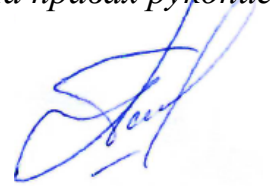


На правах рукописи



Попов Руслан Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И
ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ В
КРУПНОМАСШТАБНЫХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и компьютерное моделирование» в ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»

Научный руководитель: **Сухарев Михаил Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Чупин Виктор Романович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», директор института архитектуры и строительства, заведующий кафедрой городского строительства и хозяйства.

Ахметзянов Атлас Валиевич,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, заведующий лабораторией.

Ведущая организация: ООО «НИИгазэкономика».

Защита состоится «21» февраля 2017 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.200.14 при ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.65, корпус 1, аудитория 308.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.65, корпус 1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.200.14.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (г. Москва, Ленинский проспект, д.65, корпус 1) и на сайте <http://gubkin.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.200.14,
доктор технических наук, доцент

 Н.Н. Портнягин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Доля газа составляет свыше 50% от общего объёма первичных энергоносителей в РФ, что определяет ключевую роль газовой отрасли в энергетике современной России. На газовую отрасль ложится особая ответственность в достижении стратегических целей государственной энергетической политики, причём наименьшие затраты для обеспечения энергетической эффективности и надёжной работы магистральной и распределительной подотраслей требуют мероприятия в сфере IT-технологий.

На первых этапах жизненного цикла газотранспортных систем (ГТС) Единой системы газоснабжения (ЕСГ) выбор критерия управления технологическими режимами не относится к проблемам первостепенной значимости. В текущий момент в связи с падением добычи газа на месторождениях Надым-Пур-Тазовского региона загрузка главных крупномасштабных газотранспортных артерий ЕСГ – технических коридоров магистральных газопроводов (ТКМГ) – опустилась ниже проектного уровня и продолжает падать. Изменения загрузки могут быть достигнуты разными вариантами включения газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и компрессорных цехов (КЦ), причём различия между вариантами по критерию минимума энергетических затрат зачастую оказываются незначительными, что может приводить к нетехнологичным решениям, в частности, к частому включению и отключению силового оборудования.

В то же время при повышенном спросе или существенных ограничениях на поставки потребители начинают отбирать газ в количествах, превышающих технические возможности ГТС. Потребители, расположенные дальше от источников питания, оказываются в критическом положении. Особенно опасно, когда из-за нехватки газа опустошаются трубопроводы, снабжающие населённые пункты. Для моделирования таких процессов следует имитировать условия, влекущие за собой неуправляемое снижение подачи газа потребителям и опорожнение трубопроводов. В подобных случаях вопросы энергоэффективности уходят на второй план, а

на первом оказывается минимизация дефицита поставок, т.е. возникает задача о рациональном распределении ограниченных объёмов газа в условиях острого дефицита. Во всех перечисленных случаях необходимо рассматривать динамику процессов, в том числе изменение количества аккумулированного в трубах газа.

Проблемы исследования перечисленных выше ситуаций до сих пор в достаточной мере не обсуждались, но они являются крайне актуальными, поскольку относятся к области энергетической безопасности страны. С другой стороны, разработки отечественного математического и программного обеспечения задач планирования технологических режимов крупномасштабных ГТС тесно связаны с политикой в сфере информационной безопасности РФ и импортозамещения.

Степень разработанности темы исследования. В работе отмечен и проанализирован вклад в областях науки, связанных с темой диссертационного исследования, следующих отечественных и зарубежных учёных:

– Меренков А.П., Новицкий Н.Н., Сарданашвили С.А., Ставровский Е.Р., Сухарев М.Г., Тодини Е., Хасилев В.Я., Чарный И.А. и др. в области математических методов, вычислительных алгоритмов моделирования и оптимизации режимов транспорта газа;

– Берман Р.Я., Григорьев Л.И., Панкратов В.С., Сарданашвили С.А., Селезнев В.Е., Степин Ю.П., Сухарев М.Г. и др. в области разработки программно-вычислительных комплексов поддержки принятия диспетчерских решений при управлении ГТС;

– Беллман Р., Ланцош К., Моисеев Н.Н., Понтрягин Л.С., Самарский А.А., Черноусько Ф.Л. и др. в области математического и компьютерного моделирования, численных методов.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью работы является разработка и программная реализация моделей и методов нового поколения для расчёта технологических режимов ГТС, которые учитывают факторы, такие как: динамика процессов транспорта газа, многокритериальность управления, экстремальные режимы функционирования ГТС и др. Достижение этой цели предполагает решение следующих задач.

1. Разработка адекватных и эффективных моделей и методов для имитации штатных нестационарных режимов функционирования ГТС произвольной конфигурации.

2. Разработка математических методов, алгоритмов и программных модулей для поиска оптимальных квазистационарных режимов функционирования ГТС с учётом многокритериальности управления.

3. Разработка математического и программного обеспечения для поиска рационального распределения ограниченных объёмов газа в условиях острого дефицита поставок.

4. Компьютерное моделирование оптимальных квазистационарных и нестационарных режимов на иллюстративных и реальных примерах.

Научная новизна. В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты.

1. Впервые сопоставлены модели с сосредоточенными параметрами (МСП) для имитации нестационарных течений газа в трубопроводе. Адекватность и эффективность одной из них доказана путём вычислительного эксперимента.

2. На базе МСП и метода глобального градиента (МГГ) разработана новая методика расчёта нестационарных режимов в ГТС произвольной конфигурации. Методика применена к трубопроводной структуре, воспроизводящей в общих чертах систему газоснабжения Московского региона.

3. Предложена новая модификация метода глобального градиента для расчёта стационарных и нестационарных режимов ГТС, обобщённая для случая произвольных законов течения газа по трубопроводам, газоперекачивающим агрегатам (ГПА) и другим элементам ГТС.

4. Впервые разработаны алгоритм и программа выбора оптимального управления техническим коридором магистральных газопроводов, где наряду с минимизацией энергетических затрат в качестве целей оптимизации предложены критерии минимизации числа переключений цехов и ГПА.

5. Предложен новый метод среднесрочного планирования работы ТКМГ в

условиях многокритериальности управления. Впервые предложен алгоритм, основанный на методе Монте-Карло, для оценки показателей устойчивости технологических схем управления ТКМГ в условиях многокритериальности.

6. Впервые предложена модель исследования живучести крупномасштабных ГТС в экстремальных условиях. Предложен метод управления ГТС в условиях острого дефицита поставок газа.

7. Разработан прототип программно-вычислительного комплекса нового поколения для моделирования и оптимизации технологических режимов ГТС, в котором реализованы расчётные задачи, рассматриваемые в диссертационной работе.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке новых подходов к моделированию и управлению штатными нестационарными режимами крупномасштабных ГТС. Предложенные в работе модель и метод расчёта нестационарных течений газа в ГТС произвольной конфигурации являются новым результатом в теории гидравлических цепей. Разработанные методы математического моделирования и оптимизации режимов систем транспорта газа были успешно использованы при расчётах газотранспортных систем России.

Методология и методы исследования. В работе применены следующие основные методы: численного интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений; оптимизации, прежде всего динамического программирования и другие методы численного анализа; теории графов; теории гидравлических цепей; теории временных рядов; теории принятия решений; модульного и объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Новая методика для имитации нестационарных режимов работы ГТС произвольной конфигурации.

2. Методика оптимального среднесрочного планирования режимов работы ТКМГ и алгоритм для оценки показателей устойчивости технологических схем в условиях многокритериальности управления.

3. Модель исследования живучести и метод управления крупномасштабными ГТС в экстремальных режимах функционирования.

4. Принципы, алгоритмы и архитектурные решения при разработке прототипа программного комплекса нового поколения для моделирования и оптимизации технологических режимов ГТС.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обуславливается адекватным применением классического аппарата прикладной математики и подтверждается результатами расчётов и примерами. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 13 международных и всероссийских конференциях и семинарах:

– Всероссийский научный семинар с международным участием «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем»: Вышний Волочек, Тверская область, 1-6 июля 2012 г.; Белокураха, Алтайский край, 8-13 сентября 2014 г.; Иркутск, Иркутская область, 5-11 сентября 2016 г.;

– Научно-практические молодёжные конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва: IV конференция, 18-19 октября 2012 г.; V конференция, 20-22 ноября 2013 г.;

– Международные молодёжные научные конференции: 67-я конференция «Нефть и газ – 2013», Москва, 9-12 апреля 2013 г.; 69-я конференция «Нефть и газ – 2015», Москва, 14-16 апреля 2015 г.; 70-я конференция «Нефть и газ – 2016», Москва, 18-20 апреля 2016 г.;

– Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», Москва, 10-12 февраля 2014 г.;

– VI Международная научно-техническая конференция «Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими системами DISCOM-2014», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, 18-19 ноября 2014 г.;

– Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики»: 87-е заседание,

Минск, Республика Беларусь, 7-11 сентября 2015 г.; 88-е заседание, Сыктывкар, Республика Коми, 4-9 июля 2016 г.;

– XI Всероссийская конференция молодых учёных, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика), Москва, 20-23 октября 2015 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 научных трудах, в том числе: в 2-х статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ; в 5-ти статьях в рецензируемых научных изданиях, не входящих в список ВАК; в 7-ми тезисах и материалах международных и всероссийских конференций; получены 3 свидетельства о регистрации программного обеспечения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 155 наименований и 7 приложений. Работа изложена на 135 страницах основного текста и 16 страницах приложений. Основной текст работы содержит 37 рисунков и 10 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе «Методические аспекты моделирования и оптимизации технологических режимов ГТС» рассмотрено современное состояние исследований в области компьютерного моделирования и оптимизации технологических режимов ГТС, сформулированы проблемы управления ЕСГ.

Отмечается, что одной из важнейших задач диспетчерского управления ГТС является кратко- и среднесрочное планирование технологических режимов. С учётом крупномасштабности и сложности объекта управления решение задачи возможно лишь с применением ИТ-технологий, в основе которых должны лежать адек-

ватные и эффективные (по критерию вычислительных затрат) модели технологических объектов.

В отечественной практике для описания работы ГПА, оснащённых центробежными нагнетателями, принято пользоваться приведёнными характеристиками С.Н. Синицына. Классическими исследованиями в области нестационарных течений газа в длинных газопроводах являются работы И.А. Чарного. Развитие этих исследований получили в работах М.Г. Сухарева, Е.Р. Ставровского, С.А. Сарданашвили и др. Компьютерные методы расчёта ГТС базируются на работах А.П. Меренкова, М.Г. Сухарева, Е.Р. Ставровского, С.А. Сарданашвили.

Проблемы численного решения задач оптимального управления рассматриваются в работах Н.Н. Моисеева, И.А. Крылова, Ф.Л. Черноусько и др. Задачам оптимального управления и принятия решений в нефтегазовой отрасли посвящены работы М.Г. Сухарева, Е.Р. Ставровского, Ю.П. Степина, Э.А. Трахтенгерца, С.А. Сарданашвили и др.

Вторая глава «Моделирование нестационарных режимов крупномасштабных ГТС» посвящена расчётным алгоритмам для имитации нестационарных режимов ГТС. Течения газа в длинном газопроводе при штатных режимах эксплуатации, характеризующихся относительно медленными изменениями параметров газового потока, хорошо описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных

$$\frac{\partial p^2}{\partial x} = -\Lambda q |q|, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = -B \frac{\partial q}{\partial x}, \quad (1)$$

где x, t – пространственная и временная координаты; $p(x, t), q(x, t)$ – средние по сечению трубы давление и коммерческий расход газа; Λ, B – коэффициенты, зависящие от геометрических размеров трубы, свойств газа и принятых единиц измерения. Система (1) является моделью с рассредоточенными параметрами (МРП). В дальнейшем будем пользоваться относительной (делённой на длину трубопровода) пространственной координатой ($0 \leq x \leq 1$) и искать решение на интервале времени $0 \leq t \leq t_{end}$.

МРП для исследования нестационарных течений в крупномасштабных газотранспортных системах может оказаться неоправданно сложной, так как предъявляет высокие требования к объёму оперативной памяти и быстродействию компьютера. Альтернативой МРП служат модели с сосредоточенными параметрами (МСП), которые впервые были предложены М.Г. Сухаревым и Е.Р. Ставровским.

Главной проблемой при разработке МСП является расчёт среднего давления в трубопроводе $p_{avg}(t)$. А.Д Трофимовым и В.А. Куцевым предложено для вычисления $p_{avg}(t)$ использовать формулу трапеций с концевыми поправками К. Ланцоша. Тогда МСП представляется в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dp^s}{dt} + \frac{dp^f}{dt} + \frac{\Lambda}{a} \left[\frac{q^s(t)|q^s(t)|}{[p^s(t)]^2} \frac{dp^s}{dt} - 2 \frac{|q^s(t)|}{p^s(t)} \frac{dq^s}{dt} - \frac{q^f(t)|q^f(t)|}{[p^f(t)]^2} \frac{dp^f}{dt} + 2 \frac{|q^f(t)|}{p^f(t)} \frac{dq^f}{dt} \right] = 2B[q^s(t) - q^f(t)], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} [p^s(t)]^2 - [p^f(t)]^2 &= \frac{\Lambda}{2} (q^s(t)|q^s(t)| + q^f(t)|q^f(t)|) - \\ &- \frac{2\Lambda}{aB} \left[|q^s(t)| \frac{dp^s}{dt} - |q^f(t)| \frac{dp^f}{dt} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $p^s(t) = p(0,t)$, $p^f(t) = p(1,t)$, $q^s(t) = q(0,t)$, $q^f(t) = q(1,t)$, $a = 14$. Система (2), (3) может быть проинтегрирована с помощью стандартных численных методов, например, методом Рунге-Кутты. Исследования показали, что лучшие результаты обеспечивают неявные методы интегрирования, например, неявный метод Эйлера. Результаты проведённых вычислительных экспериментов показывают, что МСП, предложенная А.Д Трофимовым и В.А. Куцевым, даёт решения, очень близкие к эталонным (полученным по МРП). При этом время вычислений МСП требуется почти на два порядка меньше, чем для МРП.

МСП позволяет перейти к описанию нестационарных течений газа в ГТС произвольной конфигурации. Для этого структуру ГТС следует представить в виде

ориентированного графа, приняв за дуги газопроводы, а за узлы – точки стыка трубопроводов, источники и стоки. Направление дуг определяется произвольно, при этом расход считается положительным, если течение газа происходит по направлению дуги, и отрицательным в противном случае. Тогда систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающую нестационарное течение в ГТС, можно представить в виде

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P}(t) - \frac{1}{2} \Lambda (\Theta^s \mathbf{q}^s(t) + \Theta^f \mathbf{q}^f(t)) + \frac{2}{a} \Lambda \mathbf{B}^{-1} \left[\Theta^s (\mathbf{A}^s)^T \frac{d\mathbf{p}}{dt} + \Theta^f (\mathbf{A}^f)^T \frac{d\mathbf{p}}{dt} \right] = \mathbf{0}, \quad (4)$$

$$\left[(\mathbf{A}^s)^T - (\mathbf{A}^f)^T \right] \frac{d\mathbf{p}}{dt} + \frac{1}{a} \Lambda \left[\Psi^s (\mathbf{A}^s)^T \frac{d\mathbf{p}}{dt} - \Omega^s \frac{d\mathbf{q}^s}{dt} + \Psi^f (\mathbf{A}^f)^T \frac{d\mathbf{p}}{dt} - \Omega^f \frac{d\mathbf{q}^f}{dt} \right] - 2\mathbf{B}(\mathbf{q}^s(t) - \mathbf{q}^f(t)) = \mathbf{0}, \quad (5)$$

$$\mathbf{A}^s \mathbf{q}^s(t) + \mathbf{A}^f \mathbf{q}^f(t) = \mathbf{Q}(t),$$

где \mathbf{A} – матрица инцидентий графа; \mathbf{A}^s – матрица, содержащая элементы матрицы \mathbf{A} равные +1; \mathbf{A}^f – матрица, содержащая элементы матрицы \mathbf{A} равные –1; $\mathbf{p}(t)$ – вектор давлений в узлах графа; $\mathbf{P}(t)$ – вектор потенциалов в узлах графа (в случае квадратичного течения $\mathbf{P}(t) = \|p_i^2(t)\|$, $i = 1, \dots, m$); $\mathbf{Q}(t)$ – вектор внешних притоков и отборов газа в узлах; векторы $\mathbf{q}^s(t) = \|q_r^s(t)\|$ и $\mathbf{q}^f(t) = \|q_r^f(t)\|$ – соответствуют расходам газа в начале и в конце дуг графа, $r = 1, \dots, n$; диагональные матрицы Θ^s , Θ^f , Ψ^s , Ψ^f , Ω^s и Ω^f размером $n \times n$ содержат коэффициенты системы (2), (3); n – количество рёбер; m – количество узлов графа.

Для решения системы (4), (5) в реферируемой работе предлагается новая методика, основанная на неявном методе Эйлера и методе глобального градиента. Методика была распространена на случай, когда в структуре ГТС присутствуют элементы ГТС: ГПА, аппараты воздушного охлаждения, пылеуловители и др.

Качество МСП для расчёта нестационарных течений оценивалось на примере

расчёта крупномасштабной газотранспортной системы, представленной на рисунке 1. Расчёт проводился на интервале $0 \leq t \leq t_{end} = 72$ ч с шагом по времени $\tau = 5$ мин. На источниках и потребителях имитировалась динамика параметров, характерная для зимнего периода эксплуатации ГТС. Алгоритм расчёта ГТС был основан на сочетании МСП с методом узловых потенциалов (МУП) и МГГ. Полученные решения сравнивались классическим методом: МРП в сочетании с МУП.

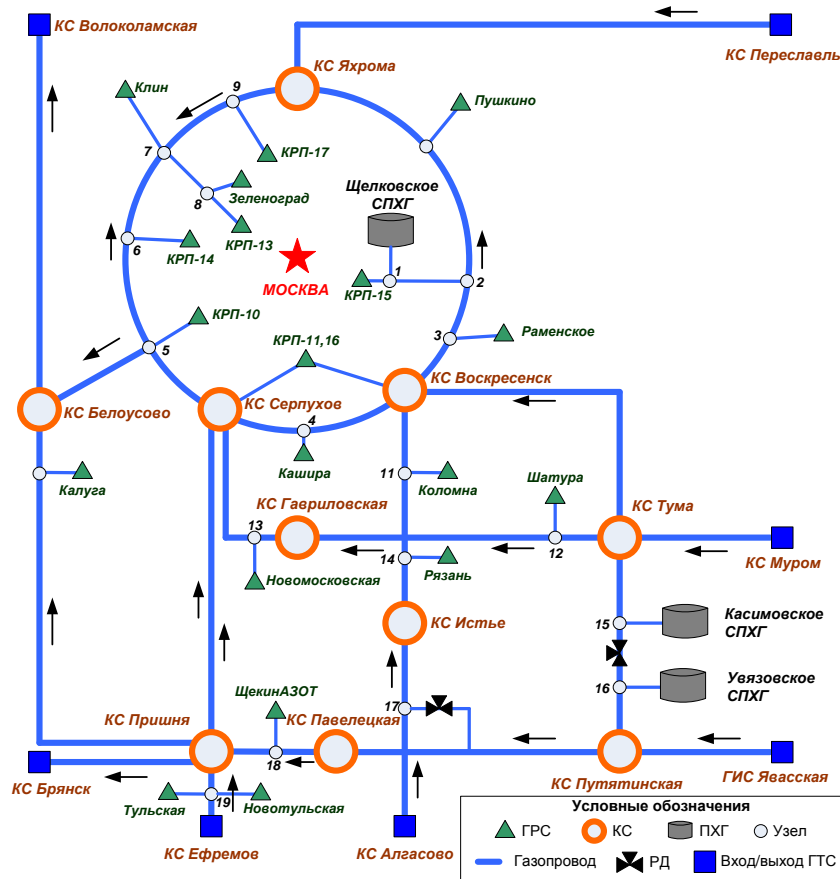


Рисунок 1 – Агрегированная схема газоснабжения Московского промышленного узла

На рисунке 2 приведены примеры графиков изменения расчётных параметров на входах и выходах системы. Сплошной линией представлены «точные» решения, полученные по МРП в сочетании МУП. Пунктиром изображены решения по МСП в сочетании с МУП и МГГ (визуально неразличимы).

В таблице 1 представлена сводная информация по результатам расчётов, в который приняты обозначения: $\delta p_{\max} = 100 \max_{i,t \in [0, t_{end}]} \left\{ \left| \frac{p_i^{exact}(t) - p_i(t)}{p_i^{exact}(t)} \right| \right\}$,

$$\delta p_{\max} = 100 t_{\text{end}}^{-1} \max_i \left\{ \int_0^{t_{\text{end}}} \left| p_i^{\text{exact}}(t) - p_i(t) \right| / p_i^{\text{exact}}(t) dt \right\} \text{ и т.д., индекс } \textit{exact} \text{ относится к}$$

классической модели (МРП в сочетании с МУП). Из таблицы видно, что применение МСП к расчёту нестационарных течений газа в крупномасштабных ГТС позволяет с достаточной точностью описывать технологический процесс. Что особенно важно, в сравнении с классическим методом применение МУП в сочетании с МСП позволяет ускорить процесс вычисления почти в 3 раза, а применение МГГ для МСП – почти в 70 раз.

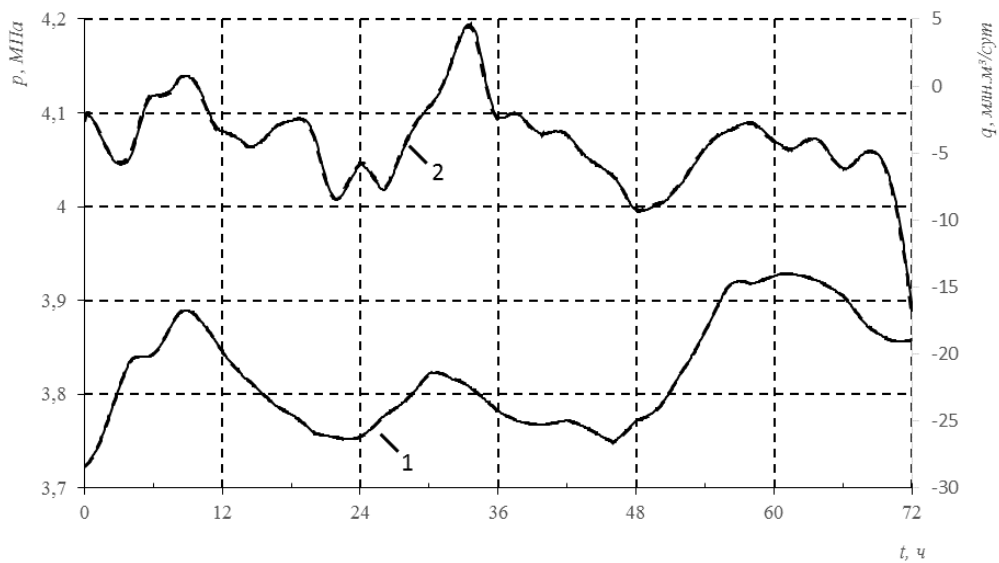


Рисунок 2 – Результаты расчёта.

1 – расход через КС Яхрома; 2 – давление газа на КРП-10

Таблица 1. Результаты вычислительного эксперимента

Метод (модель)	δp_{\max} , %	δq_{\max} , %	δp_{avg} , %	δq_{avg} , %	Время расчёта, с
МРП+МУП	–	–	–	–	395
МСП 2+МУП	0,11	3,20	0,03	0,66	135
МСП 2+МГГ	0,11	3,21	0,03	0,66	6

Третья глава «Модели управления крупномасштабными ГТС» посвящена задачам управления штатными и экстремальными квазистационарными и нестационарными режимами крупномасштабных ГТС.

Среднесрочное планирование режимов ТКМГ. В условиях неполной загрузки пользоваться одним критерием – стоимостью перекачки тыс. м³ или затратами топливного газа – не рационально, поскольку различия между технологическими схе-

мами (ТС) включения КЦ и ГПА по этому критерию могут быть весьма незначительными. К тому же, часто оказывается целесообразным использование различных ТС с отключением КЦ (нитки «на проход»). Тогда однокритериальная постановка оптимизационной задачи приведёт к решениям с частыми переключениями оборудования, что нетехнологично. Помимо устойчивости режимов, при выборе технологических схем работы ГТС следует учитывать также и другие критерии. Например, не следует слишком перегружать, подолгу держать под нагрузкой какие-то ГПА за счёт снижения времени нахождения под нагрузкой других. Кроме того, длительное нахождение в бездействии объекта ЕСГ (КЦ или КС) будет иметь социальные последствия.

В качестве примера крупномасштабной ГТС был выбран трёхниточный ТКМГ (рисунок 3) протяжённостью 900 км с 8 КС, каждая из которых состоит из 3-х одинаковых КЦ, в КЦ по 3 ГПА. Расстояние между КС составляет 100 км. Внешний диаметр всех трубопроводов коридора 1420 мм. Компрессорные станции оборудованы ГПА-Ц-16 с номинальной мощностью 16 МВт.

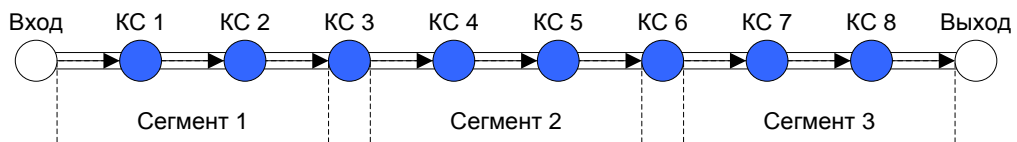


Рисунок 3 – Принципиальная схема ТКМГ

При расчёте коридора следует задать граничные условия по режимным параметрам. Представляет интерес случай, когда задаются значения давлений на входе и выходе коридора ($p^s(t)$ и $p^f(t)$ соответственно), а также расход и температура на входе – $q^s(t)$ и $T^s(t)$. Задача состоит в том, чтобы найти такие управляющие воздействия на интервале времени $[0; t_{end}]$, которые обеспечат минимум целевых функций (критериев):

$$F^{(g)}(\mathbf{u}(t)) \rightarrow \min_{\mathbf{u}(t)}, \text{ при условии } (\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \in \Phi(t), t \in [0; t_{end}]. \quad (6)$$

Здесь g – номер критерия, $\mathbf{x} = \|\mathbf{p}(t), \mathbf{q}^s(t), \mathbf{q}^f(t), \mathbf{Q}(t)\|^T$ – вектор фазовых координат, \mathbf{u} – вектор управляющих воздействий (обороты ЦБН ГПА, схемы включения КЦ и КС и др.), Φ – область допустимых значений режимно-технологических

параметров и управляющих воздействий. Дискретизируем временную координату, разбив отрезок $[0; t_{end}]$ на K интервалов с шагом τ . Решение задачи (6) будем искать при значениях $t_j = j \cdot t_{end} / K$. Рассмотрим следующие критерии управления.

Критерий 1 – минимум затрат на топливный газ:

$$F^{(1)} = \int_0^{t_{end}} Q_{fg}(\mathbf{u}(t)) dt \approx E_K^{(1)} \rightarrow \min_{\mathbf{u}(t)}, \quad (7)$$

$$E_k^{(1)} = \tau \sum_{j=1}^k Q_{fg}(\mathbf{u}_{j-1}, \mathbf{u}_j),$$

где $Q_{fg}(\mathbf{u}(t))$ – суммарные (по ТКМГ) затраты топливного газа в момент времени t .

Критерий 2 – минимизация количества технологических операций (критерий устойчивости управления):

$$F^{(2)} = M_K^{(2)} \rightarrow \min_{\mathbf{u}(t)}, \quad (8)$$

$$M_k^{(2)} = \sum_{j=1}^k M_{GCU}(\mathbf{u}_{j-1}, \mathbf{u}_j) + \mu \cdot M_{CSh}(\mathbf{u}_{j-1}, \mathbf{u}_j),$$

где $M_{GCU}(\mathbf{u}_{j-1}, \mathbf{u}_j)$ – количество пусков/остановок ГПА, $M_{CSh}(\mathbf{u}_{j-1}, \mathbf{u}_j)$ – количество включений/отключений КЦ, необходимых для перехода из состояния $(\mathbf{u}_{j-1}, \mathbf{x}_{j-1}) \rightarrow (\mathbf{u}_j, \mathbf{x}_j)$. Весовой коэффициент $\mu > 1$ позволяет учесть тот факт, что включение/отключение КЦ более трудоёмкая операция, чем пуск/остановка ГПА.

Критерий 3 – поиск компромисса в двухкритериальной задаче:

$$F^{(1)} \rightarrow \min_{\mathbf{u}(t)}, F^{(2)} \rightarrow \min_{\mathbf{u}(t)}. \quad (9)$$

Естественной представляется задача минимизации линейной комбинации критериев (9). Однако, в реферируемой работе предлагается другой аппарат – многокритериальная оптимизация, основанная на принципе Парето с использованием метода идеальной точки. Пусть решены задачи (7) и (8), и, следовательно, известны оптимальные значения критериев $\tilde{F}^{(1)}, \tilde{F}^{(2)}$ («волна» сверху означает принадлежность величины к оптимальному решению), а также оптимальные траектории $\tilde{E}_k^{(1)}, \tilde{M}_k^{(2)}$, по которым вычислены также значения $\tilde{E}_k^{(2)}, \tilde{M}_k^{(1)}$. Совокупность

$[\tilde{E}_k^{(1)}, \tilde{M}_k^{(2)}]$ образует «утопическую» траекторию. Идея предлагаемого метода заключается в минимизации расстояния расчётной траектории задачи (9) от «утопической» (рисунок 4):

$$F^{(3)} = \sum_{k=1}^K h_k \rightarrow \min_{\mathbf{u}(t)}, \quad (10)$$

$$h_k = \sqrt{\lambda \left[\frac{E_k^{(3)} - \tilde{E}_k^{(1)}}{\tilde{E}_k^{(2)} - \tilde{E}_k^{(1)}} \right]^2 + (1 - \lambda) \left[\frac{M_k^{(3)} - \tilde{M}_k^{(2)}}{\tilde{M}_k^{(1)} - \tilde{M}_k^{(2)}} \right]^2}.$$

Подкоренное выражение в (10) вычисляется при условии: если у одной из дробей знаменатель обращается в нуль, то этот член полагается равным нулю. Параметр $\lambda \in [0,1]$ позволяет регулировать вес критериев (9), он выбирается экспертно.

Разделим рассматриваемую систему на 3 сегмента со стыковыми узлами КС 3 и КС 6 (рисунок 3). Декомпозиция проводится для того, чтобы упростить исследование, осуществив перебор технологических схем для сегментов, и составить из них ТС для коридора в целом. Примеры ТС представлены на рисунке 5. Режимы работы КС 3 и КС 6 будем рассматривать в двух вариантах: КС в работе, либо КС на «проход», при этом оптимизация проводится численным методом упорядоченного перебора в фазовом пространстве давлений на входе и выходе этих КС.

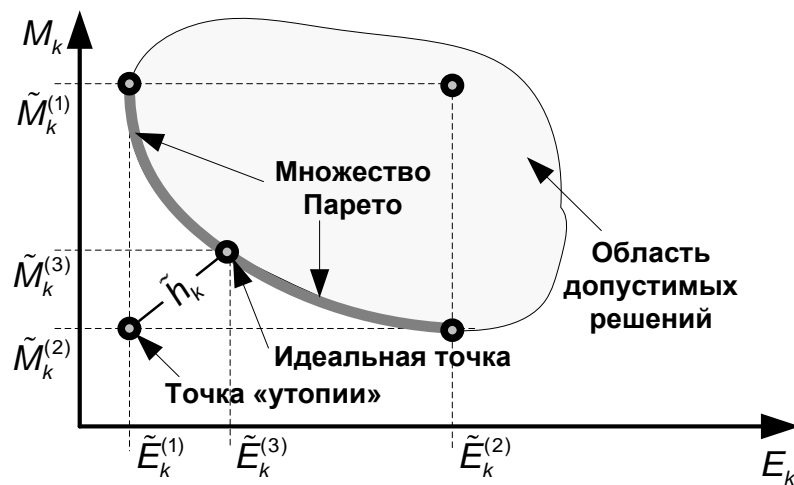


Рисунок 4 – Пояснение к стратегии 3 ($k = 1, \dots, K$)



Технологическая схема 5



Технологическая схема 6

Рисунок 5 – Пример технологических схем сегмента ТКМГ.

ТС 5 – нитка на проход КС, ТС 6 – 2 нитки на проход КС

Для решения задач (7), (8) и (10) предлагается использовать вычислительный алгоритм, основанный на методе динамического программирования.

В реферируемой работе представлены результаты численного исследования устойчивости управления ТКМГ на примере сегмента ТКМГ. Производилось исследование управления сегментом ТКМГ на интервале в 1 месяц (31 день). Принималось, что функции $p^{in}(t)$, $p^{out}(t)$ постоянны на всем отрезке $[0, T]$: $p^{in}(t) = 7,3$ МПа, $p^{out}(t) = 5,2$ МПа, $T^{in}(t) = 25$ °С. Расход газа в начале сегмента задавался моделью случайного процесса $q_t = f(t) + X_t + \varepsilon_t$, $t = 1, \dots, T$, где $X_t = \alpha X_{t-1} + \beta \varepsilon_{t-1}$, $f(t)$ – линейные убывающие функции с областью значений $[170, 208]$ – пример 1, $[185, 225]$ – пример 2 и $[208, 246]$ – пример 3, $\varepsilon \sim N(0, 1)$; $\alpha = 0,5$; $\beta = 0,3$. Рассматривались критерии управления (7) – (9). В каждом вычислительном эксперименте методом Монте-Карло имитировались 100 реализаций случайного процесса.

В табл. 2 приведены характеристики устойчивости управления. Помимо введенных ранее использованы следующие обозначения: M_{TS} – среднее по ансамблю реализаций случайного процесса количество переходов от одной ТС к другой.

Оперативное управление режимами ГТС в экстремальных условиях. Целью оперативно-диспетчерского управления ГТС является выбор режима, удовлетворяющего ряду технологических ограничений: максимум давления в трубопроводах, максимум мощности КС, поддержание определённого перепада давления на регуляторах давления и др. В случаях, когда невозможно обеспечить контрактные поставки газа при соблюдении технологических ограничений, эксплуатирующие организации вынуждены ограничивать подачу газа потребителям. В работе предлагается модель исследования живучести ГТС для оценки дефицита поставок газа при различных сценариях управляющих воздействий со стороны диспетчерских служб.

Здесь под живучестью подразумевается свойство системы противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей. Задача о рациональном распределении ограниченных объёмов газа в условиях острого дефицита возникает также в связанных с энергетической безопасностью исследованиях, где требуется распределить имеющиеся ресурсы так, чтобы минимизировать ущербы, например, не допустить остановки производств, для которых перерыв в работе приводит к выходу оборудования из строя.

Изучение процессов, приводящих к «развалу» системы, имеет целью формирование мероприятий, позволяющих снизить негативные эффекты при дефиците газа. Для исследования разработаны методы моделирования режимов, учитывающие изменение объёмов аккумулированного в трубах газа.

Таблица 2. Характеристики стратегий управления*

Стратегия	Q_{fg}	M_{TS}	M_{CSh}	M_{GCU}	Q_{fg}/Q_{fg}^*	M_{TS}/M_{TS}^*	M_{CSh}/M_{CSh}^*	M_{GCU}/M_{GCU}^*
1	13,27	5,97	8,58	20,56	1,00	3,09	4,13	4,09
	21,37	3,78	5,37	10,48		3,78	3,05	2,30
	36,81	2,23	4,82	7,78		–	2,14	2,30
2	17,03	1,94	2,08	5,03	1,28	1,00	1,00	1,00
	25,85	1,00	1,76	4,55	1,21			
	39,89	0,00	2,25	3,38	1,08			
3: $\lambda = 0,2$	15,91	2,68	3,87	8,60	1,20	1,39	1,86	1,71
	24,09	1,87	3,45	7,80	1,13	1,87	1,96	1,72
	39,69	0,10	2,41	3,67	1,08	–	1,07	1,09
3: $\lambda = 0,4$	15,56	3,04	4,10	9,50	1,17	1,57	1,97	1,89
	23,25	2,10	3,56	8,35	1,09	2,10	2,02	1,84
	37,79	0,95	4,26	6,88	1,03	–	1,89	2,04
3: $\lambda = 0,6$	15,10	3,39	4,12	10,13	1,14	1,75	1,98	2,01
	23,26	2,40	4,16	8,64	1,09	2,40	2,37	1,90
	37,80	1,12	3,31	5,54	1,03	–	1,47	1,64
3: $\lambda = 0,8$	14,42	3,74	4,32	11,24	1,09	1,93	2,08	2,23
	22,84	2,73	4,01	8,17	1,07	2,73	2,28	1,80
	37,80	1,12	3,30	5,52	1,03	–	1,46	1,64

*) В каждой тройке чисел верхнее относится к примеру 1, среднее – к примеру 2, нижнее – к примеру 3.

В работе сформулированы ограничения задачи и критерии оптимальности управления ГТС в экстремальных условиях. Будем ассоциировать потребителей с газораспределительными станциями (ГРС). Обозначим для ГРС i ($i = 1, \dots, m$, m – количество потребителей) $\hat{Q}_i(t)$ – контрактный график потребления; $Q_i(t)$ – рас-

считанный по модели (4), (5) график возможных поставок; P_i^{min} – минимально допустимое давление на входе ГРС, $p_i(t)$ – расчётное давление на входе ГРС. Если в какой-то момент времени t давление приближается к P_i^{min} , то на ГРС вводится режим ограничения поставок газа, а граничное условие $Q_i(t) = \hat{Q}_i(t)$ заменяется на $p_i(t) = P_i^{min}$. Если в режиме ограничения поставок расчётный расход повышается, приближаясь к $\hat{Q}_i(t)$, то граничным условием становится $Q_i(t) = \hat{Q}_i(t)$, т.е. режим ограничения снимается. Дефицит газа на потребителе i в момент времени t будет равен $D_i(t) = \hat{Q}_i(t) - Q_i(t)$.

Решение, удовлетворяющее сформулированным выше граничным условиям, определяет допустимый режим, соответствующий естественным технологически реализуемым граничным условиям.

Задача управления ГТС в экстремальных условиях имеет вид:

$$J = \int_0^{t_{end}} f_g(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u}} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_1(t, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \\ \mathbf{F}_2(t, \mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \\ \mathbf{A}^s \mathbf{q}^s(t) + \mathbf{A}^f \mathbf{q}^f(t) = \mathbf{Q}(t), \end{cases} \quad (12)$$

$$(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \in \Phi(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0. \quad (13)$$

Здесь g – номер критерия управления, \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 соответствуют первому и второму уравнениям системы (4), (5). Численное решение задачи (11) – (13) осуществлено методом, предложенным М.Г. Сухаревым и Р.В. Самойловым.

На модели ГТС московского промышленного узла (рисунок 1) проведён вычислительный эксперимент, в котором имитировались экстремальные условия функционирования ГТС, характерные для периодов резких похолоданий. В качестве исходных данных задавался, в частности, повышенный спрос потребителей, который не может быть удовлетворён по техническим причинам из-за недостаточного поступления газа в систему. Управляемыми объектами в системе являются компрессорные станции (КС). В качестве управляющих воздействий рассматрива-

лись степени сжатия $\varepsilon(t)$ на 4-х работающих КС: Воскресенск, Истье, Тума, Пуятинская. Цель вычислительного эксперимента состояла в сравнении следующих критериев управления:

$$1) f_1(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = -c_W \sum_{r \in \Gamma_{pipe}} W_r(t) \text{ — максимум запаса газа } (W_r(t) \text{ — количество}$$

газа, аккумулированное в трубопроводе r в момент времени t , Γ_{pipe} — множество дуг, соответствующих трубопроводам);

$$2) f_2(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = c_N \sum_{r \in \Gamma_{CS}} N_r(t) \text{ — минимум энергозатрат } (N_r(t) \text{ — мощность КС } r,$$

Γ_{CS} — множество дуг, соответствующих КС);

3) максимум запаса газа в трубах, если дефицита газа нет, в противном случае — минимум дефицита газа:

$$f_3(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{cases} -c_W \sum_{r \in \Gamma_{pipe}} W_r(t), & \text{если } D(t) = 0, \\ c_D D(t), & \text{если } D(t) > 0; \end{cases}$$

4) минимум энергозатрат, если дефицита газа нет; в противном случае — минимум дефицита газа:

$$f_4(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{cases} c_N \sum_{r \in \Gamma_{CS}} N_r(t), & \text{если } D(t) = 0, \\ c_D D(t), & \text{если } D(t) > 0. \end{cases}$$

Коэффициенты c_W, c_N, c_D введены для того, чтобы учесть размерности величин $W_r(t), N_r(t), D(t)$, причём $c_D \gg c_W, c_D \gg c_N$.

В таблице 3 представлены результаты сравнения стратегий управления 1 – 4. Из таблицы видно, что зависимость режимов от выбора критерия весьма существенна. При реализации стратегии 3 обеспечивается минимум дефицита газа в системе, однако для этого энергетические затраты должны быть в 1,5 раза больше, чем при стратегии 4. Стратегия 2 характеризуется минимальными энергозатратами, но при этом в наименьшей степени удовлетворяется спрос потребителей. Имеет недостатки также стратегия 1 («максимум запаса газа в системе»), требующая почти таких же энергозатрат, как и стратегия 3, но характеризующаяся вдвое большим

дефицитом газа.

Таблица 3 – Результаты расчёта при различных критериях

№ стратегии	N , МВт	$N - N_{\min}$, МВт	W , млн.м ³	$W_{\max} - W$, млн.м ³	D , млн.м ³
1	138,0	87,7	234,5	–	3,2
2	50,3	–	227,4	7,1	12,3
3	143,0	92,7	234,1	0,4	1,6
4	94,5	44,2	230,0	4,5	4,2

Решение о реализации той или иной стратегии специалисты должны принимать, опираясь на свой опыт и результаты расчётов.

Четвертая глава «Разработка программно-вычислительного комплекса для моделирования и оптимизации режимов ГТС» посвящена архитектуре разрабатываемого ПВК, в рамках которой можно чётко выделить следующие стили.

1. Стилль, основанный на предметной области. Платформа направлена на создание программных систем моделирования ГТС, следовательно, центральной частью системы является объектная модель – набор взаимосвязанных сущностей, предоставляющих информационные модели объектов моделируемой ГТС.

2. Компонентный архитектурный стиль. Программная платформа хотя и является законченным ПО, нуждается в настройке объектной модели и добавлении специфической для области применения функциональности (например, расчётной подсистемы). Иными словами, предполагается добавление, изменение, удаление функциональных компонентов без влияния на платформу в целом.

3. Многослойный архитектурный стиль. Функциональные возможности программной платформы разделены не только по решаемым задачам, как при использовании компонентного стиля, но и по ролям (слоям): работа с данными, бизнес-логика, визуализация, взаимодействие с пользователем. В качестве более низкоуровневой реализации данного стиля применяется шаблон проектирования Model-View View-Model (MVVM).

Сочетание всех этих стилей привело к созданию архитектуры, состоящей из:

– ядра и сервисов приложения, обеспечивающих инфраструктуру взаимодействия всех компонентов платформы;

– компонентов объектной модели, предоставляющих сущности и бизнес-логику, которые позволяют динамически формировать адаптированные к конкретной отрасли информационные модели элементов соответствующей технологической сети;

– функциональных компонентов, позволяющих манипулировать объектной моделью (графический редактор, табличный редактор, адаптер баз данных и др.).

Платформа основана на следующих технологиях.

1. Платформа создания программного обеспечения .Net Framework. Эта технология обеспечивает высокий уровень абстракции разработчика от среды выполнения приложения. На данной технологии создаётся весь программный код разрабатываемой платформы.

2. Система создания сложного интерфейса пользователя Windows Presentation Foundation (WPF). В основе данной технологии лежит шаблон проектирования MVVM.

3. Технология построения сложных бизнес-приложений PRISM. Она предоставляет реализации множества различных шаблонов проектирования, относящихся как к компонентному архитектурному стилю, так и к многослойному. На PRISM основано ядро платформы и сущности, реализующие паттерн MVVM.

4. Технология Managed Extensibility Framework (MEF), реализующая паттерн внедрение зависимостей. Данная технология является частью ядра платформы и обеспечивает поиск компонентов и их внедрение.

Заключение

В ходе выполнения работы получены следующие результаты.

1. Сопоставлены модели нестационарного течения газа с сосредоточенными параметрами. Реализован представительный вычислительный эксперимент, который доказал высокую точность и эффективность (быстрота счёта) МСП. Модель позволяет сократить, по сравнению с МРП, время счёта для нестационарного изотермического течения в 40 – 70 раз, а для нестационарного неизотермического течения – в 10 – 15 раз.

2. На базе МСП разработана новая методика расчёта нестационарных режимов в ГТС произвольной конфигурации. Предложен алгоритм реализации метода. Алгоритм применён к трубопроводной структуре, воспроизводящей в общих чертах систему газоснабжения Московского региона. Тем самым доказана приемлемость модели для крупномасштабных промышленных систем, при этом удалось сократить время счёта практически на 2 порядка.

3. Проведено исследование технологических режимов многониточного коридора МГ в условиях неполной загрузки. Разработаны алгоритм и программа выбора оптимального управления коридором по критерию минимума затрат на транспортировку газа. Наряду с минимизацией энергетических затрат в качестве критерия оптимизации предложены критерии минимизации числа переключений КЦ и ГПА. Введены количественные критерии для характеристики устойчивости режимов. Разработан алгоритм, который служит для оценки показателей устойчивости технологических схем управления коридором.

4. Предложена модель исследования живучести и управления ГТС в экстремальных режимах функционирования. Разработана компьютерная технология и проведены расчёты для крупномасштабной ГТС – Московского промышленного узла – при 4-х стратегиях управления (критериях оптимальности). Показана существенная зависимость решения от критерия. Сделан вывод о целесообразности при принятии оперативных решений сочетать производственный опыт специалистов с результатами исследования ситуации на компьютерных моделях.

5. Разработан прототип программного комплекса моделирования и оптимизации технологических режимов ГТС. Для этого подготовлены шаблоны технологических объектов газотранспортной отрасли. Также был проработан и реализован в программе внешний вид технологических объектов, соответствующий требованиям информативности и эргономичности.

Публикации по теме диссертации

1. Попов Р.В. Расчётные алгоритмы для моделирования нестационарных течений в газопроводе // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина,

2014. №3/276. – С. 47-59.

2. Сухарев М.Г., Попов Р.В. Новая методика моделирования нестационарных течений газа в системах газоснабжения // Известия РАН. Энергетика, 2015. №2 – С. 150-159.

3. Бальченко А.С., Белинский А.В., **Попов Р.В.**, Халиуллин А.Р. Платформа для построения программно-вычислительных комплексов моделирования технологических сетей / Трубопроводные системы энергетики: математическое и компьютерное моделирование / Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Сарданашвили С.А. и др. – Новосибирск: Наука, 2014. – С. 191-197.

4. **Попов Р.В.**, Белинский А.В., Комиссаров С.В., Власов С.В. Информационная расчётная система моделирования и оптимизации потоков газа «ИРС ЕСГ» / Трубопроводные системы энергетики: математическое и компьютерное моделирование / Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Сарданашвили С.А. и др. – Новосибирск: Наука, 2014. – С. 197-206.

5. **Попов Р.В.** Применение метода глобального градиента для моделирования газотранспортных систем / Труды XIV Всеросс. научн. семин. «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». Белокуриха, Алтайский край, 8-13 сентября 2014 г. – С. 83-92.

6. Бальченко А.С., **Попов Р.В.** Разработка программной платформы систем моделирования технологических сетей / Труды XIV Всеросс. научн. семин. «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». Белокуриха, Алтайский край, 8-13 сентября 2014 г. – С. 353-362.

7. Сухарев М.Г., **Попов Р.В.** Модель исследования живучести крупных газотранспортных систем в экстремальных погодных условиях / Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 280-286.

8. **Попов Р.В.** Математическое и компьютерное моделирование нестационар-

ных режимов транспорта газа / Тезисы V научно-практической молодёжной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ» – 2013 г.

9. Бальченко А.С., **Попов Р.В.** Программная платформа предметно-ориентированных систем моделирования технологических сетей / Тезисы V научно-практической молодёжной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ» – 2013 г.

10. Сухарев М.Г., **Попов Р.В.** Новая методология моделирования нестационарных режимов в системах газоснабжения / Тезисы X Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина – 2014 г. – С. 287.

11. Сухарев М.Г., **Попов Р.В.** Модель с сосредоточенными параметрами для имитации нестационарных течений в системах газоснабжения / Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими системами (DISCOM-2014): тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции 18-19 ноября 2014 г. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. – С. 55.

12. **Попов Р.В.** Компьютерная модель поддержки принятия решений для оперативного управления ГТС в экстремальных условиях / Сборник тезисов 69-й Международной молодёжной научной конференции «Нефть и газ - 2015». Том 2, секция «Автоматизация и вычислительная техника в нефтегазовом деле». – М., 2015 г. – С. 311.

13. **Попов Р.В.**, Бальченко А.С. Разработка программно-вычислительного комплекса для имитации и оптимизации нестационарных режимов газотранспортных систем / Тезисы докладов 11-ой Всероссийской конференции молодых учёных, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика). – М., 2015 г. – С. 325.

14. **Попов Р.В.** Модель управления низконапорными режимами многониточных коридоров газопроводов / Сборник тезисов 70-й Международной молодёжной

научной конференции «Нефть и газ – 2016». Секция 6 «Автоматизация и вычислительная техника в нефтегазовой отрасли». – М.: 2016 г. – С. 45.

15. Белинский А.В., Власов С.В., Тверской И.В., Комиссаров С.В., **Попов Р.В.** и др. Информационная расчётная система моделирования и оптимизации региональных систем магистральных газопроводов и газопроводов-отводов «ИРС РСГ». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2012615830 от 26 июня 2012 г.

16. **Попов Р.В.**, Белинский А.В., Тверской И.В. и др. Информационная расчётная система для моделирования и оптимизации потоков газа в Единой системе газоснабжения «ИРС ЕСГ». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2012661168 от 10 декабря 2012 г.

17. **Попов Р.В.**, Сухарев М.Г. Расчётный модуль для моделирования и оптимизации стационарных и динамических режимов транспортировки газа «Сигрюн». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2014614197 от 17 апреля 2014 г.