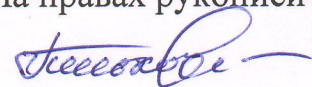


На правах рукописи



Пеньковский Андрей Владимирович

МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ
ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА В ЗАДАЧАХ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ
СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕСОВПАДАЮЩИХ ИНТЕРЕСОВ

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН
Стенников Валерий Алексеевич

Официальные оппоненты: **Дамбиев Цырен Цыдэнович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», кафедра «Тепловые электрические станции», профессор

Боруш Олеся Владимировна,
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Тепловые электрические станции», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет», г. Чита

Защита состоится «17» января 2018 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2017-8/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу диссертационного совета Д003.017.01: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



Клер Александр Матвеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Централизованное теплоснабжение в России является основным видом обеспечения потребителей тепловой энергией (ТЭ). Появление множества собственников в этом секторе экономики, связанное с процессом либерализации энергетики, привело к формированию новых экономических отношений между производителями, поставщиками и потребителями ТЭ и созданию рынка тепла. Значительно возросли требования потребителей к качеству, надежности теплоснабжения, к предоставляемому уровню комфорта в помещениях и удовлетворению необходимых условий протекания производственных процессов. Процесс преобразования теплоснабжающих систем (ТСС), формирование новой модели теплового рынка, мотивация (заинтересованность) в техническом и технологическом совершенстве, целесообразность формирования эффективной инфраструктуры теплогенерирующих мощностей, тепловых сетей (ТС) приводят к тому, что вопросы перспективного развития ТСС приобретают все большую актуальность. В связи с этим, существенно возросла роль принимаемых решений по развитию ТСС и ответственность за них. Более сложными стали задачи по подготовке и принятию перспективных решений. Это обусловлено множеством факторов, среди них наиболее важными представляются такие, как наличие множества несовпадающих интересов субъектов отношений, колебание спроса на ТЭ в зависимости от складывающейся на тепловом рынке цены, переход на новые правила организации теплоснабжения потребителей и других факторов. В настоящее время многие вопросы, связанные с техническим преобразованием ТСС и разработкой необходимой методической базы для проектирования ТСС в изменившихся условиях, недостаточно проработаны для практического использования.

Основными задачами здесь являются: разработка и реализация эффективных технических решений по развитию ТСС в условиях несовпадающих интересов между всеми субъектами ее отношений; объединение нескольких источников тепла (ИТ), принадлежащих различным собственникам, для работы на общие ТС; поиск оптимального распределения тепловой нагрузки между ИТ в условиях конкурентного и монопольного рынка тепловой энергии; оптимизация реконструкции ТС и определение мероприятий по их развитию для реализации оптимального потокораспределения в объединенной системе и др.

При этом возникает новый аспект научных исследований по созданию методической базы, позволяющей осуществлять постановку задач и реализацию решений, связанных с развитием ТСС и обеспечивающих их эффективное, конкурентоспособное функционирование и развитие.

Актуальность проблемы распределения тепловой нагрузки между ИТ в условиях несовпадающих интересов субъектов отношений с учетом ее передачи по тепловым сетям и отсутствие методов ее решения определили выбор темы, цели и задачи исследования.

Объект исследования. Теплоснабжающие системы в составе источников тепла, тепловых сетей и потребителей тепловой энергии.

Предмет исследования. Модели и методы управления реконструкцией и развитием теплоснабжающих систем в условиях несовпадающих интересов.

Цели работы состоят в разработке и развитии математических моделей и методов для решения задач преобразования ТСС в условиях различных интересов участников теплоснабжения. Для выполнения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ технологических структур ТСС, форм организации их функционирования, моделей и методов для решения задач реконструкции и развития ТСС.

2. Определены требования к методическому и вычислительному инструментарию оптимизации ТСС в современных условиях с учетом иерархической структуры организации теплоснабжения.

3. Разработаны математическая модель и метод решения задач развития ТСС в рамках модели «Единый закупщик» в условиях несовпадающих интересов сторон, учитывающие физико-технические, технико-экономические свойства и ограничения по источникам, тепловым сетям и потребителям.

4. Разработаны математические модели, методы и алгоритмы решения задачи оптимального распределения нагрузки между ИТ в задачах развития ТСС, функционирующей в формате «Единая теплоснабжающая организация» при наличии и отсутствии регулирования ее деятельности.

5. Проведены прикладные исследования с помощью разработанных математических моделей для формирования рекомендаций по решению практических задач управления развитием реальных ТСС.

Методология исследований опирается на основные положения системных исследований в энергетике, на модели и методы теории гидравлических цепей, математическое моделирование, экономику энергетике, базовые принципы микроэкономики, теорию игр, методы равновесного программирования, теорию управления. Содержательные исследования базируются на вычислительном эксперименте и практических расчетах.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней получены и выносятся на защиту следующие наиболее важные результаты:

1. Предложена система моделей распределения тепловой нагрузки между источниками тепла при решении задач оптимального развития теплоснабжающих систем в условиях несовпадающих интересов участников теплоснабжения, учитывающая системные физико-технические и экономические свойства и ограничения ТСС.

2. Сформулирована постановка задачи оптимального распределения тепловой нагрузки между теплоисточниками в рамках организационной модели «Единый закупщик». Разработан метод, основанный на поиске равновесного решения по производству и потреблению тепловой энергии с помощью игровых подходов. По сравнению с традиционным решением задачи, относительно только источников тепловой энергии, он учитывает тепловые сети с их технико-экономическими свойствами и ограничениями.

3. Разработан методический подход для решения задачи поиска баланса спроса и предложения на тепловую энергию с несколькими конкурирующими источниками тепла, основанный на пошаговом итерационном процессе «Нашупывания по Курно». Показано, что достигаемое решение позволяет обеспечить, с од-

ной стороны, заданную потребность в тепловой энергии, с другой стороны, учитывать интересы источников тепла в их развитии.

4. Предложены постановки задачи оптимизации загрузки источников тепла в условиях нерегулируемой и регулируемой «Единой теплоснабжающей организации». Для каждой задачи разработан соответствующий алгоритм поиска оптимального распределения тепловой нагрузки между источниками, которому соответствует балансовое равновесие спроса и предложения на тепловую энергию, а также оптимальные зоны их действия в рассматриваемой ТСС.

5. По результатам выполненных исследований реальных ТСС с помощью предложенного методического и вычислительного обеспечения. Получены практические рекомендации, которые могут представлять интерес для принятия решений по развитию теплоснабжающих систем.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что предлагаемые методические положения доведены до конкретных алгоритмов и рекомендаций по технологическому преобразованию ТСС. Они имеют универсальный характер и могут быть использованы теплоснабжающими организациями, органами государственной и муниципальной власти для принятия решений по управлению развитием теплоснабжения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- заседаниях всероссийского научного семинара с международным участием «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем» (г. Санкт-Петербург, 2006 г.; о. Байкал, 2008 г.; г. Ялта, 2010 г.; г. Белокуриха, 2014 г.; о. Байкал, 2016 г.);

- конференциях научной молодежи ИСЭМ СО РАН (г. Иркутск, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 гг.);

- всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (г. Иркутск, 2006, 2007, 2008, 2009, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.);

- всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление» (г. Иркутск, 2015 г.);

- международной энергетической конференции «8-th International Conference on Applied Energy» (Китай, г. Пекин, 2016 г.);

- всероссийской конференции «VIII Мелентьевские чтения. Системные исследования в энергетике: методология и результаты» (г. Москва, 2017 г.).

Личный вклад автора. Результаты работы, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 печатных работ, в том числе в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК – 5, в коллективных монографиях – 4, в изданиях, входящих в базу данных Scopus – 3.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 149 страниц. Работа содержит 38 рисунков, 9 таблиц и 5 глав.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, отмечены элементы новизны разработанных моделей, а также достигнутых результатов. Перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния и тенденций развития ТСС, приведен краткий обзор научно-методических достижений в области их математического моделирования, оптимизации и расчета. Среди работ, составляющих основу этой области знаний, следует выделить работы Б.Л. Шифринсона, А.М. Занфирова, В.Я. Хасилева, Е.П. Шубина, Е.Я. Соколова, Н.К. Громова, А.П. Меренкова, А.М. Клера, Е.В. Сенновой, В.А. Стенникова, Л.С. Хрилева. Полученные в них укрупненные технико-экономические показатели для расчета тепловых сетей в настоящее время используются в практике проектирования ТСС.

Комплексное направление, охватывающее большой спектр вопросов математического моделирования, расчета и оптимизации теплоснабжающих систем и других трубопроводных систем энергетики, получило обобщение в рамках Теории гидравлических цепей, которая была сформулирована В.Я. Хаселевым, получила продолжение в работах А.П. Меренкова и успешно развивается в ИСЭМ СО РАН.

В условиях свободного развития энергетики проблема оптимизации ТСС существенно усложняется и ее структуризация становится многовариантной в зависимости от особенностей организации отрасли. Российский научно-практический опыт по вопросам организации и осуществления преобразований в теплоэнергетике в условиях рыночной экономики еще мало изучен и недостаточно систематизирован, а зарубежный, как показывает практика, не может быть в полной мере адаптирован к отечественным условиям.

За последнее десятилетие в зарубежной литературе появились работы, связанные с применением игровых и экономико-математических моделей для различных энергетических систем, функционирующих в конкурентных условиях.

В отечественной литературе практически не встречается применение игровых моделей для решения задач функционирования и развития ТСС, но они успешно применяются в электроэнергетике, нефтегазовом комплексе и в системах водоснабжения городов.

Применительно к электроэнергетическим системам эти вопросы рассматриваются в работах Н.И. Воропая, Л.С. Беляева, А.З. Гамма, С.И. Паламарчука, С.В. Подковальникова, В.В. Труфанова, А.А. Васина, Kankar Bhattacharya, Math H.J. Bollen, Jaap E. Daalder, Steven Stoft, Day S.J., Hobbs B.F., Pang J., газоснабжающим системам – Н.И. Илькевича, И.И. Голуб, С.Я. Чернавского, О.А. Эйсмонта, А. И. Глаголева, С. С. Демина, Ю. Н. Орловой, W. Lise, B. Hobbs, Zaifu Yanga, Rong Zhangc, Zongyi Zhang, системам водоснабжения – А.Г. Коваленко.

Таким образом, вопросы математического моделирования и оптимизации ТСС в новых условиях развития и управления только начинают становиться предметом научного исследования.

Анализ рассмотренных задач и методических подходов по развитию систем энергетики в современных условиях позволил сформулировать направления исследований, конкретизировать цель работы, обосновать научную новизну и практическую значимость диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены и описаны основные организационные модели управления теплоснабжением в условиях регулируемых отношений в ТСС:

– «Единая теплоснабжающая организация» («ЕТО») – модель естественной монополии;

– «Единый закупщик» – модель, позволяющая организовывать конкурентные отношения между производителями и потребителями тепловой энергии.

Применение данных организационных моделей рынка тепловой энергии зависит от цели, которая при этом будет поставлена. Так, например, если стратегической целью является поддержание надежности и снижение технических и экономических рисков в системе теплоснабжения, то для устойчивого развития источников необходим контроль теплогенерации над всей системой. В этом случае все функции по выработке, транспорту и сбыту тепловой энергии должны быть сосредоточены в рамках «Единой теплоснабжающей организации» (рис.1).



Рисунок 1 – Организационная модель «Единая теплоснабжающая организация»

В модели «ЕТО» все вопросы по теплоснабжению консолидированы в одной компании, что позволяет создать благоприятные условия для совершенствования процесса функционирования, развития и реконструкции ТСС. В этих условиях «ЕТО» единолично оптимизирует объемы производства и ценовые параметры на тепловую энергию.

Если же стратегической целью является развитие конкуренции на рынке ТЭ, то для организации данного типа модели должны выполняться следующие требования:

- наличие двух и более источников тепла, принадлежащих различным собственникам;
- объединение тепловых сетей (магистральные, распределительные и др.) независимо от форм собственности (частная, муниципальная, прочие) в «Единую теплосетевую компанию»;
- наличие избытков тепловой мощности ИТ.

Укрупненно конкурентную модель рынка тепловой энергии схематично можно представить в следующем виде (рис. 2).

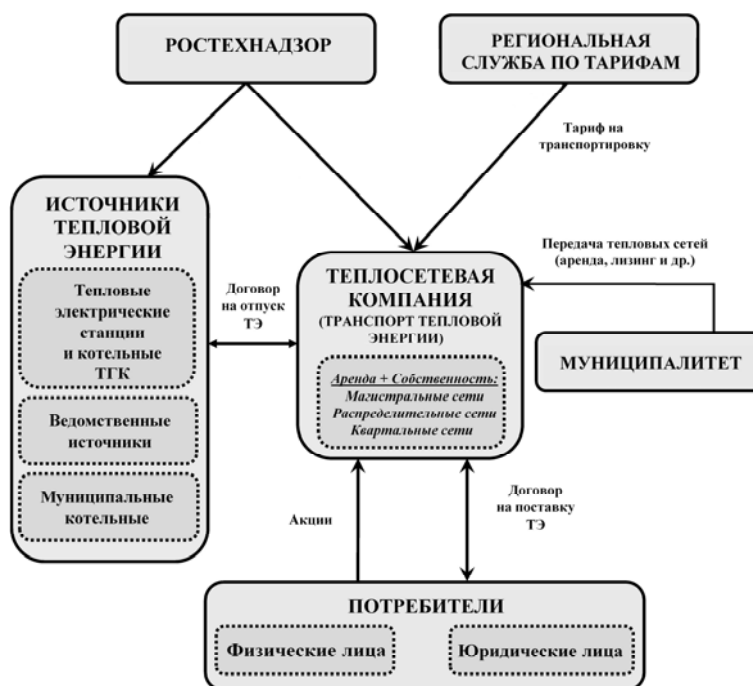


Рисунок 2 – Организационная модель «Единый закупщик» в теплоснабжающей системе

Взаимоотношения участников теплоснабжения выстраиваются по определенной схеме и заключаются в следующем. Теплосетевая компания, являясь регулируемой естественной монополией на рынке тепла, основываясь на результатах прогнозов спроса, осуществляет поставку тепловой энергии потребителям по тарифу, определяемому как сумма конкурентного тарифа производства тепловой энергии ИТ и оптимального тарифа транспортировки ТЭ от источников тепла до потребителей. Каждый источник тепла производит такое количество тепловой энергии, которое максимизировало бы получаемую ими прибыль, с условием, что ИТ в совокупности должны покрывать заданный потребителями спрос на ТЭ и удовлетворять желание потребителей платить за этот спрос, а теплосетевая компания стремится минимизировать сетевые затраты с учетом физико-технических ограничений и оптимальных потоков теплоносителя в ТС и определяет тариф на транспорт ТЭ на уровне средних суммарных затрат в тепловые сети.

Организационную структуру управления такого типа рынка, как правило, называют моделью «Единый закупщик». В России и в мире эта модель широко применяется в электроэнергетике.

В третьей главе представлена математическая модель ТСС в формате «Единый закупщик», предложен метод оптимального распределения тепловой нагрузки между теплоисточниками в условиях несовпадающих интересов. Основная особенность разработанной модели и метода заключается в том, что они наряду с традиционно решаемыми задачами для ИТ, позволяют учитывать тепловые сети с присущими им физико-техническими свойствами и технико-экономическими показателями, связанными с затратами на производство и транспортировку тепловой энергии. Данный методический подход формирует наилучшее решение по распределению тепловой нагрузки между ИТ и по зонам их действия, обеспечивающим заданный спрос на тепловую энергию, с учетом получения источниками максимальной прибыли при минимальных затратах в тепловую сеть, которые принимаются в качестве критерия в рассматриваемой постановке.

Математическая постановка задачи имеет следующий вид. Найти:

$$\sum_{\tau=\tau_0}^T P_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) = \sum_{\tau=\tau_0}^T w_{\tau}^{\text{ИТ}} \cdot Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - \sum_{\tau=\tau_0}^T Z_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) \rightarrow \max, j \in J_{\text{ИТ}}, \quad (1)$$

при условиях:

$$Q_{j_min}^{\text{ИТ}} \leq Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} \leq Q_{j_max}^{\text{ИТ}}, j \in J_{\text{ИТ}}, \quad (2)$$

$$w_{\tau}^{\text{ИТ}} = w_{\tau}^{\text{ген.ЖКХ}} \cdot \Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} w_{j\tau}^{\text{ген.П.тс}} \cdot \Theta_{j\tau}^{\text{П.тс}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}*}} w_{j\tau}^{\text{П.ит}} \cdot \Theta_{j\tau}^{\text{П.ит}}, \quad (3)$$

$$w_{\tau}^{\text{ген.ЖКХ}} = \begin{cases} w_{\tau}^{\text{ИТ}} - w_{\tau}^{\text{ИТ}} \cdot (1 - \Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}}), & \text{если } \Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}} > 1/\theta_{\tau} \\ w_{\tau}^{\text{ИТ}} + w_{\tau}^{\text{ИТ}} \cdot (1 - \Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}}), & \text{если } \Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}} < 1/\theta_{\tau}, \\ w_{\tau}^{\text{ИТ}}, & \text{если } \Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}} = 1/\theta_{\tau} \end{cases} \quad (4)$$

$$w_{j\tau}^{\text{ген.П.тс}} = \begin{cases} w_{\tau}^{\text{ИТ}} - w_{\tau}^{\text{ИТ}} \cdot (1 - \Theta_{j\tau}^{\text{П.тс}}), & \text{если } \Theta_{j\tau}^{\text{П.тс}} > 1/\theta_{\tau} \\ w_{\tau}^{\text{ИТ}} + w_{\tau}^{\text{ИТ}} \cdot (1 - \Theta_{j\tau}^{\text{П.тс}}), & \text{если } \Theta_{j\tau}^{\text{П.тс}} < 1/\theta_{\tau}, j \in J_{\text{П}}^{\text{П.тс}}, \\ w_{\tau}^{\text{ИТ}}, & \text{если } \Theta_{j\tau}^{\text{П.тс}} = 1/\theta_{\tau} \end{cases} \quad (5)$$

$$w_{j\tau}^{\text{П.ит}} = \begin{cases} w_{\tau}^{\text{ИТ}} - w_{\tau}^{\text{ИТ}} \cdot (1 - \Theta_{j\tau}^{\text{П.ит}}), & \text{если } \Theta_{j\tau}^{\text{П.ит}} > 1/\theta_{\tau} \\ w_{\tau}^{\text{ИТ}} + w_{\tau}^{\text{ИТ}} \cdot (1 - \Theta_{j\tau}^{\text{П.ит}}), & \text{если } \Theta_{j\tau}^{\text{П.ит}} < 1/\theta_{\tau}, j \in J_{\text{П}}^{\text{П.ит}}, \\ w_{\tau}^{\text{ИТ}}, & \text{если } \Theta_{j\tau}^{\text{П.ит}} = 1/\theta_{\tau} \end{cases} \quad (6)$$

$$w_{\tau}^{\text{ген.ЖКХ}} = w_{\tau}^{\text{ЖКХ}} - \frac{\varphi(Q_{\tau}^{\text{ИТ}})}{\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{П.ит}}} Q_{j\tau}^{\text{П.ит}}}, \quad (7)$$

$$w_{j\tau}^{\text{ген.П.тс}} = w_{j\tau}^{\text{П.тс}} - \frac{\varphi(Q_{\tau}^{\text{ИТ}})}{\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{П.ит}}} Q_{j\tau}^{\text{П.ит}}}, j \in J_{\text{П}}^{\text{П.тс}}, \quad (8)$$

$$Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} = \left[1 - (1-r) \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{от}}} \right)^{\frac{g-r}{1-g}} \right] \cdot Q_j^{\text{от}} + Q_j^{\text{гвс}}, j \in J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}}, \quad (9)$$

$$Q_{j\tau}^{\text{П.тс}} = \xi_j - \vartheta_j \cdot w_{j\tau}^{\text{П.тс}}, j \in J_{\Pi}^{\text{П.тс}}, \quad (10)$$

$$Q_{j\tau}^{\text{П.ит}} = \mu_j - \pi_j \cdot w_{j\tau}^{\text{П.ит}}, j \in J_{\Pi}^{\text{П.ит}}, \quad (11)$$

$$Q_{j\tau}^{\text{П.тс}} \leq Q_{j_max}^{\text{П.тс}}, j \in J_{\Pi}^{\text{П.тс}}, \quad (12)$$

$$Q_{j\tau}^{\text{П.ит}} \leq Q_{j_max}^{\text{П.ит}}, j \in J_{\Pi}^{\text{П.ит}}, \quad (13)$$

где $\Pi_{j\tau}^{\text{ИТ}} (Q_{j\tau}^{\text{ИТ}})$ – прибыль j -го ИТ, руб.; $Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}$ – объем производства тепловой энергии j -го ИТ, Гкал/ч; $w_{\tau}^{\text{ИТ}}$ – равновесная цена производства тепловой энергии источниками тепла, руб./Гкал; $Z_{j\tau}^{\text{ИТ}} (Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) = \alpha_j \cdot (Q_{j\tau}^{\text{ИТ}})^2 + \beta_j \cdot Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} + \gamma_j$ – затраты на производство тепловой энергии j -го ИТ, руб.; α_j , (руб./Гкал/ч)², β_j , (руб./Гкал/ч), γ_j , (руб.) – коэффициенты аппроксимации затратной характеристики ИТ; $Q_{j_min}^{\text{ИТ}}$ и $Q_{j_max}^{\text{ИТ}}$ – минимальный и максимальный уровень производительности ТЭ j -го ИТ соответственно, Гкал/ч; $w_{\tau}^{\text{ген.ЖКХ}}$ – цена производства тепловой энергии для потребителей ЖКХ, руб./Гкал; $w_{j\tau}^{\text{ген.П.тс}}$ – цена производства тепловой энергии для j -го промышленного потребителя, присоединенного к тепловым сетям; $w_{j\tau}^{\text{П.ит}}$ – цена производства тепловой энергии для j -го промышленного потребителя, расположенного на коллекторах ИТ руб./Гкал; $\Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}}, \Theta_{j\tau}^{\text{П.тс}}, \Theta_{j\tau}^{\text{П.ит}}$ – доли потребления ТЭ потребителями ЖКХ, промышленными потребителями, присоединенными к ТС и промышленными потребителями, расположенными на коллекторах ИТ соответственно; θ_{τ} – количество рассматриваемых категорий потребителей тепловой энергии; $Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}}$ – нагрузка j -го потребителя ЖКХ, Гкал/ч; r, g – коэффициенты неравномерности графика тепловой нагрузки; $\tau_{\text{от}}$ – продолжительность отопительного периода, ч/год; $Q_j^{\text{от}}, Q_j^{\text{гвс}}$ – расчетные нагрузки отопления и горячего водоснабжения j -го потребителя ЖКХ соответственно, Гкал/ч; $Q_{j\tau}^{\text{П.тс}}$ – спрос j -го промышленного потребителя, присоединенного к тепловым сетям, Гкал/ч; $Q_{j\tau}^{\text{П.ит}}$ – спрос j -го промышленного потребителя расположенного на коллекторах ИТ, Гкал/ч; ξ_j, ϑ_j – коэффициенты аппроксимации в функции спроса j -го промышленного потребителя присоединенного к тепловым сетям; μ_j, π_j – коэффициенты аппроксимации в функции спроса j -го промышленного потребителя, расположенного на коллекторах ИТ; $w_{j\tau}^{\text{П.тс}}$ – покупная цена j -го промышленного потребителя, присоединенного к тепловым сетям, включающая цену производства тепловой энергии и ее транспортировку, руб./Гкал; $w_{j\tau}^{\text{П.ит}}$ – покупная цена

j -го промышленного потребителя, расположенного на коллекторах ИТ, которая определяется только ценой производства тепловой энергии, руб./Гкал; $Q_{j_max}^{П.тс}$ – ограничения по объему потребления тепловой энергии j -го промышленного потребителя, присоединенного к тепловым сетям, Гкал/ч; $Q_{j_max}^{П.ит}$ – ограничения по объему потребления тепловой энергии j -го промышленного потребителя, расположенного на коллекторах ИТ, Гкал/ч; $J_{ИТ}, J_{П}^{ЖКХ}, J_{П}^{П.тс}, J_{П}^{П.ит}$ – множества узлов источников тепла, потребителей ЖКХ, промышленных потребителей, присоединенных к тепловым сетям и промышленных потребителей, расположенных на коллекторах ИТ соответственно; $\varphi(Q_{\tau}^{ИТ})$ – оптимальное решение задачи поиска минимальных затрат в тепловые сети:

$$Z_{\tau}^{TC}(x_{\tau}) = \sum_{i=1}^n Z_{it}^{TC}(x_{it}) = F_1 + F_2 \cdot \sum_{i=1}^n x_{it}^2 \cdot |x_{it}| \cdot s_i \rightarrow \min, \quad (14)$$

$$A_j x_{\tau} = Q_{jt}^{ИТ} - Q_{jt}^{П.тс} - Q_{jt}^{П.ит} - Q_{jt}^{ЖКХ}, j \in J_{ИТ} \cap J_{П}^{ЖКХ} \cap J_{П}^{П.тс} \cap J_{П}^{П.ит}, \quad (15)$$

$$A_j x_{\tau} = Q_{jt}^{ИТ}, j \in J_{ИТ} \setminus J_{П}^{ЖКХ} \cup J_{П}^{П.тс} \cup J_{П}^{П.ит}, \quad (16)$$

$$A_j x_{\tau} = -Q_{jt}^{П.тс}, j \in J_{П}^{П.тс} \setminus J_{ИТ} \cup J_{П}^{П.ит} \cup J_{П}^{ЖКХ}, \quad (17)$$

$$A_j x_{\tau} = -Q_{jt}^{П.ит}, j \in J_{П}^{П.ит} \setminus J_{ИТ} \cup J_{П}^{П.тс} \cup J_{П}^{ЖКХ}, \quad (18)$$

$$A_j x_{\tau} = -Q_{jt}^{ЖКХ}, j \in J_{П}^{ЖКХ} \setminus J_{ИТ} \cup J_{П}^{П.тс} \cup J_{П}^{П.ит}, \quad (19)$$

$$A_j x_{\tau} = 0, j \in J_0, \quad (20)$$

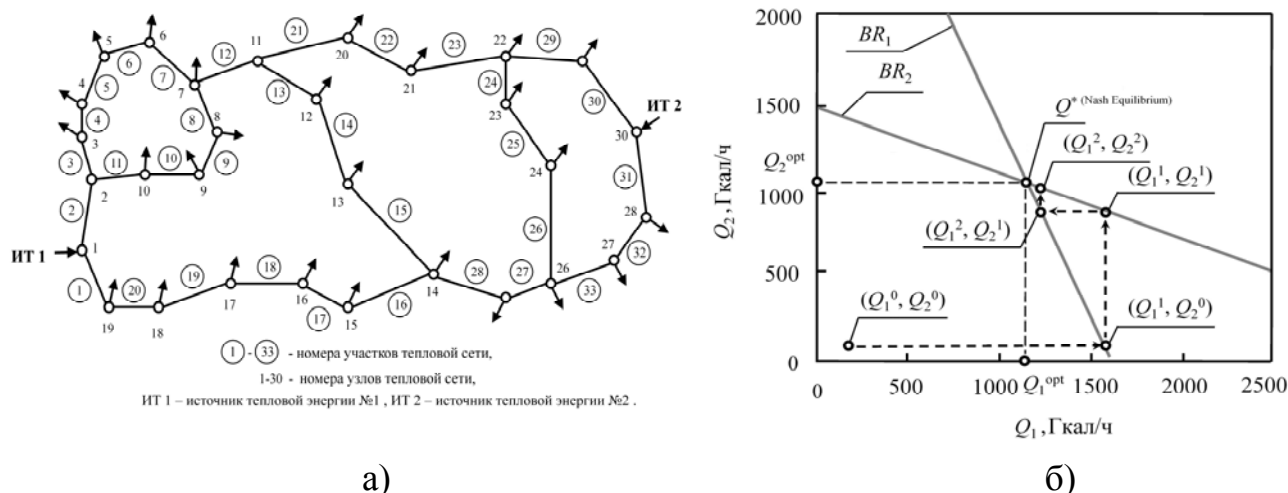
где $x_{\tau} = (x_{1\tau}, \dots, x_{n\tau})$, x_{it} – расход теплоносителя на i -м участке тепловой сети, т/ч; $F_1 = n_{\Gamma}^{-1} \cdot (a + f_c) \cdot \sum_{i=1}^n [a_i + b_i \cdot \chi_i^{0.19u_i} \cdot s_i^{-0.19u_i} \cdot l_i^{0.19u_i}] \cdot l_i$ – условно-постоянные затраты, руб.; f_c – доля условно-постоянных и эксплуатационных издержек по тепловой сети; a_i (руб./м), b_i (руб./м ^{u_i+1}), u_i (безразмерная величина) коэффициенты, которые получаются в результате аппроксимации реальных (табличных) значений стоимости трубопроводов различных диаметров; χ_i – коэффициент, зависящий от шероховатости трубопровода (безразмерная величина); s_i – коэффициент гидравлического сопротивления i -й ветви, мч²/т²; l_i – длина i -го участка сети, м; n_{Γ} – число часов работы насосной установки, ч/год; $F_2 = C_{\text{ЭЭ}}/367.2 \cdot \eta$ – коэффициент условно переменных затрат в ТС, руб.; $C_{\text{ЭЭ}}$ – цена электроэнергии, руб./кВт*ч; η – коэффициент полезного действия насосной установки; J_0 – множество простых узлов разветвления ТСС.

Описанная модель (1)-(13) включает в себя систему условий и ограничений (1)-(2), отражающих поведение всех ИТ, связи (3)-(6) между ценой производства ТЭ $w_{\tau}^{ИТ}$ и ценами потребителей, спросовые характеристики потребителей (9)-(11) и ограничения по объемам потребления тепловой энергии промышленными потребителями (12)-(13). Решение, полученное относительно соотношений (1)-(13), будет определять оптимальные уровни производства и потребления тепловой

энергии и соответствовать их равновесию (равенство спроса и предложения в ТСС), поскольку учитывает интересы всех участников теплоснабжения.

Решение задачи поиска оптимального распределения тепловой нагрузки между источниками тепловой энергии в условиях несовпадающих интересов с применением разработанной модели (1)-(13) осуществляется комбинированным методом. Он базируется на применении игрового, последовательного, итерационного процесса (процесс нащупывания по Курно), с использованием внутри цикла метода избыточных проектных схем с последующим применением метода простой итерации.

Идея разработанной методики поиска решения задачи (1)-(13) заключается в ее сведении к задаче одномерной оптимизации отдельно взятого источника тепла при фиксированных объемах производства других источников, с последующей проверкой полученных решений на условие их соответствия равновесию Курно-Нэша. Графическая иллюстрация работы методики приведена на рис. 3 для тестовой схемы теплоснабжающей системы с двумя независимыми ИТ, работающими на единые ТС (рис 3 а)).



а) б)
Рисунок 3 – Процедура поиска равновесия Курно-Нэша
в теплоснабжающей системе

Организация вычислительного процесса поиска равновесия спроса и предложения на тепловую энергию с распределением тепловой нагрузки между источниками показана на рис. 3 б).

Вычислительный процесс, реализующий предлагаемую методику, представлен в декартовой системе координат, где ось абсцисс и ось ординат отражают объемы производства тепловой энергии соответственно первым и вторым источником (рис. 3 б)). Линии BR_1 и BR_2 представляют кривые реакции первого и второго ИТ и отражают собой множество значений объемов производства ТЭ соответствующих максимальной прибыли, которую мог бы получить один из ИТ при заданном объеме производства тепла другим ИТ.

Поиск равновесия по Курно-Нэшу, согласно рис. 3 б), начинается с точки (Q_1^0, Q_2^0) , при этом каждый ИТ последовательно оптимизирует свой объем производства тепла исходя из возможности получения им максимальной прибыли при

заданном объеме производства ТЭ другим источником. Полученные в итерационном процессе (согласно направлениям стрелок на рис.3 б) объемы производства тепловой энергии ИТ являются равновесием по Курно-Нэшу, которое соответствует искомой точке Q^* . Достигнутое равновесие обеспечивается оптимальным решением по объемам производства источниками тепла тепловой энергии, поставляемой потребителям, при соблюдении физико-технических условий и ограничений, имеющих место в ТСС.

Четвертая глава посвящена задаче оптимального распределения тепловой нагрузки между источниками в задачах развития ТСС для нерегулируемой и регулируемой модели организации теплоснабжения в формате «Единая теплоснабжающая организация».

Для ТСС, организационной в виде модели нерегулируемой «ЕТО», разработана равновесная математическая модель на основе классической задачи оптимизации с критерием максимизации прибыли монополии. В отличие от математической модели «Единый закупщик», она, наряду с затратами по источникам тепла, учитывает затраты в тепловые сети в единой критериальной функции вида:

$$\Pi_{\tau}^{\text{ЕТО}} = w_{\tau} \cdot \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - Z_{\tau}^{\text{Total}}, \quad (21)$$

где w_{τ} – цена тепловой энергии «ЕТО», включающая в себя ее производство и транспортировку, руб./Гкал; $Z_{\tau}^{\text{Total}} = \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Z_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) + Z_{\tau}^{\text{ТС}}(x_{\tau})$ – суммарные за-

траты, связанные с производством и транспортировкой тепловой энергии в момент времени τ , руб.

Критериальная функция затрат на транспортировку тепловой энергии (14) рассчитывается исходя из решения задачи оптимального потокораспределения в ТС, которая представляет собой систему уравнений состоящих из первого (15) - (20) и второго (22) законов Кирхгофа, а также замыкающих соотношений (23):

$$\overline{A}^T P_{\tau} = h_{i\tau} - H_{i\tau}, \quad i \in I, \quad (22)$$

$$h_{i\tau} = s_i |x_{i\tau}| x_{i\tau}, \quad i \in I, \quad (23)$$

где $\overline{A}^T$ – транспонированная матрица соединений узлов и ветвей ТС; $P_{\tau} = (P_{1\tau}, \dots, P_{m\tau})$, $P_{j\tau}$ – давление в j -м узле, м. вод. ст.; $h_{i\tau}$ – потеря давления на i -м участке тепловой сети, м. вод. ст.; $H_{i\tau}$ – действующий напор на i -м участке тепловой сети, м. вод. ст.; s_i – коэффициент гидравлического сопротивления ветвей i -го участка тепловой сети, $\text{м}^2/\text{т}^2$; I – множество участков ТС.

При определении загрузки ИТ в качестве балансового соотношения, определяющего их оптимум, принято равновесие цен генерации тепла «ЕТО» и цен потребителей ТЭ:

$$W_{\tau}^{\text{ген.ЕТО}} = w_{\tau}^{\text{ген.ЖКХ}} \cdot \Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} w_{j\tau}^{\text{ген.П.тс}} \cdot \Theta_{j\tau}^{\text{П.тс}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}*}} w_{j\tau}^{\text{П.ит}} \cdot \Theta_{j\tau}^{\text{П.ит}}, \quad (24)$$

где $W_{\tau}^{\text{ген.ЕТО}} = \frac{w_{\tau} \cdot \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - Z_{\tau}^{\text{ТС}}(x_{\tau})}{\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}}$ – равновесная цена генерации тепловой энергии «ЕТО», руб./Гкал.

Оптимальное распределение тепловой нагрузки между источниками в условиях нерегулируемой модели «ЕТО» определяется исходя из условия получения ею суммарной максимальной прибыли за рассматриваемый период $[\tau_0, T]$:

$$\sum_{\tau=\tau_0}^T P_{\tau}^{\text{ЕТО}} = \sum_{\tau=\tau_0}^T \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} w_{\tau} \cdot Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - \sum_{\tau=\tau_0}^T Z_{\tau}^{\text{Total}} \rightarrow \max, \quad (25)$$

при ограничениях (2), (9)-(13), (15)-(20) и (22)-(23), (24), а также соотношениях связи цен производства тепла для потребителей и цены производства тепла «ЕТО», которые определяются аналогично их поиску для модели «Единый закупщик», где в место равновесной цены генерации тепловой энергии теплоисточниками $w_{\tau}^{\text{ИТ}}$ в выражениях (4)-(6) фигурирует равновесная цена генерации тепловой энергии «ЕТО» $W_{\tau}^{\text{ген.ЕТО}}$.

Поиск оптимального распределения тепловой нагрузки между теплоисточниками в условиях организационной модели «ЕТО» базируется на применении метода покоординатной релаксации (метод покоординатного подъема) с последующим использованием внутри цикла методов избыточных проектных схем и простой итерации. Суть разработанной методики заключается в сведении задачи многомерной оптимизации к одномерной, с пошаговой процедурой улучшения решений по объемам производства тепла всеми источниками.

Построение вычислительного процесса поиска оптимального распределения тепловой нагрузки между теплоисточниками (на примере ТСС, представленной на рис.3 а)) в условиях модели нерегулируемой «ЕТО» показано на рис. 5.

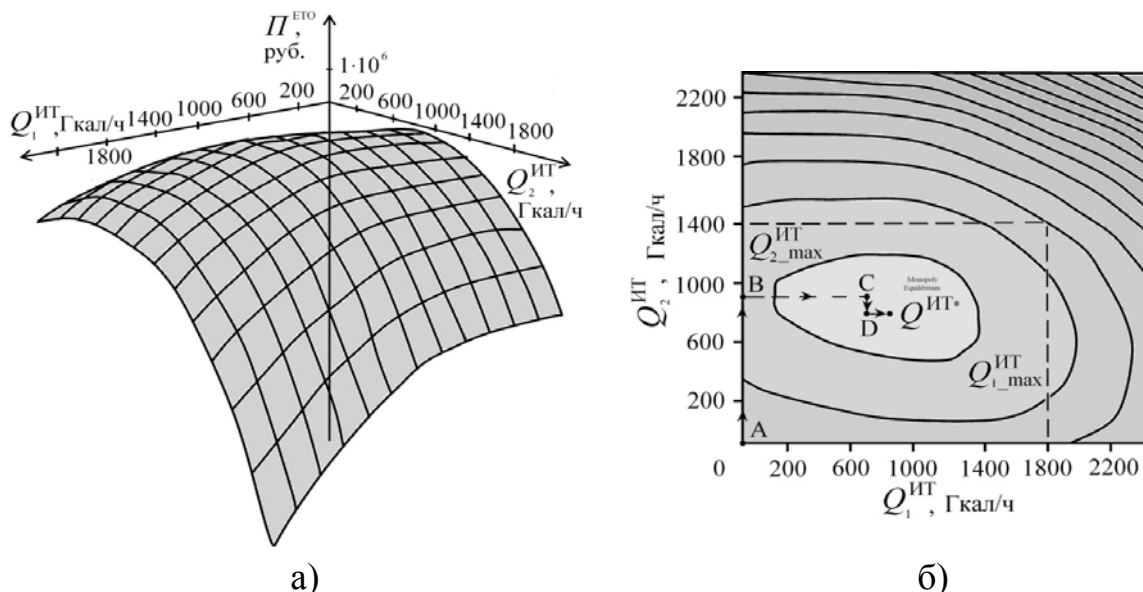


Рисунок 5 – Процесс поиска оптимального распределения тепловой нагрузки между источниками в условиях организационной модели «Единая теплоснабжающая организация»

На рис. 5 а) представлен графический вид функции цели «ЕТО» для случая ТСС с двумя источниками (рис. 3 а)), а рис. 5 б) отражает изолинии целевой функции, показывающие область ее изменения при различных комбинациях возможных объемов производства тепловой энергии ИТ. Вычислительный процесс начинается с нулевой координаты в сторону возрастания производительности одного из ИТ (точка А рис. 5 б)). Оптимальное решение по распределению тепловой нагрузки между источниками для рассмотренного примера, достигается уже на 5 шаге итерации и соответствует точке Q^* , а сама траектория вычислительного процесса представлена в виде ломаной линии А-В-С-D- Q^* .

В качестве методического подхода для поиска оптимального распределения тепловой нагрузки между теплоисточниками в условиях регулируемой «ЕТО» в работе предложена двухуровневая, иерархическая схема взаимодействия участников теплоснабжения. Основная идея построения двухуровневой модели «ЕТО» заключается в выделении подсистем, соответствующих конкретным субъектам отношений, для их дальнейшего моделирования в задачах развития и реконструкции ТСС с учетом реализации поставленных целевых установок (рис. 6).

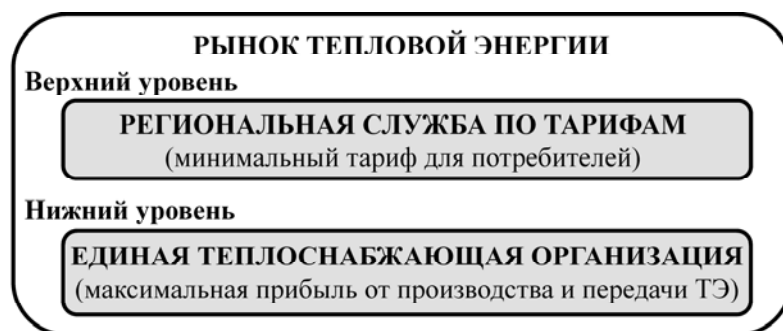


Рисунок 6 – Двухуровневая структура теплоснабжающей системы в условиях регулируемой «Единой теплоснабжающей организации»

Верхний уровень двухуровневой модели представлен Региональной службой по тарифам (РСТ), являющейся регулятором для ТСС, а нижний уровень представлен «ЕТО», отвечающей за деятельность по теплоснабжению потребителей. Взаимоотношения между уровнями строятся следующим образом. «ЕТО» на основе прогнозов спроса на ТЭ со стороны потребителей осуществляет снабжение тепловой энергией потребителей в заданном объеме. В свою очередь РСТ устанавливает такой уровень тарифов на ТЭ для потребителей ЖКХ, при котором, с одной стороны, потребители ЖКХ были бы готовы покупать необходимый объем тепла по установленному тарифу, а с другой стороны, компенсировались бы затраты «ЕТО». При решении задачи обеспечения мероприятий по теплоснабжению потребителей рассматривались следующие исходные условия по регулированию тарифа для потребителей ЖКХ: минимальный тариф, при котором «ЕТО» выходит на самоокупаемость; на уровне средних суммарных затрат; на уровне маржинальных затрат; метод «альтернативная котельная».

В условиях отсутствия регулирования удовлетворение заданного спроса на ТЭ со стороны потребителей Единой теплоснабжающей организацией определяется исходя из максимума получаемой ею прибыли согласно выражению:

$$\Pi_{\tau}^{\text{ЕТО}} = w_{\tau}^{\text{ЖКХ}} \cdot \sum_{j \in J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}}} Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} + \sum_{j \in J_{\Pi}^{\text{П.тс}}} w_{j\tau}^{\text{П.тс}} \cdot Q_{j\tau}^{\text{П.тс}} + \sum_{j \in J_{\Pi}^{\text{П.ит}}} w_{j\tau}^{\text{П.ит}} \cdot Q_{j\tau}^{\text{П.ит}} - Z_{\tau}^{\text{Total}} \rightarrow \max, \quad (26)$$

при следующих условиях и ограничениях (2), (9)-(13), (15)-(20) и (22)-(23).

Для формирования расчетной модели «ЕТО» необходимо формализовать задачу верхнего уровня, который представлен РСТ. Цель РСТ заключается в установлении минимального тарифа на тепловую энергию для потребителей ЖКХ, при которых, с одной стороны, «ЕТО» покрывало бы заданный спрос на ТЭ, а с другой стороны, получало бы максимальную прибыль от ее реализации.

Решение данной задачи должно одновременно удовлетворять ряду условий. Необходимо определить такие уровни загрузки ИТ, которые бы покрывали заданный спрос на ТЭ со стороны потребителей ЖКХ с минимальными для них тарифами, а промышленные потребители были бы готовы купить необходимое количество ТЭ в соответствии с их функцией спроса, при этом «ЕТО» получало бы максимальную прибыль.

Предложенная постановка задачи относится к классу задач «Регулируемой монополии». Она сводится к одноуровневой задаче оптимального распределения тепловой нагрузки между теплоисточниками в условиях модели «ЕТО», в которой параметр цены для потребителей ЖКХ является результатом решения задачи (26) относительно только промышленных потребителей и выполнения условия неотрицательности величины прибыли «ЕТО».

Для обоснованного учета требований потребителей, критерий оптимизации «ЕТО» преобразуется к виду относительно лишь цены и затрат производства тепловой энергии «ЕТО» для каждой группы потребителей. Таким образом, математическая модель поиска оптимального распределения тепловой нагрузки между источниками запишется в представленном ниже виде:

$$\Pi_{\tau}^{\text{ген.ЕТО}} = \sum_{j \in J_{\Pi}^{\text{П.тс}}} w_{j\tau}^{\text{ген.П.тс}} \cdot Q_{j\tau}^{\text{П.тс}} + \sum_{j \in J_{\Pi}^{\text{П.ит}}} w_{j\tau}^{\text{П.ит}} \cdot Q_{j\tau}^{\text{П.ит}} - \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Z_{j\tau}^{\text{ИТ}} (Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) \rightarrow \max, \quad (27)$$

$$w_{j\tau}^{\text{ген.П.тс}} = w_{j\tau}^{\text{П.тс}} - w_{\tau}^{\text{ТС}} = w_{j\tau}^{\text{П.тс}} - \frac{Z_{\tau}^{\text{ТС}}(x_{\tau})}{\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - \sum_{j \in J_{\Pi}^{\text{П.ит}}} Q_{j\tau}^{\text{П.ит}}}, j \in J_{\Pi}^{\text{П.тс}}, \quad (28)$$

$$\Pi_{\tau}^{\text{ген.ЕТО}} \geq 0, \quad (29)$$

при следующих условиях и ограничениях (2), (9)-(13), (15)-(20) и (22)-(23).

В условиях регулируемой «ЕТО» служба по тарифам может использовать методы установления тарифа на тепловую энергию для потребителей ЖКХ на основе средних суммарных затрат (30), предельных затрат (31), «альтернативной котельной» (32), руб./Гкал:

$$w_{\tau}^{\text{ЖКХ}} = \frac{\Theta_{\tau}^{\text{ЖКХ}} \cdot Z_{\tau}^{\text{Total}}}{\sum_{j \in J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}}} Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}}} = \frac{Z_{\tau}^{\text{Total}}}{\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}}, \quad (30)$$

$$w_{\tau}^{\text{ЖКХ}} = \frac{Z_{j\tau}^{\text{ИТ var}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) + Z_{\tau}^{\text{ТС var}}(x_{\tau})}{\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}}, \quad (31)$$

$$w_{\tau}^{\text{ЖКХ}} = S^{\text{ALT}}, \quad (32)$$

где $Z_{j\tau}^{\text{ИТ var}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) = 2\alpha_j \cdot Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} + \beta_j$ – маржинальные затраты на производство теп-

ла j -м источником, руб.; $Z_{\tau}^{\text{ТС var}}(x_{\tau}) = \frac{3 \cdot C^{\text{ЭЭ}} \cdot \sum_{i \in I} x_{i\tau}^2 \cdot s_i}{367.2 \cdot \eta}$ – маржинальные затраты на

транспортировку тепловой энергии по тепловым сетям, руб; S^{ALT} – тариф «альтернативной котельной».

В качестве целевой функции в условиях регулирования тарифа на тепловую энергию для потребителей ЖКХ относительно которой будет определяться оптимальное распределение тепловой нагрузки между источниками, выступает максимум прибыли «ЕТО» (26). Аналогично с вариантом «ЕТО» в условиях отсутствия регулирования вид целевой функции (26) преобразуется относительно объема генерации тепловой энергии и в зависимости от варианта регулирования.

Поиск оптимального распределения тепловой нагрузки между источниками для всех вышерассмотренных вариантов базируется также на применении метода покоординатного подъема с последующим использованием внутри цикла методов избыточных проектных схем и простой итерации.

В пятой главе представлены результаты исследования реальной ТСС г. Ангарска (рис. 7), состоящей из 1273 участков и 1242 узлов, в число которых входит три источника тепла: ТЭЦ-1, ТЭЦ-9, ТЭЦ-10.

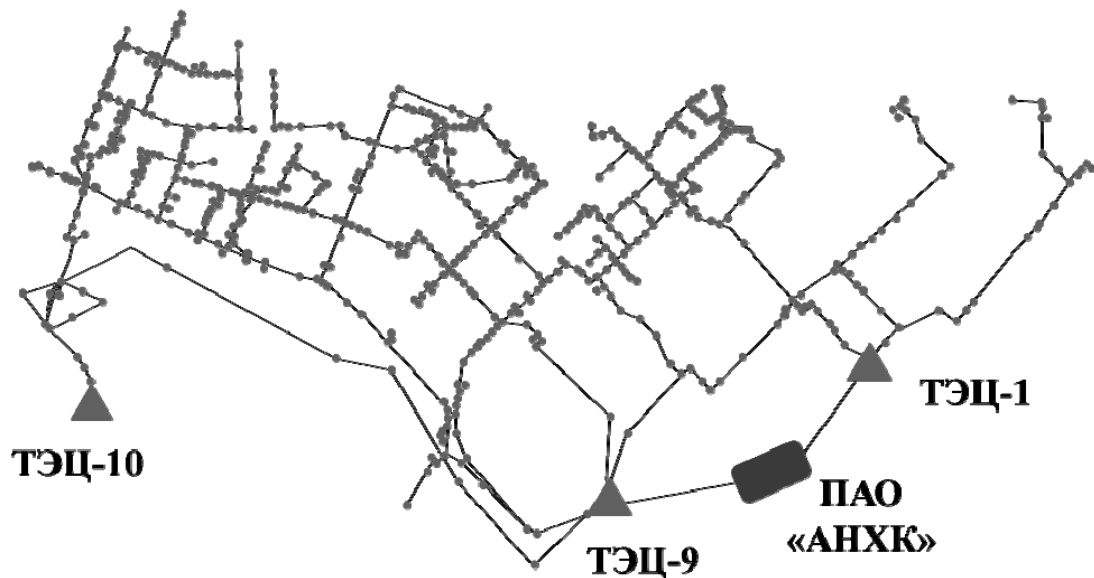


Рисунок 7 – Расчетная схема теплоснабжения г. Ангарска

Потребители на схеме представлены 534 обобщенными узлами, из которых 533 соответствуют потребителям жилищно-коммунального и общественного секторов с фиксированными тепловыми нагрузками, и одним узлом ПАО «Ангарская

нефтехимическая компания», расположенным на коллекторах ТЭЦ-1 и ТЭЦ-9, с функцией спроса на тепловую энергию, связанную со стоимостью генерации тепловой энергии. Исследования проводились для следующих организационных форматов ТСС: вариант 1 – модель «Единый закупщик»; вариант 2 – модель «ЕТО» с отсутствием регулирования; вариант 3 – модель «ЕТО», регулирование на уровне минимально допустимого тарифа на тепловую энергию; вариант 4 – модель «ЕТО», регулирование тарифа для потребителей ЖКХ на уровне средних суммарных затрат; вариант 5 – модель «ЕТО», регулирование тарифа для потребителей ЖКХ на уровне маржинальных затрат; вариант 6 – модель «ЕТО», регулирование тарифа для потребителей ЖКХ на основе метода «альтернативная котельная».

Для сравнения полученных результатов проведен дополнительный расчет оптимального распределения тепловой нагрузки между источниками по критерию минимума суммарных приведенных затрат «ЕТО» (вариант 7).

Основные задачи проводимых исследований по повышению эффективности теплоснабжения потребителей включают оптимальное распределение нагрузок между источниками тепла, определения зон их действия, радиусов теплоснабжения, потокораспределения в тепловых сетях, выбор рациональной модели управления такой системой. Расчеты проводились в соответствии с разработанными методами и алгоритмами в вычислительной среде GAMS для временного интервала один год на перспективные нагрузки.

Основные результаты расчета по описанным выше вариантам представлены в табл.1.

Таблица 1. Технико-экономические показатели теплоснабжающей системы г. Ангарска по различным вариантам организации теплоснабжения потребителей

№	Показатели	вариант 1	вариант 2	вариант 3	вариант 4	вариант 5	вариант 6	вариант 7
1	Объем производства тепловой энергии, млн. Гкал, в том числе:	8.50	7.39	9.40	7.68	9.08	9.42	9.52
1.1	ТЭЦ-1, млн. Гкал	2.43	1.10	1.66	1.54	1.57	1.68	1.71
1.2	ТЭЦ-9, млн. Гкал	3.74	4.24	5.41	4.21	5.21	5.46	5.52
1.3	ТЭЦ-10, млн. Гкал	2.33	2.05	2.33	1.93	2.30	2.27	2.29
2	Затраты на производство тепловой энергии ТЭЦ-1, млрд. руб., в том числе:	1.15	0.66	0.86	0.80	0.82	0.87	0.88
2.1	Переменные (топливные)	0.84	0.35	0.55	0.47	0.51	0.56	0.57
2.2	Условно-постоянные	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
3	Затраты на производство тепловой энергии ТЭЦ-9, млрд. руб.	1.81	1.99	2.41	2.02	2.33	2.43	2.45
3.1	Переменные (топливные)	1.06	1.24	1.66	1.27	1.58	1.68	1.70
3.2	Условно-постоянные	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
4	Затраты на производство тепловой энергии ТЭЦ-10, млрд. руб.	0.82	0.71	0.82	0.69	0.80	0.79	0.79
4.1	Переменные (топливные)	0.62	0.51	0.62	0.49	0.40	0.39	0.39
4.2	Условно-постоянные	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
5	Сетевые затраты, млрд. руб.	1.67	1.27	0.91	0.73	0.88	0.63	0.62
6	Суммарные затраты, млрд. руб.	5.45	4.63	5.00	4.24	4.83	4.71	4.75
7	Себестоимость производства ТЭ	473.2	590.9	517.8	519.4	522.3	515.3	513.2

	ТЭЦ-1, руб./Гкал							
8	Себестоимость производства ТЭ ТЭЦ-9, руб./Гкал	483.9	469.3	444.8	479.8	447.2	443.9	443.3
9	Себестоимость производства ТЭ ТЭЦ-10, руб./Гкал	351.9	346.3	351.9	357.5	347.8	348.3	348.6
10	Средняя себестоимость производства ТЭ, руб./Гкал	444.7	454.6	435.1	457.0	435.0	433.6	433.2
11	Объем потребления тепловой энергии потребителями ЖКХ, млн. Гкал.	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46
12	Объем потребления тепловой энергии промышленными потребителями, млн. Гкал.	2.04	0.93	2.92	1.22	2.62	2.96	3.06
13	Цена для промышленного потребите- ля, руб./Гкал	859.3	965.1	789.1	947.3	835.1	789.4	690.0
14	Цена для потребителей ЖКХ, руб./Гкал	695.2	733.2	410.3	512.9	260.2	876.6	375.4
15	Прибыль ТЭЦ -1, млрд. руб., (%)	0.15 (12.2)	1.00 (17.7)	0.00 (0)	0.21 (4.7)	-0,96 (-19.8)	3.29 (38)	-0.21 (-4.6)
16	Прибыль ТЭЦ -9, млрд. руб., (%)	0.19 (9.5)						
17	Прибыль ТЭЦ -10, млрд. руб., (%)	0.43 (34.4)						

Проведенные расчеты показали, что по вариантам 2-6 распределение нагрузок и зоны действия источников изменяются несущественно по сравнению с этими показателями для варианта 7 (минимум приведенных затрат). Их графическое представление для вариантов 2-7 показано на рис. 8

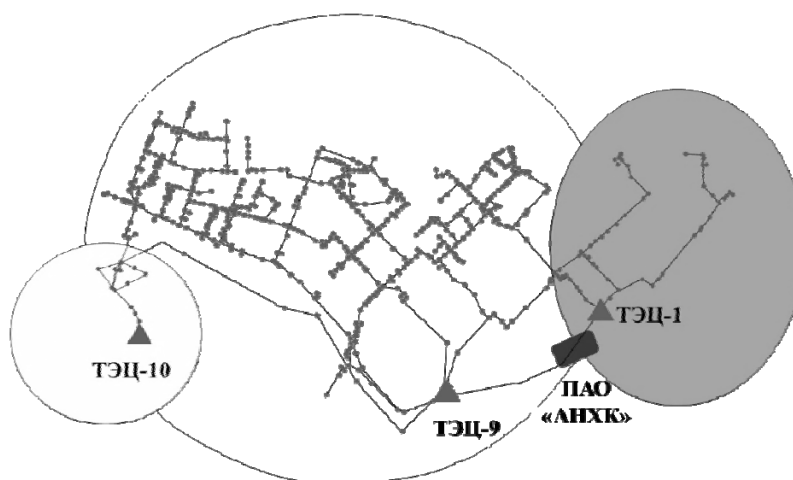


Рисунок 8 – Зоны действия источников тепла по вариантам 2-6

Основными показателями, которые влияют на распределение нагрузки между источниками, является тип организационной модели «ЕТО» (регулируемая или нерегулируемая).

В условиях модели «Единый закупщик» (вариант 1), зоны действия всех источников существенно изменяются по сравнению с их зонами действия в модели «ЕТО» (рис. 9), при этом нагрузка между источниками распределяется практически равномерно.

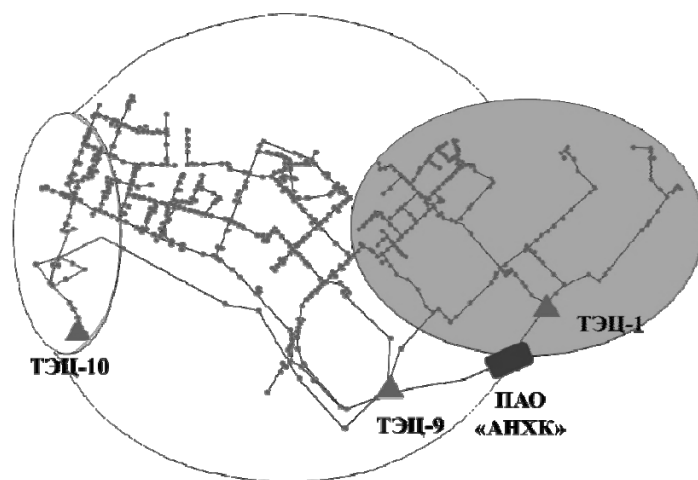


Рисунок 9 – Зоны действия источников тепла по варианту 1

Полученные распределения нагрузки между источниками по рассмотренным вариантам позволяют сделать следующие выводы.

С позиции интересов производителей тепловой энергии (получение максимальной прибыли) наиболее предпочтительными являются варианты 1, 2, 4 и 6, в которых энергоснабжающие организации получают положительную прибыль. В модели «ЕТО» с регулированием тарифа по методу «альтернативная котельная» (вариант 6), его величина почти на 20% превышает цену на тепловую энергию, получаемую при организации теплоснабжения по принципу свободного ценообразования (вариант 2) и в 2,3 раза цену, формируемую по приведенным затратам.

Предпочтения потребителей по предложенным вариантам организации теплоснабжения противоположны интересам производителей. Так для потребителей ЖКХ лучшим является вариант 5, в котором получены самые низкие для них цены – 260.2 руб./Гкал. Для промышленного потребителя ПАО «АНХК» выгодным является вариант 7. Самым дорогим (не выгодным) вариантом теплоснабжения для потребителей ЖКХ является вариант 6 (метод «альтернативная котельная»)

Для обоснованного выбора наиболее рациональной организации теплоснабжения построим матрицу сравнения вариантов. С этой целью проранжируем (в порядке убывания по привлекательности) варианты по организации теплоснабжения г. Ангарска для производителей и потребителей относительно критериев, отражающих их интересы (прибыль и тарифы).

Матрица сравнения вариантов

Критерии	Варианты						
Прибыль поставщиков	6	2	1	4	3	7	5
Цена для потребителей ЖКХ	5	7	3	4	1	2	6
Цена для потребителей ОАО «АНХК»	7	3	6	5	1	4	2

Матрица сравнений наглядно дает представление о предпочтениях производителей и потребителей тепловой энергии и позволяет выявить наилучшие состояния, при которых интересы потребителей и производителей максимально сбалансированы. В соответствии с матрицей сравнения, наиболее предпочтительны-

ми являются два типа организации теплоснабжения – модель «Единый закупщик» (вариант 1) и модель «Единая теплоснабжающая организация» (вариант 4) с регулированием тарифа на тепловую энергию для потребителей ЖКХ на уровне средних суммарных затрат. Это объясняется тем, что при таких условиях предпочтения производителей и потребителей максимально совпадают. В варианте 4 суммарные затраты в ТСС г. Ангарска наиболее близки к оптимальным (вариант 7) и не превышают их более чем на 9%, при этом «ЕТО» в этих условиях получает положительную прибыль на уровне 4.7% от суммарной выручки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ существующей научно-методической литературы в области теплоснабжения показал, что наряду с традиционными технико-экономическими проблемами построения развивающихся ТСС появился новый специфический организационный аспект их функционирования, основанный на саморегулируемых взаимоотношениях участников теплоснабжения в рамках одной системы. Это приводит к необходимости корректировки существующих подходов к построению ТСС и возникновению принципиально новых задач управления их развитием и функционированием в условиях несовпадающих интересов.

2. Новые вызовы времени, тенденции развития теплоснабжения в России и за рубежом, с одной стороны, повлияли на технические и технологические изменения, а с другой стороны, на формирование новых организационных форм в управлении в виде модели «Единая теплоснабжающая организация» и модели «Единый закупщик». В связи с этим в работе предложены методические подходы согласования задач развития теплоснабжающих систем с современными формами их управления, сформулированы новые постановки задач развития ТСС, определены требования к математическим моделям и методам для их решения.

3. Разработана оригинальная математическая модель, обеспечивающая получение решения по рациональному распределению тепловой нагрузки между источниками тепла, удовлетворяющего теории равновесия Нэша для теплоснабжающей системы, работающей в условиях организационной модели «Единый закупщик». Для поиска решения предложен алгоритм, основанный на игровой, пошаговой, итерационной процедуре оптимизации уровней загрузки источников тепловой энергии (процедура нащупывания по Курно). Отличительной особенностью предложенного методического подхода является учет в едином вычислительном цикле не только источников тепла, но и сетевой составляющей ТСС с присущими ей физико-техническими свойствами тепловой сети. Это позволяет в интегрированном виде рассматривать и исследовать ТСС в комплексе, учитывая взаимовлияние всех ее элементов на результаты решения.

4. Разработаны математические модели и методы решения задачи распределения тепловой нагрузки между источниками тепла для организационной модели «Единая теплоснабжающая организация» с возможностью регулирования и отсутствия регулирования. Они позволяют в условиях совместного, сбалансированного взаимодействия источников тепла, работающих в рамках «ЕТО», определять оптимальные уровни их загрузки, наилучшее перераспределение тепловой энергии

по тепловым сетям, обеспечивать заданный спрос со стороны потребителей. Для каждой модели предложен соответствующий алгоритм решения задачи поиска равновесия спроса и предложения на тепловую энергию, в основе которых лежит метод покоординатной релаксации с применением внутри цикла метода избыточных проектных схем и простой итерации.

5. Проведенные практические исследования реальных теплоснабжающих систем с использованием математических моделей и методов, предложенных в работе, позволяют выбрать наиболее оптимальный вариант по реконструкции развитию ТСС, формат организации их управления с учетом конкретных особенностей и условий обслуживаемых ими территорий. Это свидетельствует об универсальности предложенного методического обеспечения для принятия решений муниципальными органами власти по управлению функционированием и развитием ТСС.

6. С помощью разработанного методического обеспечения сформулированы рекомендации по реконструкции и развитию теплоснабжающей системы г. Ангарска, включая оптимальные мощности источников тепла, зоны их действия, потокораспределение в тепловой сети, организационную модель в виде «Единая теплоснабжающей организации» с регулированием по уровню средних суммарных затрат. Показано, что тариф на тепловую энергию, рассчитанный по методу «альтернативная котельная», представляет собой наиболее дорогую стоимость тепловой энергии для потребителей. По своему уровню он превышает даже свободно формируемую цену на тепловую энергию и значительно увеличивает финансовую нагрузку на потребителей (до 30%).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в журналах, входящих в список ВАК

1. **Пеньковский, А.В.** Возможные механизмы управления теплоснабжением потребителей в условиях рынка / В.А. Стенников, О.В. Хамисов, А.В. Пеньковский // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – № 3. – С. 27-36.

2. **Пеньковский, А.В.** Двухуровневое моделирование рынка тепловой энергии / В.А. Стенников, О.В. Хамисов, А.В. Пеньковский // Промышленная энергетика. – 2011. – № 3. – С. 8-13.

3. **Пеньковский, А.В.** Оптимизация теплового рынка на основе двухуровневого подхода / В.А. Стенников, О.В. Хамисов, А.В. Пеньковский // Теплоэнергетика. – 2011. – № 5. – С. 67-71.

4. **Пеньковский, А.В.** Оптимальное распределение нагрузки между источниками тепла на основе модели Курно / А.В. Пеньковский, В.А. Стенников, О.В. Хамисов // Теплоэнергетика. – 2015. – № 8. – С. 62-71.

5. **Пеньковский, А.В.** Поиск равновесия Курно на рынке тепловой энергии в условиях конкурентного поведения источников тепла / В.А. Стенников, А.В. Пеньковский, О.В. Хамисов // Проблемы управления. – 2017. – № 1. – С. 10-18.

Статьи в изданиях, входящих в базы данных Scopus

6. **Penkovsky, A.V.** Optimizing the Heat Market on the Basis of a Two-Level Approach / V.A. Stennikov, O.V. Khamisov, A.V. Penkovsky // Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 58. – No.12. – PP. 1043-1048.

7. **Penkovskii, A.V.** Optimum Load Distribution between Heat Sources Based on the Cournot Model / A.V. Penkovskii, V.A. Stennikov, O.V. Khamisov // Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 62. – No. 8. – PP. 598–606.

8. **Penkovskii, A.** Problems of Modeling and Optimization of Heat Supply Systems: Bi-Level Optimization of the Competitive Heat Energy Market / V. Stennikov, A. Penkovskii, O. Khamisov // Sustaining power resources through energy optimization and engineering / edited by P. Vasant and Nikolai Voropai. – Hershey PA, USA: Engineering Science Reference, 2016. – PP. 54-75.

Главы в монографиях

9. **Пеньковский, А.В.** Двухуровневое управление организацией теплоснабжения потребителей в рыночных условиях / В.А. Стенников, О.В. Хамисов, А.В. Пеньковский // Трубопроводные системы энергетики. Развитие теории и методов математического моделирования и оптимизации / Аверьянов В.К., Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г. и др. – Новосибирск: Наука, 2008. – С. 119-127.

10. **Пеньковский, А.В.** Анализ рынка тепловой энергии на базе игровых подходов / В.А. Стенников, А.В. Пеньковский // Трубопроводные системы энергетики. Математического моделирования и оптимизации/ Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Тевяшев А.Д. и др. – Новосибирск Наука, 2010. – С. 281-295.

11. **Пеньковский, А.В.** Методы и механизмы управления либерализованными системами теплоснабжения / В.А. Стенников, А.В. Пеньковский // Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ/ от. Ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – С. 407-412.

12. **Пеньковский, А.В.** Математическое моделирование рынка тепловой энергии на основе метода двухуровневого программирования / А.В. Пеньковский, В.А. Стенников // Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы математического моделирования/ Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Тевяшев А.Д. и др. – Новосибирск: Наука, 2015. – С. 306-317.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Заказ № 126, тираж 100 экз.