

На правах рукописи



Ротов Павел Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ, ПОДКЛЮЧЕННЫХ К ТЭЦ, ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАГРУЗОК
ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Специальности: 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты
05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иваново – 2015

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» (НИЛ «ТЭСУ») федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор **Шарапов Владимир Иванович**

Официальные оппоненты:

Кудинов Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции»;

Щинников Павел Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Тепловые электрические станции»;

Николаев Юрий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Теплоэнергетика».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет».

Защита состоится «18» декабря 2015 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Dissertaciya-Rotov_P.V..pdf.

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ <http://ispu.ru/> .

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из достижений отечественной теплоэнергетики является централизация теплоснабжения на основе теплофикационных систем, подключенных к тепловым электрическим станциям. В настоящее время энергетическая эффективность таких систем снизилась, что обусловлено нечеткой государственной политикой в области энергетики и, зачастую, нерациональным их управлением. Тем не менее, термодинамические преимущества теплофикационных систем с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии не могут быть оспорены. Сохранение и развитие теплофикационных систем является актуальной задачей.

Структура отечественных систем теплоснабжения формировалась продолжительное время, в том числе, и в условиях восстановления экономики страны после разрушительных войн XX века. Невысокая стоимость топливно-энергетических ресурсов способствовала принятию технических решений, в которых главным критерием были небольшие капитальные затраты. В итоге сформировалась структура систем теплоснабжения, при которой теплогенерирующие мощности (включая пиковые котлы, включенные последовательно за сетевыми подогревателями) размещались на значительном удалении от потребителей, что приводило к повышенному потреблению топливно-энергетических ресурсов в теплофикационных системах. Далеко не все принимаемые решения соответствовали требованиям по экологичности и энергосбережению, предъявляемым к системам теплоснабжения в настоящее время. Развитие последовательной структуры систем теплоснабжения предопределило и развитие качественного способа регулирования отпуска теплоты, принятого в качестве основного способа в отечественном теплоснабжении.

Анализ работы отечественных ТЭЦ и систем теплоснабжения показывает, что традиционные режимы их эксплуатации не отвечают современным требованиям по энергетической эффективности. Положительный эффект от централизованного теплоснабжения в значительной мере нивелируется потерями топливно-энергетических ресурсов, обусловленными несоответствием расчетных режимов работы теплофикационных систем теплоснабжения фактическим условиям эксплуатации, большой инерцией систем транспорта теплоты, низким уровнем автоматизации теплопотребляющих установок, а также недостатками центрального качественного регулирования тепловой нагрузки.

Необходимость структурных и режимных преобразований обусловлена и тем, что вследствие кризисных явлений 90-х годов XX века в системах теплоснабжения большинства городов России повсеместно нарушаются принципы качественного регулирования тепловой нагрузки: не выдерживаются температурные графики, гидравлические режимы. Повысить эффективность теплофикационных систем возможно за счет пересмотра и корректировки ряда концептуальных положений по схемам и режимам работы основных их элементов: теплоисточников, систем транспорта теплоты, теплопотребляющих установок. Актуальной задачей является разработка и исследование технологий централизованного теплоснабжения с пониженными температурными графиками при количественном и качественно-количественном регулировании тепловой нагрузки. В связи с невозможностью быстрого структурного изменения отечественных систем теплоснабжения актуальной

задачей является адаптация способа центрального качественного регулирования к современным требованиям по энергосбережению.

Цель работы: повышение эффективности работы теплофикационных систем, подключенных к ТЭЦ, путем разработки и научно-технического обоснования технологий обеспечения тепловой нагрузки систем теплоснабжения.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы и решены следующие задачи:

- проведено исследование этапов и исторических особенностей развития централизованного теплоснабжения на основе теплофикационных систем в России;
- проведен анализ современного состояния обеспечения тепловой нагрузки в отечественных теплофикационных системах теплоснабжения;
- проведено обследование режимов работы системы теплоснабжения г. Ульяновска в период с 1997 г. по 2012 г.;
- разработана концепция совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки в теплофикационных системах;
- разработаны технологии обеспечения тепловой нагрузки различными способами на ТЭЦ и методики расчета режимов работы систем теплоснабжения при реализации этих технологий;
- обоснована необходимость структурной оптимизации теплофикационных систем теплоснабжения и разработаны системы комбинированного теплоснабжения, объединяющие элементы централизованных и децентрализованных систем;
- реализовано комбинированное регулирование тепловой нагрузки в действующей системе теплоснабжения и произведено экспериментальное исследование режимов ее работы;
- разработаны технические решения по обеспечению тепловой нагрузки в местных системах теплоснабжения;
- разработаны энергосберегающие технологии низкотемпературного теплоснабжения с использованием тепловых насосов, позволяющие оптимизировать режимы работы теплофикационных систем в переходные периоды отопительного сезона;
- произведено технико-экономическое обоснование разработанных технологий.

Научная новизна работы

1. Разработан комплекс положений, определяющих общую направленность (концепция) по совершенствованию технологий обеспечения тепловой нагрузки, в рамках которого предложены и научно-технически обоснованы технологии низкотемпературного теплоснабжения при преимущественно количественном и качественно-количественном регулировании отпуска теплоты, технологии комбинированного теплоснабжения, совмещающие различные способы центрального и местного регулирования в периоды наименьшей эффективности работы централизованных систем теплоснабжения.

2. Разработана методика расчета температурного графика качественного регулирования отпуска теплоты в замкнутом контуре водогрейных котлов двухконтурных схем ТЭЦ, определены границы применимости двухконтурных схем ТЭЦ.

3. На основании полученных в диссертации аналитических выражений проведен сравнительный анализ показателей эффективности количественного,

качественно-количественного и качественного способов обеспечения тепловой нагрузки систем теплоснабжения, разработаны методики расчета режимов работы открытых систем теплоснабжения при количественном и качественно-количественном регулировании отпуска теплоты, отличием которых от существующих методик расчета является учет влияния нагрузки горячего водоснабжения на работу систем отопления при переменном расходе воды в теплосети.

4. Разработаны и исследованы режимы работы ТЭЦ с количественным и качественно-количественным регулированием тепловой нагрузки систем теплоснабжения, особенностью которых является обеспечение тепловой нагрузки систем теплоснабжения путем изменения количества работающих сетевых подогревателей и пиковых водогрейных котлов, включенных параллельно.

5. Предложено, теоретически обосновано и реализовано в теплофикационной системе теплоснабжения деление (зонирование) температурного графика на периоды в зависимости от комбинирования различных способов регулирования тепловой нагрузки.

6. Разработаны, исследованы, теоретически и технико-экономически обоснованы энергосберегающие низкотемпературные технологии работы теплофикационных систем с использованием тепловых насосов, отличием которых является обеспечение нагрузки горячего водоснабжения в переходные периоды отопительного сезона при пониженных параметрах сетевой воды в системе теплоснабжения.

7. Предложены решения по обеспечению тепловой нагрузки и стабилизации гидравлических режимов в местных системах теплоснабжения с учетом неравномерности потребления теплоты и теплоносителя абонентами при переменном расходе сетевой воды в централизованной системе теплоснабжения, особенностью которых является регулирование режимов работы теплоснабжающих установок по параметрам теплоносителя после систем теплоснабжения.

Достоверность результатов обусловлена применением методов и методик исследования, основанных на фундаментальных законах технической термодинамики, гидравлики, методах вычислительной математики, математической статистики, теории вероятности, теории теплообмена, эвристических методах поиска новых технических решений, апробированных методик технико-экономического анализа, теории планирования и обработки результатов инженерного эксперимента; сопоставимостью полученных данных с другими источниками; промышленной проверкой и патентной чистотой разработанных решений.

Практическая значимость. С использованием технологий комбинированного теплоснабжения от централизованных и автономных теплоисточников на основании патентов № 2235249 (RU) МКИ F29 D 3/08, № 2235250 (RU) МКИ F29 D 3/08 в здании Медицинского диализного центра (г. Ульяновск, ул. III Интернационала, 1а) спроектированы и смонтированы системы отопления, горячего водоснабжения и вентиляции.

Применен способ работы системы теплоснабжения на основании патента № 2307289 (RU) МКИ F24 D 17/00 и реализовано комбинированное регулирование тепловой нагрузки на основе предложенного в диссертации зонированного температурного графика в системе теплоснабжения г. Ульяновска на 16

центральных тепловых пунктах (ЦТП). Годовая экономия от реализованного регулирования составляет 10-30 млн руб.

Реализована технология автоматического регулирования параметров в системах горячего водоснабжения в зависимости от режима потребления горячей воды на 25 ЦТП в системе теплоснабжения г. Ульяновска. Годовая экономия внедренного регулирования составляет около 4 млн руб.

Для оптимизации режимов работы теплофикационных систем, подключенных к ТЭЦ, разработаны и зарегистрированы программные продукты «Расчет температурного графика водогрейных котлов в двухконтурных схемах» и «Расчет энергетической эффективности комбинированной теплофикационной системы с ТЭЦ и автономными пиковыми теплоисточниками».

Результаты исследований использованы при чтении курсов «Регулирование нагрузки систем теплоснабжения», «Современные проблемы теплоснабжения населенных пунктов», организации научно-исследовательской работы аспирантов и студентов.

Результаты исследований использованы при разработке инвестиционных, производственных программ и программ энергосбережения на Ульяновском муниципальном унитарном предприятии «Городской теплосервис».

Положения, выносимые на защиту:

1. Положения концепции, определяющей общую направленность совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки, и их научно-техническое обоснование.

2. Совершенствование технологий и режимов качественного регулирования отпуска теплоты на ТЭЦ. Методика расчета температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов в двухконтурных схемах ТЭЦ.

3. Технологии количественного и качественно-количественного регулирования отпуска теплоты на ТЭЦ и методики расчета режимов работы систем теплоснабжения при реализации этих технологий.

4. Комбинированное регулирование нагрузки в системах теплоснабжения на основе зонированного температурного графика, особенностью которого является сочетание различных способов центрального и местного регулирования.

5. Энергосберегающие технологии низкотемпературного теплоснабжения с использованием тепловых насосов, в которых реализован новый подход к регулированию тепловой нагрузки без излома температурного графика с обеспечением нагрузки горячего водоснабжения потребителей при пониженных параметрах сетевой воды

6. Решения по регулированию тепловой нагрузки и стабилизации гидравлических режимов в местных системах отопления и горячего водоснабжения, учитывающие переменный расход сетевой воды в системе теплоснабжения и неравномерность условий работы систем теплопотребления.

7. Результаты научно-технического обоснования и апробации перечисленных выше исследований в действующих системах теплоснабжения.

Апробация работы. Результаты работы представлены на Российском национальном симпозиуме по энергетике (Казань, КГЭУ, 2001 г.); на Международных научно-технических конференциях «Проблемы развития централизованного теплоснабжения» (Самара, СамГТУ, 2004 г.); «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» (Москва, МГСУ, 2005 г.); «Энергосбережение в

городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, УлГТУ, 2001, 2003, 2006, 2013 г.); «Строительство и энергосбережение в 21 веке» (Ульяновск, 2013 г.); «Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований (Москва, 2013 г.); «Муниципальная энергетика: проблемы и решения» (Украина, г. Николаев, 2013 г.); «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения» (Саратов, СарГТУ, 2014 г.); на Национальной конференции по теплоэнергетике (Казань, КГЭУ, 2006 г.); на Всероссийском конкурсе «Инженер года» (Москва, 2006 г., 2010 г.); на X Московском международном салоне инноваций и инвестиций (Москва, 2010 г.); на Национальном конгрессе по энергетике (Казань, КГЭУ, 2014 г.); на семинарах научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» ФГОУ ВПО Ульяновского государственного технического университета (Ульяновск, 1999–2015 гг.); на расширенном заседании кафедры «Тепловые электрические станции» ФГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (Иваново, 2015 г.).

Соответствие паспорту специальности. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности работы централизованных систем теплоснабжения, подключенных к ТЭЦ. В диссертации рассмотрены новые технические решения и режимы работы систем отопления и горячего водоснабжения, подключенных к централизованным системам теплоснабжения. Исследованные в диссертации вопросы регулирования отпуска теплоты относятся к принципам обеспечения тепловой нагрузки потребителей и не рассматривают проблемы автоматизированного управления технологическими процессами.

При обозначении способов регулирования отпуска теплоты использованы термины и определения, приведенные в СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003.

Соответствие диссертации специальности 05.14.14 подтверждается выполнением исследований в следующих областях, указанных в паспорте специальности:

- п. 3. «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий...» соответствуют представленные в диссертации результаты обследования режимов работы действующей системы теплоснабжения, подключенной к ТЭЦ; аналитическое и технико-экономическое сравнение различных способов регулирования отпуска теплоты в отечественных системах теплоснабжения; концепция совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки; технологии качественного регулирования тепловой нагрузки в двухконтурных схемах ТЭЦ; схемы ТЭЦ с количественным и качественно-количественным регулирования отпуска теплоты; энергосберегающие технологии низкотемпературного теплоснабжения с использованием тепловых насосов; новая структурная схема теплофикационных систем и технологии комбинированного теплоснабжения, объединяющие элементы централизованных и децентрализованных систем теплоснабжения; разработанная, внедренная в системе теплоснабжения, подключенной к ТЭЦ г. Ульяновска, и исследованная энергосберегающая технология комбинированного регулирования параметров теплоносителя в переходные периоды отопительных сезонов; технико-экономическое обоснование разработанных и внедренных технологий;

- п. 5. «Повышение надежности и рабочего ресурса агрегатов, систем тепловых электростанций в целом» соответствует представленный в диссертации расчет показателей надежности двухконтурных схем ТЭЦ с включением водогрейных котлов в замкнутый контур;

- п. 6 «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций» соответствуют разработанные в диссертации методика расчета температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов в двухконтурных схемах ТЭЦ, методики расчета количественного и качественно-количественного способов регулирования отпуска теплоты в открытых системах теплоснабжения; программные комплексы для оптимизации режимов работы теплофикационных систем, подключенных к ТЭЦ, «Расчет температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов в двухконтурных схемах», «Расчет энергетической эффективности комбинированной теплофикационной системы с ТЭЦ и автономными пиковыми теплоисточниками»; предложенное в диссертации зонирование температурного графика на периоды в зависимости от комбинирования центрального регулирования отпуска теплоты на ТЭЦ и местного регулирования тепловой нагрузки у потребителя; проведенное в диссертации моделирование режимов работы системы теплоснабжения при различных способах регулирования тепловой нагрузки.

Соответствие диссертации специальности 05.14.04 подтверждается выполнением исследований в следующих областях, указанных в паспорте специальности:

- п. 2. «Оптимизация схем энергетических установок и систем...» соответствуют представленные в диссертации концепция совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки; технологии качественного регулирования тепловой нагрузки в двухконтурных схемах ТЭЦ; схемы ТЭЦ с количественным и качественно-количественным регулированием отпуска теплоты; энергосберегающие технологии низкотемпературного теплоснабжения с использованием тепловых насосов; технологии комбинированного теплоснабжения, объединяющие элементы централизованных и децентрализованных систем;

- п. 3. «Теоретические и экспериментальные исследования процессов... Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок...» соответствуют представленные в диссертации результаты обследования режимов работы действующей системы теплоснабжения; аналитическое и технико-экономическое сравнение различных способов регулирования отпуска теплоты в отечественных системах теплоснабжения; методика расчета температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов в двухконтурных схемах ТЭЦ; методики расчета количественного и качественно-количественного способов регулирования отпуска теплоты в открытых системах теплоснабжения; предложенное, обоснованное и реализованное в системе теплоснабжения комбинированное регулирование тепловой нагрузки на основании разработанного в диссертации зонированного температурного графика; результаты исследования влияния способа регулирования отпуска теплоты на режимы работы систем отопления; результаты исследования энергосберегающих низкотемпературных технологий работы теплофикационных систем с использованием тепловых насосов;

- п. 4. «Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок...» соответствуют разработанные и представленные в диссертации энергосберегающие низкотемпературные технологий работы теплофикационных

систем с использованием тепловых насосов; технологии комбинированного теплоснабжения; новые схемы систем отопления и горячего водоснабжения, способствующие повышению надежности и экономичности их работы при переменном расходе сетевой воды в централизованной системе теплоснабжения с учетом неравномерности потребления теплоты и теплоносителя абонентами; расчетное, экспериментальное исследование, теоретическое и технико-экономическое обоснование разработанных технологий;

- п. 5. «Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок...» соответствуют представленные в диссертации результаты расчетного, экспериментального исследования и технико-экономического обоснования энергосберегающего комбинированного регулирования тепловой нагрузки в действующей системе теплоснабжения; теоретического и технико-экономического исследования энергосберегающих низкотемпературных технологий работы теплофикационных систем с использованием тепловых насосов; результаты экспериментального исследования работы централизованной системы горячего водоснабжения с учетом неравномерности разбора горячей воды потребителями; разработанные в диссертации программные комплексы для оптимизации режимов работы теплофикационных систем, подключенных к ТЭЦ, «Расчет температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов в двухконтурных схемах» и «Расчет энергетической эффективности комбинированной теплофикационной системы с ТЭЦ и автономными пиковыми теплоисточниками»; результаты исследования влияния способа регулирования отпуска теплоты на режимы работы систем отопления; новые схемы систем отопления и горячего водоснабжения, способствующие повышению надежности и экономичности их работы при переменном расходе сетевой воды в централизованной системе теплоснабжения с учетом неравномерности потребления теплоты и теплоносителя абонентами.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликована 131 печатная работа, в том числе 58 статей, 32 изобретения, 29 полных текстов докладов, 3 монографии, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В рецензируемых изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, опубликовано 18 статей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 335 использованных источников и шести приложений. Полный объем диссертационной работы 410 с., в том числе 143 иллюстрации на 125 с., 76 таблиц на 73 с., 6 приложений на 6 с., список литературы на 36 с.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ этапов и особенностей исторического развития отечественного централизованного теплоснабжения на основе теплофикационных систем. Отмечено, что теоретические и практические основы централизованного теплоснабжения и теплофикации в России были заложены в начале XX века во время реализации ряда проектов теплоснабжения потребителей в г. Санкт-Петербурге под руководством профессора В.В. Дмитриева.

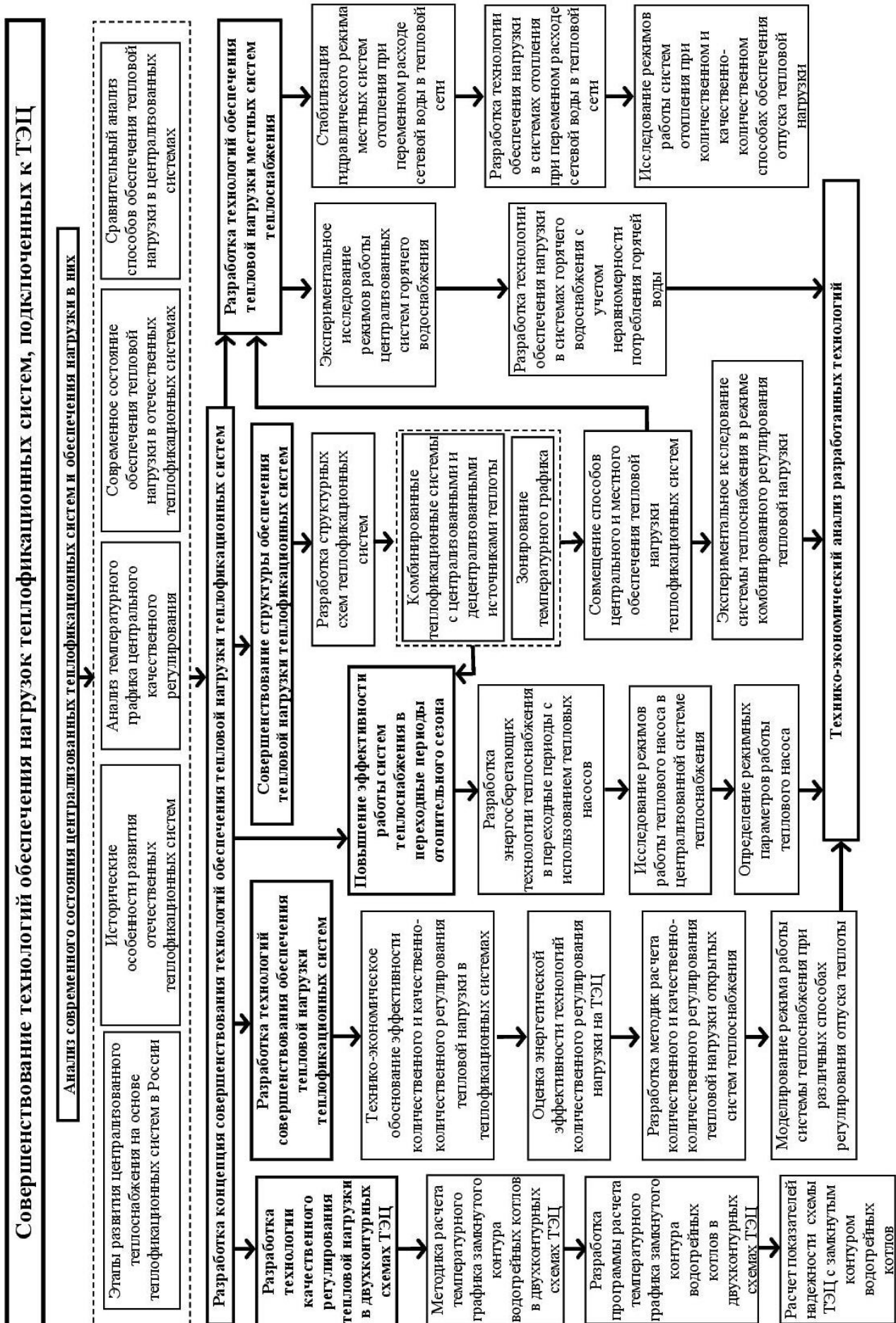


Рис. 1. Схема решения проблемы

Важнейшими событиями, повлиявшими на развитие и формирование структуры отечественных теплофикационных систем, являются принятие в 1920 г. Государственного плана электрификации России и период массового жилищного строительства конца 50-х годов прошлого века.

Период середины XX века для отечественных систем теплоснабжения характерен разработкой и внедрением технических и технологических решений, на многие годы предопределивших дальнейшее развитие отечественных энергетических систем. Именно в этот период формируется основа структуры теплоснабжения, которая практически без изменения просуществовала до настоящего времени.

Существенный вклад в развитие отечественных энергетических систем внесли ученые: Соколов Е.Я., Копьев С.Ф., Громов Н.К., Зингер Н.М., Мелентьев Л.А., Чистович С.А., Бродянский В.М., Андрющенко А.И., Хлебалин Ю.М., Николаев Ю.Е., Щинников П.А. и др.

В первой главе исследованы методологические и технологические основы температурного графика центрального качественного регулирования.

В результате исследования установлено, что высокие параметры температурного графика, принятые в отечественном теплоснабжении, обоснованы только снижением капитальных затрат в системы теплоснабжения. Энергетическая эффективность систем теплоснабжения при выборе параметров температурного графика учитывалась в меньшей мере.

Рассмотрена топология отечественных централизованных теплофикационных систем с детализацией по структурным элементам. Выполнен обзор существующих технологий регулирования нагрузки в системах теплопотребления.

Проведен анализ зарубежного опыта теплоснабжения, показавший преимущества теплофикации перед отдельной выработкой тепловой и электрической энергии, особенно в преодолении энергетических кризисов второй половины XX века.

Сформулированы основные задачи исследования, решение которых необходимо для повышения эффективности технологий обеспечения нагрузок теплофикационных систем, разработана схема решения проблемы (рис. 1).

Во второй главе на основании анализа температурного графика центрального качественного регулирования и изучения современного состояния отечественного централизованного теплоснабжения разработана концепция совершенствования технологий регулирования тепловых нагрузок теплофикационных систем.

Фактический температурный график центрального качественного регулирования до кризиса 90-х годов прошлого века в большинстве городов страны характеризовался превышением температуры сетевой воды в подающей магистрали над расчетными значениями в базовой части графика тепловых нагрузок ($-10 \leq t_{\text{н}} \leq 8$ °С) и недоотопом (недогревом сетевой воды до расчетных параметров) в пиковый период ($-10 \leq t_{\text{н}} \leq -31$ °С). Анализ температурного графика показывает, что завышение температур сетевой воды в обратной магистрали тепловой сети имело место в течение всего отопительного периода. Подобное несовпадение температурных графиков явилось следствием несовершенства качественного регулирования тепловой нагрузки.

В период экономического кризиса осуществление центрального качественного регулирования на теплоисточниках во многих городах России практически

прекратилось. Почти все системы теплоснабжения страны стали работать со значительным недотопом, вызванным систематическими неплатежами за тепловую энергию, удорожанием топлива, отсутствием средств на модернизацию оборудования систем теплоснабжения. Так, в системе теплоснабжения г. Ульяновска, подключенной к ТЭЦ, температура теплоносителя в подающем трубопроводе не превышает 110 °С уже в течение более 20 лет, при расчетном температурном графике с параметрами 150/70 °С.

Невыдерживание температурного графика привело к снижению эффективности работы систем теплоснабжения, нарушению качества и надежности эксплуатации систем теплоснабжения, формированию негативного отношения к централизованному теплоснабжению. Менее экономичные децентрализованные системы теплоснабжения стали успешно конкурировать с теплофикационными системами.

На основании результатов исследований режимов работы систем теплоснабжения сделаны выводы о периодах неэффективной работы централизованных систем теплоснабжения. Это переходные периоды в начале и конце отопительного сезона и пиковый период.

Разработанный в диссертации комплекс положений, определяющих общую направленность по совершенствованию технологий обеспечения тепловой нагрузки в отечественных системах теплоснабжения (далее концепция) содержит следующие основные пункты:

1. Совершенствование технологий качественного регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения на ТЭЦ.
2. Низкотемпературное теплоснабжение при преимущественном количественном и качественно-количественном регулировании отпуска теплоты в системах теплоснабжения.
3. Совершенствование структуры систем теплоснабжения с изменением принципов обеспечения базовой и пиковой нагрузок систем теплоснабжения и повышение эффективности технологий обеспечения базовой и пиковой нагрузок систем теплоснабжения.
4. Совершенствование схем ТЭЦ применительно к новым технологиям регулирования и обеспечения базовой и пиковой тепловых нагрузок систем теплоснабжения.
5. Комбинирование различных способов централизованного и децентрализованного регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения в отдельные периоды отопительного сезона.
6. Повышение эффективности работы централизованных теплофикационных систем за счет применения тепловых насосов.

Научно-техническое и технико-экономическое обоснование каждого пункта концепции приведено в следующих главах диссертационной работы. В качестве критериев эффективности приняты экономия условного топлива, снижение затрат электроэнергии на транспорт теплоносителя и потерь теплоты в системах теплоснабжения, увеличение комбинированной выработки электрической энергии на ТЭЦ.

В третьей главе приведено научно-техническое обоснование п. 1 концепции по совершенствованию технологии качественного регулирования тепловой нагрузки в двухконтурных схемах ТЭЦ.

Одним из путей повышения надежности регулирования тепловой нагрузки теплофикационных систем является включение пиковых водогрейных котлов в замкнутый контур двухконтурных схем. Разработаны решения, направленные на повышение надежности работы замкнутого контура, что обеспечивается подпиткой замкнутого контура добавочной питательной водой или водой, которую отбирают после деаэратора питательной воды. Разработана методика расчета температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов, параметры которого необходимо учитывать при обосновании целесообразности применения двухконтурных схем. В таких схемах режим работы водогрейного котла определяет режим работы системы теплоснабжения. Температуру воды в подающем и обратном трубопроводах замкнутого контура предложено рассчитывать по уравнениям:

$$\tau_1^{\text{зам}} = (\tau_1 - \tau_2 - \delta\tau'_0 \alpha_{\text{тэц}})(0,35 + 0,65 \frac{W_6}{W_M} + \frac{1}{\Phi} \sqrt{\frac{W_6}{W_M}}) + \tau_2 + \delta\tau'_0 \alpha_{\text{тэц}}, \quad (1)$$

$$\tau_2^{\text{зам}} = (\tau_1 - \tau_2 - \delta\tau'_0 \alpha_{\text{тэц}})(0,35 + \frac{1}{\Phi} \sqrt{\frac{W_6}{W_M}} - 0,35 \frac{W_6}{W_M}) + \tau_2 + \delta\tau'_0 \alpha_{\text{тэц}}, \quad (2)$$

где $\tau_1^{\text{зам}}$, $\tau_2^{\text{зам}}$ – соответственно температура воды в подающем и обратном трубопроводах замкнутого контура, °С; τ_1 , τ_2 – соответственно температура сетевой воды в подающей и обратной магистралях теплосети, °С; $\delta\tau'_0$ – расчетный перепад температур сетевой воды, °С; $\alpha_{\text{тэц}}$ – коэффициент теплофикации; Φ – параметр подогревателя; W_6 , W_M – большее и меньшее значения водяных эквивалентов теплоносителей, Дж/(с·К).

Расчет температурного графика замкнутого контура является достаточно трудоемким процессом. Для повышения точности, скорости расчета при изменении исходных данных, возможности сравнения и оптимизации параметров температурного графика разработан программный продукт «Расчет температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов в двухконтурных схемах». Результаты расчета по уравнениям (1) и (2) представлены на рис. 2.

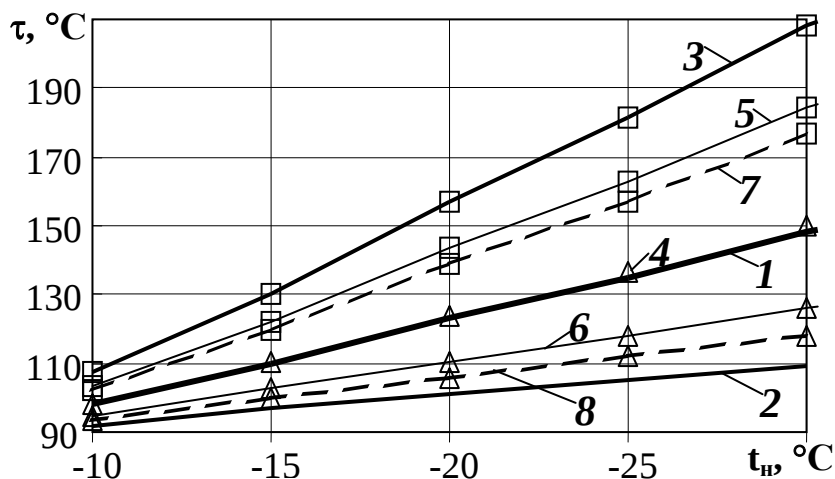


Рис. 2. Температура воды в замкнутом контуре водогрейных котлов при $W_6/W_M = 1,5$: 1 – температура сетевой воды в подающей магистрали теплосети; 2 – температура воды после сетевых подогревателей; 3, 4 – $\tau_1^{\text{зам}}$ и $\tau_2^{\text{зам}}$ при $\Phi=1$; 5, 6 – $\tau_1^{\text{зам}}$ и $\tau_2^{\text{зам}}$ при $\Phi=2$; 7, 8 – $\tau_1^{\text{зам}}$ и $\tau_2^{\text{зам}}$ при $\Phi=3$

Программа обеспечивает выполнение следующих функций: выбор режима работы теплофикационной системы; выбор температурного графика контура системы теплоснабжения; расчет температурного графика централизованной системы теплоснабжения с различными параметрами; расчет температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов ТЭЦ; построение температурных графиков.

В результате расчетного исследования установлено, что параметры работы замкнутого контура необходимо ограничивать следующими значениями: $W_6/W_m \leq 3$; $\Phi \geq 2$. Ограничение обусловлено ухудшением режимных параметров замкнутого контура при превышении указанных величин.

Рассчитаны показатели надежности двухконтурной схемы ТЭЦ с включением водогрейных котлов в замкнутый контур. В зависимости от увеличения времени наработки на отказ водогрейного котла вероятность его безотказной работы увеличивается на 28 %, а вероятность безотказной работы теплоэнергетической системы повышается на 18 % по сравнению с традиционным включением водогрейного котла последовательно за сетевыми подогревателями.

Четвертая глава посвящена совершенствованию способов регулирования отпуска теплоты в теплофикационных системах. Исследования, приведенные в главе 4, являются научно-техническим обоснованием пп. 2–4 разработанной в диссертации концепции совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки в отечественных системах теплоснабжения.

Проведенный анализ показал, что в будущем в отечественных системах теплоснабжения все большее распространение получают способы количественного и качественно-количественного регулирования отпуска теплоты. Достоинствами количественного и качественно-количественного регулирования тепловой нагрузки являются: увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении за счет понижения температуры обратной сетевой воды; возможность применения недорогих методов обработки подпиточной воды; значительная экономия электроэнергии на транспорт теплоносителя за счет ограничения времени работы теплосети с максимальным расходом сетевой воды; снижение количества коррозионных повреждений трубопроводов за счет поддержания температуры сетевой воды в подающей магистрали теплосети постоянной; меньшая инерционность регулирования тепловой нагрузки; более эффективный режим систем отопления.

Приведенные затраты в системы теплоснабжения при реализации количественного регулирования тепловой нагрузки на 8–20 % меньше затрат при качественном регулировании тепловой нагрузки.

Разработаны схемы ТЭЦ с количественным (рис. 3) и качественно-количественным регулированием тепловой нагрузки. Новизна предложенных схем заключается в регулировании тепловой нагрузки систем теплоснабжения количеством параллельно включенных пиковых водогрейных котлов и сетевых подогревателей, что позволяет снизить затраты на водоподготовку более чем в 15 раз, увеличить выработку электроэнергии на тепловом потреблении на 9 %, снизить расход топлива водогрейными котлами на 9 %, уменьшить затраты на транспорт теплоносителя в два раза.

При количественном регулировании температуру сетевой воды в подающей магистрали t_1 поддерживают постоянной. Устанавливают ее исходя из средней температуры насыщения пара верхних отопительных отборов теплофикационных

турбин t^{BO} с учетом средней величины недогрева воды в верхних сетевых подогревателях $\delta t^{BСП}$: $\tau_1 = t^{BO} - \delta t^{BСП}$. Расход сетевой воды в базовой части графика тепловой нагрузки $Q=f(t_n)$ регулируют изменением количества включенных сетевых подогревателей, а в пиковой части графика, при включенных сетевых подогревателях всех турбин, расход сетевой воды регулируют изменением количества водогрейных котлов, включенных параллельно сетевым подогревателям.

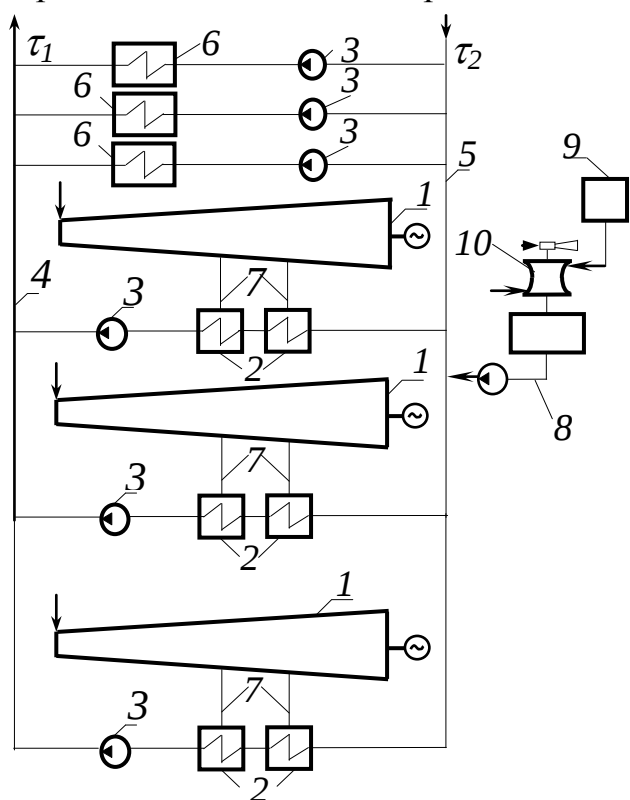


Рис. 3. Схема ТЭЦ с количественным регулированием тепловой нагрузки: 1 – теплофикационная турбина; 2 – сетевые подогреватели; 3 – сетевой насос; 4, 5 – подающий и обратный трубопроводы теплосети; 6 – водогрейный котел; 7 – отопительные отборы пара; 8 – трубопровод подпиточной воды; 9 – узел умягчения и снижения щелочности подпиточной воды; 10 – вакуумный деаэратор

При качественно-количественном регулировании в базовой части графика $Q=f(t_n)$ осуществляют центральное качественное регулирование отпуска теплоты путем изменения температуры сетевой воды, циркулирующей только через сетевые подогреватели, а после полной загрузки сетевых подогревателей, в пиковой части графика $Q=f(t_n)$, осуществляют количественно-качественное регулирование отпуска теплоты, для чего увеличивают расход сетевой воды за счет подачи ее в водогрейные котлы, включенные параллельно сетевым подогревателям.

Регулирование температуры общего потока сетевой воды, подаваемой потребителям, в обоих случаях производят по пониженному температурному графику теплосети 110/70 °С (вместо традиционно применяемого графика 150/70 °С). Утечки воды из теплосети компенсируются подпиточной водой, которая благодаря пониженному температурному графику работы теплосети подвергается противонакипной обработке по упрощенной технологии путем дозирования в воду фосфонатов или их аналогов, что позволяет снизить более чем в 5 раз капитальные затраты в оборудование для подпитки теплосети.

Разработаны методики расчета режимов работы систем теплоснабжения при количественном и качественно-количественном регулировании отпуска теплоты. Существенной особенностью предложенных методик является учет влияния нагрузки горячего водоснабжения на работу систем отопления.

В результате расчетного исследования построены зависимости относительного располагаемого напора на коллекторах станции и относительного

эквивалента расхода воды на отопление от температуры наружного воздуха при количественном регулировании, которые описываются следующими уравнениями:

$$\alpha = \bar{S}_n \left(\frac{\bar{Q}_{op} \delta \tau'_0}{\tau'_1 - t_2} + \beta \bar{Q}_r \frac{\delta \tau'_0}{t_1 - t_2} \right)^2 + \bar{S}_3 \left(\frac{\bar{Q}_{op} \delta \tau'_0}{\tau'_1 - t_2} \right)^2 + \bar{S}_o \left(\frac{\bar{Q}_{op} \delta \tau'_0}{\tau'_1 - t_2} - (1 - \beta) \bar{Q}_r \frac{\delta \tau'_0}{t_1 - t_2} \right)^2; \quad (3)$$

$$\bar{W} = -\bar{W}_r \frac{\delta \tau'_0}{t_1 - t_2} (\beta \bar{S}_n - [1 - \beta] \bar{S}_o) + \sqrt{(\bar{W}_r \frac{\delta \tau'_0}{t_1 - t_2})^2 \{ [\beta \bar{S}_n - (1 - \beta) \bar{S}_o] - [\beta^2 \bar{S}_n + (1 - \beta)^2 \bar{S}_o] \} + \alpha}, \quad (4)$$

где $\bar{W}$ – отношение эквивалента расхода сетевой воды на отопление при любом режиме к эквиваленту расхода при отсутствии отбора воды на горячее водоснабжение; $\bar{W}_r$ – отношение эквивалента расхода воды на горячее водоснабжение к эквиваленту расхода воды на отопление при отсутствии отбора воды на горячее водоснабжение; α – отношение располагаемого напора на теплоисточнике при режиме работы системы теплоснабжения с нагрузками на отопление и горячее водоснабжение к располагаемому напору при режиме только с отопительной нагрузкой; $\bar{S}_n$, $\bar{S}_3$, $\bar{S}_o$ – относительные сопротивления подающей линии, элеваторного узла, обратной линии; t_1 , t_2 – соответственно температура горячей и холодной воды; $\delta \tau'_0$ – расчетный температурный перепад в теплосети; τ'_1 – температура сетевой воды в подающем трубопроводе при расчетных условиях.

Построенные зависимости можно использовать в качестве графиков регулирования при осуществлении количественного (рис. 4, 5) и качественно-количественного регулирования нагрузки в открытых системах теплоснабжения.

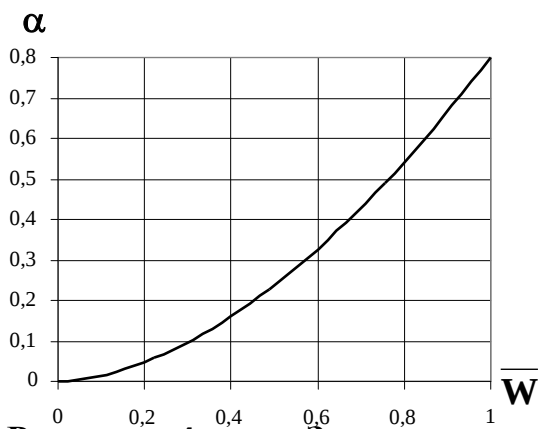


Рис. 4. Зависимость относительного располагаемого напора на станции α от относительного эквивалента расхода воды на отопление $\bar{W}$

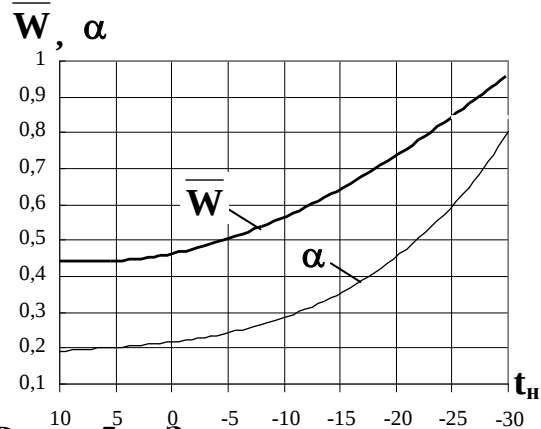


Рис. 5. Зависимость относительного располагаемого напора на станции α и относительного эквивалента расхода воды на отопление $\bar{W}$ от температуры наружного воздуха

Одним из основных показателей энергетической эффективности разработанных технологий является экономия топлива от изменения электрической мощности ТЭЦ, развиваемой на тепловом потреблении, в режиме с количественным регулированием тепловой нагрузки, которая определяется по уравнению:

$$\Delta B_{тф} = [(m_{кол} \cdot N_{тф}^{кол} - N_{сн}^{кол}) - (m_{кач} \cdot N_{тф}^{кач} - N_{сн}^{кач})](b_{э.к} - b_{э.тф})n, \quad (5)$$

где $N_{\text{тф}}^{\text{кол}}$, $N_{\text{тф}}^{\text{кач}}$ – мощность турбины, развиваемой за счет пара отопительных отборов соответственно при количественном и качественном регулировании, кВт; $N_{\text{сн}}^{\text{кол}}$; $N_{\text{сн}}^{\text{кач}}$ – мощность, потребляемая сетевыми насосами, соответственно при количественном и качественном регулировании тепловой нагрузки, кВт; $b_{\text{э.к}}$, $b_{\text{э.тф}}$ – удельный расход условного топлива соответственно на конденсационную и теплофикационную выработку электроэнергии, кг/(кВт·ч); $m_{\text{кол}}$, $m_{\text{кач}}$ – число одновременно включенных турбин на ТЭЦ при количественном и качественном регулировании тепловой нагрузки; n – количество часов работы турбин в отопительных периодах.

Увеличение мощности ТЭЦ, развиваемой на паре отопительных отборов при количественном регулировании тепловой нагрузки, позволяет сэкономить более 65 млн руб. при стоимости топлива 3700 руб. за тонну.

С целью изучения особенностей функционирования систем теплоснабжения при пониженном температурном графике и переменном расходе сетевой воды в тепловой сети выполнено моделирование расчетных режимов работы системы теплоснабжения с использованием программно-расчетного комплекса ZuluThermo, интегрированного с геоинформационной системой ГИСZulu.

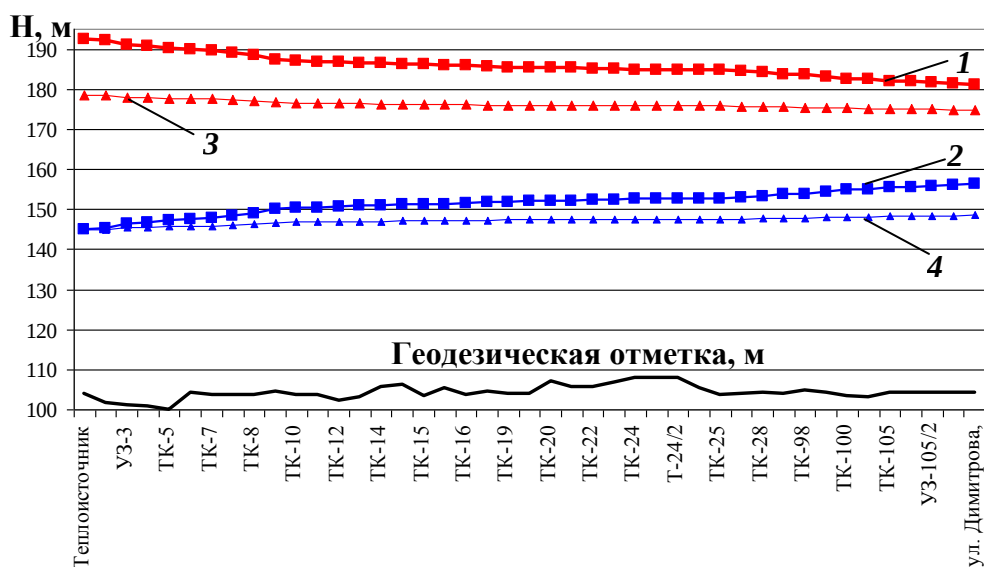


Рис. 6. Пьезометрические графики системы теплоснабжения: 1, 2 – при температурном графике 110/70 °С; 3, 4 – при температурном графике 150/70 °С

Моделирование режимов проводилось на основе действующей системы теплоснабжения мощностью 38 Гкал/ч для температурных графиков с параметрами 150/70 °С и 110/70 °С при неизменных диаметрах трубопроводов тепловых сетей. Производился гидравлический расчет тепловой сети, определялись расчетные расходы сетевой воды и потери напора в трубопроводах, располагаемые напоры в узловых точках тепловой сети и у потребителей. Смоделированный режим работы системы теплоснабжения при температурном графике 150/70 °С соответствует качественному способу регулирования отпуска теплоты. Режим работы системы теплоснабжения при температурном графике 110/70 °С – количественному способу регулирования отпуска теплоты.

В результате моделирования гидравлических режимов построены пьезометрические графики, на основании которых определена возможность работы

системы теплоснабжения при пониженном температурном графике и количественном регулировании отпуска теплоты без изменения диаметров трубопроводов тепловой сети (рис. 6).

Увеличение расхода сетевой воды в системе теплоснабжения не приводит к нарушению качества и надежности теплоснабжения потребителей при соответствующей компенсации располагаемого напора на теплоисточнике и гидравлической наладке потребителей.

Исследования, приведенные в **пятой главе**, посвящены совершенствованию структуры теплофикационных систем и повышению эффективности регулирования тепловой нагрузки в них и являются научно-техническим обоснование пп. 3–5 разработанной в диссертации концепции совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки.

Необходимость структурных изменений в системах теплоснабжения подтверждается многочисленными исследованиями отечественных ученых. Основоположником изменения структуры отечественных систем теплоснабжения является профессор Андрющенко А.И. Под его руководством в Саратовском государственном техническом университете (СарГТУ) были разработаны и технико-экономически обоснованы комбинированные системы энергоснабжения. Отдельные технологии комбинированного теплоснабжения разработаны и технико-экономически обоснованы в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ).

Особенностью технологий комбинированного теплоснабжения, разработанных в СарГТУ и НГТУ, является сохранение последовательной структурной схемы системы теплоснабжения.

В диссертации разработан ряд схем комбинированного теплоснабжения, которые объединяют в себе структурные элементы централизованных и децентрализованных систем теплоснабжения. Основным отличием предложенных структурных схем систем комбинированного теплоснабжения является параллельное размещение пиковых и основных теплоисточников (рис. 7).

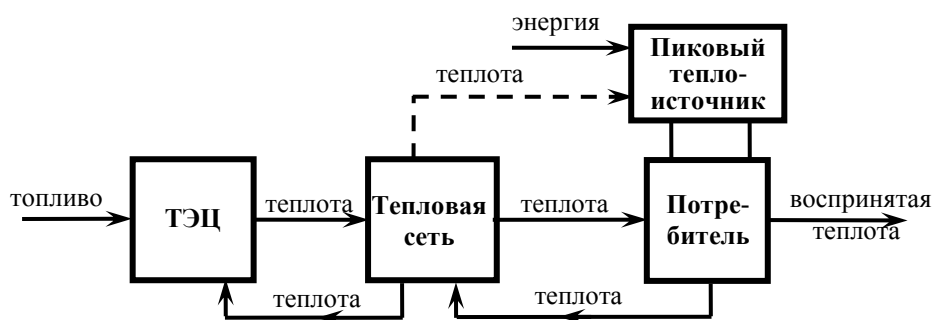


Рис. 7. Структурная схема комбинированной системы теплоснабжения с параллельным включением основных и пиковых теплоисточников

Пример такой комбинированной системы теплоснабжения приведен на рис. 8. Преимуществом разработанных технологий является возможность в каждой системе теплоснабжения выбирать момент включения пикового теплоисточника и задавать его режим работы в зависимости от требований или пожеланий потребителей.

Комбинированные системы теплоснабжения обладают более высокой степенью надежности по сравнению с традиционными системами за счет резервирования тепловой мощности автономными теплоисточниками при аварийных ситуациях в централизованных системах теплоснабжения. Также

исключаются протяженные тепловые сети от пикового источника до систем теплоснабжения, являющиеся источником повышенных тепловых потерь в существующих системах теплоснабжения.

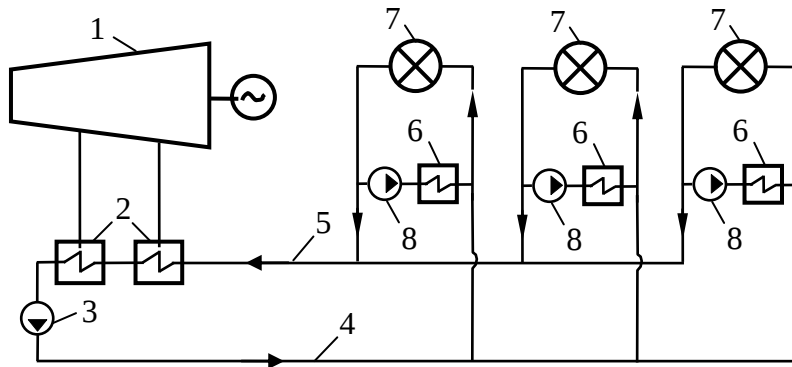


Рис. 8. Комбинированная система теплоснабжения с централизованными и местными теплоисточниками: обозначения 1–5 те же, что на рис. 3; 6 – автономные пиковые источники теплоты; 7 – системы теплоснабжения абонентов; 8 – насос у абонента

Годовая экономия условного топлива, ΔB , т/год, в комбинированной системе теплоснабжения может быть представлена как

$$\Delta B = \Delta B_{\text{тф}} + \Delta B_0 + \Delta B_{\text{пик}} + \Delta B_{\text{н}}, \quad (6)$$

где $\Delta B_{\text{тф}}$ – изменение расхода условного топлива при переходе от централизованной системы теплоснабжения к комбинированной, т/год; ΔB_0 – изменение расхода условного топлива на энергетические котлы в комбинированной системе теплоснабжения, т/год; $\Delta B_{\text{пик}}$ – изменение расхода условного топлива при передаче тепловой нагрузки с пиковых водогрейных котлов ТЭЦ на автономные пиковые теплоисточники, т/год; $\Delta B_{\text{н}}$ – изменение расхода условного топлива на выработку электроэнергии для сетевых насосов и насосов, установленных в местных системах абонентов, т/год.

Годовая экономия условного топлива, определенная по уравнению (6) в комбинированной системе теплоснабжения, составляет $\Delta B = 2993$ т/год или 11,07 млн руб./год при средней цене условного топлива 3700 руб. за тонну. Расчет производился для ТЭЦ с расчетной тепловой нагрузкой $Q = 360$ Гкал/ч.

С целью повышения эффективности работы комбинированных систем теплоснабжения предложено разделить температурный график на три периода по режимам регулирования: переходный, базовый и пиковый (рис. 9). Особенностью каждого периода регулирования является совмещение центрального и местного регулирования тепловой нагрузки в системах теплоснабжения в отдельные периоды отопительного сезона.

В базовом периоде осуществляется центральное качественное регулирование (линии 2–3 и 2'–3' на рис. 9). В пиковом и переходных периодах осуществляется комбинирование центрального качественного и местного количественного регулирования.

В переходном периоде возможно несколько комбинаций режимов совместной работы централизованного и местного теплоисточников. В первом случае централизованный источник работает по графику центрального качественного регулирования без излома (линии 1–2 и 1'–2' на рис. 9). Нагрузка горячего

водоснабжения обеспечивается местным теплоисточником, который работает по заданному потребителем температурному графику (условно показан линиями 5–2 и 5'–2' на рис. 9). Во втором случае, в централизованной системе теплоснабжения для обеспечения нагрузки горячего водоснабжения выдерживается постоянная температура сетевой воды в подающей магистрали тепловой сети (линии 5–2 и 5'–2' на рис. 9). В местных системах теплоснабжения обеспечивается регулирование тепловой нагрузки по оптимальному температурному графику (линии 1–2 и 1'–2' на рис. 9). Способ комбинированного теплоснабжения определяется с учетом технологических решений применяемых в системе теплоснабжения. В пиковом периоде ТЭЦ обеспечивает базовую нагрузку системы теплоснабжения по температурному графику, обозначенному линиями 3–4 и 3'–4' на рис. 9. Пиковая нагрузка систем теплоснабжения обеспечивается с помощью местных пиковых теплоисточников, установленных непосредственно у абонентов.

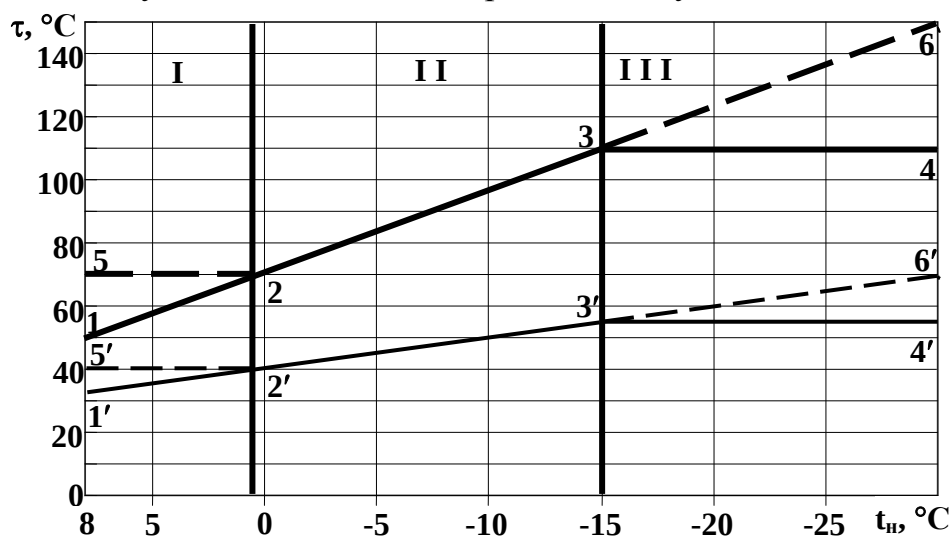


Рис. 9. Зонированный температурный график: I – переходный период; II – базовый период; III – пиковый период

В системе теплоснабжения г. Ульяновска на ряде центральных тепловых пунктов (ЦТП) с установленной тепловой мощностью более 143 Гкал/ч с 2008 г. реализовано комбинированное регулирование тепловой нагрузки в переходные периоды отопительного периода. Регулирование обусловлено необходимостью компенсации излома температурного графика, повышения экономичности и качества теплоснабжения потребителей, увеличения теплофикационной выработки электроэнергии на ТЭЦ; снижения расхода топливно-энергетических ресурсов. Регулирование реализовано по зонированному температурному графику (рис. 9). При этом в системе теплоснабжения от ТЭЦ поддерживалась постоянная температура сетевой воды в подающем трубопроводе теплосети (линия 5–2 на рис. 9). В системах отопления регулирование теплового потребления осуществлялось по температурному графику, обозначенному линиями 1–2 и 1'–2' на рис. 9.

Результатом такого комбинированного регулирования явилось существенное снижение расхода сетевой воды (10–61 %) и теплоты (11–52 %) на ЦТП в отопительные периоды 2008-2010 гг. относительно периода, когда комбинированное регулирование не осуществлялось (2006 г.). На рис. 10 приведена диаграмма среднесуточного теплоснабжения ЦТП в различные отопительные периоды.

В результате регулирования температура сетевой воды в системе теплоснабжения понизилась на 5–8 °С, что дает годовой экономический эффект до 5 млн руб.

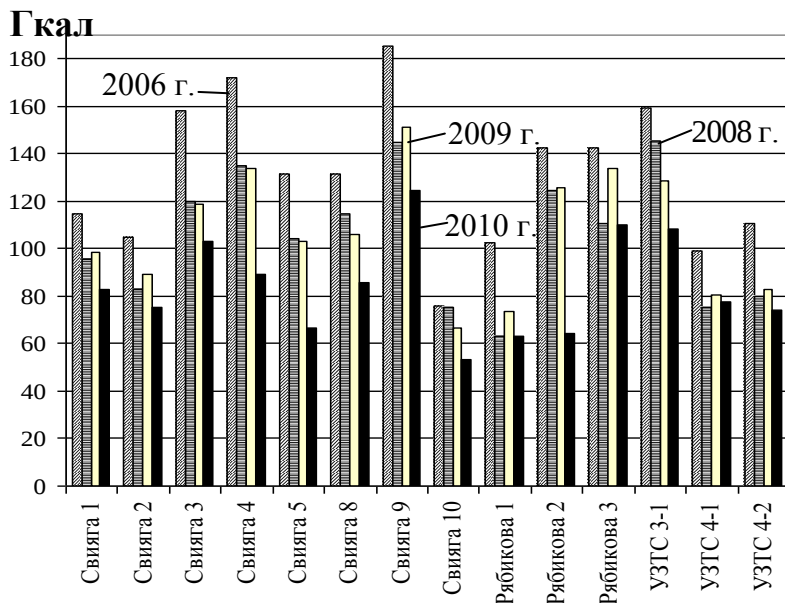


Рис. 10. Диаграмма среднесуточного теплопотребления ЦТП в апреле 2006 г., 2008 г., 2009 г., 2010 г.

Для определения границ применимости и оценки степени изменения температуры обратной сетевой воды при комбинированном регулировании тепловой нагрузки проведено экспериментальное исследование режимов работы системы теплоснабжения г. Ульяновска методом пассивного эксперимента. Производился сбор данных и анализ режимов работы ЦТП в переходные периоды отопительных сезонов 2008–2011 гг. в режиме обычного функционирования системы теплоснабжения. Результаты эксперимента, проведенного в апреле 2011 г., представлены в табл. 1 и на рис. 11.

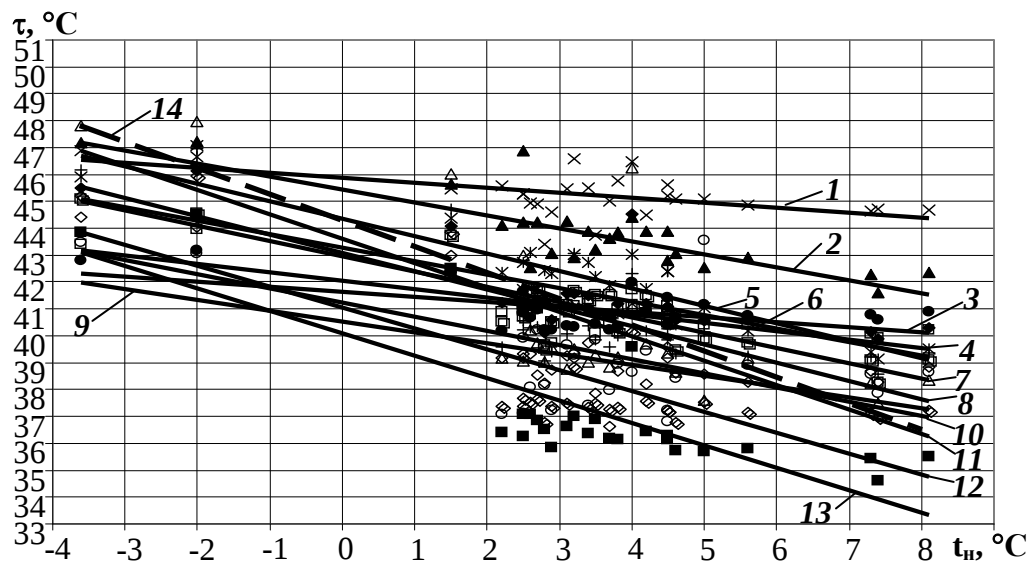


Рис. 11. Графическое изображение результатов пассивного эксперимента в апреле 2011 г.: 1 – ЦТП УЗТС 3-2; 2 – ЦТП «Рябикова 3»; 3 – ЦТП УЗТС 3-1; 4 – ЦТП «Рябикова 2»; 5 – ЦТП «Свята 2»; 6 – ЦТП «Рябикова 1»; 7 – ЦТП УЗТС 4-1; 8 – ЦТП «Свята 4»; 9 – ЦТП УЗТС 4-2; 10 – ЦТП «Свята 9»; 11 – ЦТП «Свята 8»; 12 – ЦТП «Свята 1»; 13 – ЦТП «Свята 5»; 14 – τ_2 по температурному графику

При обработке результатов пассивного эксперимента для определения взаимосвязи между независимой (температурой наружного воздуха, t_n) и зависимой (температурой обратной сетевой воды, τ_2) величинами применен корреляционно-регрессионный анализ. Обработка результатов эксперимента производилась с использованием программ Microsoft Office Excel 2007, Statistica 10. Проведена статистическая проверка адекватности уравнений регрессии, в результате которой установлено, что по всем оцениваемым параметрам уравнения регрессии, коэффициенты регрессии и коэффициент корреляции являются статистически значимыми. Значения средней ошибки аппроксимации во всех опытах не превышают 10 %, что является подтверждением качества подобранной модели.

Таблица 1

Результаты пассивного эксперимента 2011 г.

№	Наименование ЦТП	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции, r
1	Рябикова 1	$\tau_2 = 43,28 - 0,50 \cdot t_n$	-0,77
2	Рябикова 2	$\tau_2 = 42,04 - 0,31 \cdot t_n$	-0,78
3	Рябикова 3	$\tau_2 = 45,44 - 0,48 \cdot t_n$	-0,77
4	ЦТП Свяга-1	$\tau_2 = 41,05 - 0,78 \cdot t_n$	-0,75
5	ЦТП Свяга-2	$\tau_2 = 44,36 - 0,65 \cdot t_n$	-0,91
6	ЦТП Свяга-4	$\tau_2 = 43,07 - 0,68 \cdot t_n$	-0,79
7	ЦТП Свяга-5	$\tau_2 = 40,10 - 0,83 \cdot t_n$	-0,81
8	ЦТП Свяга-8	$\tau_2 = 43,61 - 0,91 \cdot t_n$	-0,73
9	ЦТП Свяга-9	$\tau_2 = 41,23 - 0,53 \cdot t_n$	-0,72
10	ЦТП УЗТС 3-1	$\tau_2 = 41,63 - 0,19 \cdot t_n$	-0,58
11	ЦТП УЗТС 3-2	$\tau_2 = 45,89 - 0,19 \cdot t_n$	-0,54
12	ЦТП УЗТС 4-1	$\tau_2 = 42,96 - 0,57 \cdot t_n$	-0,88
13	ЦТП УЗТС 4-2	$\tau_2 = 40,54 - 0,40 \cdot t_n$	-0,51

В результате экспериментов установлено, что температура обратной сетевой воды на ЦТП изменяется в широких пределах на 6 °С – 12 °С от расчетной при различных температурах наружного воздуха. Коэффициент корреляции находится в пределах 0,48–0,91, что подтверждает хорошую взаимосвязь между переменными. Однако фактическая температура обратной сетевой воды на некоторых объектах существенно отличается от рассчитанной по температурному графику. Это расхождение объясняется разрегулировкой внутренних систем отопления, значительной инерцией системы теплоснабжения, различными теплозащитными свойствами зданий. В результате эксперимента установлено, что при групповом регулировании целесообразно производить регулирование тепловой нагрузки потребителей по параметрам теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети. Регулирование тепловой нагрузки по температуре обратной сетевой воды целесообразно осуществлять на отдельных зданиях.

Фактическая годовая экономия внедренного комбинированного регулирования составляет 10–30 млн руб. при сроке окупаемости до 30 суток, что свидетельствует о высоком инвестиционном потенциале энергосберегающего мероприятия. Проект обладает высокой рентабельностью. Нерентабельным проект становится только при ставке дисконта более 96,12 % при высоких капитальных затратах (более 16 млн руб.) и низкой экономии тепловой энергии на ЦТП (менее 1 Гкал/ч).

В **шестой главе** исследованы режимы работы и разработаны способы повышения эффективности регулирования тепловых нагрузок местных систем теплоснабжения. Исследования, приведенные в главе 6, являются научно-техническим обоснованием п. 5 разработанной в диссертации концепции совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки.

Приведены результаты обследования внутридомовых систем горячего водоснабжения ряда жилых домов, в результате которого выявлено несоответствие фактических и расчетных режимов работы систем горячего водоснабжения. Одно из несоответствий заключается в существенном превышении циркуляционного расхода расчетных значений. Расход воды в циркуляционных трубопроводах систем горячего водоснабжения жилых домов G_4 составляет 40–90% от расхода в подающем трубопроводе систем горячего водоснабжения G_3 и 70–500% от расхода воды на горячее водоснабжение G_r . Необходимость обеспечивать повышенный циркуляционный расход обусловлена требованиями нормативно-технической документации выдерживать температуру горячей воды в точках водоразбора не ниже 60 °С независимо от типа системы.

Увеличенный циркуляционный расход приводит к повышению температуры воды в обратном трубопроводе теплосети, что влияет на экономичность работы ТЭЦ.

В то же время, отсутствие циркуляции в системах горячего водоснабжения негативно влияет на режимы их работы и приводит к нарушению качества теплоснабжения.

Целесообразно в системах ГВС применять технологии регулирования, позволяющие учесть неравномерность режимов их работы. Одной из таких технологий является технология поддержания температуры горячей воды вблизи нижнего предела в период минимального водоразбора, что позволяет добиться значительной экономии теплоты.

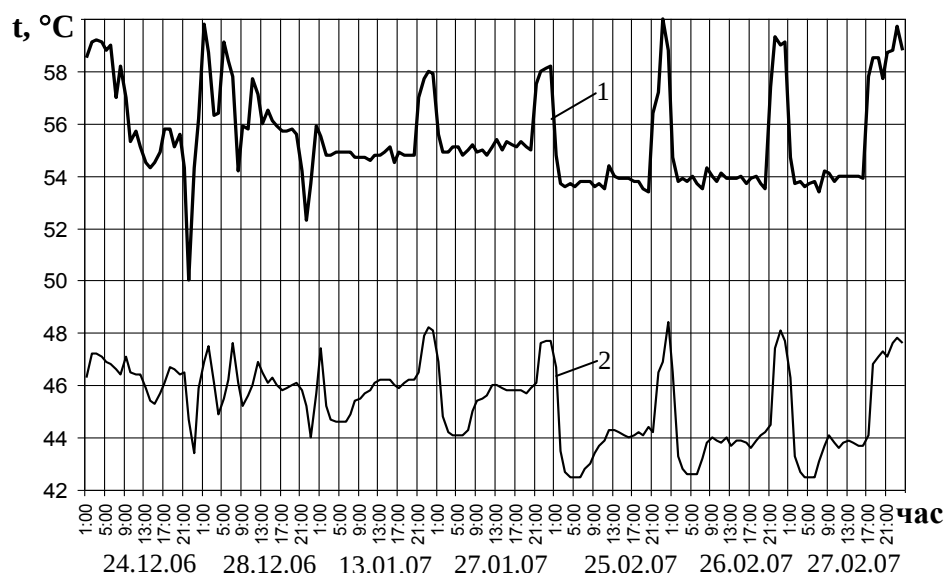


Рис. 12. Динамика изменения температуры воды в системе ГВС на ЦТП Искра-1:
1, 2 – температура в подающем и обратном трубопроводах ГВС

В системе теплоснабжения г. Ульяновска на 25 ЦТП с суммарной расчетной максимальной тепловой нагрузкой ГВС равной 171 Гкал/ч реализовано автоматическое понижение параметров в периоды минимального водоразбора. Результатом такого

регулирования является снижение расхода теплоносителя и тепловой энергии на ЦТП, снижение затрат на транспорт теплоносителя и понижение температуры обратной сетевой воды. Режим работы одного из ЦТП представлен на рис. 12.

Анализ режимов работы показывает, что снижение теплопотребления ЦТП составляет более чем 2,5 %. Суммарная ежегодная экономия тепловой энергии на всех ЦТП за счет ночного понижения температуры ГВС составляет более 3,96 млн руб.

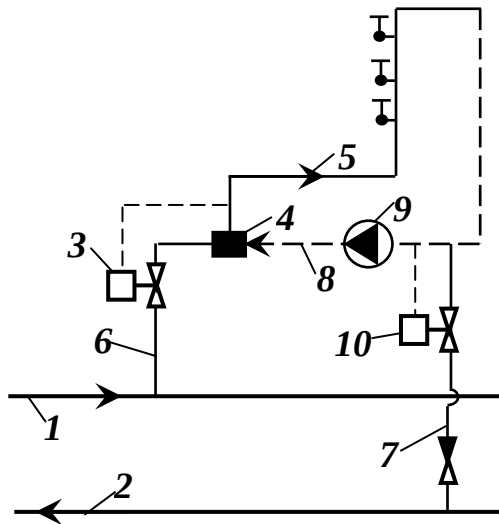


Рис. 13. Система горячего водоснабжения: 1, 2 – подающий и обратный трубопроводы теплосети; 3 – регулятор температуры; 4 – смесительное устройство; 5 – подающий трубопровод системы ГВС; 6, 7 – подающий и обратный смесительные трубопроводы; 8 – циркуляционный трубопровод системы ГВС; 9 – циркуляционный насос; 10 – регулятор подпитки

Разработаны технические решения по регулированию расхода воды, циркулирующей в системе горячего водоснабжения, в которых заложен принцип обеспечения нагрузки горячего водоснабжения с учетом параметров воды в водоразборных точках.

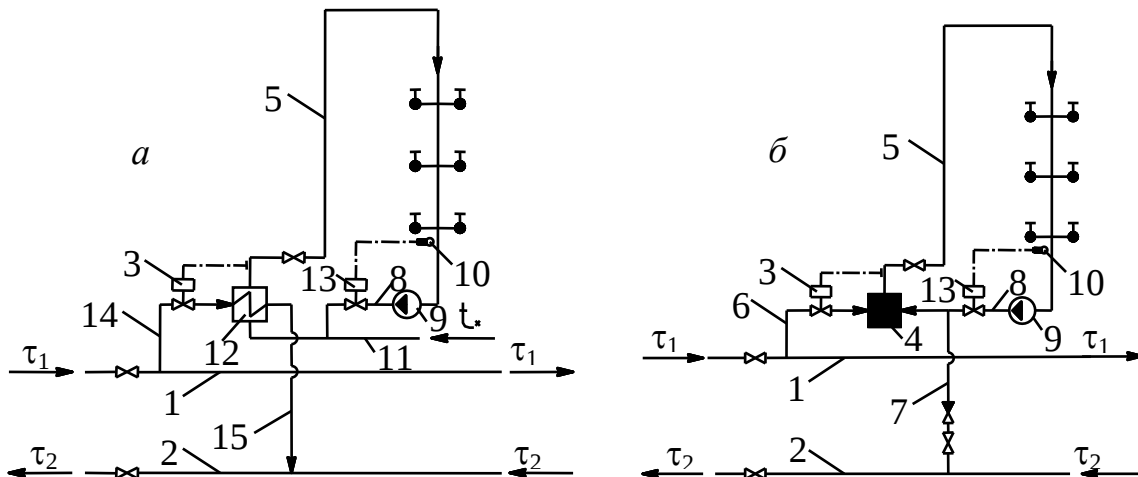


Рис. 14. Схемы систем горячего водоснабжения с регулированием циркуляции горячей воды: *а* – в закрытой системе теплоснабжения; *б* – в открытой системе теплоснабжения; обозначения 1–9 те же, что на рис. 13; 10 – датчик температуры; 11 – трубопровод исходной воды; 12 – подогреватель; 13 – регулятор температуры в циркуляционном трубопроводе; 14, 15 – подающий и обратный подводящие сетевые трубопроводы

Особенностью технического решения, представленного на рис. 13, является подача циркуляционной воды системы горячего водоснабжения вместе с обратной сетевой водой на вход смесительного устройства 4, что позволяет снизить расход сетевой воды на горячее водоснабжение из обратного трубопровода теплосети 2.

В других технических решениях осуществляется регулирование расхода горячей воды, поступающей на циркуляцию, с помощью регулятора температуры по сигналу от датчика температуры горячей воды, установленного в циркуляционном трубопроводе после водоразборных приборов (рис. 14). Расход воды в циркуляционном трубопроводе поддерживают не постоянным, а переменным: при максимальном разборе горячей воды из водоразборных приборов расход циркулирующей воды снижают с помощью регулятора 13 по сигналу от датчика 10. При минимальном разборе горячей воды потребителями расход циркулирующей в трубопроводе 8 воды увеличивают для поддержания нормативной температуры горячей воды в системе, благодаря чему повышают качество работы системы горячего водоснабжения.

Предложенные решения позволяют повысить качество и экономичность работы систем горячего водоснабжения путем обеспечения постоянной нормативной температуры горячей воды, поступающей к водоразборным приборам потребителей, при минимально необходимом для этого расходе воды в циркуляционном трубопроводе.

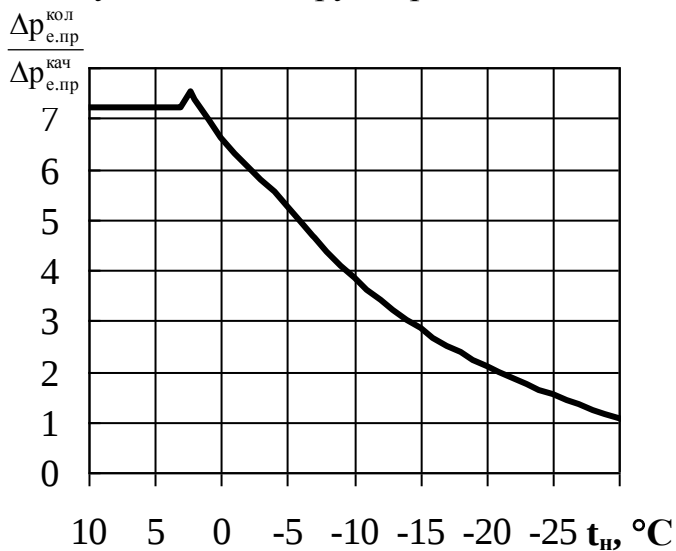


Рис. 15. Зависимость отношения естественного циркуляционного давления при количественном и качественном регулировании от температуры наружного воздуха

Произведен анализ влияния способа регулирования отпуска теплоты на режимы работы систем отопления. В результате расчетного исследования установлено, что при переменном расходе воды в системе теплоснабжения на режим работы систем отопления существенное влияние оказывает естественное циркуляционное давление. Естественное циркуляционное давление увеличивается с повышением температуры наружного воздуха. При температуре наружного воздуха, соответствующей излому температурного графика, и количественном регулировании естественное циркуляционное давление $\Delta p_{\text{епр}}^{\text{кол}}$ увеличивается более чем в 7 раз по сравнению с естественным циркуляционным давлением $\Delta p_{\text{епр}}^{\text{кач}}$ при качественном регулировании. Повышение естественного циркуляционного давления является следствием увеличения температурного перепада в системе отопления (рис. 15) и позволяет уменьшить долю давления, создаваемого насосом, и, тем самым, снизить затраты на циркуляцию воды в системе отопления.

Для повышения надежности работы теплофикационных систем при переменном расходе сетевой воды в тепловой сети разработаны способы стабилизации гидравлических режимов местных систем отопления.

В разработанных решениях регулирование тепловой производительности местной системы теплоснабжения производят изменением расхода воды в обратном трубопроводе системы отопления с помощью регулятора расхода, установленного после

системы отопления. Подобное регулирование наиболее точно отвечает принципам количественного и качественно-количественного регулирования тепловой нагрузки и позволяет создать у всех абонентов тепловой сети необходимую для центрального регулирования пропорциональную разрегулировку систем отопления. Установка регулятора расхода после системы отопления позволяет свести к минимуму влияние нагрузки горячего водоснабжения на работу системы отопления без значительного увеличения расхода сетевой воды в тепловой сети (рис. 16а). Гидравлическую защиту отопительных приборов системы отопления от превышения давления в подающей магистрали теплосети целесообразно осуществлять путем установки на подающем стояке системы отопления регулятора давления, связанного с датчиком давления в системе отопления (рис. 16б).

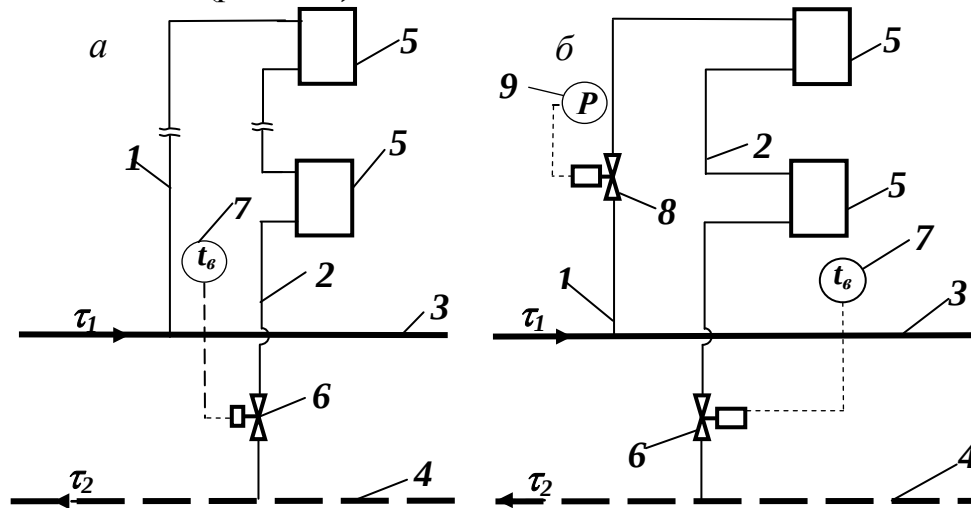


Рис. 16. Схемы систем отопления со стабилизацией гидравлических режимов: 1, 2 – подающий и обратный стояки системы отопления; 3, 4 – подающий и обратный трубопроводы тепловой сети; 5 – отопительный прибор; 6 – регулятор расхода; 7 – датчик температуры воздуха в отапливаемом помещении; 8 – регулятор давления; 9 – датчик давления воды

При установке приборов автоматического регулирования и гидравлической защиты на абонентском вводе актуальность приобретают вопросы определения гидравлического сопротивления регулирующих клапанов при изменении расхода воды.

График на рис. 17 позволяет получить представление о том, как должно изменяться сопротивление клапана при переменном расходе воды через абонентскую установку, определяемое зависимостью:

$$S = \frac{10 \cdot \bar{V}^2}{K_v^2 \cdot \Delta H}, \quad (7)$$

где $\bar{V} = V/V'$ – отношение расхода воды на абонентскую установку при текущем положении штока клапана к расходу воды через полностью открытый клапан; $\Delta H = (H_1 - H_2)/(H'_1 - H'_2)$ – отношение потерь напора в абонентской установке при текущем положении штока клапана к потерям напора в абонентской установке при полностью открытом клапане; K_v – условная пропускная способность клапана, м³/ч. Регулирующий клапан, установленный после системы отопления, позволяет также повысить гидравлическую устойчивость абонентской установки при изменении располагаемого напора на вводе и переменном расходе сетевой воды в тепловых

сетях и обеспечить заданный режим регулирования при любых гидравлических условиях в тепловой сети.

Проведенные исследования показывают необходимость 100%-й автоматизации абонентских установок при переводе систем теплоснабжения на количественное и качественно-количественное регулирование тепловой нагрузки систем теплоснабжения.

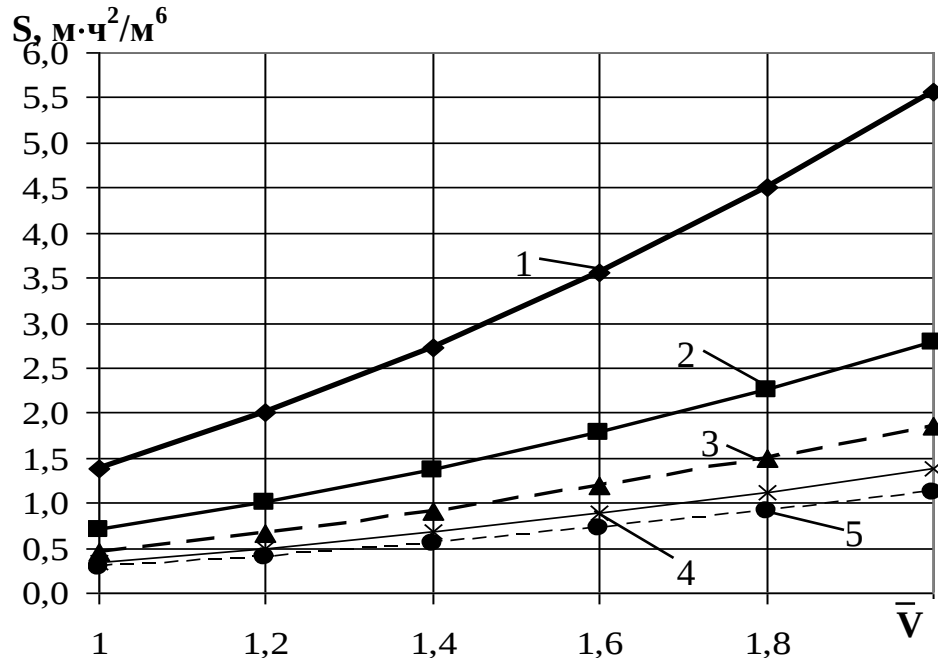


Рис. 17. Зависимость текущего значения сопротивления регулирующего клапана от относительного расхода сетевой воды через систему отопления при различных относительных располагаемых напорах на вводе: 1 – $\Delta H = 0,2$; 2 – $\Delta H = 0,4$; 3 – $\Delta H = 0,6$; 4 – $\Delta H = 0,8$; 5 – $\Delta H = 1$

В седьмой главе разработаны и исследованы энергосберегающие технологии низкотемпературного комбинированного теплоснабжения на основе тепловых насосов (ТН), что является научно-техническим обоснованием предложенной в диссертации пп. 3, 5, 6 концепции совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки в отечественных системах теплоснабжения.

В предложенных схемах реализован новый подход к регулированию отпуска теплоты в теплофикационных системах без излома температурного графика. Нагрузка горячего водоснабжения обеспечивается при помощи тепловых насосов, низкопотенциальным источником теплоты для которых является сетевая вода, при этом коэффициент преобразования ТН составляет $\phi = 3,98\text{--}5,01$ (рис. 18).

Одним из способов повышения эффективности работы системы теплоснабжения с ТН и увеличения часов его работы является включение испарителя ТН в схему теплового пункта таким образом, чтобы греющий агент можно было подавать из подающего и обратного трубопроводов теплосети. Охладитель конденсата целесообразно по греющей среде подключить к трубопроводу обратной сетевой воды по ходу движения воды после отбора греющего агента в испаритель ТН.

Произведен термодинамический расчет циклов ТН при использовании в качестве низкопотенциального источника теплоты сетевой воды из подающего

трубопровода. В таком режиме работы коэффициент преобразования ТН составляет $\varphi=5,98-8,61$.

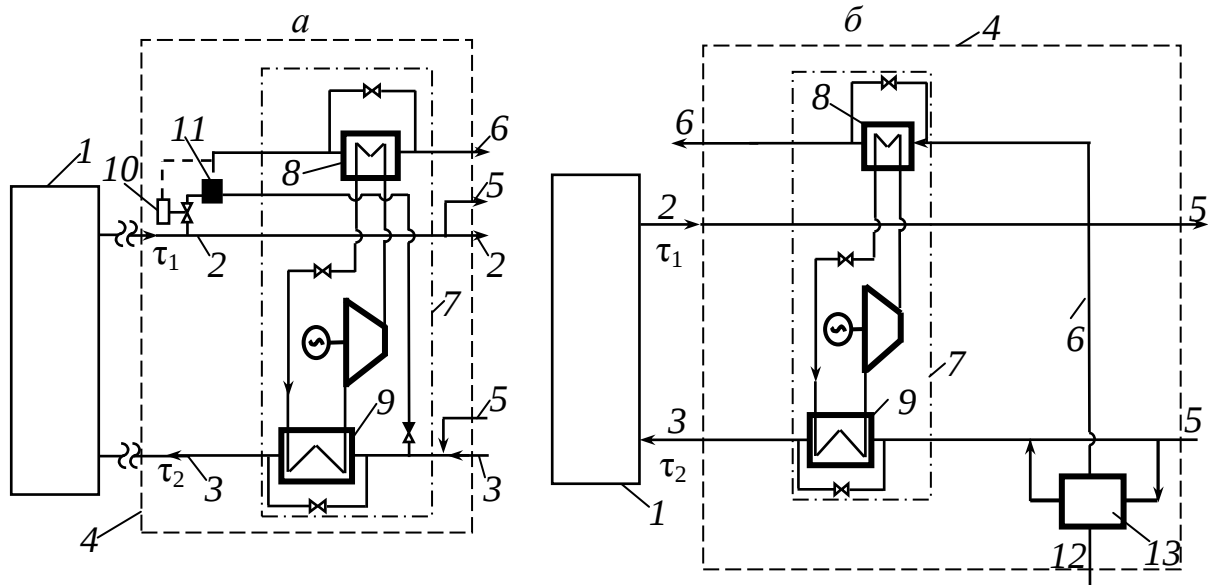


Рис. 18. Принципиальная схема системы теплоснабжения с тепловым насосом: *а* – открытая система теплоснабжения; *б* – закрытая система теплоснабжения; 1 – теплоисточник; 2, 3 – подающий и обратный трубопроводы тепловой сети; 4 – тепловой пункт; 5 – трубопроводы систем отопления; 6 – трубопровод горячего водоснабжения; 7 – тепловой насос; 8, 9 – конденсатор и испаритель теплового насоса; 10 – регулятор температуры; 11 – смеситель; 12 – трубопровод холодной воды; 13 – подогреватель нижней ступени; τ_1 , τ_2 – температура сетевой воды соответственно в подающем и обратном трубопроводах теплосети

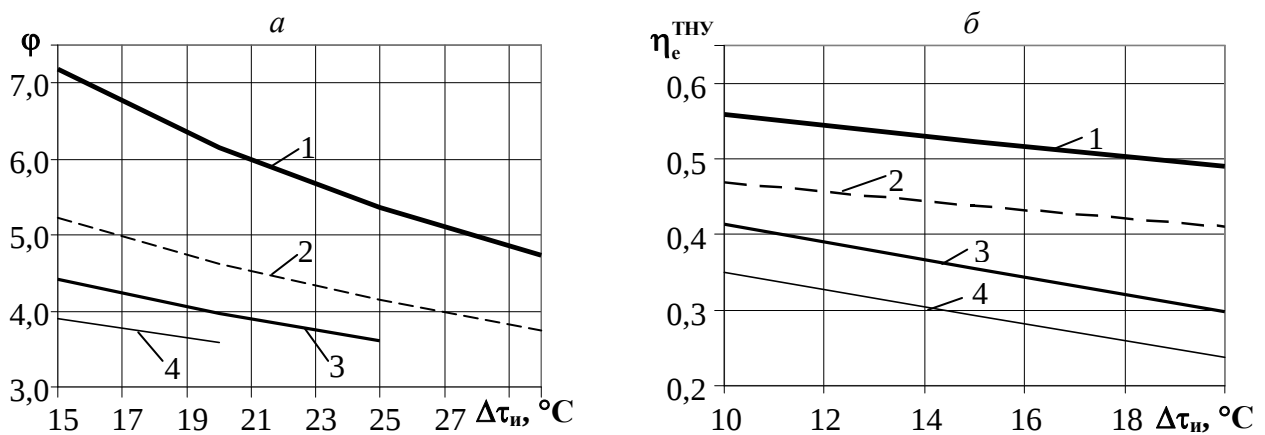


Рис. 19. Зависимость коэффициента преобразования ТН (а) и эксергетического КПД цикла ТН (б) от температурного перепада сетевой воды в испарителе $\Delta\tau_n$ при различных температурах теплоносителя на входе в испаритель ТН τ_n : 1 – $\tau_n = 55$ °C; 2 – $\tau_n = 44$ °C; 3 – $\tau_n = 37$ °C; 4 – $\tau_n = 31$ °C

Произведен эксергетический анализ цикла ТН, в результате которого определены эксергетические КПД ТН при различных режимах его работы. Результаты эксергетического анализа полностью подтверждают результаты термодинамических расчетов: наибольшим эксергетическим КПД обладает одноступенчатый цикл ТН с переохлаждением. На рис. 19 представлены значения коэффициента преобразования ТН и эксергетического КПД цикла ТН при различных режимах ее работы.

Предложен критерий эффективности применения теплового насоса, на основании которого возможно с учетом основных эксплуатационных затрат оценить целесообразность включения теплового насоса в системе теплоснабжения. Экономия тепловой энергии ΔQ при работе системы теплоснабжения с использованием технических решений, представленных на рис. 18, формируется за счет разности теплотребления при работе системы теплоснабжения с изломом и без излома температурного графика в переходные периоды отопительного сезона. Основные затраты при работе теплового насоса будут состоять из стоимости потребленной компрессором электроэнергии W_k .

Критерий эффективности применения теплового насоса K может быть представлен в виде

$$K = \frac{\Delta Q \cdot T_{тэ}}{W_k \cdot T_э} > 1, \quad (8)$$

где $\Delta Q = G \cdot c (\Delta t_{и} - \tau_1 + \tau_2)$ – количество сэкономленной тепловой энергии, Гкал; $\Delta t_{и}$ – температурный напор в системе теплоснабжения в точке излома температурного графика, °С, для условий г. Ульяновска $\Delta t_{и} = 28$ °С; G – расход сетевой воды, кг/ч; c – теплоемкость, ккал/(кг·°С); τ_1, τ_2 – соответственно температура воды в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети по температурному графику без излома, °С; W_k – количество потребленной компрессором электроэнергии, кВт·ч; $T_{тэ}$ – тариф на тепловую энергию, руб./Гкал; $T_э$ – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч.

На рис. 20 представлена зависимость критерия эффективности применения теплового насоса от температуры наружного воздуха и величины теплотребления в точке излома температурного графика, построенная на основании следующих исходных данных: тариф на тепловую энергию $T_{тэ} = 1360$ руб./Гкал; тариф на электроэнергию $T_э = 4$ руб./кВт·ч; теплотребление в точке излома температурного графика $Q = 1-3$ Гкал/ч.

При соотношении $K > 1$, экономия тепловой энергии за счет отказа от излома температурного графика превышает затраты на привод теплового насоса, что соответствует эффективному применению теплового насоса в системе теплоснабжения. В случае, если $K < 1$, то потребление компрессора превышает экономию тепловой энергии и применять тепловой насос невыгодно.

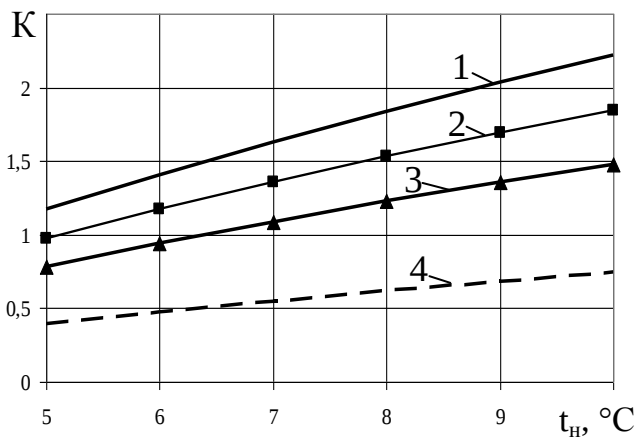


Рис. 20. Зависимость критерия эффективности применения теплового насоса от температуры наружного воздуха и величины теплотребления в точке излома температурного графика: 1 – теплотребление в точке излома 3 Гкал/ч; 2 – 2,5 Гкал/ч; 3 – 2 Гкал/ч; 4 – 1 Гкал/ч

Экономический эффект разработанных технологий формируется за счет увеличения теплофикационной выработки электроэнергии на ТЭЦ, снижения потерь

теплоты в тепловых сетях, снижения затрат на транспорт теплоносителя, уменьшение потребления топливно-энергетических ресурсов.

Чистый дисконтированный доход от реализации разработанных технологий для системы теплоснабжения мощностью 140 МВт составляет от 12,3 млн руб. до 135,4 млн руб. при сроке окупаемости от 6,3 до 10,5 лет, что свидетельствует об инвестиционной привлекательности разработанных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании исследования этапов и особенностей исторического развития, анализа современного состояния централизованного теплоснабжения в России и зарубежного опыта теплоснабжения разработана концепция совершенствования технологий обеспечения тепловой нагрузки в отечественных системах теплоснабжения. Основные положения этой концепции предусматривают развитие в отечественных теплофикационных системах низкотемпературного теплоснабжения при количественном и качественно-количественном регулировании тепловой нагрузки; совершенствование структуры и технологий обеспечения пиковой и базовой нагрузок теплофикационных систем; комбинирование способов центрального и местного регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения в отдельные периоды отопительного сезона.

2. Усовершенствованы технологии качественного регулирования отпуска теплоты путем повышения надежности работы пиковых водогрейных котлов на ТЭЦ при включении их в замкнутый контур. Разработана методика расчета температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов. В результате расчетного исследования установлено, что параметры работы замкнутого контура необходимо ограничивать следующими значениями: отношением водяных эквивалентов в нагреваемом и греющем контурах $W_6/W_m \leq 3$; параметром подогревателя $\Phi \geq 2$.

Разработан программный продукт «Расчет температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов в двухконтурных схемах», который обеспечивает выполнение следующих функций: выбор режима работы теплофикационной системы; выбор температурного графика контура системы теплоснабжения; расчет температурного графика централизованной системы теплоснабжения с различными параметрами; расчет температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов ТЭЦ; построение температурных графиков.

3. Включение водогрейного котла в замкнутый контур способствует увеличению одного из основных показателей надежности работы теплоэнергетического оборудования – вероятности безотказной работы. В зависимости от увеличения времени наработки на отказ водогрейного котла вероятность его безотказной работы увеличивается на 28 %, а вероятность безотказной работы теплоэнергетической системы – на 18 % по сравнению с традиционным включением водогрейного котла последовательно за сетевыми подогревателями.

4. В результате технико-экономического сравнения технологий количественного и качественно-количественного регулирования отпуска теплоты в системах теплоснабжения установлено, что их внедрение обеспечивает снижение приведенных затрат на 8–20 % по сравнению с качественным регулированием. Экономия при реализации количественного и качественно-количественного регулирования тепловой нагрузки достигается за счет снижения капитальных затрат

в водоподготовительное оборудование ТЭЦ более чем в 5 раз, а эксплуатационных издержек – более чем в 15 раз, снижения затрат на транспорт теплоносителя более чем в 2 раза.

5. Разработаны и исследованы технологии низкотемпературного теплоснабжения с количественным и качественно-количественным регулированием тепловой нагрузки систем теплоснабжения на ТЭЦ. Реализация способов заключается в разделении сетевой воды на потоки в параллельно включенных пиковых водогрейных котлах и теплофикационных турбинах на ТЭЦ. С уменьшением доли тепловой нагрузки, покрываемой непосредственно от котлов, возрастает абсолютная величина комбинированной выработки электрической энергии более чем на 9 %, снижается расход топлива водогрейными котлами на 22 % и потребление электроэнергии на транспорт теплоносителя в два раза.

6. Разработаны методики расчета количественного и качественно-количественного регулирования отпуска теплоты в открытых системах теплоснабжения, существенной особенностью которых является учет влияния нагрузки горячего водоснабжения на работу систем отопления при переменном расходе воды в теплосети. В результате расчетного исследования построены зависимости основных регулируемых параметров систем теплоснабжения.

7. В результате моделирования гидравлических режимов действующей системы теплоснабжения определена возможность её работы при пониженном температурном графике и количественном регулировании отпуска теплоты на теплоисточнике без увеличения диаметров трубопроводов тепловой сети.

Увеличение расхода сетевой воды в системе теплоснабжения не приводит к нарушению качества и надежности теплоснабжения потребителей при соответствующей компенсации располагаемого напора на теплоисточнике и гидравлической наладке потребителей.

8. Разработаны технологии комбинированного теплоснабжения, особенностью которых является совмещение элементов централизованных и децентрализованных систем теплоснабжения, параллельное размещение пиковых и основных теплоисточников, размещение пиковых источников в непосредственной близости от потребителей, что позволяет комбинировать различные способы центрального и местного регулирования тепловой нагрузки в отдельные периоды отопительного сезона.

9. Для повышения эффективности работы комбинированных систем теплоснабжения предложено температурный график центрального регулирования разделить (зонировать) на три периода регулирования: переходный, базовый и пиковый. Каждый период регулирования характеризуется совмещением центрального и местного регулирования тепловой нагрузки в системах теплоснабжения. В базовом периоде осуществляется центральное качественное регулирование. В пиковом и переходных периодах осуществляется комбинирование центрального качественного и местного количественного регулирования.

10. В системе теплоснабжения г. Ульяновска реализовано и исследовано комбинированное регулирование тепловой нагрузки в соответствии с зонированным температурным графиком.

Результатом комбинированного регулирования является снижение расхода сетевой воды на 11–61% и теплоты на 6–52 % в ЦТП централизованной системы

теплоснабжения. В результате регулирования температура обратной сетевой воды в системе теплоснабжения понизилась на 5–9 °С.

Годовая экономия от внедрения комбинированного регулирования тепловой нагрузки, определенная в результате технико-экономического анализа, составила 10–30 млн руб. Свидетельством значительного инвестиционного потенциала комбинированного регулирования тепловой нагрузки является небольшой срок окупаемости: до 35 суток. Нерентабельным проект становится только при ставке дисконта более 96,12 %.

11. Разработаны решения по регулированию нагрузки в системах горячего водоснабжения, предусматривающие поддержание параметров и расхода циркуляционной воды в зависимости от режима потребления горячей воды с учетом температуры воды в водоразборных точках.

12. Исследовано влияние способа регулирования тепловой нагрузки на режимы работы систем отопления и разработаны технические решения по регулированию тепловой нагрузки местных систем отопления при количественном и качественно-количественном регулировании тепловой нагрузки. Предложенные решения позволяют одновременно с регулированием тепловой производительности системы отопления изменением расхода обратной сетевой воды осуществлять гидравлическую защиту систем.

13. Разработаны, исследованы, теоретически и технико-экономически обоснованы энергосберегающие низкотемпературные технологии работы теплофикационных систем с использованием тепловых насосов, позволяющие обеспечивать потребителей нагрузкой горячего водоснабжения в переходные периоды отопительного сезона при пониженной температуре сетевой воды в системе теплоснабжения.

Коэффициент преобразования, характеризующий термодинамическую эффективность предложенных технологий, изменяется от 3,98 до 8,61 в зависимости от температуры низкопотенциального источника теплоты. При этих же начальных условиях эксергетический КПД цикла теплового насоса составляет 0,24–0,52.

14. Экономический эффект от внедрения энергосберегающих низкотемпературных технологии работы теплофикационных систем с использованием тепловых насосов формируется за счет увеличения теплофикационной выработки электроэнергии на ТЭЦ, снижения потерь теплоты в тепловых сетях, снижения затрат на транспорт теплоносителя, уменьшения потребления топливно-энергетических ресурсов за счет снижения выработки тепловой энергии. Чистый дисконтированный доход от реализации разработанных технологий для системы теплоснабжения мощностью 140 МВт составляет от 12,3 млн руб. до 135,4 млн руб. при сроке окупаемости от 6,3 до 10,5 лет, что свидетельствует о достаточном инвестиционном потенциале разработанных технологий.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

Монографии:

1. Шарапов, В.И. Технологии регулирования нагрузки систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, П.В. Ротов. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 160 с.
2. Шарапов, В.И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В.И.

Шарапов, П.В. Ротов. – М. : Новости теплоснабжения, 2007. – 164 с.

3. Ротов, П.В. Регулирование нагрузки городских теплофикационных систем / П.В. Ротов, В.И. Шарапов. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 309 с.

Статьи в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России:

4. Шарапов, В.И. Повышение эффективности вакуумной деаэрации подпиточной воды тепловой сети в водогрейных котельных / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, П.В. Ротов // Промышленная энергетика. – 1997. – № 12. – С. 35–39.

5. Шарапов, В.И. О путях преодоления кризиса в работе систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, П.В. Ротов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2000. – № 5–6. – С. 3–7.

6. Шарапов, В.И. Компенсация недоотпуска тепла от ТЭЦ городскими потребителями / В.И. Шарапов, П.В. Ротов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2000. – №9–10. – С. 62–69.

7. Шарапов, В.И. Количественное регулирование нагрузки открытых систем теплоснабжения на ТЭЦ / В.И. Шарапов, П.В. Ротов, М.Е. Орлов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2001. – №7–8. – С. 31–40.

8. Шарапов, В.И. О регулировании тепловой нагрузки открытых систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, П.В. Ротов // Промышленная энергетика. – 2002. – № 4. – С. 46–51.

9. Шарапов, В.И. Технологии обеспечения пиковой мощности систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, П.В. Ротов // Главный энергетик. – 2008. – №5. – С. 46–58.

10. Ротов, П.В. Особенности регулирования нагрузки систем теплоснабжения в переходный период / П.В. Ротов, В.И. Шарапов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 2. – С. 25–28.

11. Sharapov, V.I. The improvement technologies of the thermal load regulation for cogeneration systems in urban areas / V.I. Sharapov, P.V. Rotov, M.E. Orlov // Transactions of Academenergo. – 2010. – №4. – С. 70–83.

12. Ротов, П.В. Повышение энергетической эффективности работы ТЭЦ и городских систем теплоснабжения / П.В. Ротов, В.И. Шарапов // Электрические станции. – 2011. – № 9. – С.16–20.

13. Орлов, М.Е. Повышение надежности и энергетической эффективности теплофикационных систем / М.Е. Орлов, П.В. Ротов, В.И. Шарапов // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 1. – С. 22–26.

14. Шарапов, В.И. О концепции модернизации городских теплофикационных систем / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, П.В. Ротов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 1. – С. 32–37.

15. Ротов, П.В. О работе систем теплоснабжения без излома температурного графика / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 2. – С. 12–17.

16. Rotov, P.V. About the concept of better regulation of the load domestic heat supply systems / P.V. Rotov, M.E. Orlov, V.I. Sharapov // Transaction of Academenergo. – 2012. – №2. – P. 76–87.

17. Ротов, П.В. О температурном графике работы теплофикационных систем городов / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, М.А. Ротова, В.И. Шарапов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 6. – С. 39–42.

18. Ротов, П.В. О зонировании температурного графика центрального регулирования нагрузки теплофикационных систем / П.В. Ротов // Промышленная энергетика. – 2013. – № 6. – С. 21–25.

19. Ротов, П.В. О температурном графике центрального регулирования систем теплоснабжения / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2014. – № 5–6. – С. 3–11.

20. Ротов, П.В. Повышение эффективности работы централизованных систем теплоснабжения за счет применения теплонасосных установок / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, А.А. Сивухин // Промышленная энергетика. – 2014. – № 7. – С. 27–31.

21. Ротов, П.В. Оценка энергетической эффективности технологий количественного регулирования тепловой нагрузки на ТЭЦ / П.В. Ротов // Труды Академэнерго. – 2014. – № 4. – С. 39–49.

Изобретения:

22. Патент 2190164 Российская Федерация. МПК⁷ F 24 D 19/10, 3/02. Система отопления/ В.И. Шарапов, П.В. Ротов, Э.У. Ямлеева; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2001124559/06; заявл. 04.09.01; опубл. 27.09.02, Бюл. № 27. – 4 с.

23. Патент 2235249 Российская Федерация. МПК⁷ F 24 D 3/08. Способ теплоснабжения/ В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, П.В. Ротов, И.Н. Шепелев; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2003108707/06; заявл. 28.03.03; опубл. 27.08.04, Бюл. № 24. – 3 с.

24. Патент 2235250 Российская Федерация. МПК⁷ F 24 D 3/08. Система теплоснабжения/ В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, П.В. Ротов, И.Н. Шепелев; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2003108708/06; заявл. 28.03.2003; опубл. 27.08.04, Бюл. № 24. – 3 с.

25. Патент 2307289 Российская Федерация. МПК⁷ F 24 D 17/00. Способ работы системы теплоснабжения / П.В. Ротов, В.И. Шарапов, О.В. Половов, М.А. Ротова; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2006108975/03; заявл. 21.03.2006; опубл. 27.09.07, Бюл. № 27. – 4 с.

26. Патент 2433351 Российская Федерация. МПК⁷ F 24 D 3/08. Способ работы открытой системы теплоснабжения / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, П.Е. Чаукин, В.А. Мордовин; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2010114945/03; заявл. 13.04.10; опубл. 10.11.11, Бюл. № 31. – 6 с.

27. Патент 2468301 Российская Федерация. МПК⁷ F 24 D 3/08. Способ работы открытой системы теплоснабжения / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, П.Е. Ежов; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2011109778/12; заявл. 15.03.11; опубл. 27.11.12, Бюл. № 33. – 7 с.

28. Патент 2509958 Российская Федерация. МПК⁷ F 24 D 3/00. Способ теплоснабжения / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, М.А. Кунин; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2012131212/12; заявл. 20.07.12; опубл. 20.03.14, Бюл. № 8. – 5 с.

29. Патент 2549082 Российская Федерация. МПК F 24 D 3/08. Способ работы системы горячего водоснабжения / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, А.А.

Сивухин; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2013145517/12; заявл. 10.10.13; опубл. 20.04.15, Бюл. № 11. – 6 с.

30. Патент 2549089 Российская Федерация. МПК F 24 D 3/08. Способ работы открытой двухтрубной системы теплоснабжения / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, А.А. Сивухин; заявитель и патентообладатель Ульянов. гос. техн. ун.-т. – № 2013145525/12; заявл. 10.10.13; опубл. 20.04.15, Бюл. № 11. – 5 с.

Программные продукты:

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618374. Расчет энергетической эффективности комбинированной теплофикационной системы с ТЭЦ и автономными пиковыми теплоисточниками / М.Е. Орлов, П.В. Ротов, В.И. Шарапов, М.В. Елизарова, М.В. Кунин. 17.09.2012 г.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618717. Расчет температурного графика замкнутого контура водогрейных котлов в двухконтурных схемах / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов. 17.09.2012 г.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618595. Сравнительный расчет тепловых потерь вертикальных цилиндрических резервуаров для жидкого топлива / М.Е. Орлов, П.В. Ротов, В.И. Шарапов, Е.В. Мокров. 12.09.2012 г.

Материалы конференций:

34. Шарапов, В.И. О выборе метода регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, П.В. Ротов // Материалы Второй Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве». – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – С. 72–75.

35. Орлов, М.Е. Схемы ТЭЦ с количественным регулированием тепловой нагрузки системы теплоснабжения / М.Е. Орлов, П.В. Ротов, В.И. Шарапов // Материалы Второй Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве». – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – С. 75–78.

36. Шарапов, В.И. Количественное регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, П.В. Ротов, М.Е. Орлов // Материалы докладов Российского национального симпозиума по энергетике. – Казань : КГЭУ, 2001, Т.5. – С. 29–33.

37. Sharapov, V.I. Quantitative regulation of loading of heat supply systems / V.I. Sharapov, P.V. Rotov, M.E. Orlov // Russian national symposium on power engineering. – Kazan : Kazan State Power Eng. University, 2001, Volum V. – P. 25–28.

38. Ротов, П.В. Энергосберегающие технологии регулирования нагрузки систем теплоснабжения / П.В. Ротов, В.И. Шарапов // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности. Материалы четвертой Российской научно-технической конференции. – Ульяновск : УлГТУ, Т.1, 2003. – С. 133–141.

39. Ротов, П.В. Учет воды на горячее водоснабжение – важнейший фактор энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве / П.В. Ротов, В.Н. Егоров // Материалы Пятой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике и промышленности». – Ульяновск : УлГТУ, 2006. Т.2. – С. 66–70.

40. Ротов, П.В. О путях развития регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения / П.В. Ротов // Материалы докладов Национальной конференции по теплоэнергетике. – Казань : КГЭУ, 2006, Т. 1. – С. 319–323.

41. Ротов, П.В. Актуальные вопросы использования низкопотенциальной теплоты теплофикационных систем / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, А.А. Сивухин // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике. – Казань : КГЭУ, 2014, Т.1. – С. 378–384.

42. Ротов П.В. Совершенствование технологий регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения / П.В. Ротов // Проблемы теплоэнергетики. Сборник научных трудов по материалам XII Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2014. Выпуск 3. – С. 82–86.

Прочие публикации:

43. Шарапов, В.И. Кто и как осуществляет теплоснабжение городов сегодня? / В.И. Шарапов, П.В. Ротов // Новости теплоснабжения. – 2001. – № 2. – С. 11–15.

44. Шарапов, В.И. Технологии обеспечения пиковой мощности систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, П.В. Ротов // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 5. – С. 32–40.

45. Ротов, П.В. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения в переходный период / П.В. Ротов, В.Н. Егоров, О.В. Половов // Новости теплоснабжения. – 2008. – №8. – С. 48–52.

46. Ротов, П.В. Особенности работы городской системы теплоснабжения в переходный период / П.В. Ротов // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 10. – С. 37–42.

Ротов Павел Валерьевич

**Совершенствование систем централизованного теплоснабжения, подключенных к ТЭЦ,
путем разработки энергоэффективных технологий обеспечения нагрузок отопления
и горячего водоснабжения**

Подписано в печать 15.09.2015. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 150 экз. Заказ 717.

ИПК «Венец», 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32