

На правах рукописи

РОДИЧЕВ
Леонид Васильевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТА
ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург
2006

Работа выполнена на кафедре «Промышленная теплоэнергетика»
в ГОУ ВПО Санкт-Петербургский Государственный Политехнический
университет

Официальные оппоненты:

Доктор техн. наук, профессор *Сапожников Сергей Захарович*

Доктор техн. наук, профессор, академик архитектуры
Чистович Сергей Андреевич

Доктор техн. наук, профессор *Аракевян Эдик Койрунович*

Ведущая организация — ОАО «Северо-Западный
энергетический инжиниринговый центр»

Защита диссертации состоится « 16 » октября 2006 г.
в 16 часов на заседании Диссертационного Совета Д 212.229.04
в Государственном образовательном учреждении высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
ГОУ ВПО «СПбГПУ»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2006 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета

К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время более двух третей общего теплоснабжения в городах и населенных пунктах покрывается системами теплофикации от городских и промышленных крупных ТЭЦ и системами централизованного теплоснабжения от котельных с единичной мощностью свыше 20 Гкал/ч.

Концепция политики РАО «ЕЭС России» в области теплофикации и централизованного теплоснабжения предусматривает сохранение доминирующей роли в обеспечении теплом городов и промышленных комплексов. Вместе с тем, с учетом изменения структуры собственности как в производственной, так и жилищно-коммунальной сфере, доля децентрализованного теплоснабжения неизбежно возрастет. Особенно это касается городов и населенных пунктов с малой плотностью застройки, а также теплоэлектроснабжения зданий и предприятий мелкого и среднего бизнеса, коттеджной застройки, промышленных цехов, использующих для отопления газовое топливо.

Сохранение доминирующей роли теплофикации и централизованного теплоснабжения в обеспечении тепловой энергией городов и промышленных комплексов обусловлено рядом факторов.

В городах России созданы уникальные по своим размерам системы централизованного теплоснабжения, охватывающие всю городскую инженерную инфраструктуру и послужившие аналогом для создания систем теплофикации и централизованного теплоснабжения во многих развитых странах мира.

Комбинированное производство тепловой и электрической энергии на городских ТЭЦ позволяет значительно более экономично использовать органическое топливо по сравнению с их отдельным производством.

На крупных теплоэнергетических установках (ТЭЦ, котельные) возможно организовать экологически чистое сжигание низкосортных местных видов топлива (например бурый уголь, торф, твердые бытовые отходы, древесные отходы и др.), что практически неосуществимо в мелких установках.

Удаление мощных источников генерации энергии, работающих на органическом топливе, от центров тепловой нагрузки значительно улучшает состояние воздушной среды в городах.

Участившиеся в последнее время аварии в системах централизованного теплоснабжения городов предельно обнажили недостатки инженерной инфраструктуры и показали, насколько велика ее роль в обеспечении условий нормальной жизнедеятельности населения, выд-

винули проблему развития и реконструкции систем теплоснабжения в разряд стратегических государственных задач.

Недостаточное в течение многих лет выделение финансовых средств на устранение физического износа основных фондов рассматриваемых систем, отсутствие государственной целенаправленной политики в этой области неизбежно приводят к ускорению деградации систем теплофикации и теплоснабжения, снижению их эффективности.

Наиболее уязвимым звеном в системе централизованного теплоснабжения являются тепловые сети, общая протяженность которых в России составляет более 200 тыс. км (в пересчете на двухтрубную прокладку). Неудовлетворительное состояние тепловых сетей приводит не только к высоким потерям при транспортировке теплоносителя, но и к их частым повреждениям. Оценка физического состояния тепловых сетей, выполненная различными экспертами, показала, что 40 – 50 % теплопроводов уже выработали свой амортизационный ресурс. Поэтому большая часть аварий в системах теплоснабжения связана именно с их повреждением.

Высокая степень физического и морального износа источников тепловой энергии, до 50 – 70 %, также резко снижает эффективность теплоснабжения.

На многих теплоэлектроцентралях из-за физического износа уже демонтирована часть паровых турбин, в результате чего резко снижается экономия, заложенная в принцип комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Эффективность работы многих ТЭЦ в последнее десятилетие снизилась из-за уменьшения подключенной тепловой нагрузки, вызванной, с одной стороны, спадом промышленного производства, а с другой – тем, что многие потребители построили собственные автономные теплоисточники.

Целью диссертационной работы является разработка технических предложений и мероприятий по повышению надежности и эффективности теплопроводов от источника до потребителя и улучшению их гидравлических режимов в том числе:

разработка методики выявления дефектов теплопроводов различного класса современных способов дефектоскопии (разрушающих и неразрушающих);

разработка методики прогнозирования работоспособности и диагностики технического состояния сварных стыков теплопроводов;

разработка ультразвукового и зеркально-теневого методов контроля трубопроводов с использованием изгибных волн ЛЭМБА;

повышение эффективности гидравлических режимов теплосети за счет резервных связей;

разработка технических предложений по использованию защиты от электрохимической коррозии;

оценка возможности поэтапного перехода от открытой к закрытой системе теплоснабжения;

повышение эффективности управления отпуском тепловой энергии в условиях рынка.

Научная новизна работы:

на основе разработанной методики оценки состояния теплопроводов разработаны и усовершенствованы способы выявления дефектов на трубопроводах тепловых сетей;

предложена и опробирована методика прогнозирования работоспособности и технического состояния сварных стыков теплопроводов;

на базе использования изгибных волн ЛЭМБА предложено использование ультразвукового и зеркально-теневого методов контроля состояния теплопроводов;

на основе выполненных расчетов гидравлических режимов теплосети даны рекомендации по сооружению резервных связей между участками теплопроводов;

разработаны, предложены и внедрены технические предложения по использованию электрохимической защиты трубопроводов тепловых сетей;

дано обоснование возможности поэтапного перехода от открытой к закрытой системе теплоснабжения;

на основе разработанной АСУ ТП даны рекомендации по совершенствованию управления отпуска тепловой энергии в рыночных условиях.

Личный вклад автора:

предложена и внедрена комплексная система диагностики на основе современных методов контроля трубопроводов тепловых сетей с использованием современной информационно-измерительной техники;

разработаны и внедрены в производство рекомендации по улучшению гидравлического и температурного режимов тепловых сетей, оптимизации температурных графиков отпуска тепловой энергии;

разработаны предложения по поэтапному переходу от открытой к закрытой системе теплоснабжения;

разработана структура АСУ ТП систем отпуска тепловой энергии.

Практическая значимость работы:

реализован и внедрен в производство комплекс мероприятий по выявлению дефектов теплопроводов на базе современных методов контроля и диагностики их состояния;

предложены и внедрены в производство методы защиты от электрохимической коррозии;

даны практические рекомендации по улучшению гидравлических режимов тепловых сетей, разработана схема управления отпуском тепловой энергии.

Объектом исследований является система теплопроводов Санкт-Петербурга с системами их прокладки и защиты от внутренней и внешней коррозии, а также их гидравлическими и тепловыми режимами.

На защиту выносятся:

разработка и создание комплексной методики оценки состояния и работоспособности теплопроводов на основе современных методов контроля и диагностики;

разработка мероприятий по повышению эффективности гидравлических и температурных режимов тепловых сетей;

создание систем электрохимической защиты металла теплопроводов;

технические предложения по постепенному переходу от открытой к закрытой системе теплоснабжения для систем отопления Санкт-Петербурга;

разработка и создание системы АСУ ТП по отпуску тепловой энергии.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на выставке-конференции инновационных проектов и разработок “Наука – технологии – производство – рынок” (2000 г., ЦНТИ, Смоленск); на VII, IX и X международных научно-технических конференциях “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика” (2001, 2003, 2004 гг., МЭИ, г. Москва); межвузовской научно-технической конференции, посвященной XXXII Неделе науки СПбГПУ; научно-технических конференциях “Информационные технологии, ресурсосбережение, энергетика и экономика” (2003 г., СФ МЭИ, Смоленск), “Проблемы развития централизованного теплоснабжения” (2004 г., Самараэнерго, г. Самара), “Экономика, экология и общество России в 21-м столетии” (2004 г., МВШУ, Санкт-Петербург), а также научных семинарах

кафедр “Промышленная теплоэнергетика” Смоленского филиала МЭИ и Санкт-Петербургского политехнического университета. Результаты работы докладывались 12 мая 2004 г. на заседании Научного совета по проблемам теплоэнергетики и энергомашиностроения Российской академии наук.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 14 научных работах, в том числе в двух монографиях, а также статьях, опубликованных в двух научных журналах, сборниках материалов научных конференций.

По теме диссертации получено 2 патента.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы из 130 наименований, 15 приложений, изложена на 250 страницах машинописного текста, включает 25 таблиц и 54 иллюстрации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность решаемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и связанные с ее реализацией научные и технические задачи. Определены новизна и практическая значимость работы. Приведены сведения о практической реализации результатов.

В **первой главе**, посвященной анализу исторического развития теплофикации Санкт-Петербурга и современному состоянию проблемы, дана краткая историческая справка состояния теплофикации до 1917 года. Отмечается вклад петербургских ученых в развитие теплофикации: В.В. Дмитриева и А.К. Павловского, Л.Л. Гинтера, Е.Ф. Бродского, М.В. Кирпичева, И.С. Ланина и ряда других. После образования СССР были переведены в режим теплофикации ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3. В предвоенные годы была построена ТЭЦ-5 «Уткина заводь». Особенно бурного развития достигла теплофикация СПб в послевоенные годы, когда были сооружены ТЭЦ-14, ТЭЦ-15, ТЭЦ-17, Северная и Южная ТЭЦ. Выработка электроэнергии на тепловом потреблении достигла до 40% от общей энерговыработки. Протяженность тепловых сетей, подключенных к ТЭЦ, достигла 1,5 тыс. километров, а тепловая нагрузка потребителей составила порядка 10200 Гкал/час. Была проведена большая работа по вводу в эксплуатацию насосно-перекачивающих станций, центральных тепловых пунктов и ряда других объектов.

В этой главе дается характеристика закрытых и открытых систем теплоснабжения.

Основные преимущества закрытой системы теплоснабжения:

гидравлическая изолированность водопроводной воды, поступающей в установки горячего водоснабжения, от воды, циркулирующей в тепловой сети, благодаря чему обеспечивается стабильное качество горячей воды; простота санитарного контроля системы ГВС, благодаря короткому пути прохождения водопроводной воды от ввода в здание до водоразборного крана;

простота контроля герметичности такой системы, так как он производится по расходу на подпитку;

оборудование системы подпитки тепловой сети значительно дешевле в связи с малым расходом подпиточной воды.

К недостаткам закрытых систем теплоснабжения относятся:

сложность и повышенная стоимость оборудования ИТП и ЦТП, обусловленные необходимостью установки водо-водяных теплообменников;

выпадение накипи в водо-водяных подогревателях и трубопроводах местных установок ГВС из-за отсутствия химводоочистки водопроводной воды (при использовании воды, имеющей карбонатную жесткость J_k более 7 мг-экв/л);

коррозия оборудования ГВС из-за поступления в них недеаэрированной водопроводной воды, насыщенной агрессивными газами.

Основные преимущества открытых систем теплоснабжения:

возможность утилизации низкопотенциальной теплоты электростанций и промышленных предприятий в системах ГВС;

упрощение и удешевление абонентских вводов вследствие простоты оборудования, используемого для приготовления горячей воды в зданиях;

более длительный срок службы местных установок горячего водоснабжения по сравнению с закрытыми системами;

возможность использования для транзитного транспорта теплоты одноконтурной системы.

Недостатки открытых систем:

усложнение и удорожание системы станционной водоподготовки;

нестабильность (по запаху, цветности и другим качествам) воды, поступающей в водоразбор при зависимой схеме присоединения отопительных установок к тепловой сети и высокой окисляемости водопроводной воды, что может быть устранено практически только при 100 % присоединении отопительных установок по независимой схеме;

усложнение контроля герметичности тепловых сетей в связи с тем, что в открытых системах теплоснабжения расход подпитки не характеризует плотность системы;

усложнение и увеличение объема санитарного контроля системы теплоснабжения;

усложнение эксплуатации системы теплоснабжения из-за неустойчивости гидравлического режима, связанного переменным расходом воды в обратной линии.

Внедрение метода непосредственного разбора сетевой воды для горячего водоснабжения присоединенных потребителей потребовало решения ряда задач:

обеспечение требуемого качества воды в тепловых сетях;

обеспечение требований Санитарных правил по поддержанию температуры воды в системах горячего водоснабжения на уровне 60 – 75°C;

поддержание гидравлического режима в тепловой сети и на тепловых пунктах, обеспечивающего постоянный залив всех присоединенных к теплосети систем потребителей при любом режиме работы систем горячего водоснабжения.

В главе приводятся характеристики теплопроводов и способы их прокладки в составе рабочего трубопровода, а также конструкции изоляции.

К наиболее современным изолирующим материалам относятся: полиуритан и производная на его основе – полимербетон и бион. Выбор теплоизоляционной конструкции и ее размеров зависит от типа теплопровода и располагаемых исходных материалов. При использовании современных теплоизолирующих материалов можно получить экономию около 9 млн. тонн усл. топлива в год под снижение потерь в окружающую среду. Даются характеристики несущих конструкций, опор, подвесок при сооружениях теплопроводов для канальной и бесканальной прокладки теплопроводов.

Для расчета времени, в течение которого температура внутри отапливаемого помещения может понизиться до нормируемого минимального уровня, являющегося одним из показателей надежности теплоснабжения на уровне потребителя здания, можно использовать зависимости:

$$t_B = t_H + \frac{Q_0}{q_0 V} + \frac{t'_B - t_H - \frac{Q_0}{q_0 V}}{e^{z/\beta}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{в}}$, °C – внутренняя температура, которая установится в помещении через время z (ч) после нарушения нормального теплового режима; $t'_{\text{н}}$, °C – внутренняя температура, которая была в помещении в момент нарушения нормального теплового режима; $t_{\text{н}}$, °C – средняя температура наружного воздуха за период нарушения теплового режима, т.е. за время z (ч); $Q_{\text{о}}$, Дж/ч – подача теплоты в помещение; $q_{\text{о}}V$, Дж/(ч·°C) – удельные расчетные теплотопотери здания; $e = 2,72$ – основание натурального логарифма; β , ч – коэффициент аккумуляции здания.

1. Под *надежностью* тепловых сетей понимается их способность обеспечивать потребителей требуемым количеством теплоносителя при заданном его качестве, оставаясь в течение заданного срока (25 – 30 лет) в работоспособном состоянии. Для характеристики безотказности можно использовать выражение для изменения потока отказов во времени

$$\lambda = 1 - \frac{1}{e^{\frac{t-t_0}{t_k}}} \quad (2)$$

где t , г. – срок действия теплопровода, отсчитанный от года ввода в работу; t_0 , г. – наработка на первый отказ; t_k , г. – число лет после первого отказа, за которые поток отказов достигнет значения

$$\lambda - 1 - 1/e = 0,63 \text{ 1/(км·г.)}$$

Параметры t_0 и t_k характеризуют надежность данной конструкции теплопровода при заданных условиях его сооружения. С увеличением t_0 и t_k снижается значение λ и замедляется темп роста потока отказов. Если по статистическим эксплуатационным данным известны значения t_0 и λ за произвольно выбранный год t , то параметр t_k может быть найден расчетным путем по формуле

$$t_k = \frac{t - t_0}{\ln[1/(1 - \lambda)]} \quad (3)$$

Преимущество предлагаемого решения заключается в возможности получения общей закономерности динамики отказов конкретных конструкций теплопроводов на основе статистической обработки эксплуатационных материалов или экспериментальных данных, полученных экспресс-методом путем искусственного форсирования коррозионного процесса.

В качестве показателя безотказности может быть также использована *вероятность безотказной работы*, как величина однозначно связанная с параметром потока отказа.

2. *Долговечность* – свойство сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, когда дальнейшее их использование недопустимо и экономически нецелесообразно.

Математическое описание этого условия имеет следующий вид

$$(E_{\text{н}} + f)k_{\text{н}} \leq \lambda_y \quad (4)$$

где $k_{\text{н}}$, руб/км – удельные начальные затраты на сооружение нового теплопровода; $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент отчислений, принимаемый равным 0,121/год; f – доля ежегодных отчислений на амортизацию, текущий ремонт и общесетевые расходы, равная 0,0751/год; y , руб/отказ – затраты на ликвидацию одного отказа с учетом расхода на компенсацию ущерба от нарушения теплоснабжения.

На основе зависимости (4) может быть найдено значение предельного потока отказов $\lambda_{\text{пред}}$ 1/(км·г.), при котором экономически целесообразно сооружение нового теплопровода

$$\lambda_{\text{пред}} \geq (E_{\text{н}} + f) \frac{k_{\text{н}}}{y} \quad (5)$$

3. *Ремонтпригодность* – способность к поддержанию работоспособного состояния участков тепловых сетей путем обеспечения их ремонта.

В качестве основного параметра, характеризующего ремонтпригодность теплопровода, можно принять время z_p , необходимое для ликвидации повреждения. Этот параметр зависит: от конструкции теплопровода, типа укладки (надземный или подземный), диаметра трубопровода, расстояния между секционирующими задвижками, оснащения теплоснабжающего предприятия машинами, механизмами и транспортом для выполнения аварийно-восстановительных работ. Как правило, параметр z_p должен определяться экспертным путем для каждого конкретного теплоснабжающего предприятия с учетом местных условий.

Для предварительного вычисления параметра z_p (ч) может быть принята предложенная автором зависимость

$$z_p = a [1 + (b + c l) d^{1,2}] \quad (6)$$

где l , м – расстояние между секционирующими задвижками; d , м – диаметр трубопровода; a , b , c – постоянные коэффициенты, зависящие от

способа укладки теплопровода (подземный, надземный) и его конструкции, а также от уровня механизации ремонтных работ.

4. *Сохраняемость* – способность сохранять безотказность, достоверность и ремонтпригодность в течение всего срока эксплуатации.

Надежность тепловых сетей рекомендуется исследовать отдельно для распределительных и магистральных трубопроводов. Необходимо структурировать весь комплекс с выделением двух уровней:

системы транспорта теплоты по магистральным тепловым сетям от источника до промышленных предприятий, жилых микрорайонов и административно-общественных центров;

распределительные тепловые сети, передающие теплоноситель от магистральных тепловых сетей до потребителей теплоты, т.е. до ИТП отапливаемых зданий.

Для систематизации и изучения показателей, характеризующих надежность тепловых сетей в каждом конкретном предприятии, целесообразно создавать банк данных по повреждаемости тепловых сетей и установить соответствующие количественные показатели, базирующиеся на статистических данных. Можно предложить два таких показателя:

относительная повреждаемость тепловой сети

$$\bar{\Pi} = \frac{\sum M_{от} n_{от}}{\sum M n} , \quad (7)$$

где $M_{от}$, m^2 – материальная характеристика участков тепловой сети, выключенных из работы при аварии или отказе; $n_{от}$, ч – время вынужденного выключения участков сети, вызванное аварией или отказом и его устранением; $M n$ – произведение материальной характеристики тепловой сети данной системы теплоснабжения на плановую длительность ее работы за заданный период времени (обычно за год);

относительный аварийный недоотпуск тепловой энергии

$$\bar{q} = \Sigma Q_{ав} / \Sigma Q , \quad (8)$$

где $\Sigma Q_{ав}$ – аварийный недоотпуск теплоты за год; ΣQ – расчетный отпуск теплоты за год.

По динамике изменения приведенных показателей во времени (например, из года в год) можно судить о прогрессе или деградации надежности систем централизованного теплоснабжения.

Установлено, что основной причиной появления дефектов в тепловых сетях является коррозионное старение теплопроводов (внутренняя и наружная коррозия), поэтому задачи исследований были сформулированы следующим образом:

анализ причин, вызывающих старение трубных коммуникаций и теплотехнического оборудования теплопроводов;

разработка эффективного метода защиты теплопроводов от наружной коррозии;

разработка комбинированного способа тепловой и антикоррозионной защиты для теплопроводов, оборудования и арматуры;

разработка методики математической оптимизации конструктивных и теплофизических параметров комбинированной системы защиты теплопроводов;

определение оптимальных конструктивных и теплофизических параметров комбинированной системы защиты теплопроводов;

внедрение результатов разработок в практику эксплуатации теплопроводов.

Глава 2 посвящена проблемам диагностики и оценки состояния системы теплоснабжения и ее основных узлов (элементов). Статистический анализ, проведенный Госгортехнадзором РФ, показывает, что технические причины, вызывающие аварии трубопроводов, делятся на ряд категорий: повреждения, возникающие в результате случайных внешних воздействий – 33 %; ошибки, допущенные при проектировании и монтаже трубопроводов – 24 %; брак, заложенный в заводских условиях производства труб – 17 %; наружная коррозия трубопроводов – 20 %; нарушение регламента эксплуатации – 6 %.

Более половины аварий на трубопроводах связаны с накоплением повреждений в металле и сварных швах. Эти повреждения с течением времени становятся причиной отказа в работе трубопроводов. В этом случае суть отказа в работе трубопровода заключается в разрушении целостности ТС, сопровождающемся возникновением утечек теплоносителя из трубопровода наружу. Интенсивность утечек зависит от размеров очага разгерметизации трубопровода и может достигать значительных масштабов.

На основе анализа современных методов дефектоскопии (разрушающих и неразрушающих) выполняется оценка степени опасности повреждений. Для определения уровня напряжений условие динамического равновесия материала нагруженной как с внутренней, так и с внешней стороны трубы, выраженное в напряжениях, может быть представлено следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\partial \sigma_{ik} / \partial x_k = 0, \quad i, k = 1, 2, 3; \quad (9)$$

$$\sigma_{ik} n_k = P_i \quad (10)$$

$$dU_0 \geq A_{d\Sigma}^{(e)} + dQ^{**}, \quad (11)$$

где σ_{ik} – компоненты тензора напряжений, x_k – координаты рассматриваемой точки тела в некоторой системе координат; n_k – компоненты единичного вектора, направленного по внешней нормали поверхности тела; p_i – компоненты внешней силы, действующей на единицу поверхности тела; U_0 – внутренняя энергия взаимного сцепления микрочастиц тела; $dA_{d\Sigma}^{(e)}$ – поток энергии в точках, совпадающих с берегами трещин, который возникает за счет перемещения краев последних благодаря действию концентраций напряжений; dQ^{**} – внешний поток энергии.

Анализ системы уравнений (9), (10) применительно к трубе осуществляется в системе цилиндрических координат $x_1 = r$; $x_2 = \phi$; $x_3 = z$ (z имеет направление, совпадающее с осью трубы), тогда ее решение имеет вид:

$$\sigma_{rr} = (r_1^2 p_1 (1 - \Delta r_2) - r_2^2 p_2 (1 - \Delta r_1)) / \Delta r_{12}; \quad (12)$$

$$\sigma_{\phi\phi} = (r_1^2 p_1 (1 + \Delta r_2) - r_2^2 p_2 (1 + \Delta r_1)) / \Delta r_{12}; \quad (13)$$

$$\sigma_{zz} = (r_1^2 p_1 - r_2^2 p_2) (\lambda / (\lambda + \mu)) / \Delta r_{12}, \quad (14)$$

где p_1 и p_2 – соответственно внутреннее и внешнее давления, действующие на стенки трубы; r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы трубы; $\Delta r_{12} = (r_2^2 - r_1^2)$; $\Delta r_1 = r_1^2 / r^2$; $\Delta r_2 = r_2^2 / r^2$; λ и μ – коэффициенты Ламе.

Уравнения (12) – (14) позволяют определить величину напряжения в любой точке материала стенки, но без учета концентрации местных напряжений, которые, как правило, возникают при наличии резких изменений формы поверхности тела.

Если в рассматриваемой зоне тела присутствует концентрация напряжений из-за резких изменений формы поверхности тела, распределение напряжений описывается при помощи гармонического уравнения для функции Эри в полярных координатах ($x_1 = \rho$, $x_2 = \phi$, $x_3 = z$, при этом ось z имеет направление наибольшего линейного размера трещины):

$$(\partial^2 / \partial \rho^2 + (\partial / \partial \rho) / \rho + (\partial^2 / \partial \phi^2)) / \rho^2 (\partial^2 U / \partial \rho^2 + (\partial U / \partial \rho) / \rho + \partial^2 U / \partial \phi^2) / \rho^2 = 0; \quad (15)$$

$$\sigma_\rho = [(\partial U / \partial \rho) / \rho + (\partial^2 U / \partial \phi^2) / \rho^2]; \quad \sigma_\phi = \partial^2 U / \partial \phi^2;$$

$$\sigma_{\rho\phi} = -\partial[(\partial U / \partial \phi) / \rho] / \partial \rho,$$

где $U(\rho, \phi)$ – общий интеграл этого уравнения; σ_ρ , σ_ϕ , $\sigma_{\rho\phi}$ – компоненты тензора напряжений, выражающие через функцию Эри в полярных координатах.

Статистические данные об авариях в тепловых сетях показывают, что несквозные трещины, как правило, приводящие к разрушению стенок труб, имеют сложную криволинейную конфигурацию. По этой причине вдоль протяженности таких повреждений угол α меняет свою величину в широких пределах. Это означает, что в соответствии с уравнением (15) в различных участках повреждения значение σ_ϕ^{\max} будет различным. Наибольшее значение σ_ϕ^{\max} соответствует величинам угла $\alpha = 0, \pi$, а наименьшее значение – $\alpha = \pi/2, 3\pi/2$. Таким образом наибольшую опасность, с точки зрения возможности разрушения стенок труб в результате дальнейшего развития трещины вследствие внешнего силового воздействия, представляют участки трещин (в зависимости от глубины h и ширины m), имеющие направление вдоль образующих труб.

Результаты расчета напряженного состояния стенок трубы в зоне указанных повреждений (с учетом действия гидравлического удара) приведены в табл. 1.

Большое значение имеет система неразрушающего контроля, предназначенная для оценки интенсивности коррозии в тепловых сетях и повышения их надежности. Важным мероприятием является создание системы мониторинга и диагностики теплопроводов с последующим формированием системы их капитального ремонта, то есть перехода на системы автоматизированного управления состоянием трубопроводов и технического оборудования. В обобщенном виде комплекс исследований иллюстрирует блок-схема, представленная на рис. 1.

Система контроля коррозионной стойкости теплоизолированных труб включает:

1. теоретический анализ ультразвукового метода контроля с целью учета физических особенностей и определения способа получения измерительной информации с достаточным уровнем достоверности. Анализ необходим, поскольку аналитическое описание параметров возбужденных колебаний со средой не является детерминированными функциями и коррозионное поражение поверхности не имеет прямой количественной оценки;

2. оценку метрологических характеристик системы контроля, обеспечивающих ее достоверность. Под системой контроля в данном случае понимается совокупность аппаратных средств и самого объекта,

Таблица 1

Сведения о параметрах повреждений на наружной поверхности теплопровода, механических характеристиках стали трубы и результатах расчета напряженного состояния стенок трубы в зоне локальных повреждений

Повреждение	Параметры повреждений				$\sigma_{\phi}^{\max} \cdot 10^{-8}, \text{ Н/М}^2$	Механические характеристики материала (стали) труб			Соотношение нормативных параметров стали с данными, характеризующими напряженное состояние стенок трубы в зоне локальных повреждений
	$l, \text{ мм}$	$m, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$	α		$[\sigma] \cdot 10^{-8}, \text{ Н/М}^2$	$\sigma_T \cdot 10^{-8}, \text{ Н/М}^2$	$\sigma_{\text{пр}} \cdot 10^{-8}, \text{ Н/М}^2$	
1	450	22	3	0	2,01	2,06	2,35	4,02	$\sigma_{\phi}^{\max} < [\sigma]$ – материал трубы работает в зоне упругих деформаций, опасности нет
2'	30	1,5	2	62	2,45	2,06	2,35	4,02	$\sigma_{\phi}^{\max} > \sigma_T$ – материал трубы работает в зоне пластических деформаций
2''	50	1,5	2	0	4,02	2,06	2,35	4,02	$\sigma_{\phi}^{\max} > \sigma_{\text{пр}}$ – напряжение в материале стенки трубы превышает предел прочности
2'''	40	1,5	2	21	3,78	2,06	2,35	4,02	$\sigma_{\phi}^{\max} > \sigma_T$ – материал трубы работает в зоне пластических деформаций

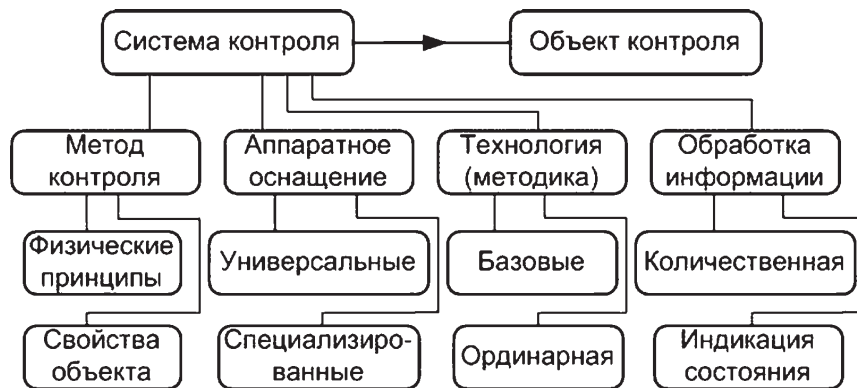


Рис. 1. Блок-схема системы контроля коррозионной стойкости теплоизолированных труб

поскольку информативные свойства системы в значительной мере определяются локальными свойствами тракта прохождения сигнала;

3. экспериментальную оценку информативности и достоверности метода контроля. Цель исследований – фактологическая оценка выбранных информативных параметров, получение конкретных данных для разработки методики контроля и конструирования задающих и приемных элементов;

4. Методологическую и схемотехническую проработку способа получения измерительной информации.

Методы ультразвукового контроля, а также других методов (акустический метод Лэмба и др.) позволяют своевременно выявить дефекты в теплопроводах.

Разработанная методика контроля коррозионного состояния труб включает:

выбор схемы контроля: метода ультразвукового контроля, типа волн, поверхности, через которую вводят ультразвуковые волны, угла ввода;

подготовку изделия к контролю: выработку требований к качеству поверхности, разделение крупногабаритных изделий на участки для последовательного контроля;

составление рекомендаций по подготовке аппаратуры: проверку, выбор и настройку частоты, чувствительности;

разработку правил поиска коррозионных участков: выбор пути контроля, шага и скорости сканирования (коммутации);

оценку результатов контроля: определение местоположения коррозионных участков, измерение площади, оценка изменения площади во времени.

Измерение толщины стенки трубы с использованием пьезометрических излучателей и др. приборов имеет большое значение для составления графиков превентивной замены участков теплопроводов.

К указанным методам добавляются различные способы определения течи в местах повреждений (течescания), акустический метод, тепловизионная съемка и ряд других.

В главе дается также прогноз работоспособности сварных соединений трубопроводов методом акустической эмиссии.

Для дальнейшего развития централизованного теплоснабжения большое значение имеют анализ влияния на надежность работы элементов тепловых сетей инженерно-геологических условий прокладки теплопроводов. В этих условиях необходимо оценивать эффективность теплоизоляции трубопроводов, исследовать зависимости величины тепловых потерь от глубины прокладки теплопроводов и диаметра труб,

определять влияние расстояния между трубами в случае бесканальной прокладки, различие в тепловых потерях при бесканальной и канальной прокладках трубопроводов и ряд других факторов. Важно установить зависимость величины тепловых потерь от срока эксплуатации, эффективной теплопроводности грунта, коэффициента теплообмена с атмосферой, температуры теплоносителя и др.

Глава 3 посвящена оценке работоспособности современных схем транспорта тепловой энергии. В главе дается подробный анализ работы систем теплоснабжения, оценка методов и графиков регулирования и основных параметров работы тепловых сетей. В зависимости от объекта вида потребителей тепловой энергии различают центральное, групповое, местное и индивидуальное регулирование. Для обеспечения высокой экономичности теплоснабжения следует применять комбинированное регулирование, которое является рациональным сочетанием центрального, группового, местного и индивидуального регулирования. Эффективное регулирование может быть достигнуто только с помощью автоматических систем регулирования (САР). Центральное регулирование ведется по тепловой нагрузке, характерной для данного района. Такой нагрузкой может быть отопление и горячее водоснабжение. Несмотря на все многообразие систем регулирования количество теплоты, переданное потребителю, определяется уравнениями теплового баланса и теплопередачи

$$Q = kF\Delta t n = W_n(\tau_1 - \tau_2)n, \quad (16)$$

где Q – количество теплоты, отданное за время n ; kF – произведение коэффициента теплопередачи нагревательных приборов на их поверхность нагрева; k – коэффициент теплопередачи нагревательных приборов; F – поверхность нагрева нагревательных приборов; Δt – средняя разность температур между греющей и нагреваемой средой; W – эквивалент расхода первичной (греющей) среды; τ_1, τ_2 – температуры первичной (греющей) среды на входе в нагревательный прибор и на выходе из него.

Средняя разность температур может быть представлена в первом приближении как разность между среднеарифметическими температурами греющей и нагреваемой среды

$$\Delta t = \frac{\tau_1 - \tau_2}{2} - \frac{t_1 - t_2}{2} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{2} - t_{cp}, \quad (17)$$

где t_{cp} – средняя температура нагреваемой среды; t_1, t_2 – температуры вторичной (нагреваемой) среды на входе в нагревательный прибор и на выходе из него.

Из уравнений (16) – (17) следует

$$\tau_2 = \tau_1 - \frac{Q}{nW_n};$$

$$Q = kF \left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{2} - t_{cp} \right) n. \quad (18)$$

Из совместного решения находится:

$$Q = \frac{(\tau_1 - t_{cp})n}{\frac{1}{kF} + \frac{0,5}{W_n}}. \quad (19)$$

Далее в главе дается характеристика центрального регулирования при различных видах нагрузки при количественном и качественном регулировании, а также приводятся способы построения графиков температур и расхода сетевой воды на отопление и горячее водоснабжение.

Дается сравнительная оценка количественного и качественного регулирования отпуска тепловой энергии. Рассмотренный расчет гидравлических сопротивлений и режимов работы систем теплоснабжения базируется на программном комплексе «Zulu 5.2» фирмы «Политерм» (Санкт-Петербург). На базе поверочных расчетов теплосети по указанной программе с использованием закона Кирхгофа выполнен расчет потока распределения в трубопроводной сети.

Рассмотрен график регулирования отпуска тепловой энергии от ТЭЦ АО «Ленэнерго» за отопительный сезон 2002 – 2003 г. Проанализированы причины износа систем теплоснабжения, состояние и их аварийность. Даны рекомендации по повышению надежности систем теплопроводов в процессе их эксплуатации:

проведение обследования состояния и условий работы сетевых трубопроводов для планирования работ по повышению надежности на ближайшую ремонтную кампанию и разработки долгосрочных мероприятий;

внедрение комплекса современных инструментальных обследований состояния тепловых сетей: тепловизионная аэросъемка, пирометрические обследования, метод электронно-акустической эмиссии,

измерения электрических потенциалов, применения акустических и ультразвуковых теческателей;

проведение в полном объеме температурных и гидравлических испытаний сетевых трубопроводов перед началом ремонтной кампании;

оснащение участков тепловых сетей, наиболее подверженных электроэрозии вследствие высокой активности воздействия блуждающих токов установками катодной защиты;

повышение надежности запорной арматуры, в том числе замена ее на поворотные шаровые краны;

разработка мер по консервации оборудования тепловых сетей при простое в межотопительный период;

применение при замене трубопроводов пенополиуретановой теплоизоляции.

Долгосрочные мероприятия должны предусматривать:

разработку концепции развития тепловых сетей Санкт-Петербурга в соответствии с Генеральным планом развития города для гарантированного обеспечения теплоснабжения потребителей при отключении отдельных участков для проведения ремонтно-восстановительных работ, а также с учетом предстоящей реструктуризации холдинга и изменения структуры выработки тепловой и электрической энергии;

разработку перспективного плана модернизации тепловых сетей в части полного перехода на канальную подземную и надземную прокладку сетевых трубопроводов, применения теплоизоляционных и гидроизолирующих материалов, адекватных условиям эксплуатации, а также надежной отключающей арматуры и устройств температурной компенсации трубопроводов;

реконструкцию существующих и строительство новых насосно-перекачивающих станций, в том числе внедрение систем частотно-регулируемого привода.

В главе 4 изложены методы и средства повышения надежности систем теплоснабжения: защита от электрохимической коррозии, оптимизация конструктивных и технологических параметров антикоррозионной изоляции, диагностика эффективности экранирования антикоррозионного покрытия от действия окружающей среды. Рассматривается также проблема повышения эффективности конструкций теплопроводов. Приведена аналитическая оценка современных конструкций тепловых сетей, включающая особенности канальной и бесканальной прокладки. Предпочтение отдается канальной прокладке теплопроводов с использованием высокоэффективных теплоизоляционных материалов с учетом

воздушной прослойки. Даются примеры распределения температуры по толщине изоляции, определяемых при помощи уравнения теплового потока. Определена эффективность применения оптических экранов для снижения тепловых потерь от теплопровода. На базе численного анализа процессов теплопередачи через тепловую защиту находится предельная величина тепловой изоляции для различного диаметра труб. Дана оценка интенсивности теплопереноса через комбинированное теплозащитное покрытие (табл. 2).

В главе 5 дается анализ развития сетей теплоснабжения Санкт-Петербурга. В зависимости от территориального расположения различных тепловых потребителей дается краткая характеристика суммарной подключенной тепловой нагрузки для основных магистралей с учетом коэффициента устойчивости. Предлагаются мероприятия по обеспечению тепловых нагрузок до 2015 года. Большое значение придается подключению вновь строящихся жилых зданий и других объектов к действующим тепловым сетям с учетом реконструкции. Весь этот план увязывается со строительством и вводом в действие новых энергоисточников (ТЭЦ-5 и др.).

Таблица 2

Интенсивность теплопереноса через комбинированное теплозащитное покрытие

b_3	q	Fu_2	St_2	Ri_2	St_4	Ri_4	S_4E_4
0,000	483,7	483,7	0,1	0,0	42,8	440,7	30,9
0,002	450,9	437,7	13,2	0,0	39,8	411,0	28,9
0,004	424,1	400,7	23,4	0,0	37,4	386,7	27,2
0,006	401,8	370,1	31,6	0,0	35,4	366,3	25,8
0,008	382,8	344,4	38,4	0,0	33,7	349,1	24,6
0,010	366,5	322,4	44,1	0,0	32,3	334,2	23,6
0,012	366,9	283,5	46,2	37,1	32,3	334,5	23,6
0,014	370,9	251,6	47,6	71,6	32,7	338,2	23,8
0,016	375,4	227,4	49,0	99,1	33,1	342,3	24,0
0,018	380,4	208,3	50,2	121,8	33,5	346,8	24,3
0,020	385,7	192,9	51,5	141,3	34,0	351,7	24,6
0,022	391,5	180,3	52,7	158,5	34,5	357,0	24,9
0,024	397,6	169,7	53,8	174,0	35,1	362,6	25,3
0,026	404,1	160,8	55,0	188,3	35,6	368,5	25,6
0,028	410,9	153,2	56,2	201,6	36,2	374,7	26,0

**Перечень мероприятий по развитию схемы теплоснабжения
для обеспечения прироста тепловых нагрузок на перспективу
до 2015 г.**

№ п/п	Название т/сетей	Длина, п.м	Диаметр, мм	Цель строительства	
1	Строительство Резервной т/м:			1. Перевод на новую магистраль зон снабжения р/с Транзитная, кварт. 7, кварт. 17-18-19, что обеспечивает возможность прироста тепловых нагрузок в зоне Южной т/м за НПС	
	1.1. от Южной т/м до Транзитной р/с	1825	800		
	1.2. от Транзитной р/с до р/с кварт. 7	1050	800		
	1.3. от р/с кварт. 7 до р/с кварт. 17-18-19	2000	600		
	1.4. от р/с Кварт. 17-18-19 до р/с Шоссейная	1065	500		
2	Строительство участков, соединяющих Резервную т/м с существующими р/сетями:			2. Резервирование зоны р/с Шоссейная	
	2.1. по р/с Транзитная	160	500		
	2.2. по р/с кварт. 7	125	500		
	2.3. по р/с кварт. 17-18-19	275	600		
	2.4. по р/с Шоссейная	250	500		
3	Соединение Восточной т/м и Западной т/м:	300	600	Резервирование зоны Восточной т/м в Центральном районе	
4	Перекладки существующих теплотрасс			Перекладка участков для увеличения пропускной способности	
	4.1	Транзитная т/м:			
		2.1. от НО-3 до последнего перехода диаметра	8		800
		2.2. от НО-5 до последнего перехода диаметра	25		800
		2.3. от ТК-6 до ТК-7а	116		800
		2.4. от ТК-10 до ТК-11а	140		800
	4.2	Т/м Западная от ТК-41 (секц. задв.) до ТК-46 (секц. задв.)	485		500
4.3	Р/с квартала 14-15 от Шоссейной р/с до ТК-3	293	400	Для ликвидации участков с высокими удельными потерями	

Предлагаемый комплекс мероприятий и план реконструкции тепловых сетей существенно улучшит надежность и качество теплоснабжения и горячего водоснабжения Санкт-Петербурга.

Проведенные исследования показали целесообразность поэтапного перехода от открытой к закрытой схеме теплоснабжения. Большое значение для этого перехода имеет организация водно-химического режима. Сравнительная оценка водно-химического режима для открытой и закрытой систем показала преимущества перехода на закрытую систему теплоснабжения.

Дальнейший переход на закрытую схему присоединения систем ГВС позволит обеспечить:

снижение расхода тепловой энергии на отопление и ГВС;

уменьшение удельных расходов топлива на производство теплоты и электрической энергии на перекачку теплоносителя;

ввод в хозяйственную деятельность помещений закрываемых центральных тепловых пунктов (ЦТП);

снижение расходов тепловой энергии на собственные нужды котельных;

увеличение срока службы водогрейных котлов, магистральных и квартальных тепловых сетей;

снижение затрат на эксплуатацию котельных и тепловых сетей;

кардинально улучшить качество теплоснабжения потребителей, что будет способствовать исчезновению “перетопов” в осенне-зимний периоды, а также во время положительных температур в отопительный сезон;

подключение дополнительной нагрузки за счет экономии тепловой энергии и уменьшить ввод дополнительных мощностей;

улучшить экологическую обстановку в регионе.

Большое значение уделяется организации работы тепловых пунктов (индивидуальных и центральных) для повышения надежности систем теплоснабжения. Предлагается комплекс мероприятий по повышению эффективности управления системой теплоснабжения путем создания транспортной компании.

Реформа системы теплоснабжения Санкт-Петербурга, рассмотренная в главе 6, должна базироваться на оптимальном использовании существующего потенциала и нацелена на решение следующих главных задач:

обеспечение надежности и безопасности теплоснабжения;

экономическая оптимизация теплоснабжения, включая энергосбережение;

оптимизация движения ресурсов, обеспечение финансирования текущей деятельности и инвестиционных проектов;

создание организации и отношений ее субъектов, которые способны решать вышеуказанные задачи в интересах города в целом, а также всех его жителей и предприятий;

обеспечение эффективного минимально необходимого и достаточного влияния властей на создание, развитие и деятельность вышеуказанной организации системы теплоснабжения города с обеспечением адекватных социальных гарантий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. На основании статистического анализа повреждения теплопроводов предложен комплекс мероприятий по снижению аварийности тепловых сетей. На базе анализа современных методов дефектоскопии (разрушающих и неразрушающих) предложена методика выявления дефектов теплопроводов различного класса.

2. Предложенная методика прогнозирования работоспособности и диагностики технического состояния сварных соединений позволяет существенно поднять их уровень надежности.

3. Дано обоснование ультразвуковому, зеркально-теневому методам контроля эффективности покрытия с использованием изгибных волн Лэмба, а также ультразвуковая экспериментальная многоканальная установка, существенно повышающая эффективность выявления дефектов в теплосети.

4. Предложен активный метод организации работ по результатам диагностики для ликвидации места повреждения на основе программного обеспечения, которое позволяет на базе информации о дефектах достаточно точно определить места повреждения.

5. В зависимости от конструкции и характеристики подземных теплопроводов изменяется их надежность и потери теплоты через поверхность изоляции.

6. Показано, что управление тепловыми сетями должно базироваться на создании на АСУ ТП с широким использованием телеуправления и телемеханики. Необходимо постепенное внедрение системы диагностики влажности изоляции трубопроводов, обнаружение разгерметизации теплопроводов на базе различных методов контроля.

7. Отказ от тепловых камер позволяет предотвратить причину 65% всех дефектов в тепловых сетях. Вместе с тем это требует перехода от традиционных устаревших технических решений к современному

оборудованию и новым техническим решениям (шаровые краны, бескамерные врезки, самокомпенсирующие трубы).

8. На базе анализа характеристик тепловой сети, определяющих надежность теплоснабжения, является важным: наличие резервных связей, возможность обеспечения резервного теплоснабжения потребителя от другого источника, возможность поддержания стабильного гидравлического режима тепловой сети, поддержание стабильного температурного режима в помещении.

9. Аналитическая оценка теплоснабжения районов Санкт-Петербурга позволила разработать комплекс мероприятий по улучшению режимов работы тепловой сети и источников теплоснабжения применительно к конкретным районам с учетом подключения новых потребителей и развития новых источников (ТЭЦ-5 и др.).

10. Разработка комплекса мероприятий перехода от открытой к закрытой системе теплоснабжения, в который входит: установка аккумуляторных баков, оснащение ЦТП и ИТП регуляторами температуры на горячее водоснабжение и др.

11. Реформа управления системой теплоснабжения Санкт-Петербурга должна базироваться на оптимальном использовании существующего потенциала и нацелена на решение следующих основных задач:

обеспечение надежности и безопасности теплоснабжения;

экономическая оптимизация теплоснабжения, включая энергосбережение;

оптимизация движения ресурсов, обеспечение финансирования текущей деятельности и инвестиционных проектов;

создание организации и отношений ее субъектов, которые способны решать вышеуказанные задачи в интересах города в целом, а также всех его жителей и предприятий;

обеспечение эффективного минимально необходимого и достаточного влияния властей на создание, развитие и деятельность вышеуказанной организации системы теплоснабжения города с обеспечением адекватных социальных гарантий.

**Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:**

1. **Родичев Л.В., Каримов З.Ф.** Исследование физико-химической обстановки, вызывающей коррозию труб и арматуры в тепловых камерах, и разработка эффективного метода их защиты // Строительство трубопроводов. 1993. № 1.
2. **Родичев Л.В., Каримов З.Ф.** Физическое моделирование процессов коррозии металла под слоем антикоррозионной защиты // Строительство трубопроводов. 1993. № 6.
3. **Родичев Л.В., Каримов З.Ф.** Гидродинамические факторы, интенсифицирующие внутреннюю коррозию в теплопроводах // Строительство трубопроводов. 1994. № 2.
4. **Родичев Л.В.** Статистический анализ коррозионного старения теплопроводов // Строительство трубопроводов. 1994. № 5.
5. **Оскин Ю.Ф., Родичев Л.В., Каримов З.Ф.** Комбинированная тепловая и антикоррозионная защита теплопроводов // Строительство трубопроводов. 1995. № 9.
6. **Родичев Л.В. Каримов З.Ф.** Новый способ снижения тепловых потерь в теплопроводах // Промышленная энергетика. 1996. № 5.
7. **Оскин Ю.Ф., Родичев Л.В., Каримов З.Ф.** Комбинированное антикоррозионное покрытие для защиты трубных коммуникаций и арматуры в камерах теплопроводов и способ его нанесения. Патент РФ. № 2067718. 1996.
8. **Николаев С.В., Родичев Л.В.** Акустический контроль состояния поверхности теплоизоляционных труб / Материалы VII Международной научно-технической конференции “Оптические, радиоволновые, тепловые методы и средства контроля природной среды, материалов и промышленных изделий”. г. Череповец. 1997.
9. **Оскин С.В., Родичев Л.В.** Комбинированные покрытия для защиты трубных коммуникаций и арматуры в камерах теплопроводов и способ его нанесения. Патент РФ. № 2067718. 1997.
10. **Родичев Л.В., Поляков В.Е., Потапов А.И.** Система и способ контроля состояния трубопровода в реальном времени и трубопровод, снабженный такой системой. Патент РФ. № 2227910. 2002.
11. **Родичев Л.В.** Снижение ресурса эксплуатационной безопасности тепловых сетей и методы их защиты. СПб: Изд-во СПбГПУ. 2002.
12. **Родичев Л.В.** Эффективность транспорта тепловой энергии. СПб. 2006.
13. **Родичев Л.В., Каримов З.Ф.** Экспериментальная оценка эффекта оптического экранирования и ч системы тепловой защиты теплопроводов // Теплоэнергетика (в печати).
14. **Родичев Л.В., Каримов З.Ф.** Система тепловой защиты для высокотемпературных поверхностей // Теплоэнергетика (в печати).