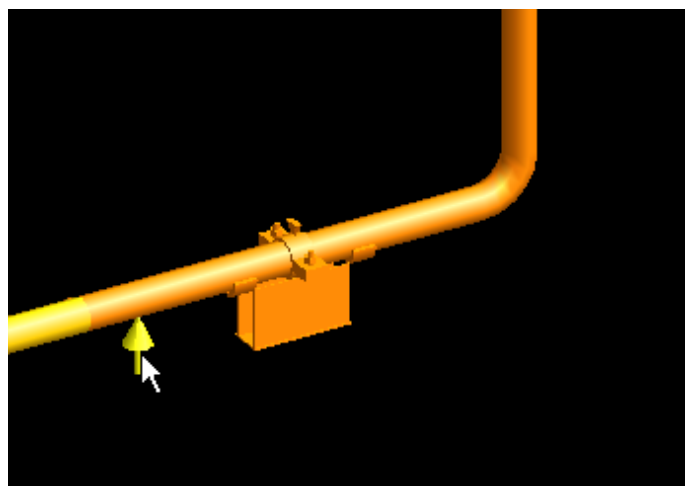
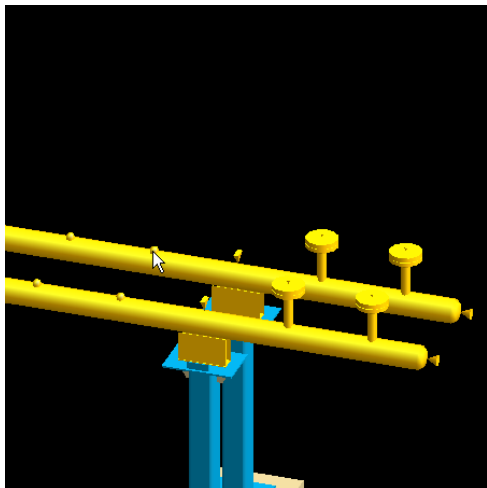
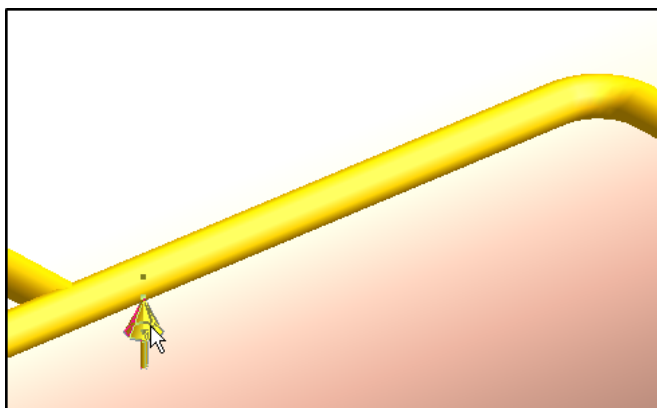
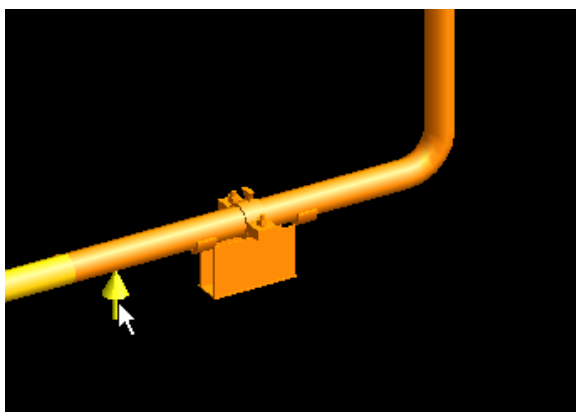


Рис. П.1.3. Места отпитки на гребенке и запитки на обогреваемом трубопроводе

- Строятся все остальные перекидки (см. рис. П.1.4);



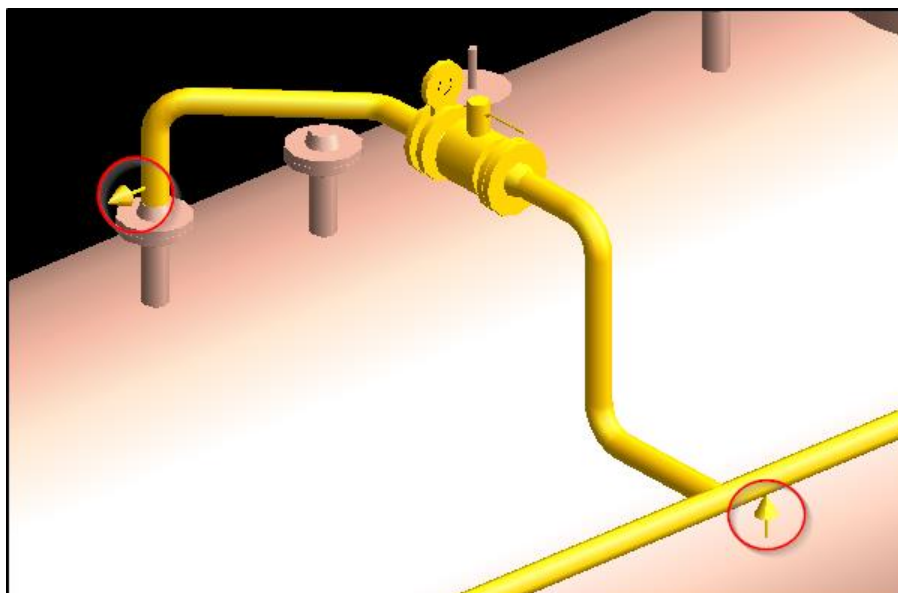


Рис. П.1.4. Места отпитки и запитки на обогреваемом трубопроводе

- Устанавливается место разворота теплоспутника при обогреве двумя или более спутниками (см. рис. П.1.5);

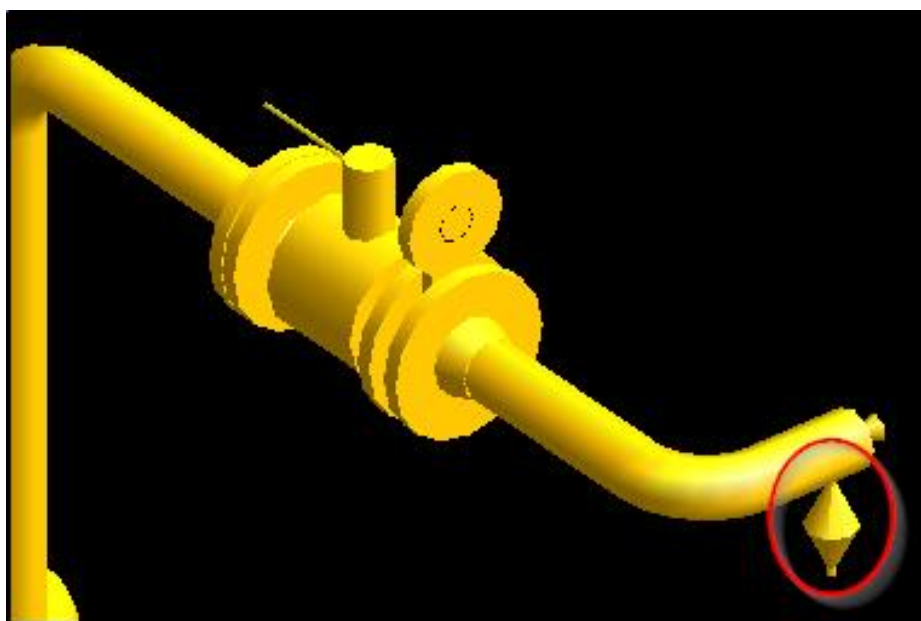


Рис. П.1.5. Место разворота трассы на обогреваемом трубопроводе

- Добавляются при необходимости новые участки обогрева к уже созданному контуру.

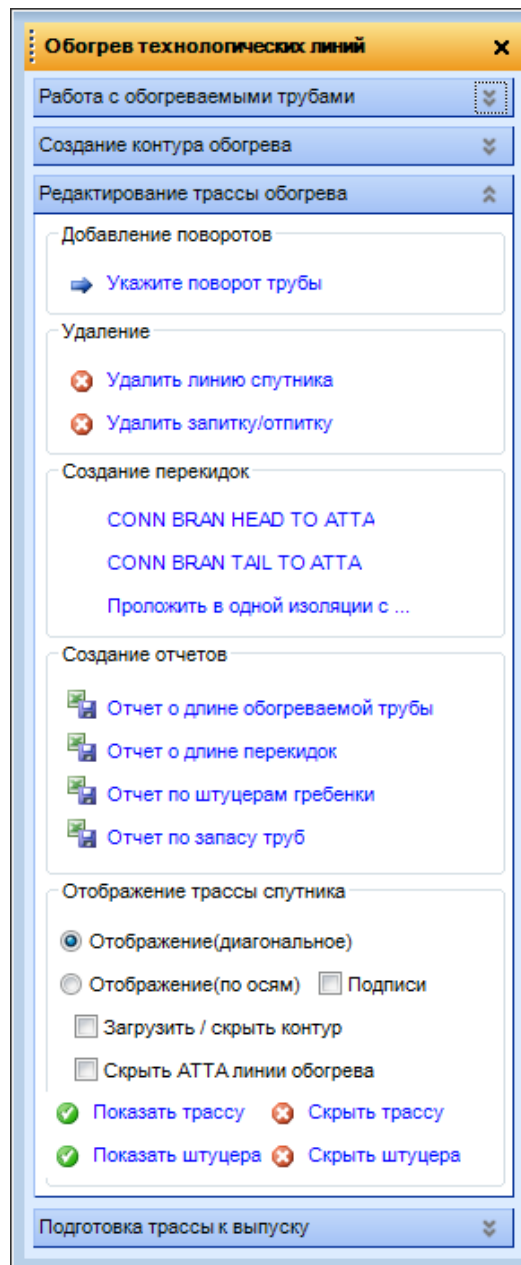


Рис. П.1.6. Интерфейс меню «Редактирование/результаты»

Меню «Редактирование/результаты» (см. рис. П.1.6) предназначено для:

- Выбора способа графического отображения трассы теплоспутника:
 - Диагональное отображение (см. рис. П.1.7) – показывает трассу с порядковыми номерами, участки перекидок отображает прямой линией.

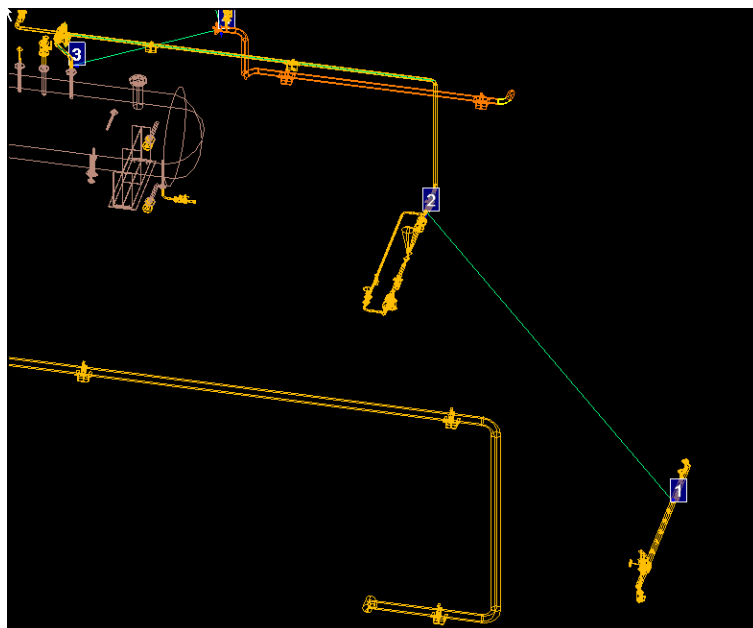


Рис. П.1.7. Диагональное отображение трассы теплоспутника

- Отображение по осям (см. рис. П.1.8) - показывает трассу с порядковыми номерами, участки перекидок отображает линией, прорисованной по осям.

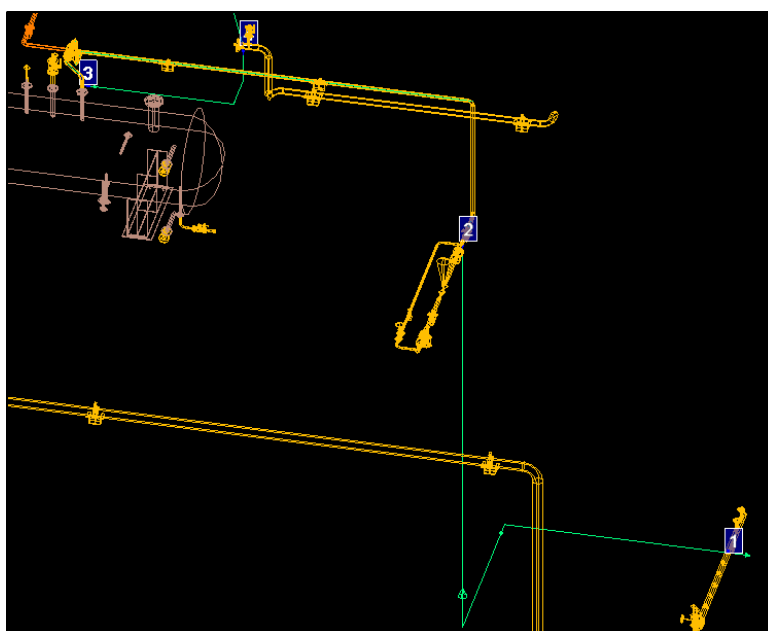


Рис. П.1.8. Отображение трассы теплоспутника по осям

- Добавления поворотов в трассу теплоспутника - на этапе технического проекта – на частой сетке, что дает более качественную разводку (см. рис. П.1.9).

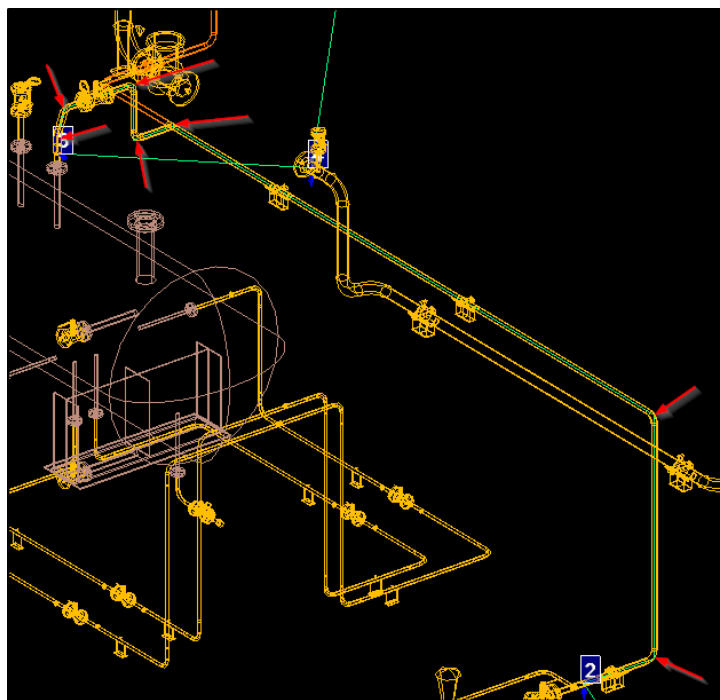


Рис. П.1.9. Отображение трассы теплоспутника с добавленными поворотами

- Удаления всего контура или отдельно системы запитка / распитка;
- Присоединения перекидок к местам запитки / распитки:

Перекидки условно можно разделить на 3 вида:

- «Технические» - возникают либо при изменении названия трубопровода, либо при разветвлении трубопровода (см. рис. П.1.10);

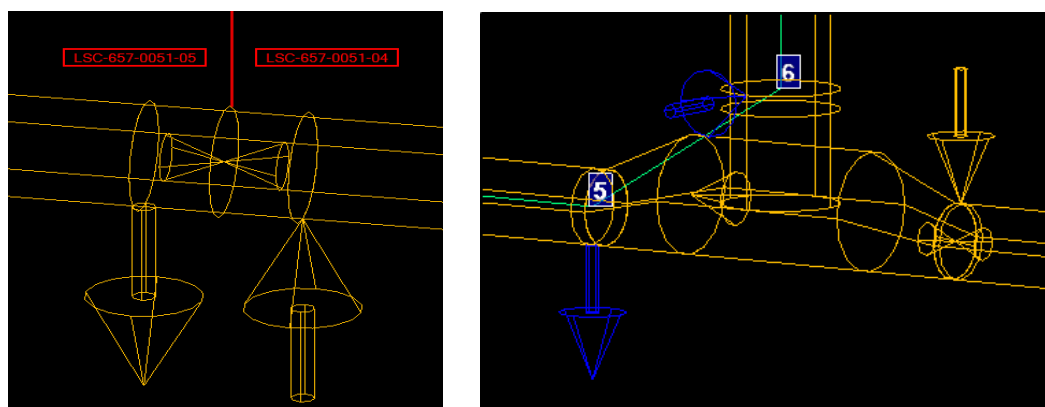


Рис. П.1.10. «Технические» перекидки

- «Короткие» - перекидки длиной около 0,5 м, для которых не нужно разрабатывать изометрический чертеж, но длину необходимо учитывать в спецификации (см. рис. П.1.11);

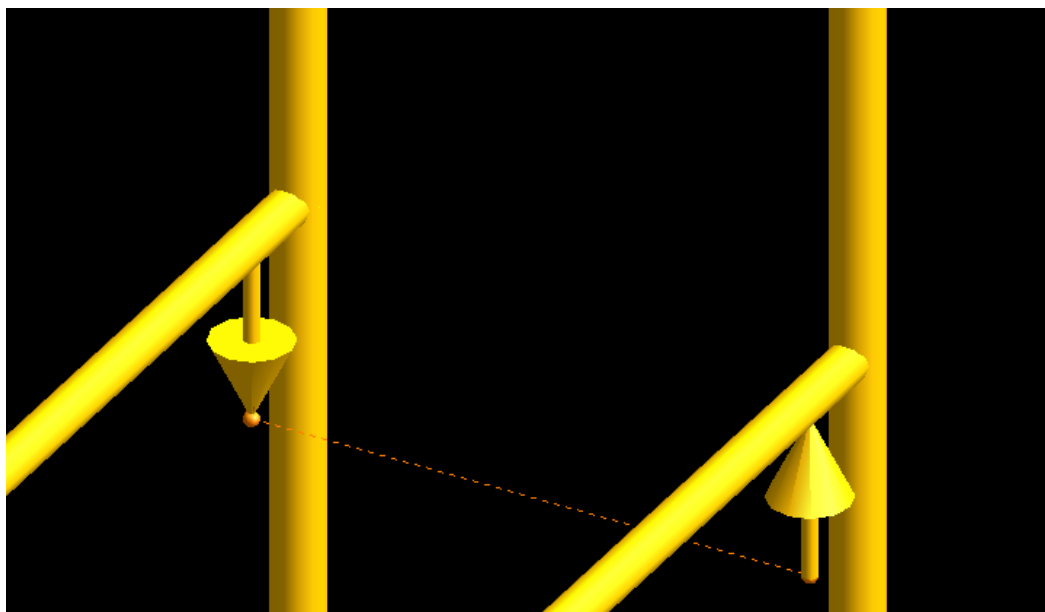


Рис. П.1.11. «Короткие» перекидки

- «Длинные» - выполняются как обычные трубопроводы (см. рис. П.1.12).

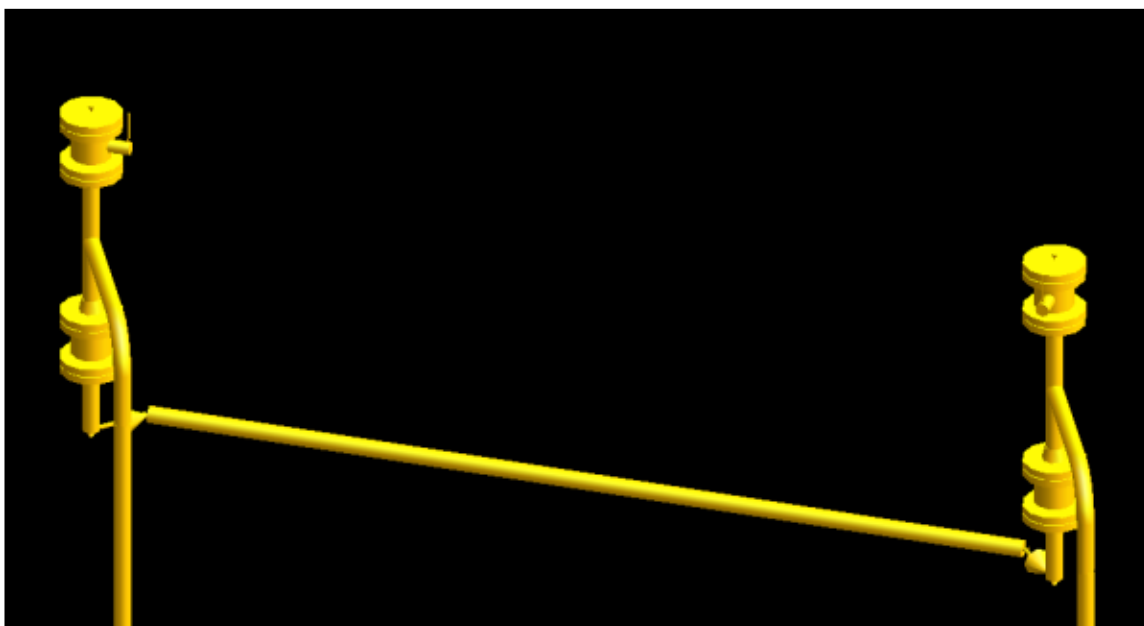


Рис. П.1.12. «Длинные» перекидки

- Получения необходимых отчетов (см. рис. П.1.13-1.16):

1	Порядок обогрева трубопроводов от ЗБРГ № 40-1.1 до РВРГ № 40-1.1				
2	Поз.	Описание	Позиция линии обогрева	Позиция обогреваемого трубопровода	Длина, м
3		1 Запитка т.с. от ЗБРГ № 40-1.1	HWS-323-0006-03	-	14
4		2 Запитка т.с. к Р-323-0002-03	-	P-323-0002-03	24.3
5		3 Распитка т.с. от Р-323-0002-03	-	P-323-0002-03	0.0*
6		4 Запитка т.с. к Р-323-0002-02	-	P-323-0002-02	9.5
7		5 Распитка т.с. от Р-323-0002-02	-	P-323-0002-02	0.0*
8		6 Запитка т.с. к Р-323-0002-08	-	P-323-0002-08	6.9
9		7 Распитка т.с. от Р-323-0002-08	-	P-323-0002-08	0.0*
10		8 Запитка т.с. к Р-323-0002-02	-	P-323-0002-02	5.1
11		9 Распитка т.с. от Р-323-0002-02	-	P-323-0002-02	0.0*
12		10 Запитка т.с. к Р-323-0002-01	-	P-323-0002-01	15.4
13		11 Распитка т.с. от Р-323-0002-01	HWS-323-0006-07	-	4.8
14		12 Запитка т.с. к Р-323-0002-09	-	P-323-0002-09	3.6
15		13 Распитка т.с. от Р-323-0002-09	HWS-323-0006-07	-	4.8
16		14 Запитка т.с. к Р-323-0009-03	-	P-323-0009-03	3.4
17		15 Распитка т.с. от Р-323-0009-03	HWS-323-0006-09	-	4.7
18		16 Запитка т.с. к Р-323-0009-01	-	P-323-0009-01	35.2
19		17 Разворот т.с. на Р-323-0009-01	-	P-323-0009-01	0.0*
20		18 Разворот т.с. на Р-323-0009-01	-	P-323-0009-01	35.2
21		19 Распитка т.с. от Р-323-0009-01	HWS-323-0006-10	-	4.6
22		20 Запитка т.с. к Р-323-0009-03	-	P-323-0009-03	3.5
23		21 Распитка т.с. от Р-323-0009-03	HWS-323-0006-11	-	5.4
24		22 Запитка т.с. к Р-323-0002-09	-	P-323-0002-09	3.7
25		23 Распитка т.с. от Р-323-0002-09	HWS-323-0006-12	-	4.6
26		24 Запитка т.с. к Р-323-0002-01	-	P-323-0002-01	15.5
27		25 Распитка т.с. от Р-323-0002-01	-	P-323-0002-01	0.0*
28		26 Запитка т.с. к Р-323-0002-08	-	P-323-0002-08	6.9
29		27 Разворот т.с. на Р-323-0002-08	-	P-323-0002-08	0.0*
30		28 Разворот т.с. на Р-323-0002-08	-	P-323-0002-08	6.9
31		29 Распитка т.с. от Р-323-0002-08	-	P-323-0002-08	0.0*
32		30 Запитка т.с. к Р-323-0002-02	-	P-323-0002-02	9.6
33		31 Распитка т.с. от Р-323-0002-02	-	P-323-0002-02	0.0*
34		32 Запитка т.с. к Р-323-0002-03	-	P-323-0002-03	24.2
35		33 Распитка т.с. от Р-323-0002-03	HWR-323-0006-03	-	15.4
36		34 Распитка т.с. к РВРГ № 40-1.1	-	-	-
37		Общая длина			267.2
38	Порядок обогрева трубопроводов от ЗБРГ № 40-1.2 до РВРГ № 40-1.2				
39	Поз.	Описание	Позиция линии обогрева	Позиция обогреваемого трубопровода	Длина, м
40		1 Запитка т.с. от ЗБРГ № 40-1.2	HWS-323-0006-04	-	11.7
41		2 Запитка т.с. к Р-323-0008-02	-	P-323-0008-02	13.8
42		3 Распитка т.с. от Р-323-0008-02	-	P-323-0008-02	0.0*
43		4 Запитка т.с. к Р-323-0008-03	-	P-323-0008-03	4.8

Рис. П.1.13. Отчет по штуцерам гребенки

№	A	B	C	D	E	F
1	Тип запитки/отпитки/перекидки	№	Описание	Позиция	Общая (приблизительная) длина спутника, мм	Длина обогреваемого участка трубы, мм
2	OLET	1	Запитка т.с. от ЗБРГ № 40-1.1	E 87687.37mm N 18360.049mm U 600mm WRT /°	0mm	0mm
3	АТТА	2	Запитка т.с. к Р-323-0002-03	E 87372.367mm N 18299.994mm U 13563mm WRT /°	13338mm	0mm
4	АТТА	3	Распитка т.с. от Р-323-0002-03	E 73250mm N 16599.998mm U 5063mm WRT /°	37680mm	24322mm
5	АТТА	4	Запитка т.с. к Р-323-0002-02	E 73250mm N 16056.056mm U 4363mm WRT /°	38904mm	24322mm
6	АТТА	5	Распитка т.с. от Р-323-0002-02	E 65271.383mm N 14549.998mm U 4363mm WRT /°	48389mm	33807mm
7	АТТА	6	Запитка т.с. к Р-323-0002-08	E 64853mm N 14832.628mm U 4363mm WRT /°	49090mm	33807mm
8	АТТА	7	Распитка т.с. от Р-323-0002-08	E 70591mm N 14816.546mm U 4363mm WRT /°	56028mm	40745mm
9	АТТА	8	Запитка т.с. к Р-323-0002-02	E 70288.254mm N 14549.998mm U 4363mm WRT /°	56598mm	40745mm
10	АТТА	9	Распитка т.с. от Р-323-0002-02	E 65166.435mm N 14549.998mm U 4363mm WRT /°	61720mm	45867mm
11	АТТА	10	Запитка т.с. к Р-323-0002-01	E 64523.69mm N 14549.998mm U 4363mm WRT /°	62363mm	45867mm
12	АТТА	11	Распитка т.с. от Р-323-0002-01	E 61473.245mm N 15049.998mm U 1155mm WRT /°	77738mm	61242mm
13	АТТА	12	Запитка т.с. к Р-323-0002-09	E 66403.023mm N 15049.998mm U 1155mm WRT /°	82668mm	61242mm
14	АТТА	13	Распитка т.с. от Р-323-0002-09	E 67449mm N 12495.381mm U 1155mm WRT /°	86269mm	64843mm
15	АТТА	14	Запитка т.с. к Р-323-0009-03	E 64384mm N 8606.344mm U 1155mm WRT /°	93223mm	64843mm
16	АТТА	15	Распитка т.с. от Р-323-0009-03	E 65271.879mm N 6100mm U 1155mm WRT /°	96617mm	68237mm
17	АТТА	16	Запитка т.с. к Р-323-0009-01	E 70140.562mm N 6100.001mm U 1155mm WRT /°	101486mm	68237mm
18	АТТА	17	Разворот т.с. на Р-323-0009-01	E 75000mm N 10674.52mm U 15036mm WRT /°	136847mm	103398mm
19	АТТА	18	Разворот т.с. на Р-323-0009-01	E 75000mm N 10674.52mm U 15036mm WRT /°	136847mm	103398mm
20	АТТА	19	Распитка т.с. от Р-323-0009-01	E 70135mm N 6100.001mm U 1155mm WRT /°	171614mm	138565mm
21	АТТА	20	Запитка т.с. к Р-323-0009-03	E 65353.768mm N 6100mm U 1155mm WRT /°	176565mm	138565mm
22	АТТА	21	Распитка т.с. от Р-323-0009-03	E 64384mm N 8669.766mm U 1155mm WRT /°	180135mm	142105mm
23	АТТА	22	Запитка т.с. к Р-323-0002-09	E 67449mm N 12453.865mm U 1155mm WRT /°	186984mm	142105mm
24	АТТА	23	Распитка т.с. от Р-323-0002-09	E 66366.145mm N 15049.998mm U 1155mm WRT /°	190633mm	145784mm
25	АТТА	24	Запитка т.с. к Р-323-0002-01	E 61574mm N 15049.998mm U 1155mm WRT /°	195456mm	145784mm
26	АТТА	25	Распитка т.с. от Р-323-0002-01	E 64506.874mm N 14549.998mm U 4363mm WRT /°	210914mm	161243mm
27	АТТА	26	Запитка т.с. к Р-323-0002-08	E 64853mm N 14830.049mm U 4363mm WRT /°	211540mm	161243mm
28	АТТА	27	Разворот т.с. на Р-323-0002-08	E 70591mm N 14855.05mm U 4363mm WRT /°	218443mm	168146mm
29	АТТА	28	Разворот т.с. на Р-323-0002-08	E 70591mm N 14855.05mm U 4363mm WRT /°	218443mm	168146mm
30	АТТА	29	Распитка т.с. от Р-323-0002-08	E 64853mm N 14850.896mm U 4363mm WRT /°	225325mm	175028mm
31	АТТА	30	Запитка т.с. к Р-323-0002-02	E 65176.163mm N 14549.998mm U 4363mm WRT /°	225949mm	175028mm
32	АТТА	31	Распитка т.с. от Р-323-0002-02	E 73250mm N 16051.069mm U 4363mm WRT /°	235524mm	184603mm
33	АТТА	32	Запитка т.с. к Р-323-0002-03	E 73250mm N 16599.998mm U 5013mm WRT /°	236723mm	184603mm
34	АТТА	33	Распитка т.с. от Р-323-0002-03	E 87230.801mm N 18299.994mm U 13563mm WRT /°	260954mm	208834mm
35	OLET	34	Распитка т.с. к РВРГ № 40-1.1	E 87687.37mm N 20718.936mm U 600mm WRT /°	276793mm	208834mm

Рис. П.1.14. Отчет о длине обогреваемой трубы

	A	B	C	D	E	F	G
1	Имя BRANCH	Описание трубы	Стандарт материала	Длина	мм	Длина	м
2	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	4079.724	мм	4.08	м
3	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	2279.4608	мм	2.279	м
4	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	1981.261	мм	1.981	м
5	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	1493.4493	мм	1.493	м
6	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	1427.4068	мм	1.427	м
7	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	440.1659	мм	0.44	м
8	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	1437.88	мм	1.438	м
9	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	2952.716	мм	2.953	м
10	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	275.486	мм	0.275	м
11	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	3915.3716	мм	3.915	м
12	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	10136.98263	мм	10.137	м
13	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	512.034	мм	0.512	м
14	/HWS-320-0014-001	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	2164.277	мм	2.164	м

Рис. П.1.15. Отчет о длине перекидок

	1	2	3
1	Описание трубы	Стандарт материала	Длина, м
2	Труба 25х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	41.72
3	Труба 32х3.5 ГОСТ 8734-75	Сталь 20 ГОСТ 8733-74	3.647

Рис. П.1.16. Отчет по запасу труб

Для создания структуры проекта обогрева и подготовки трассы к выпуску используется меню – «Подготовка трассы к выпуску» (см. рис. П.1.17):

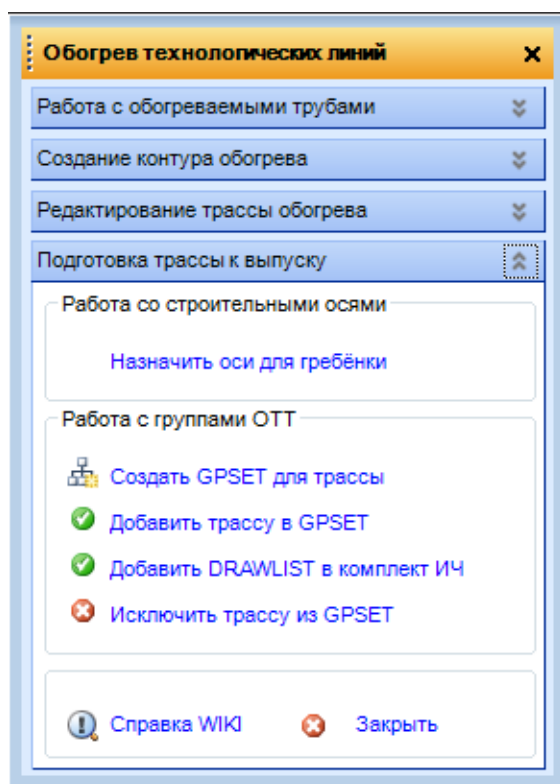


Рис. П.1.17. Меню «Подготовка трассы к выпуску»

- используется для отображения привязок к строительным осям на изометрических чертежах гребенок (см. рис. П.1.18):

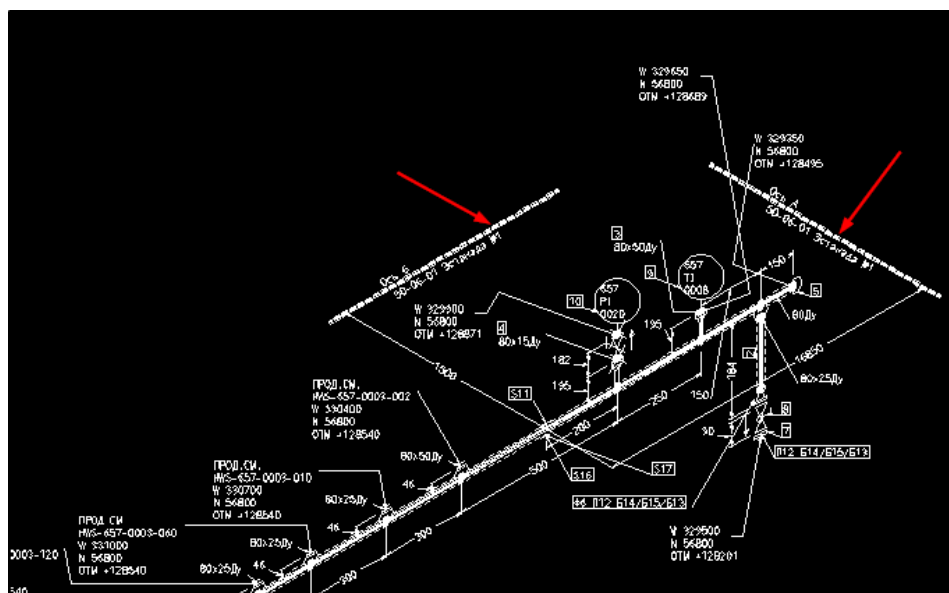


Рис. П.1.18. Строительные оси на изометрических чертежах гребенок

- используется для структурирования и компоновки трубопроводов обогрева перед выпуском.

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

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017663546

**«Программный комплекс проектирования обогрева
технологических трубопроводов тепловыми спутниками
для системы автоматизированного проектирования AVEVA
PDMS»**

Правообладатель: *Акционерное общество «Гипрогазоочистка» (RU)*

Авторы: *Кохов Тимур Александрович (RU), Гартман Томаши
Николаевич (RU), Корельштейн Леонид Бенционович (RU),
Фролов Андрей Александрович (RU), Салихов Раил Ришатович
(RU)*

Заявка № **2017660670**
Дата поступления **17 октября 2017 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **07 декабря 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



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



Гипрогазоочистка
Инжиниринговая компания

АО «Гипрогазоочистка»
ул. Первомайская, д. 126, г. Москва, 105203, Россия
Тел.: +7 (495) 231-3052, 465-1742 Факс: +7 (499) 461-1741

№ _____
На № _____ от _____

Акт

об использовании результатов диссертационной работы

г. Москва

06.09.2017 г.

Настоящим актом подтверждается использование научных результатов диссертационной работы Кохова Тимура Александровича, ведущего инженера департамента САПР на тему: «Топологическо-эвристическо-вычислительные алгоритмы и комплекс программ оптимизации энергоресурсоэффективности трассировки систем обогрева сложных технологических трубопроводов» в проектах, выполняемых АО «Гипрогазоочистка». Несомненный практический интерес представляют следующие практические результаты:

1. Разработанные алгоритмы и комплекс программ успешно применены для решения инжиниринговых задач прокладки оптимальных энергоресурсоэффективных трасс сложных систем теплового обогрева технологических трубопроводов установок производства элементарной серы на нефтеперерабатывающих заводах.

2. Применение разработанного комплекса программ оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов позволило сократить время принятия оптимальных проектных решений и выбора оптимальных энергоресурсоэффективных трасс проектируемых химических производств.

Первый заместитель генерального директора

Слесарева И.В.

Аспирант РХТУ им. Д.И.Менделеева,

ведущий инженер департамента САПР

Кохов Т.А.



www.ggo.ru



ggo@ggo.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем: учеб. для вузов. М.: Химия, 1991. 432 с.
2. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов. М.: Химия. 1991. 279 с.
3. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1991. 400 с.
4. Хижняков С. В. Практические расчеты тепловой изоляции (для промышленного оборудования и трубопроводов). М.: «ЭНЕРГИЯ», 1976. 200 с.
5. Гурьев В. В., Жолудов В. С., Петров-Денисов В. Г. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет. М.: Стройиздат, 2003. 415 с.
6. Миркин А.З., Усиныш В.В. Трубопроводные системы: Справ. изд. М.: Химия, 1991. 256 с.
7. Кафаров В.В., Ветохин В.Н. Основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Наука, 1987. 623 с.
8. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. М.: Химия, 1979. 320 с.
9. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. М.: Химия, 1995. 368 с.
10. Кафаров, В.В., Мешалкин В.И., Финкельштейн Б.И. Эвристический маршрутно-реверсный алгоритм оптимальной трассировки трубопроводов химико-технологических систем // Теоретические основы химической технологии. 1991. Т. 25, №3. С. 416-421.

11. Мешалкин В.П., Образцов А.А., Ходченко С.М., Панина Е.А. Редукционный топологическо-эвристический метод поиска оптимальных трасс разветвленных сетей технологических трубопроводов // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. 2013. Т. 56, № 12. С. 132-135
12. Мешалкин В.П., Глушко С.И. Иерархические нечеткие многоколонийные муравьиные алгоритмы и комплекс программ оптимизации телекоммуникационных сетей нефтетранспортных предприятий. Смоленск: Универсум, 2013. 142 с.
13. Мешалкин В.П., Образцов А.А. Декомпозиционно-эвристический алгоритм оптимального размещения технологического оборудования химических производств // Изв. Вузов. Химия и хим. Технология. 2009. – Т. 52, № 10. С. 102-105.
14. Mohinder L. Nayyar. Piping handbook. 7th ed. P. 2482.
15. J. Phillip Ellenberger. Piping and Pipeline Calculations Manual Construction, Design Fabrication and Examination. Second Edition, 2014. P. 398.
16. Bob Wilson. Detail Engineering and Layout of Piping Systems. 2011. P. 434.
17. ISO 10077-2:2012. Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames.
18. СП 61.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003 (с Изменением № 1).
19. Стандарт организаций. СТО ИПН/НТП 17-02-2010. ОБОГРЕВАЮЩИЕ СПУТНИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ. Основные положения по проектированию. Москва. 2010.
20. Указания по проектированию систем обогрева технологических трубопроводов и оборудования на открытых площадках в химической промышленности, ВСН 2-82, Минхимпром, Москва, 1982. 25 с.

21. Альбом чертежей внутреннего типажа. Спутники технологических трубопроводов. Т-ТТ-06-85, Грозгипронефтехим, Грозный, 1985. 48 с.
22. Инструкция по расчету и проектированию теплоизоляционных конструкций продуктопроводов, обогреваемых паровыми и водяными спутниками, ВСН 168-76/ММСС СССР, Москва, 1978. 89 с.
23. Малыгин Е.Н., Егоров С.Я., Немтинов В.А., Громов М.С. Информационный анализ и автоматизированное проектирование трехмерных компоновок оборудования химико-технологических схем: учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. 128 с.
24. Егоров С.Я., Немтинов В.А., Громов М.С. Автоматизация компоновки оборудования в цехах ангарного типа. Часть 1 // Химическая промышленность. 2003. №8. С. 21-28.
25. Егоров С.Я., Немтинов В.А., Майоров С.П. Автоматизация компоновки оборудования в цехах ангарного типа. Часть 2. Трассировка технологических трубопроводов // Химическая промышленность. 2003. №8. С. 29-34.
26. Егоров С.Я. Методология построения автоматизированной информационной системы принятия проектных решений по компоновке промышленных объектов: дис. ... доктора техн. наук. Томск, 2008. 371 с.
27. Зайцев И.Д. Теория и методы автоматизированного проектирования химических производств: Структурные основы. Киев, 1981. 308 с.
28. Малыгин Е.Н., Егоров С.Я., Громов М.С. Методика решения задачи компоновки в цехах ангарного типа // Химическая промышленность сегодня. 2006. № 6. С. 46-55.
29. Малыгин Е.Н., Егоров С.Я., Громов М.С. Постановка задачи компоновки оборудования ХТС в цехах ангарного типа // Химическая промышленность сегодня. 2006. № 7. С. 50-56.

30. Образцов А. А. «Топологические декомпозиционно-эвристические алгоритмы и комплекс программ оптимальной ресурсоэнергоэффективной компоновки химических производств»: дис. ... канд. техн. наук. 2009. 190 с.
31. Georgiadis M.C., Rotstein G.E., Macchietto S. Optimal Layout Design in Multipurpose Batch Plants // *Industrial & Engineering Chemical Research*. 1997. 36 (11). P. 4852-4863.
32. Georgiadis M.C., Schilling G., Rotstein G.E., Macchietto S. A general mathematical programming approach for process plant layout // *Computers & Chemical Engineering*. Volume 23. Issue 7. 1999. P. 823-840.
33. Papageorgiou L.G., Rotstein G.E. Continuous-Domain Mathematical Models for Optimal Process Plant Layout // *Industrial & Engineering Chemical Research*. 1998. 37 (9). P. 3631-3639.
34. Xu G., Papageorgiou L.G. A Construction-Based Approach to Process Plant Layout Using Mixed-Integer Optimization // *Industrial & Engineering Chemical Research*. 2007. 46 (1). P. 351-358.
35. Swaney R.E., Guirardello R. Optimization of process plant layout with pipe routing // *Computers & Chemical Engineering*. Volume 30. Issue 1. 2005. P. 99-114.
36. Новицкий Н.Н., Сеннова Е.В., Сухарев М.Г. Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 273 с.
37. Бутусов О.Б., Кантюков Р.А., Мешалкин В.П. Компьютерное моделирование полей температуры и давления нестационарных турбулентных газовых течений в технологических трубопроводах // *Химическая промышленность*. 1998. №7. С. 433-438.
38. Кантюков Р.А., Бутусов О.Б., Дови В.Г., Мешалкин В.П. Компьютерное моделирование течения сжимаемых газов через сложные технологические трубопроводы // *Химическая промышленность*. 1998. №12. С.784-790.

39. Сарданашвили С.А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. 577 с.
40. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. пособие. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 336 с.
41. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем. М.: Едиториал УРСС, 2002. 448 с.
42. Васильев О.Ф., Бондарев Э.А., Воеводин А.Ф., Каниболотский М.А. Неизотермическое течение газа в трубах. Новосибирск С.О.: Наука, 1978. 128 с.
43. Воеводин А.Ф. Численный метод расчета неустановившихся потоков газа и жидкости в сложных системах трубопроводов и открытых русел: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1970. 17 с.
44. Галиуллин З.Т. Оптимизация технологических параметров трубопроводного транспорта газа и нефти: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1969. 35 с.
45. Сулейманов В.А. Численное решение уравнений неустановившегося движения газа в длинных трубопроводах методом характеристик // Приближенные методы анализа и их приложения: сб. СЭИ СО АН СССР. Иркутск, 1984. № 16. С. 37-43.
46. Сулейманов В.А. Численный гидравлический расчет опорожнения газопровода через факельное устройство // Изв. вузов. Нефть и газ. 1988. №5. С. 65-71.
47. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 297с.
48. Темпель Ф.Г. Механика газовых потоков в трубах. (Прикладные аспекты). Л., 1972. 213 с.

49. Ходанович И.Е., Галиуллин З.Т., Кривошеин Б.Л. Неизотермическое течение реального газа при переменном значении коэффициента теплопередачи // Транспорт газа. М., 1964. С. 38-43.
50. Ходанович И.Е. Аналитические основы проектирования и эксплуатации магистральных газопроводов. М.: Гостоптехиздат, 1961. 128 с.
51. Чионов А.М. Инструменты компьютерного моделирования термогидродинамических режимов потока в многослойно изолированных подводных газопроводах высокого давления: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016 г. 247 с.
52. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М: Стройиздат, 1954. 298 с.
53. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 206 с.
54. Гребер Р., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. М.: ИЛ, 1958. 566 с.
55. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
56. Lee, C.Y., «An Algorithm for Path Connections and Its Applications», IRE Transactions on Electronic Computers. vol. EC-10. № 2. 1961. P. 364-365.
57. Штейн М.Е. Методы машинного проектирования цифровой аппаратуры. М.: Сов. радио, 1973. 296 с.
58. Деньдобренко Б.Н. Автоматизация конструирования РЭА: Учебник для вузов. М.: Высш. школа, 1980. 202 с.
59. Казеннов Г.Г., Щемелинин В.М. Автоматизация проектирования БИС. В 6 кн.: практическое пособие. Кн.4. Топологическое проектирование нерегулярных БИС. М.: Высшая школа, 1990. 110 с.
60. Морозов К.К. Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1983. 280 с.

61. Kim D.G., Come D.W., Ross P. Industrial plant pipe-route optimisation with genetic algorithms // Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature. P. 1012-1021. 1996.
62. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
63. T. Barrera, J. Griffith, S. A. McKee, G. Robins, T. Zhang. Toward a Steiner engine: enhanced and parallel implementations of the iterated 1-Steiner MRST algorithm. Proc. Great Lakes Symposium on VLSI, Kalamazoo, MI. 1993.
64. T. Barrera, J. Griffith, G. Robins, T. Zhang. Closing the gap: near-optimal Steiner trees in polynomial time. IEEE Transactions on Computer Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 13. 1993.
65. Рыженко Н.В. Алгоритм построения минимальных связывающих деревьев с дополнительными вершинами (деревьев Штейнера) для случая прямоугольной метрики. Труды ИМВС РАН, 2002 г. С. 94-105
66. Рыженко Н.В. Задача построения дерева Штейнера для этапа глобальной трассировки. Сб. научно-технических трудов "Высокопроизводительные вычислительные системы и микропроцессоры". М.: ИМВС РАН. 2003. №4. С.96-105.
67. D. M. Warme. A new exact algorithm for rectilinear Steiner trees. INFORMS Conf., San-Diego, California. 1997.
68. Kahng A.B., Robins G. On Optimal Interconnections for VLSI. Springer, 1994.
69. Hwang F. K. On Steiner minimal trees with rectilinear distance. SIAM J. Applied Math. 1976.
70. Hanan M. On Steiner's problem with rectilinear distance. SIAM J. Applied Math. 1966.

71. Mandoiu I.T., Vazirani V.V., Ganley J.L. A new heuristic for rectilinear Steiner trees. // IEEE/ACM international conference on Computer- aided design. 1999. P.157-162.
72. Ganley J.L. Computing optimal rectilinear Steiner trees: A survey and experimental evaluation // Discrete Applied Mathematics. 1999.№89. P. 161-171.
73. Hare R.M., Julstrom B.A. A Spanning-Tree-Based Genetic Algorithm for Some Instances of the Rectilinear Steiner Problem with Obstacles // ACM Symposium on Applied Computing, NY: ACM Press. 2003. P.725-729
74. Su Gao, Jan E., Chang K.-Y. A 4-geometry maze router and its application on multi-terminal nets // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES) 10 (2005). №1. P. 116-135.
75. Zhe Feng, Yu Hu, Tong Jing, Xianlong Hong, Xiaodong Hu, Guiying Yan. An $O(n \log n)$ algorithm for obstacle-avoiding routing tree construction in the lambda-geometry plane // International Symposium on Physical Design, ISPD 2006, San Jose, California. 2006. P.48-55.
76. Das S., Gosavi S.V., Hsu W.H., Vaze S.A. An Ant Colony Approach for the Steiner Tree Problem // In Proc. of Genetic and Evolutionary Computing Conference, New York City. 2002.
77. Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies // Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, FJ. Varela and P. Bourguine (Eds.), MIT Press, Cambridge, MA. 1992. P. 134-142.
78. Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics PartB: Cybernetics, Vol.26, № 1. 1996, P. 29-41.
79. Dorigo M., Gambardella L.M. Ant Colony Systems: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem // IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1(1). 1997. P. 53-66.

80. Yu Hu, Tong Jing, Xianlong Hong, Zhe Feng, Xiaodong Hu, Guiying Yan. An Efficient Rectilinear Steiner Minimum Tree Algorithm Based on Ant Colony Optimization. In Proc. of International Conference on Communications, Circuits and Systems 2004 (IEEE ICCCAS'04). Chengdu, China. P. 1276-1280.
81. Yu Hu, Tong Jing, Xian-Long Hong, Zhe Feng, Xiao-Dong Hu, and Gui-Ying Yan. ACO-Steiner: Ant Colony Optimization Based Rectilinear Steiner Minimal Tree Algorithm // Journal of Computer Science & Technology. 2006. 21(1), P. 147-152.
82. Глушко С.И., Иванова И.В. Нечеткие муравьиные алгоритмы планирования оптимального маршрута прокладки трубопроводного транспорта // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. №6. С. 120-125.
83. Глушко С.И., Какатунова Т.В. Нечеткая модификация алгоритма муравьиных колоний // Научное обозрение. 2013. №1. С. 377-381.
84. Дли М.И., Гимаров В.В., Глушко С.И. Алгоритмы поддержки принятия решений по управлению инфраструктурными проектами на основе моделей муравьиных колоний // Вестник СГТУ. 2012. №1 (64). Выпуск 2. С. 423-427.
85. НР 34-70-188-87. Нормы проектирования тепловой изоляции для трубопроводов и оборудования тепловых и атомных электростанций. М., 1987.
86. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М., 2001.
87. ТКП 45-4.02-91-2009. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Строительные нормы проектирования. Минск, 2010.
88. Серия 7.903.9-6.11. Тепловая изоляция трубопроводов с положительными температурами. 2011.
89. Справочник строителя. Тепловая изоляция. М., Стройиздат, 1985.
90. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: МГУ, "Наука", 2004. 742 с.

91. Араманович И.Г, Левин В.И. Уравнения математической физики. Издание 2-е, стереотипное. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. 288 с.
92. 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. С. 156-165.
93. Корельштейн Л. Б., Кохов Т. А. Инженерный метод расчета трубопроводов с обогревающими спутниками для случая неподвижного продукта // Трубопроводная арматура и оборудование. 2017. №3 (90). С. 50-53.
94. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.3. Руководство пользователя. Санкт-Петербург, ООО «Тор», 2017. 296 с.
95. Бабенко А. В., Корельштейн Л. Б. Несправедливо забытый Pegasus, или «чему не учат в ВУЗах» // CADmaster. 2011. № 3 (58). 86-87 с.
96. Тищенко А.С. Оптимальное технологическое проектирование нефтепроводов. М.: Недра, 1982. 263 с.
97. Лебедев О.Б. Глобальная трассировка на основе муравьиного алгоритма // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №7 (120). С. 94-102.
98. Лебедев Б.К., Лебедев В.Б. Глобальная трассировка на основе роевого интеллекта // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. №7 (108). С. 32-39.
99. Литвинова Е.И., Гаркушин С.В. Топологическая трассировка соединений печатной платы // Радиоэлектроника и информатика. 2007. №2. С. 73-79.
100. Попов Ю.И., Попов С.И. Вычисление минимального по длине пути проводника в топологической трассировке печатного монтажа // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. №6 (82). С. 117-122.

101. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1990. 352 с.
102. Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 136 с.
103. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы; пер. с англ. В.Н.Веселова. М.: Мир, 1973. 302 с.
104. Грешилов А.А. Прикладные задачи математического программирования: учебное пособие. М.: Логос, 2006. 288 с.
105. Романовский И.В. Алгоритмы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1997. 352 с.
106. Kruskal J. B. Jr. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem // Proceedings of the American Mathematical Society. 1956. Vol. 7, № 1. P. 48-50.
107. 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). С. 244-248.
108. Кохов Т.А., Корельштейн Л.Б., Гартман Т.Н. Разработка комплексной системы проектирования обогрева технологических трубопроводов // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Том XXX, №2. С. 135-136.
109. Кохов Т.А. Автоматизированное проектирование обогрева технологических трубопроводов тепловыми спутниками // Химическая Промышленность сегодня. 2016. № 10. С. 44-51.
110. Кохов Т. А. Интегрированная система проектирования обогрева технологических трубопроводов тепловыми спутниками // Сборник статей к 25-летию ООО «НТП Трубопровод». 2017. С. 168-175.

111. AVEVA Plant (12 Series) Graphical Model Manipulation Guide, AVEVA Solutions Ltd, High Cross, Maddingley Road, Cambridge, CB3 0HB, United Kingdom, 2009. 94 p.
112. Расчет и выбор тепловой изоляции трубопроводов и оборудования. Руководство пользователя. Москва, 2014. 280 с.
113. TM-1401 AVEVA Plant (12 Series) Programmable Macro Language, AVEVA Solutions Ltd, High Cross, Maddingley Road, Cambridge, CB3 0HB, United Kingdom, 2009. 115 p.
114. Бондаренко Б.И. Альбом технологических схем процессов переработки нефти и газа. – М.: Изд-во РГУ нефти и газа им. Губкина, 2003. 202 с.
115. Абросимов А.А. Экология переработки углеводородных систем. М.: Химия, 2002. 608 с.
116. Банов П.Г. Процессы переработки нефти. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2003, ЧЗ. 504 с.
117. Широкова Г.С. Переработка сероводородных газов в элементарную серу // Материалы докладов международной конференции «Топливо и экология – 2008». М., 2008. С. 48-51.
118. Магалиф В.Я, Иткина Д.М, Корельштейн Л.Б. Монтажное проектирование химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. М.: Навигатор, 2010. 344 с.
119. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы. М.: МАКС Пресс, 2007. 695 с.
120. Питцер Кн., Барт Р. Парообогрев для энергосбережения // Выставка и конференция инженеров-химиков. 2000.
121. Люк М.А., Мизерлс К.К. Сравнение пара и обогрева на работе завода // Oil and Gas. 1977. с.64-73.

122. Этингер Дж. Применение термальных жидкостей для косвенного обогрева // Process Heating Magazine. 1997.
123. Бельков В.Н., Ланшаков В.Л. Автоматизированное проектирование технических систем: учебное пособие. Издательство "Академия Естествознания", 2009. 143 с.
124. Петухов А.В., Мельников Д.В., Быстренков В.М. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов: учебн. пособие. М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос.техн. ун-т им П.О. Сухого, 2011. 144 с.
125. Якимов А.С. Аналитический метод решения краевых задач. Монография. 2-е изд., доп. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. 199 с.
126. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
127. Жуков Н. П., Майникова Н. Ф., Никулин С. С., Антонов О. А. Решение задач теплопроводности методом конечных элементов. Учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. 80 с.
128. Капустин В.М., Рудин М.Г., Кудинов А.М. Основы проектирования нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. М.: Химия (РГУ нефти и газа им. Губкина), 2012. 440 с.
129. Замятина О. М. Моделирование систем: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 204 с.
130. Красных В.Ю., Королев В.Н. Тепломассообмен. Основные формулы, задачи и способы их решения: сборник задач. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 64 с.
131. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Физические величины: Справочник. М.; Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
132. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1987. 471 с.

133. Оразбаев Б.Б., Мумнбеткалиева А.К. Задачи и методы многокритериального выбора оптимальных режимов работы объектов нефтепровода. Монография. Алматы: «Эверо», 2007. 147 с.
134. Зверьков Б.В. Костовецкий Д.Л. и др. Расчет и конструирование трубопроводов. Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1979. 246 с., ил.
135. Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации. Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 105 с.
136. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 3 е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.
137. Мешалкин В.П., Чионов А.М., Казак А.С., Аристов В.М. Компьютерная модель нестационарного газового потока в протяженном многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления // Доклады академии наук. 2016. Т.469. №6. С. 694-697.
138. Мешалкин В.П., Чионов А.М., Казак А.С., Аристов В.М. Прикладная компьютерная модель нестационарного потока в протяженном многослойно изолированном подводном газопроводе высокого давления // Доклады академии наук. 2016. Т.470. №1. С. 56-59.
139. ГОСТ Р 50922-2006 Защита информации. Основные термины и определения.
140. ГОСТ 33707-2016 (ISO/IEC 2382:2015) Информационные технологии (ИТ). Словарь.
141. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения.
142. ГОСТ 15971-90 Системы обработки информации. Термины и определения.
143. СНиП 3.05.05-84 Технологическое оборудование и технологические трубопроводы.

144. Standard ECMA-334 C# Language Specification

145. ISO/IEC 23270:2003 Information technology – C# Language Specification