

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,
профессора кафедры системного анализа и информационных технологий
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный технологический институт (технический университет)»
Холоднова Владислава Алексеевича

о кандидатской диссертации Кохова Тимура Александровича
на тему «Топологическо-эвристическо-вычислительные алгоритмы и комплекс
программ оптимизации энергоресурсоэффективности трассировки систем обог-
рева сложных технологических трубопроводов»
по специальностям 05.13.18 – Математическое моделирование, численные ме-
тоды и комплексы программ (технические науки)
и 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

Актуальность темы диссертационной работы. Интенсификация производств нефтегазохимического комплекса, представляющих собой сложные химико-технологические системы, использование высоких температур и давлений, а также глубокого холода в химико-технологических процессах обуславливают необходимость обязательного наличия тепловой изоляции сложных технологических трубопроводов. Для технологических трубопроводов, транспортирующих на значительные расстояния вещества с заданной температурой или вещества, вязкость которых при остывании недопустимо возрастает, кроме тепловой изоляции, для поддержания требуемого температурного режима изолируемого трубопровода применяют дополнительный обогрев. Для обогрева сложных технологических трубопроводов используют обогревающие трубопроводы-спутники с потоками пара или горячей воды. На долю трубопроводов прихо-

дится до 25% стоимости всего оборудования. А в общем объеме монтажных работ стоимость монтажа трубопроводов достигает 65%.

Основное внимание в работе уделено обеспечению повышения показателей энергоресурсоэффективности химико-технологических систем за счет снижения тепловых потерь и уменьшения удельных расходов топлива и энергии.

Разработка декомпозиционного топологическо-эвристического алгоритма и комплекса программ оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплого обогрева с учетом математических моделей процессов теплообмена в сложных теплотехнических системах, а также инженерно-технологических, физико-химических и гидродинамических ограничений трассировки трубопроводов, является **актуальной научной задачей**, поскольку применение разработанного комплекса программ позволит увеличить эффективность использования производственных площадей, а также минимизировать приведенные затраты на трубопроводные системы, существенно уменьшить материалоемкость трубопроводов за счет уменьшения объема изоляции и энергозатраты на перекачку и обогрев технологических потоков, обеспечивая высокий уровень надежности и технологической безопасности химических производств.

Основное содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, глоссария основных терминов и понятий, приложений и библиографического списка из 145 наименований. Общее число страниц – 204, текст работы содержит 6 таблиц и 87 рисунков.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и основные задачи; приведены положения, выносимые на защиту; изложены научная новизна и практическая значимость результатов работы; приведены сведения об апробации работы.

В первой главе выполнен аналитический обзор результатов исследований, по изучению процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе. 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 теплого обогрева сложных технологических трубопроводов.

Отмечено, что точность классической инженерно-технической модели процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе недостаточно исследована. Поэтому, требуется проверка заложенной в нормативные документы и пособия методики моделирования процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе. и при необходимости модифицировать их для более удобной реализации в расчетных программах. Отмечается, что используемая в практике инженерно-техническая модель процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе с неподвижным (период остановки) изотермическим продуктом описана, хотя и основывается на правильных исходных уравнениях, по конечным результатам ее применения при проектировании сложной теплотехнической системы, вызывает определенные сомнения, поскольку не учитывает явным образом влияние толщины и свойств материала стенки обогреваемого трубопровода на перепад температур по сечению трубопровода. Глава заканчивается постановкой задач исследования.

Вторая глава посвящена разработке оригинальной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным изотермическим продуктом и декомпозиционно-

го топологическо-эвристического алгоритма оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов. Кроме того, обосновано применение существующей специализированной упрощенной математической модели для моделирования процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом. С использованием серии вычислительных экспериментов выполнены проверки адекватности, существующей специализированной упрощенной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом и разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом. Сформулирована инженерно-технологическая постановка неформализованной задачи оптимальной энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов. Обоснован выбор вида целевой функции оптимизации трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов. Разработаны наборы эвристических правил неформализованной задачи энергоресурсоэффективной трассировки в виде знаний по теории процессов и аппаратов химической технологии.

В третьей главе разработана архитектура комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов. Описаны структура, программная реализация и режимы функционирования комплекса программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева технологических трубопроводов. Подробно описано информационное обеспечение комплекса программ в виде базы продукционных правил, программно реализованных на мак-

языке программирования PML. Обоснована эффективность разработанного алгоритма теплогидродинамических расчетов сложных технологических трубопроводов на основе проведенной серии вычислительных экспериментов.

В четвертой главе описаны инженерно-технологическая постановка и результаты решения практической задачи оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов установок производства элементарной серы. Разработан набор 33 основных эвристических правил, отражающие технологические, гидродинамические, инженерные, физико-химические и конструкционные ограничения трассировки трубопроводов. Получена оптимальная энергоресурсоэффективная трасса систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов производства элементарной серы на нефтеперерабатывающем заводе. Описаны результаты вычислительных экспериментов по проверке адекватности традиционной специализированной математической модели процесса теплообмена и адекватности, разработанной аппроксимационной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с неподвижным изотермическим продуктом. Приведено сравнение аналитического решения с результатами компьютерного моделирования процесса теплообмена в сложных теплотехнических системах различных конфигураций на стационарных моделях теплопередачи.

Научная новизна исследования и полученных результатов. В диссертационной работе подучен ряд оригинальных результатов. Новизна работы заключается в следующем.

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 теплого 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 полученных автором результатов. Автором диссертационной работы получен ряд важных для практики выводов. Эти выводы позволяют 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, а также сократить время принятия оптимальных проектных решений и выбора оптимальных энергоресурсоэффективных трасс проектируемых химических производств:

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 слож-

ных 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.

Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов.

При решении поставленных в работе задач корректно использованы апробированные научные положения и методы исследования; обеспечена строгость используемого математического аппарата, корректно применены методы теории искусственного интеллекта и теории графов, новые научные результаты согласованы с теоретическими основами и подтверждаются многочисленными вычислительными экспериментами, результаты которых доказывают адекватность созданной аппроксимационной математической модели и применимость разработанных алгоритмов. Научные положения апробированы на международных и российских конференциях, опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Сделанные выводы основаны на полученных в диссертации результатах.

Рекомендации к практическому использованию результатов. Разработанная в диссертационной работе методика математического моделирования процесса теплообмена в сложных теплотехнических системах из нескольких параллельных технологических трубопроводов с неподвижным изометрическим продуктом может быть реализована в составе отечественных программных ком-

плексов по расчету гидродинамических и тепловых процессов. Заинтересованы в разработках могут быть проектные институты и компании, занимающиеся проектированием и эксплуатацией сложных теплотехнических систем.

Предложенный автором комплекс программ может быть рекомендован к использованию проектными институтами и компаниями, занимающимися проектированием объектов нефтегазохимического комплекса, для решения инженеринговых задач по оптимизации энергоресурсоэффективности трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов.

Разработанные аппроксимационная математическая модель процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких параллельных технологических трубопроводов в едином изоляционном кожухе с неподвижным изотермическим продуктом, декомпозиционный топологическо-эвристический алгоритм и комплекс программ оптимизации энергоресурсоэффективной трассировки систем теплового обогрева сложных технологических трубопроводов могут быть использованы при проведении научных исследований, направленных на повышение показателей энергоресурсоэффективности химико-технологических систем.

Замечания

1. По аналитическому литературному обзору научной литературы.

В аналитическом обзоре не отражена в достаточной мере классическая современная литература по процессам и аппаратам, отсутствуют основополагающие ссылки на работы в области математического моделирования научного руководителя «Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов». Не заслужено забыты пионерские работы в области теплообменного оборудования профессора Каневец Г.Е., в которых автор рассмотрел влияние изменения физико-химических параметров на процессы теплообмена, что важно

при оценке адекватности получаемых результатов. Не отражена работа проф. Абиева Р.Ш., в которой изложены основы вычислительной гидродинамика и тепломассообмена. Не нашлось места существующим программам для решения подобного рода задач: например, Comsol, Aspen Shel&TUBE EXCHANGER, FLEXPDE и свободной программе OpenFOAM.

2. По вопросам адекватности полученной автором модели и вычислительному эксперименту.

Адекватность полученных автором результатов не вызывает сомнения. К сожалению эти вопросы, связанные с адекватностью, в диссертации иногда изложены, по мнению оппонента, недостаточно корректно.

- с.54- «Максимальная погрешность расчета тепловых балансов (1.1.22.1) – (1.1.22.2) не превысила 0,05%, что подтверждает достаточную точность (по мнению оппонента сверх достаточную точность) специализированной упрощенной математической модели процесса теплообмена в системе теплового обогрева технологического трубопровода с движущимся изотермическим продуктом».
- с.161- «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%». Есть вопросы, связанные с погрешностью измерений: например, с какой погрешностью могут быть определены величины (например, коэффициент теплоотдачи), входящие в модель? И как это скажется на погрешность вычисления? И как это связано с проверкой адекватности предложенных моделей.

- с. 119- (рис. 3.5.1. -3.5.8.) неубедительное доказательство адекватности, которое можно сформулировать в шуточной форме: ЧЕРЕЗ ЛЮБЫЕ точки можно провести кривую, если рисовать её ровно.

- с. 137 – (рис 4.3.1. - 4.3.11) в виде столбчатых диаграмм. Также неубедительное доказательство. Для доказательства адекватности нужно было использовать скорректированный на число экспериментов и число параметров модели коэффициент детерминации.

- Непонятно по какому плану проводился вычислительный эксперимент, как автору удалось избежать сетей «коллинеарности и мультиколлинеарности».

3. По разделу оптимизации.

Отсутствие некоторых литературных источников по вопросам оптимизации привело автора не к математической постановке задачи оптимизации, а к допустимой понятной специфической описательной формулировке. Недостаточно отражены работы по методам нелинейного программирования при использовании эвристических правил. В постановке задачи в ограничениях типа равенств нужно добавлять и математическое описание объекта, а в нем есть параметры, для которых существуют доверительные области. Получается, что для получения надежных результатов нужно было решать задачи оптимизации в условиях параметрической и вероятностной неопределенности, что обеспечило бы высокую предсказательную способность.

С одной стороны, обоснован выбор вида целевой функции оптимизации трассировки систем теплого обогрева сложных технологических трубопроводов. Основными показателями качества трассировки систем теплого обогрева сложных технологических трубопроводов являются: малая материалоемкость; минимальные гидравлические потери ТП; высокий уровень надежности; высо-

кий уровень безопасности; простота эксплуатации и технического обслуживания.

С другой стороны, для определения оптимальной трассировки систем теплового обогрева СТТ автор использует только технико-экономический критерий, в виде минимума приведенных затрат. Спрашивается: и где всё остальное?

4. По оформлению текста диссертации.

- ✓ Хорошо бы приводить единицы измерения физических величин.
- ✓ Перегруз обозначений- одни и те же обозначения для разных по смыслу величин, перегруз формулами, обозначениями, математическими преобразованиями.
- ✓ Материал изложен не всегда последовательно. Очень трудно следить за последовательностью изложения материала. Ссылки на формулы даны либо на 5-10 страниц вперед, либо на 5-10 страниц назад. Проверка адекватности разработанной автором аппроксимационной математической модели процесса теплообмена выполнена в результате серии вычислительных экспериментов по определению температурных полей в комплексе ELCUT (см. разд. 4.4) изложено на с. 68, а иллюстрация аж на с. 157.
- ✓ Трудно оценить, что сделано автором и что известно.
- ✓ Алгоритм расчета тепловой изоляции систем обогрева сложных технологических трубопроводов изложен неудачно (с. 44 - уравнение (1.1.22.2) не содержит указанные в алгоритме величины).
- ✓ Заявленная взаимосвязь процедуры трассировки сложных технологических трубопроводов с расчетами гидродинамических и тепловых процессов изложена очень скудно.

- ✓ В диссертации много красивых рисунков, к сожалению, некоторые из них, неинформативны (рис. 3.4.1, рис. 4.1.1, рис. 4.5.1 и др.).
- ✓ Для уравнений (1.1.1), (1.1.2) отсутствуют начальные и граничные условия.

Заключение

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки) в части формулы: «разработка фундаментальных основ и применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем»; паспорту специальности научных работников 05.17.08 Процессы и аппараты химических технологий (технические науки) в части формулы: «совершенствование аппаратного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения, использование особенностей нестационарных режимов с позиции экологической безопасности и надежности химических процессов и производств», «решение проблем совершенствования и создания эффективных технологических схем и производств на основе использования современных машин и аппаратов».

В списке публикаций автора присутствует 8 научных трудов, из них 2 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых Высшей Аттестационной Комиссией Министерства образования и науки РФ. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Работа является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, актуальной, обладающей новизной и прак-

тической значимостью. Таким образом, диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842), а автор работы,

Кохов Тимур Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям:

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

и 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки).

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
профессор кафедры системного анализа
и информационных технологий
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)

Холоднов Владислав Алексеевич

дата

22.05.18

подпись



Адрес: 190013, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 26

Тел. 8(812)494-93-02 (2554)

E-mail: holodnov@sa.lti-gti.ru

Подпись д.т.н., профессора
Холоднова В.А. удостоверяю

Подпись *Холоднова Владислав Алексеевич*
Алексеевич
Начальник отдела кадров

Ж

В.А.