

На правах рукописи



**Гойтина Екатерина Владимировна**

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
РЕЖИМАМИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ  
МАКРОМОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.06 –  
«Автоматизация и управление технологическими процессами  
и производствами (промышленность)»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2008

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Казаринов Лев Сергеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Глухов Владимир Николаевич,  
доктор технических наук,  
профессор Голяк Сергей Алексеевич.

Ведущая организация - Челябинский филиал Федерального государственного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования Петербургский энергетический институт повышения квалификации (Челябинский филиал ФГОУ ДПО ПЭИПК), г. Челябинск.

Защита состоится 28 мая 2008 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект имени В. И. Ленина, 76, зал заседаний ученого совета №1 (ауд. 1001).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-93-69.

Автореферат разослан 18 апреля 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.298.03  
д.т.н., профессор



А.Г. Щипицын

**Актуальность темы исследования**

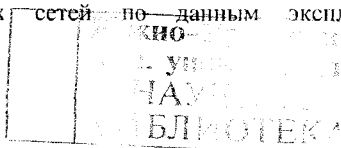
В настоящее время и на перспективу базовым подходом к теплоснабжению на крупных промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве Российской Федерации является централизованное теплоснабжение, позволяющее снизить затраты на производство тепла за счет совместной выработки электрической и тепловой энергии. Важную роль в эффективном функционировании централизованных систем теплоснабжения играет согласованная работа источников и потребителей при регулировании подачи тепла. В этой связи актуальным является решение задач оперативного управления, позволяющего осуществлять контроль и управление процессом теплоснабжения в различных режимах, а также своевременно выявлять потери и нерациональное использование тепла, проводить оценку эффективности теплоснабжения.

Управление режимами теплоснабжения потребителей промышленных предприятий осуществляется, как правило, с помощью автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ), которые выполняют функции сбора, накопления и представления на ЭВМ информации о параметрах теплоносителя на источниках, в магистральных трубопроводах и у крупных потребителей. Для повышения эффективности оперативного управления сложными системами теплоснабжения целесообразным является проведение оперативного анализа текущих режимов функционирования тепловых сетей на основе математического моделирования процесса теплоснабжения.

Современные системы теплоснабжения крупных промышленных предприятий являются сложными системами и содержат большое количество разнородных потребителей, распределенных на большой территории. Известные подходы к анализу режимов подобных сложных систем основаны на разработке математической модели реальной системы с помощью специализированного программного обеспечения. Сложность построения такой модели на практике для крупных сетей состоит в необходимости получения большого объема данных, включающих детальные характеристики трубопроводов тепловых сетей (длины, диаметры, коэффициенты шероховатости и т.д.) и потребителей, что требует значительных затрат времени и средств, а в ряде случаев практически не реализуемо.

Для оперативного анализа модель должна учитывать текущие фактические параметры теплоносителя в различных точках системы теплоснабжения и позволять оперативно рассчитывать режимы в случае оперативных переключений, что накладывает дополнительные требования к сходимости используемых математических методов, объему данных и скорости вычислений, и может быть достигнуто за счет сокращения объема информации, используемой при расчетах, а также повышения эффективности вычислительных алгоритмов.

С учетом сказанного актуальной является задача разработки методов оперативного анализа режимов теплоснабжения, основанных на построении упрощенных макромоделей тепловых сетей по данным эксплуатации,



позволяющих производить расчеты с достаточной для практического использования точностью в режиме реального времени.

Вопросы построения АСДУ для теплофикационных систем разрабатывались в работах Плетнева Г.П., Голяка С.А., Панферова В.И., Громова Н.К., Туркина В.П., Шнайдера Д.А. и других авторов. Проблемы математического моделирования, расчета и оптимизации тепловых сетей промышленных предприятий освещены в трудах Ахметзянова А.В., Баясанова Д.Б., Бутковского А.Г., Вапника В.Н., Евдокимова А.Г., Зингера Н.М., Казаринова Л.С., Меренкова А.П., Рапопорта Э.Я., Сенновой Е.В., Сидлера В.Г., Тевяшева А.Д., Хасилева В.Я. и других. Необходимо обратить внимание на аналогичные работы для электрических сетей. Здесь следует выделить работы А.З.Гамма, Ильина В.Н., которые с методической точки зрения представляют несомненный интерес для гидравлических сетей. Вопросы идентификации тепловых процессов и систем освещены также в трудах Алифанова О.М., Вабищевича П.Н., Михайлова В.В. и др., однако в этих работах не рассматривались специфичные задачи, возникающие в условиях ограниченности объема информации, которую можно получить о реальных характеристиках сети: построение упрощенных гидравлических макромоделей, не требующих чрезмерной детализации характеристик сети и одновременно позволяющих рассчитывать достоверные параметры режимов теплоснабжения, учет реальной оперативной информации. Подобные задачи в литературе не достаточно освещены, что и определяет актуальность данной работы.

**Объектом исследования** являются системы централизованного теплоснабжения промышленных предприятий.

**Предметом исследования** автоматизированные системы управления теплоснабжением, осуществляющие оперативное управление режимами тепловых сетей в условиях ограниченности объема информации о реальных характеристиках сети.

### **Цели и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является разработка методов оперативного анализа режимов в задачах управления системами теплоснабжения на основе использования макроmodellирования.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи исследовательского, методического и прикладного характера:

1) разработка обобщенной математической макромоделли тепловой сети, не требующей чрезмерной детализации характеристик сети и тепловых нагрузок потребителей;

2) разработка метода идентификации обобщенной математической макромоделли тепловых сетей путем использования экспериментальных и расчетных данных;

3) создание алгоритмического и программного обеспечения оперативного анализа режимов тепловых сетей на основе макроmodellирования для автоматизированных систем управления теплоснабжением;

4) внедрение разработанного методического и программного обеспечения в АСДУ теплоснабжения ОАО «ММК».

### **Связь диссертации с федеральными и региональными программами**

Диссертационное исследование выполнялось в рамках программы «Энерго- и ресурсосберегающие технологии» национального проекта «Образование» на 2007 – 2008 годы, в соответствии с общей политикой энергосбережения, проводимой в Российской Федерации согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2001 г. № 796 «О федеральной целевой программе «Энергоэффективная экономика» на 2002 - 2005 годы и на перспективу до 2010 года», «Основным направлениям энергосбережения в Челябинской области до 2010 года» (утверждены постановлением Губернатора Челябинской области №112 от 26.03.2003 г.).

### **Методология и методика исследования**

Теоретической и методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых по автоматизации технологических процессов, включая процессы централизованного теплоснабжения, методологии создания автоматизированных систем управления. В работе использовались методы теории автоматизированного управления, автоматического регулирования, теории гидравлических систем и систем теплоснабжения.

Источником экспериментальных данных явились результаты натурных обследований тепловой сети ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»), г. Магнитогорск, совместно с сотрудниками ЦЭСТ ОАО «ММК» в результате выполнения хозяйственной работы между ОАО «ММК» и Управлением научных исследований Южно-Уральского государственного университета (УНИ ЮУрГУ).

### **Научная новизна работы**

В ходе исследования были получены следующие научные результаты:

- 1) предложена новая математическая макромодель тепловой сети, исходя из реальных возможностей получения информации о параметрах режимов, позволяющая оперативно рассчитывать процессы в тепловой сети в агрегированном виде;
- 2) разработана методика идентификации математических макромоделей тепловых сетей, основанная на использовании экспериментальных и расчетных данных;
- 3) на основе макро моделирования разработано алгоритмическое обеспечение подсистемы АСДУ теплоснабжения, позволяющее проводить оперативный анализ и моделирование режимов функционирования тепловых сетей.

### **Практическое значение**

Выполненные в рамках диссертационной работы методические и программные разработки были использованы при организации управления режимами теплоснабжения промышленной площадки ОАО «ММК». Разработанное программное обеспечение анализа режимов тепловых сетей на основе макро моделирования было использовано в процессе принятия управленческих решений по регулированию режимов теплоснабжения сетевых

районов и крупных потребителей промплощадки ОАО «ММК» в рамках хоздоговорной работы №151197 от 16 февраля 2007 г. между УНИ ЮУрГУ и ОАО «ММК».

Отработка указанного программного комплекса проводилась на фактических данных эксплуатации системы теплоснабжения промплощадки ОАО «ММК». Сопоставление полученных результатов моделирования и реальных данных эксплуатации тепловых сетей ОАО «ММК» показало достаточную для практического использования точность моделирования. Применение программного обеспечения автоматизированного ввода, отображения и анализа данных с узлов учета тепла позволило выявить потребителей с температурным напором ниже нормативного значения, а также потребителей, у которых фактическая утечка теплоносителя превышает нормативную.

Внедрение результатов диссертационной работы подтверждено соответствующим актом.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы доложены на II международной научно-технической конференции «Энергосбережение на промышленных предприятиях», г. Магнитогорск, 2000 г; VI международной научно-практической конференции «Моделирование. Теория, методы и средства», г. Новочеркасск, 7 апреля 2006 г.; VI международной научно-практической конференции «Современные энергетические системы и комплексы и управление ими», г. Новочеркасск, 21 апреля 2006 г.; XXVI Российской школе по проблемам науки и технологий, г. Миасс, 27 – 29 июня 2006 г; II Международной научно-технической конференции «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации», г. Магнитогорск, 5 – 6 июня 2007 г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано II печатных работ.

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, библиографического списка используемой литературы, включающего 112 наименований, а также 2 приложений. Диссертация изложена на 125 страницах и включает 38 рисунков, 9 таблиц.

### **На защиту выносятся:**

- 1) математическая макромодель водяной системы теплоснабжения, разработанная исходя из реальных возможностей получения информации о параметрах режимов;
- 2) методика идентификации макромодели тепловой сети на основе данных эксплуатации;
- 3) алгоритмическое обеспечение программы оперативного анализа режимов тепловых сетей в рамках АСДУ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Автоматизированная система управления теплоснабжением с использованием макро моделирования

В настоящее время управление режимами теплоснабжения потребителей крупных промышленных предприятий, и в частности ОАО «ММК», осуществляется с помощью автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ). Существующие АСДУ, как правило, выполняют функции сбора, накопления и представления на ЭВМ диспетчера информации о параметрах теплоносителя на источниках, в магистральных трубопроводах и у крупных потребителей.

Для осуществления контроля за эффективностью работы системы теплоснабжения промышленного предприятия целесообразным является создание подсистемы автоматизированного САР-анализа режимов теплоснабжения (САР-Т). Обобщенная структурная схема САР-Т приведена на рис. 1.

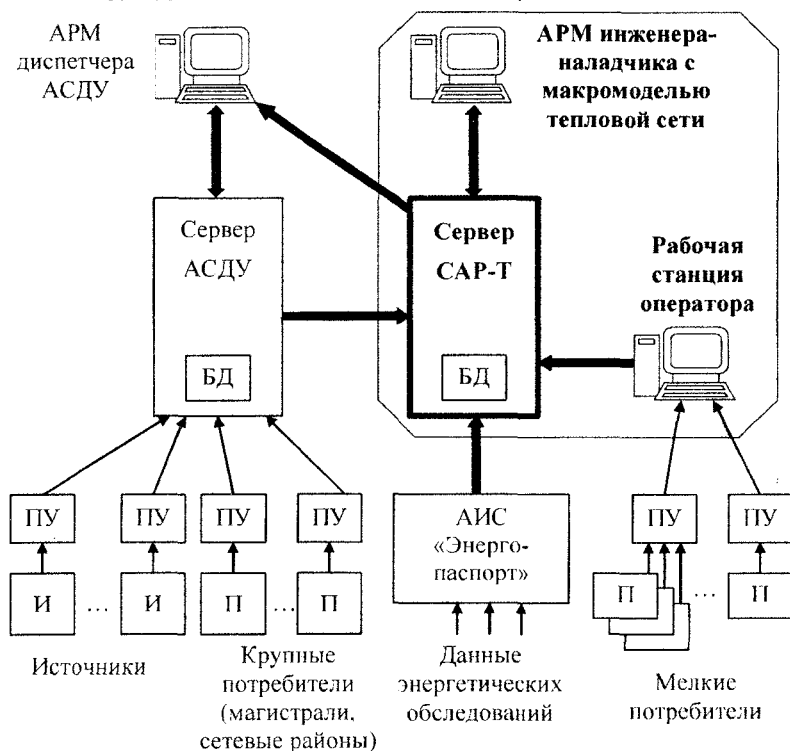


Рис. 1. Структура автоматизированной системы анализа режимов теплоснабжения

Система теплоснабжения крупного промышленного предприятия, как правило, состоит из нескольких источников теплоснабжения (ТЭЦ, котельные), потребителей и соединяющих их трубопроводов тепловых сетей. Как видно из рис.1, на нижнем (полевом) уровне САР-Т находятся приборы учета (ПУ) тепла на источниках и у потребителей системы теплоснабжения, включающие в общем случае датчики расхода, температуры и давления теплоносителя. Данные о параметрах источников и крупных потребителей с приборов учета нижнего уровня поступают на сервер базы данных существующей АСДУ. Далее необходимые данные из базы данных АСДУ поступают на сервер базы данных САР-Т.

Данные с теплосчетчиков мелких потребителей, не подключенных к АСДУ, поступают на рабочую станцию оператора, в функции которого входит автоматизированный ввод в базу данных САР-Т суточных архивов теплопотребления, считываемых с теплосчетчиков один раз за отчетный период (обычно месяц).

Кроме того, в базу данных сервера САР-Т поступают данные из автоматизированной информационной системы (АИС) «Энергопаспорт», представляющей собой систему ведения энергопаспортов промышленных потребителей, содержащих технико-эксплуатационные показатели и проектные нагрузки.

Далее все необходимые данные из базы данных САР-Т поступают на автоматизированное рабочее место (АРМ) инженера-наладчика и диспетчера АСДУ. На АРМ инженера-наладчика функционирует специализированное программное обеспечение для оперативного моделирования и анализа режимов функционирования тепловых сетей. Программное обеспечение включает в себя математическую макромодель тепловых сетей, позволяющую проводить анализ режимов при различных вариантах структурных переключений в тепловых сетях в период подготовки проведения плановых ремонтных работ и ликвидации аварийных ситуаций. На основе предварительного моделирования режимов теплоснабжения с учетом фактических параметров теплоносителя и структуры тепловых сетей анализируются различные режимы теплоснабжения с точки зрения безопасности и эффективности, после чего инженер-наладчик принимает решение о реальном использовании того или иного режима. Для настройки параметров модели по запросу инженера-наладчика периодически повторяется процедура идентификации макромодели на основе текущих и архивных данных эксплуатации, а также экспертных оценок. Необходимость проведения идентификации параметров математической модели (а именно, фактических гидравлических сопротивлений участков тепловой сети по данным о расходах и напорах теплоносителя на абонентских вводах потребителей тепла) определяется тем, что рассчитываемые на основании паспортных характеристик значения гидравлических сопротивлений участков тепловых сетей в процессе эксплуатации претерпевают изменения вследствие зарастания внутренней поверхности трубопроводов, существенно отклоняются от проектных данных и фактически являются неизвестными величинами. В связи с этим необходимо периодически



повторять процедуру идентификации параметров математических моделей тепловых сетей по данным эксплуатации с целью уточнения значений гидравлических сопротивлений участков трубопроводов, используемых далее для теплогидравлических расчетов тепловых сетей. Результаты идентификации и моделирования режимов хранятся в базе данных САР-Т.

Программное обеспечение инженера-наладчика также позволяет проводить оценку эффективности использования теплоносителя у потребителей. Эффективность режимов теплоснабжения оценивается с помощью показателей эффективности, которые характеризуют использование теплового потенциала сетевой воды. В качестве основных показателей эффективности выступают температурный напор, представляющий собой фактическую разность температур теплофикационной воды между подающим и обратным трубопроводами, а также и утечки теплофикационной воды у потребителей, определяемые с учетом емкости систем теплоснабжения потребителей и средней температуры наружного воздуха за рассматриваемый период. Сопоставление фактических значений показателей функционирования тепловых сетей с их нормативными значениями на основе выбранного критерия эффективности позволяет проводить оценку эффективности функционирования тепловых сетей, определять наиболее проблемные участки сетей и потребителей, требующих проведения наладочных работ, и тем самым оперативно влиять на улучшение режимов теплоснабжения.

Таким образом, подсистема автоматизированного анализа режимов теплоснабжения САР-Т обеспечивает выполнение следующих функций:

- ведение информационной базы данных технологических параметров и показателей функционирования системы теплоснабжения;
- идентификация и уточнение параметров макромоделей тепловых сетей;
- макро моделирование режимов теплоснабжения с учетом структурных переключений;
- расчет и графическое отображение результатов моделирования режимов и показателей энергоэффективности теплоснабжения.

Практическое использование подсистемы автоматизированного анализа режимов теплоснабжения, построенной на основе изложенных принципов, позволяет оперативно выявлять и устранять нерациональное использование теплоносителя и тем самым повысить эффективность и качество теплоснабжения потребителей промышленных предприятий.

#### **Методика анализа режимов тепловых сетей на основе макро моделирования**

Решение задачи оперативного анализа текущих режимов функционирования тепловых сетей осуществляется на основе математического моделирования процесса теплоснабжения. Для эффективного моделирования системы теплоснабжения в реальном времени требуется разработка упрощенной макро модели тепловой сети, не требующей чрезмерной детализации характеристик сети и позволяющей проводить расчет и анализ режимов теплоснабжения с достаточной для практического применения точностью.

Суть предлагаемого подхода состоит в представлении реальной тепловой сети в виде многоуровневой структуры с выделенными сетевыми районами,

отдельными крупными потребителями и соединяющими их магистральными тепловыми сетями (рис. 2). В отличие от полной модели, отражающей состояния всех имеющихся межэлементных связей, в макромодели отображаются состояния значительно меньшего числа межэлементных связей, что соответствует описанию объекта при укрупненном выделении элементов.

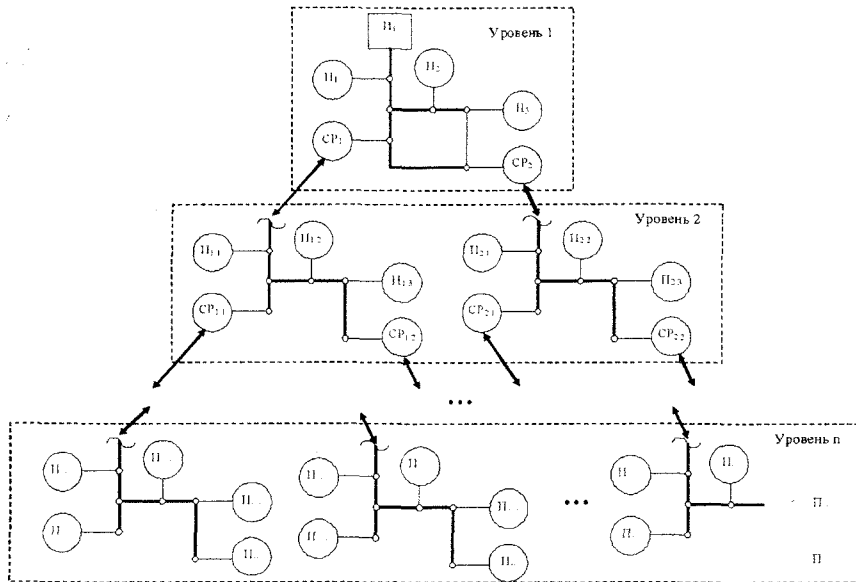


Рис. 2. Многоуровневая структура тепловой сети

В основу построения макромодели для расчета тепловых сетей могут быть положены следующие принципы:

1. Сетевые районы ( $CP_i$ ) со сложной схемой сетевых соединений, содержащие большое количество относительно маломощных потребителей, рассматриваются как единый эквивалентный потребитель.

2. Потребители ( $\Pi_j$ ), подключенные непосредственно к магистральной сети, рассматриваются как таковые.

3. При необходимости более подробного рассмотрения параметров гидравлических режимов внутри отдельных сетевых районов может быть осуществлен переход на следующий уровень макромодели, отражающий состояние потребителей ( $\Pi_k$ ) и вновь выделенных сетевых районов ( $CP_{i,j}$ ) внутри сетевого района  $CP_i$ . При этом объект  $CP_i$ , являющийся потребителем на верхнем уровне макромодели, выступает в роли источника для сетевого района  $CP_{i,j}$ .

На основе указанных выше принципов реализуется возможность использования при анализе одной и той же тепловой сети нескольких моделей, различающихся сложностью, точностью и полнотой отображения свойств. Таким образом, в зависимости от целей моделирования может изменяться степень

детализации представления и описания модели тепловой сети. При этом следует отметить, что результаты однократно выполненного трудоемкого моделирования отдельного сетевого района могут многократно применяться далее в укрупненной общей макромоделе, что обуславливает общее снижение объема вычислений.

Рассмотрим методику построения математической макромоделе тепловой сети. Основными элементами, образующими систему теплоснабжения, являются источники, обеспечивающие притоки транспортируемой среды и привносящие энергию в систему, абонентские теплопотребляющие установки (далее: потребители) и тепловая сеть в виде совокупности взаимосвязанных трубопроводов, соединяющих источники со множеством потребителей.

При математическом моделировании все эти подсистемы находят соответствующее отражение в расчетной топологической схеме сети: участки сети, включающие все местные сопротивления, – в виде ветвей, места расположения источников (притоков) и потребителей (стоков), а также соединения ветвей – в виде узлов (вершин), см. рис. 2. В общем случае тепловые сети образуют многокольцевые системы, для которых топологический граф содержит несколько контуров. Для того, чтобы произвести расчет сети, в ее структуре необходимо выделить ветви дерева и хорды.

Задача расчета гидравлического режима сети заключается в определении расходов сетевой воды у потребителей и на отдельных участках сети, а также напоров в узловых точках сети и у потребителей. При расчете гидравлического режима тепловой сети исходными данными являются: схема тепловой сети, сопротивления всех участков сети, напоры на подающем и обратном коллекторах источников, а также сопротивления (проводимости) всех потребителей.

В простейшем случае структура тепловой сети не содержит хорд и представляет собой разветвленную сеть с одним источником, что соответствует выделенным сетевым районам после декомпозиции на нижнем уровне макромоделе. Для гидравлического расчета таких разветвленных тепловых сетей может быть использована разработанная расчетная гидравлическая макромоделль сети, представленная на рис. 3.

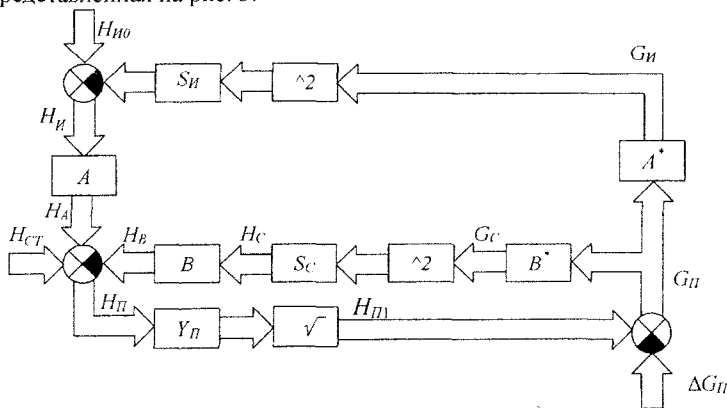


Рис. 3. Гидравлическая макро модель разветвленной тепловой сети.

На схеме приняты следующие обозначения:

$S_{II}$  – внутренние сопротивления источников, диагональная матрица  $n \times n$ , где  $n$  – число источников теплоснабжения;

$S_C$  – гидравлические сопротивления участков сети, диагональная матрица  $l \times l$ , где  $l$  – число участков сети;

$Y_{II}$  – гидравлические проводимости потребителей, диагональная матрица  $m \times m$ , где  $m$  – число потребителей;

$H_{II0}$  – напоры источников, когда через них идет нулевой поток, вектор размерности  $n \times 1$ ;

$H_{II}, H_C, H_{II}$  – напоры соответственно источников, участков сети и потребителей, векторы размерностей соответственно  $n \times 1, l \times 1, m \times 1$ ;

$G_{II}, G_C, G_{II}$  – расходы соответственно источников, участков сети и потребителей, векторы размерностей соответственно  $n \times 1, l \times 1, m \times 1$ ;

$\Delta G_{II}$  – утечки воды у потребителей, векторы размерности  $m \times 1$ ;

$H_{CT}$  – статический напор на участках сети, вектор размерности  $l \times 1$ ;

$A, A^*, B, B^*$  – матрицы связей, которые задают топологию сети;

$\wedge^2, \sqrt{\phantom{x}}$  – операторы возведения в квадрат и взятия квадратного корня элементов векторов.

Для расчета гидравлических режимов тепловой сети по предложенной макро модели (рис. 3) необходимо составить все перечисленные выше матрицы.

Матрица  $A = \{a_{ij}\}$  размерности  $m \times n$  отражает связи между напорами потребителей и источников. Элементы  $a_{ij}$  матрицы  $A$  определяются по следующему правилу:  $a_{ij} = 1$ , если  $j$ -й источник повышает напор по направлению к  $i$ -му потребителю, в противном случае  $a_{ij} = -1$ . Матрица  $A^*$  размерности  $n \times m$  отражает связи между расходами потребителей и источников и получена транспонированием матрицы  $A$ .

Матрица  $B = \{b_{ij}\}$  размерности  $m \times l$  отражает связи между напорами потребителей и участков сети. Элементы  $b_{ij}$  матрицы  $B$  определяются по следующему правилу:  $b_{ij} = 1$ , если  $j$ -й участок сети является частью пути к  $i$ -му потребителю от какого-либо из насосов, повышающих у него напор, в противном случае  $b_{ij} = 0$ . Матрица  $B^*$  размерности  $l \times m$  отражает связи между расходами потребителей и участков сети и получена транспонированием матрицы  $B$ .

При известных значениях расходов у потребителей, расчет расходов теплоносителя через узлы осуществляется, начиная с потребителей до источников, и в результате определяются расходы на каждом участке сети и расходы через источники:

$$G_C = B^* \cdot G_{II}; \quad (1)$$

$$G_{II} = A^* \cdot G_C; \quad (2)$$

Расчет напоров в узлах сети производится обратным движением от источников, напоры которых известны, к потребителям по соотношению

$$H_{II} = H_A - H_B + H_{CT}; \quad (3)$$

где

$$H_A = A \cdot H_{II}; \quad (4)$$

$$H_B = B \cdot H_C; \quad (5)$$

$$H_H = H_{H0} - S_H \cdot G_H^2; \quad (6)$$

$$H_C = S_C \cdot G_C^2; \quad (7)$$

Сопротивления участков  $S_C$  определяются по их диаметрам и длинам. Сопротивление участка трубопровода длиной  $l$  и диаметром  $d$  численно равно потере напора в трубопроводе при расходе воды  $1 \text{ м}^3/\text{час}$  и определяется по известным формулам:

$$S_C = \frac{0,7}{10^9} \cdot \frac{k_{\Sigma}^{0,25}}{d^{5,25}} \left( l + \frac{d \cdot \sum \xi}{\lambda} \right), \text{ мм} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6, \quad (8)$$

где  $k_{\Sigma}$  – эквивалентная шероховатость трубопровода,  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений,  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения (безразмерная величина), который с достаточной точностью определяется по формуле:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{k_{\Sigma}}{d} \right)^{0,25}.$$

В результате рассчитываются новые значения расходов потребителей:

$$G_{Pi} = \sqrt{Y_{Pi} \cdot H_{Pi}} - \Delta G_{Pi}, \quad i = 1, m. \quad (9)$$

Задача гидравлического расчета разветвленной тепловой сети может быть решена итерационным методом (например, методом Ньютона) с использованием представленной на рис.3 расчетной макромодели сети по следующему алгоритму:

1. задается начальное приближение значений расходов потребителей  $G_{Pi0}$ .
2. По расчетной схеме, представленной на рис. 3, рассчитываются значения расходов и напоров участков и источников с использованием формул (1 – 9), а также новые значения расходов потребителей.
3. Найденные значения расходов потребителей  $G_{Pi}$  сравниваются с исходными значениями  $G_{Pi0}$ . Если разница  $(G_{Pi} - G_{Pi0}) < \varepsilon$  (где  $\varepsilon$  – заданная точность вычислений), то следует перейти к п.5. В противном случае проводится минимизация невязок расчетных расходов  $G_{Pi}$  методом Ньютона или методом простой итерации с релаксацией.
4. Определение новых значений расходов потребителей:

$$G_{Pi}(k+1) = G_{Pi0}(k) + \delta G_{Pi}(k), \quad (10)$$

и переход к п.2.

5. Конец вычислений.

При расчете многоконтурной тепловой сети приведенный ранее расчет деревьев дополняется расчетом хорд. При известных расходах потребителей задаются начальные значения и направления расходов теплоносителя на хордах. В зависимости от выбранного произвольно направления движения теплоносителя на участке, соответствующем хорде, она может выступать как потребитель для одного узла дерева, и как источник расхода – для другого узла дерева. Расчет сетей с хордами проводится при минимизации невязок по расходам на хордах.

Преобразование расчетной гидродинамической модели тепловой сети, представленной на рис. 3, к виду, изображенному на рис. 4, позволяет



7. Найденные значения расходов потребителей  $G_{пi}$  сравниваются с исходными значениями  $G_{п0}$ . Если разница  $(G_{пi} - G_{п0}) < \varepsilon$  (где  $\varepsilon$  – заданная точность вычислений), то следует перейти к п. 9. В противном случае проводится минимизация невязок расчетных расходов  $G_{п}$  методом Ньютона.

8. Переопределение начальных значений расходов потребителей:

$$G_{п0}(k+1) = G_{п0}(k) + \delta G_{п}(k), \quad (12)$$

и переход к п.2.

9. Конец вычислений.

Таким образом, расчет сети с потребителями происходит с использованием результатов расчета хорд при минимизации невязки расходов на потребителях.

#### Идентификация параметров математических макромоделей

При использовании изложенного подхода к моделированию тепловой сети задача идентификации представляет собой задачу определения фактических гидравлических сопротивлений участков тепловой сети и решается на основе расчетной макромоделей, представленной на рис. 3. В отличие от прямых задач расчета потокораспределения теплоносителя в сети, когда гидравлические сопротивления участков считаются заданными, а напоры  $H$  и расходы  $G$  теплоносителя на абонентских вводах потребителей – искомыми, в рассматриваемой задаче идентификации заданными являются измеренные значения статистических наблюдений напоров  $H^*$  и расходов  $G^*$  у потребителей, а также напоры сетевой воды на источниках тепла  $H_{п0}$ ; при этом известна структура сети, т.е. матрицы связей  $A, A^*, B, B^*$ . Выбор располагаемых напоров и расходов теплоносителя на абонентских вводах потребителей тепла в качестве основного источника информации для идентификации обуславливается тем, что это именно те параметры, которые в большинстве случаев контролируются при эксплуатации тепловых сетей.

После получения необходимой статистической информации о поведении объекта – тепловой сети формируются функции невязки  $\Psi$  выходов модели ( $H_{п}$ ) и объекта ( $H_{п}^*$ ) следующего вида:

$$\Psi(t, S_C) = \sum_{i=1}^m [H_{пi}^*(t) - H_{пi}(t, S_C)]^2, \quad (13)$$

где  $m$  – число потребителей;  $H_{пi}^*(t)$  – измеренные в определенный момент времени  $t$  значения напоров теплоносителя на абонентских вводах потребителей тепла;  $H_{пi}(t, S_C)$  – рассчитанные значения напоров, соответствующие измеренным расходам теплоносителя на абонентских вводах потребителей  $G^*$  при значениях сопротивлений участков сети  $S_C$ .

Далее задача параметрической идентификации сводится к задаче поиска минимума целевого функционала на конечном множестве точек  $t_k$ :

$$J_1(S_C) = \sum_{k=1}^N \Psi(t_k, S_C) \rightarrow \min. \quad (14)$$

где  $k$  – номер измерения параметров гидравлического режима тепловой сети, соответствующий моменту времени  $t_k$ ;  $N$  – общее число измерений.

Подставляя выражение (13) в формулу (14), получаем:

$$J_1(S_C) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \left( H_{\Pi i,k}^* - H_{\Pi i,k}(S_C) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

Преобразуя выражение (15) согласно схеме гидравлической макромодели тепловой сети, приведенной на рис. 3, получим следующее выражение для целевого функционала:

$$J_1(S_C) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \left( a_{i,k} - \sum_{j=1}^l b_{i,j,k} S_{C_j} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} a_{i,k} &= H_{A i,k} - H_{\Pi i,k}^*; \\ b_{i,j,k} &= b_{i,j} \cdot \left( \sum_i b_{i,j} \cdot G_{\Pi i}^* \right)^2; \end{aligned} \quad (17)$$

$l$  – число участков.

Целевой функционал является выпуклой функцией, поэтому для решения поставленной задачи оптимизации можно использовать известные методы, например, метод простого покоординатного спуска или градиентный метод.

Далее, необходимо отметить такие особенности решения задачи идентификации параметров макромоделей тепловых сетей на основе данных эксплуатации, как наличие ошибок в измерении значений расхода, температуры и давления теплоносителя на источниках и у потребителей и неполнота информации о характеристиках, содержащихся в данных эксплуатации. Поэтому решение задачи идентификации параметров макромоделей тепловых сетей должно включать в себя регуляризацию на основе регуляризирующих наборов данных, которые являются дополнительными для восполнения недостающей информации в данных реальных наблюдений.

В качестве регуляризирующих наборов данных могут быть использованы расчетные значения сопротивлений участков  $S_C$  по формуле (8) или экспертные оценки полученных в результате моделирования значений напоров  $H_{\Pi}$  у потребителей в рассматриваемых режимах. В результате для регуляризирующих данных составляется целевая функция:

$$J_2(S_C) = \sum_{i=1}^n \left[ H_{\Pi i} - H_{\Pi i}(S_C) \right]^2, \quad (18)$$

где  $n$  – число регуляризирующих данных. Тогда результирующая целевая функция при решении задачи идентификации параметров макромоделей тепловых сетей будет иметь вид:

$$F = (1 - \alpha) \cdot J_1(S_C) + \alpha \cdot J_2(S_C) \rightarrow \min, \alpha \in [0, 1], \quad (19)$$

где  $\alpha$  – вес регуляризирующих данных  $J_2$ , который выбирается из условия корректности постановки задачи. При  $\alpha = 0$  задача решается только на экспериментальных данных; при  $\alpha = 1$  задача решается только на регуляризирующих данных. При выборе значения коэффициента  $\alpha$  необходимо задавать минимально возможное значение, при котором сохраняется корректность постановки задачи, т.е. выполняется критерий  $J_2$  с заданной точностью  $\varepsilon$ .



Таким образом, предлагаемая методика позволяет проводить идентификацию параметров математической макромодели тепловой сети по данным эксплуатации тепловых сетей.

Применение на практике математической макромодели тепловой сети, описанной выше, в составе автоматизированной системы диспетчерского управления позволяет оперативно анализировать функционирование систем теплоснабжения в различных режимах и повысить эффективность и надежность процесса теплоснабжения.

### **Алгоритмическое и программное обеспечение анализа режимов тепловых сетей на основе макро моделирования**

Обобщенная структура разработанного программного обеспечения подсистемы автоматизированного анализа режимов теплоснабжения (ПО САР-Т), отражающая потоки информации между программными модулями и базой данных сервера САР-Т, представлена на рис. 5.



Рис. 5. Структура программного обеспечения САР-Т.

ПО САР-Т включает в себя автоматизированную базу данных, и следующие программные модули:

1. Модуль взаимодействия сервера базы данных САР-Т с АСДУ теплоснабжения, позволяющий получать данные о параметрах источников и крупных потребителей с приборов учета тепла.

2. Модуль взаимодействия с АИС «Энергопаспорт» для автоматического ввода данных о технико-эксплуатационных показателях, проектных нагрузках потребителей, параметрах и структуре тепловых сетей.

3. Модуль ввода данных экспертных оценок параметров теплоносителя у потребителей, не оборудованных приборами учета.

4. Модуль автоматизированного ввода данных оператором рабочей станции САР-Т суточных архивов теплопотребления с теплосчетчиков мелких

потребителей, не подключенных к АСДУ.

5. Модуль идентификации параметров макромоделей тепловых сетей по данным эксплуатации в различных режимах работы тепловой сети.

6. Модуль теплогидравлических расчетов тепловых сетей на основе макро моделирования. ПО САР-Т включает в себя макро модель системы теплоснабжения и предусматривает возможность моделирования различных режимов теплоснабжения путем изменения параметров модели (напоры источников, сопротивления потребителей), а также изменением структуры модели тепловой сети при помощи открытия/закрытия задвижек на магистральных трубопроводах и внесением дополнительных элементов в структуру тепловой сети.

7. Модуль анализа данных и расчета характеристик энергоэффективности потребления тепловой энергии. На основании параметров, которые хранятся в базе данных на сервере САР-Т, проводится расчет характеристик энергоэффективности теплоснабжения, результаты которого сохраняются модулем в базе данных САР-Т.

8. Модуль визуализации результатов моделирования и анализа, формирования отчетов отображает данные эксплуатации, технологические параметры, результаты моделирования и показатели эффективности функционирования, т.е. позволяет осуществлять визуальный контроль качества теплотребления, отклонений технологических параметров от требуемых значений. Отображение данных может осуществляться в табличном виде, в виде графиков и диаграмм, также предусмотрена возможность отображения одновременно фактических и расчетных показателей.

В качестве примера, на рис. 6 и 7 представлены результаты моделирования теплотрассы ЦЭС-1000№1 в двух режимах: при включенной и отключенной бойлерной в энергокорпусе, являющейся дополнительным источником тепла на трассе. Основной источник тепла – центральная электростанция (ЦЭС).

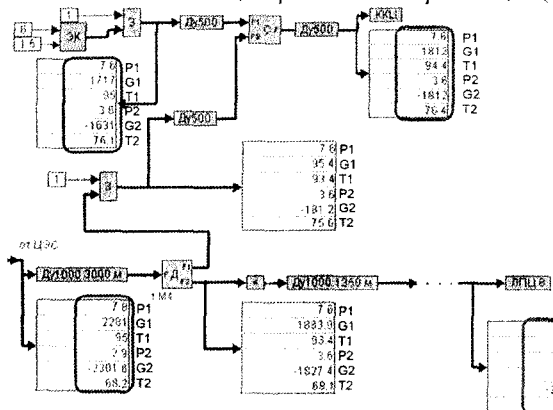


Рис. 6. Видеокадр моделирования системы теплоснабжения ОАО «ММК» в режиме: бойлерная энергокорпуса в работе.

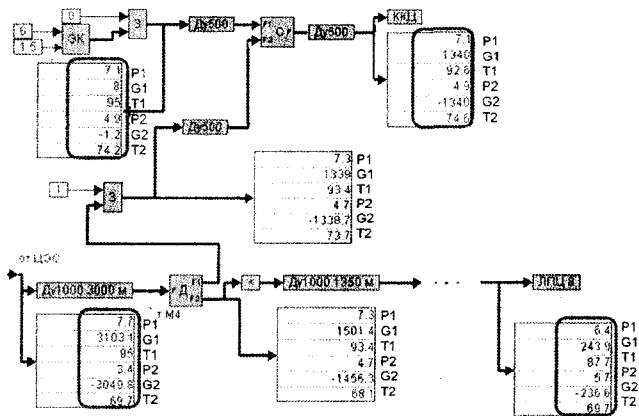


Рис. 7. Видеокادر моделирования системы теплоснабжения ОАО «ММК» в режиме: бойлерная энергокорпуса отключена.

На рис. 6, 7 приняты следующие обозначения:

P1, G1, T1 – напор, расход и температура теплоносителя в подающем трубопроводе; P2, G2, T2 – напор, расход и температура теплоносителя в обратном трубопроводе.

Анализ рис. 6 и 7 показывает, что в случае отключения бойлерной энергокорпуса необходимо увеличить подачу теплоносителя от ЦЭС до максимального значения 3103 куб.м./час при тех же напорах источника. При этом напоры и расходы у конечных потребителей будут существенно снижены. Приведенный пример показывает, что разработанная макро модель позволяет проводить анализ вариантов структурных переключений в тепловых сетях, возникающих при проведении ремонтных работ и аварийных ситуациях.

На основе использования разработанного программного обеспечения САР-Т был проведен автоматизированный анализ режимов теплоснабжения потребителей промплощадки ОАО «ММК» по следующим основным показателям:

- 1) температурный напор (фактическая разность температур теплофикационной воды между подающим и обратным трубопроводами);
- 2) утечки теплофикационной воды (фактическая разность расходов теплофикационной воды между подающим и обратным трубопроводами), определяемые с учетом емкости систем теплоснабжения потребителей и средней температуры наружного воздуха за рассматриваемый период.

В качестве исходных данных для анализа использовались фактические данные приборного учета тепла ЦЭСТ ОАО «ММК» за январь 2007 г. Согласно данным диспетчерской УГЭ ОАО «ММК» средняя температура наружного воздуха в январе 2007 г. составляла -3,6°C. Согласно утвержденному температурному графику на промплощадке разность температур между подающим и обратным теплоносителем при указанной температуре наружного

воздуха должна составлять 15°C. В таблице 1 приведен фрагмент данных по потребителям с температурным напором в январе 2007 г. менее 15°C, полученные автоматизированным способом с помощью разработанного программного обеспечения. Общее число проанализированных потребителей (с установленными приборами учета тепла) составляло 229. Было выявлено 109 потребителей с недостаточным температурным напором.

Таблица 1.

Перечень потребителей с недостаточным температурным напором

№ п/п	Потребители	dT, °C
1	ЦЭСиП. Подстанция №63	1.2
2	ЖДТ. Ст. "Гранитная". ЦТП	3.0
3	Сортовой цех. Стан 450	3.3
4	ПСЦ. Котельная №2	4.0
5	ЦЭСиП. Подстанция №80	4.3
6	ЦЭС. УМИС	4.3
...	...	...

В результате анализа с помощью разработанного программного обеспечения было выявлено 80 потребителей, у которых фактическая утечка теплоносителя превышает нормативную. В качестве фактических данных в расчетах использовались значения разности расходов подаваемого и обратного теплоносителя с приборов учета тепла. Нормативные значения утечек рассчитывались по методике, принятой на ОАО «ММК». В таблице 2 приведен фрагмент результатов анализа режимов теплоснабжения, потребителей с точки зрения утечек теплофикационной воды.

Таблица 2.

Утечки теплофикационной воды потребителей

№ п/п	Потребители	Утечка, т/ч	Норма, т/ч	Превышение, %	Тепло, Гкал/ч	Объем, м <sup>3</sup>
...	...	...	...	...	...	...
53	ЗАО «МССР» ЦРМП	0.131	0.057	130	0.301	22.8
54	Доменный цех. Мех. мастерские	0.234	0.105	124	0.554	41.9
55	ЦВС. Насосная станция №35	0.021	0.01	107	0.055	4.1
56	ЦЭТЛ	0.029	0.014	107	0.074	5.6
57	ЦВС. Насосная станция №2	0.037	0.019	94	0.101	7.7
58	ЛПЦ 3. Ввод 1 очередь 2	1.041	0.536	94	2.834	214.2
...	...	...	...	...	...	...

Было выявлено, что для отдельных потребителей фактическая утечка теплоносителя превышает нормативные значения более, чем на 100%. При этом, например, для трассы ЦЭС-1000№1 расчетная нормативная утечка по данным

января 2007 г. составляет 10.5 т/час, в то время как фактическая утечка в данный период составила 64.3 т/час.

Полученные данные свидетельствуют о существующих резервах энергосбережения в системе теплоснабжения промплощадки ОАО «ММК» и необходимости проведения наладочных и регулировочных работ с использованием разработанного ПО САР-Т.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Рассмотрены общие тенденции развития автоматизированного диспетчерского управления системами теплоснабжения, выявлены особенности такого управления и определены пути его совершенствования на основе макро моделирования режимов тепловых сетей.

2. Предложена макро модель оперативного анализа тепловой сети, описывающая взаимосвязь между параметрами отдельных элементов системы теплоснабжения, позволяющая рассчитывать режимы в реальном времени с разной степенью детализации в зависимости от реальных возможностей получения информации о параметрах режимов. Использование описанной макро модели тепловой сети позволяет производить расчет режимов как тупиковых, так и кольцевых тепловых сетей, работающих от одного или нескольких источников.

3. Предложена методика идентификации разработанной макро модели тепловой сети по данным диспетчерского контроля, расчетным или экспертным оценкам без детального обследования тепловых сетей.

4. Предложена структура и алгоритм работы подсистемы автоматизированного анализа режимов теплоснабжения, реализующей автоматизированное управление в режиме «советчика» диспетчеру.

5. Разработан программный комплекс, предназначенный для оперативного моделирования и анализа режимов функционирования тепловых сетей промышленных предприятий. Программный комплекс включает в себя математическую макро модель тепловых сетей, позволяющую проводить анализ прогнозируемых режимов при различных вариантах структурных переключений в тепловых сетях в период подготовки проведения плановых ремонтных работ и ликвидации аварийных ситуаций, и программное обеспечение автоматизированного ввода, отображения и анализа данных с узлов учета тепла, установленных на тепловых вводах потребителей и источников теплоснабжения.

6. Разработанное программное обеспечение анализа режимов тепловых сетей, апробировано на данных эксплуатации тепловых сетей промплощадки ОАО «ММК». Использование разработанного ПО позволило выявить потребителей с температурным напором ниже нормативного значения, а также потребителей, у которых фактическая утечка теплоносителя превышает нормативную. Расчетный экономический эффект от проведения наладочных работ на объектах промплощадки ОАО «ММК» с повышенной циркуляцией и утечками теплоносителя, выявленных с использованием разработанной программы анализа режимов тепловых сетей на основе макро моделирования по данным за январь 2007 г., составляет 470 000 руб. в месяц.

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В ВЕДУЩИХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ЖУРНАЛАХ ВАК

1. Гойтина, Е.В. Подход к автоматизированному анализу эффективности режимов теплоснабжения на основе макро моделирования / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – №7 (79). – С. 9 – 11.

2. Гойтина, Е.В. Методика идентификации параметров модели тепловой сети по данным эксплуатации / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – №9. – С. 20 – 22.

3. Гойтина, Е.В. Автоматизированный анализ режимов тепловых сетей с использованием энергетических паспортов потребителей / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 6. – №23 (95). – С. 65 – 66.

## ДРУГИЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ельфимовская\*, Е.В. Алгоритм гидравлического расчета тепловой сети по динамической модели / Е.В. Ельфимовская, Л.С. Казаринов // Энергосбережение на промышленных предприятиях: материалы второй Международной научно-технической конференции / Под общ. ред. Заславца Б.И. – Магнитогорск: Изд-во «Дом печати», 2000. – С. 195 – 199.

2. Ельфимовская, Е.В. Расчет гидравлических режимов автоматизированного индивидуального теплового пункта здания / Е.В. Ельфимовская, Д.А. Шнайдер // Автоматизация и управление в технических системах: Сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – С.58 – 60.

3. Гойтина, Е.В. Анализ многоконтурной системы теплоснабжения / Е.В. Гойтина // Информационные, измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 31 – 35.

4. Гойтина, Е.В. Идентификация математических моделей тепловых сетей / Е.В. Гойтина // Информационные, измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 35 – 38.

5. Гойтина, Е.В. Подход к идентификации математических моделей тепловых сетей / Е.В. Гойтина // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы VI Международной научно-практической конференции, г.Новочеркасск, 7 апр. 2006 г.: В 5 ч./ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. – Ч.1. – С. 31 – 34.

6. Гойтина, Е.В. Автоматизированная система оперативного управления режимами тепловых сетей на основе макро моделирования / Е.В. Гойтина // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы VI Международной научно-практической конференции, г.Новочеркасск, 21 апр. 2006 г.: В 2 ч./ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. – Ч.1. – С. 10 – 11.

7. Гойтина, Е.В. Автоматизация расчета гидравлических режимов многоконтурных тепловых сетей / Е.В. Гойтина // XXVI Российская школа по

проблемем науки и технологий. Краткие сообщения. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – С. 124 – 126.

8. Гойтина, Е.В. Автоматизированная система управления энергоэффективностью теплоснабжения промышленного предприятия / Е.В. Гойтина // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации. Вып. 2: Сб. тр. Международной науч.-техн. конф. / под ред. Д.Х. Девятова. Магнитогорск: ИПЦ ООО «Проф-Принт», 2007. – С. 213 – 217.

\* Ельфимовская Е.В. с января 2000 г. сменила фамилию на Гойтину.