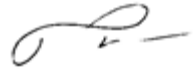


На правах рукописи



**Гавей Ольга Фёдоровна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ И УПРАВЛЕНИЕ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СИСТЕМ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

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

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Челябинск – 2015**

Диссертационная работа выполнена на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук,  
профессор Панферов Владимир Иванович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
профессор Шарапов Владимир Иванович,  
ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный  
технический университет», зав. кафедрой  
теплогазоснабжения и вентиляции;

доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Круглов Геннадий Александрович,  
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный  
аграрный университет», профессор кафедры  
тепловодогазоснабжения сельского хозяйства.

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им.  
Б.Н. Ельцина».

Защита состоится 15 февраля 2016 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина 76, ауд. 1001 главного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета, а также на сайте <http://www.susu.ac.ru>.

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» декабря 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



В.Н. Любицын

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время в работе систем централизованного теплоснабжения на базе теплофикации возникли определенные сложности. Помимо разрегулированности сетей, огромного количества утечек теплоносителя и тепловых потерь при транспортировке, актуальна проблема несоответствия фактических и проектных температурных параметров процесса теплоснабжения. Приведение фактических температурных графиков регулирования систем теплоснабжения (графиков компенсации основного возмущения теплового режима зданий – температуры наружного воздуха) к их проектным значениям является зачастую невыполнимой задачей ввиду отсутствия технической возможности на источниках выработки теплоты. Анализу сложившейся ситуации посвящены работы Гагарина В.Г., Гершковича В.Ф., Казаринова Л.С., Ливчака И.Ф., Родионова В.Г., Табушникова Ю.А., Хаванова П.А., Чистовича С.А., Шаропова В.И. и др. Характерный для середины прошлого столетия высокотемпературный график регулирования «150-70 °С» в современных условиях уже не является актуальным. В настоящее время возрастает интерес к применению низкотемпературных графиков регулирования процесса теплоснабжения: «105-70», «95-70» и даже «70-50°С». Установлено, что такие параметры теплоносителя в системах теплоснабжения могут быть применены в современных условиях, однако при этом необходимо разработать новые методы регулирования тепловой нагрузки, обосновывать выбор параметров процесса теплоснабжения для каждого конкретного случая и провести адаптацию всех структурных частей системы теплоснабжения, спроектированной для высоких параметров теплоносителя.

К настоящему времени известны наработки по регулированию систем теплоснабжения с низкотемпературными параметрами теплоносителя, а также некоторые исследования, показывающие их преимущества перед высокотемпературными. Однако данные наработки ориентированы, в основном, на новые тепловые сети, спроектированные для новых параметров

теплоносителя. Основные же рекомендации для старых тепловых сетей следующие: замена теплопроводов с увеличением их диаметров, установка автоматизированных тепловых пунктов для стабилизации температурных и гидравлических режимов, повышение теплозащитных свойств ограждений объектов-потребителей. На практике эти мероприятия зачастую не реализуются, т.к. являются либо весьма затратными, либо недостаточными для достижения запланированного эффекта.

В связи с этим возникает необходимость поиска таких параметров теплоносителя, при которых было бы возможно осуществлять эффективное (как с точки зрения экономичности, так и с точки зрения обеспечения комфортных условий) управление теплоснабжением в условиях старых тепловых сетей и оборудования.

Вышеизложенное позволяет сформулировать основную цель диссертационной работы: сокращение затрат энергоресурсов при эксплуатации тепловых сетей и удовлетворительное обеспечение потребителей теплом путём выбора оптимальных параметров теплоносителя (температуры и/или расхода) и их регулирование в системе теплоснабжения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- 1) анализ современного состояния изучаемой задачи и основных тенденций, характерных для настоящего времени;
- 2) анализ эффективности применяемых в настоящее время температурных графиков регулирования процесса теплоснабжения с точки зрения обеспечения комфортных условий у потребителей и уменьшения затрат тепловой и электрической энергии при транспортировке теплоносителя;
- 3) разработка алгоритмов управления гидравлическим режимом системы теплоснабжения при изменении (снижении) температуры теплоносителя;
- 4) разработка алгоритмов оптимального управления процессом теплоснабжения с целью минимизации затрат

электрической энергии и тепловых потерь при транспортировке теплоносителя.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- 1) определена эффективность низкотемпературного теплоснабжения, его достоинства и недостатки по сравнению с высокотемпературным процессом;
- 2) получены зависимости, указывающие, как следует изменить характеристики системы теплоснабжения (диаметры теплопроводов, расходы теплоносителя) при изменении (снижении) температуры теплоносителя;
- 3) решена задача оптимального управления температурой и расходом теплоносителя, при которых наименьшими будут тепловые потери при транспортировке и расход электрической энергии на перекачку;
- 4) разработана методика расчета оптимального управления температурой и расходом теплоносителя для конкретных условий.

На защиту выносятся следующие положения:

- 1) результаты анализа эффективности применяемых в настоящее время температурных графиков регулирования процесса теплоснабжения;
- 2) алгоритмы управления гидравлическим режимом системы теплоснабжения при изменении (снижении) температуры теплоносителя;
- 3) алгоритмы оптимального управления температурой и расходом теплоносителя с целью минимизации затрат электрической энергии и тепловых потерь при транспортировке теплоносителя;
- 4) рекомендации по расчету оптимального управления температурой и расходом теплоносителя для конкретных условий.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты могут применяться как на стадии проектирования новых объектов, так и при реконструкции и эксплуатации уже существующих систем теплоснабжения, либо для оценки эффективности их работы. Разработанный способ

управления процессом теплоснабжения можно использовать в качестве энергоэффективного мероприятия, что в современных условиях является весьма актуальным. При грамотной организации работы тепловых станций и котельных, а также систем отопления и вентиляции в зданиях регулирование тепловой нагрузки предложенным способом может привести не только к существенному экономическому эффекту, но и улучшить работу системы теплоснабжения с точки зрения создания комфортных условий у потребителей. Разработано программное обеспечение для расчета параметров теплоносителя.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на четвертой международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогоснабжения и вентиляции» (г. Москва, 2011 г), 13-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов (г. Магнитогорск, 2012 г), Международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Образование» (г. Магнитогорск, 2013 г), «Актуальные проблемы автоматизации и управления» (г. Челябинск, 2013 г), пятой международной научно-технической конференции "Теоретические основы теплогоснабжения и вентиляции" (г. Москва, 2013 г).

Основные положения диссертации отражены в 4 печатных статьях, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 119 наименований и приложений. Объем работы составляет 183 страницы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена постановка задачи, рассматриваются ее актуальность, а также цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** представлен обзор современного состояния изучаемого вопроса, отмечены основные проблемы теплоснабжения в России и их причины, а также дан краткий обзор состояния централизованного теплоснабжения в странах Европы.

Рассмотрены основные методы регулирования тепловой нагрузки и вопросы автоматизации систем теплоснабжения. На примере промышленного предприятия показаны результаты перевода систем управления теплоснабжением с высокотемпературных параметров регулирования тепловой нагрузки на низкотемпературные.

Подчеркнуто, что основной проблемой теплоснабжения в РФ является проблема поддержания параметров теплоносителя на уровне «150-70 °С», который был принят в качестве оптимального в середине прошлого века. Основными причинами этого являются устаревшее оборудование тепловых станций, повышение цен на топливо, большие тепловые потери и утечки теплоносителя и т.п. Кроме того, с повышением теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий снижается потребность в высоких температурах теплоносителя.

Отмечено, что попытки адаптировать низкотемпературное теплоснабжение к объектам и тепловым сетям, спроектированным для высокотемпературных параметров теплоносителя, в большинстве случаев не привели к желаемым результатам, в том числе и из-за отсутствия обоснованных алгоритмов управления гидравлическими режимами. Основные мероприятия, которые применяются при переходе на низкотемпературное теплоснабжение, как отмечалось выше, таковы: установка автоматизированных тепловых пунктов, повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий, переход к децентрализованному теплоснабжению, разработка энергоэффективных мероприятий, позволяющих снизить потребление тепловой энергии и т.п.

Замена оборудования систем теплоснабжения, в частности, замена теплопроводов сетей на другие, пригодные для новых температурных графиков и гидравлических режимов, практически не осуществляются ввиду отсутствия финансирования и больших объемов работ.

Недостатки низкотемпературных режимов регулирования в системах теплоснабжения следующие: это увеличение расхода электрической энергии на перекачку теплоносителя,

необходимость в увеличении диаметров теплопроводов, отсутствие надлежащих методов управления процессом теплоснабжения, пригодных для сложившихся условий. К достоинствам низкотемпературного теплоснабжения обычно относят удобство в эксплуатации, снижение тепловых потерь при транспортировке, снижение затрат топлива на производство тепловой энергии.

Отмечено, что в литературе практически нет каких-либо конкретных данных, которые бы показывали, как управлять процессом теплоснабжения, какие параметры теплоносителя являются оптимальными в конкретных условиях.

В связи с этим актуальными являются задача выбора подходящих параметров теплоносителя, а также разработка методов управления процессом теплоснабжения применительно к системам, спроектированным под высокотемпературные параметры.

**Во второй главе** проектно-расчётными методами оценивались характерные особенности систем теплоснабжения и отопления при различных вариантах графиков регулирования отпуска теплоты.

Согласно данным Гершковича В.Ф. самыми простыми и доступными способами уменьшения потребности объекта теплоснабжения в теплоте являются замена деревянных стеклопакетов на пластиковые и снижение норматива на воздухообмен. В связи с этим рассматривались 3 варианта (далее вариант 1, вариант 2 и вариант 3) расчета нагрузки системы отопления жилого кирпичного 5-ти этажного дома. В первом варианте было принято, что оконные стеклопакеты деревянные, а норматив на воздухообмен равен  $3 \text{ м}^3/\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^2$  площади помещения. Во втором варианте оконные стеклопакеты пластиковые, а норматив на воздухообмен равен  $1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^2$ . В третьем варианте оконные стеклопакеты пластиковые, а норматив на воздухообмен равен  $3 \text{ м}^3/\text{ч}$  на  $1 \text{ м}^2$ .

Для каждой из этих нагрузок была оценена пригодность следующих трех температурных графиков регулирования процесса теплоснабжения: «150-70 °С», «110-70 °С» и «90-60 °С». Расчёту подлежали величина тепловой нагрузки, размеры отопительных



приборов, диаметры теплопроводов тепловой сети, тепловые потери при транспортировке. Решение считалось приемлемым, если расчетная длина отопительных приборов составляла не менее  $2/3$  от ширины оконного проёма, при этом диаметры теплопроводов в системе теплоснабжения не изменялись, и гидравлический режим не нарушался, а тепловые потери при транспортировке минимальны.

Расчётами установлено, что замена деревянных окон на пластиковые стеклопакеты приводит к сокращению потребности в теплоте здания (тепловой нагрузки для системы теплоснабжения) на 17,2 %. Если же количество инфильтрующегося воздуха будет составлять всего  $1,2 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$  (норматив для Украины), а не  $3 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ , как это требуется по СНиП РФ, то требуемая тепловая нагрузка здания сократится уже на 42,3 %. При этом, однако, необходимо иметь ввиду, что перевод систем управления теплоснабжением с параметров «150-70 °С» на параметры «95-70 °С» при условии неизменности расхода теплоносителя приводит к сокращению покрываемой тепловой нагрузки до 70 %. Поэтому, очевидно, что в этом случае потребности зданий в теплоте не будут удовлетворяться.

Также при условии неизменности тепловых нагрузок переход на низкотемпературные параметры теплоносителя, согласно расчетам, приводит к увеличению длины радиатора до 30 %, увеличению диаметров теплопроводов до 30 % и снижению тепловых потерь до 15 %.

При этом, если увеличение длины радиаторов оказывает положительное влияние на распределение тепловых потоков в помещении, то увеличение диаметров теплопроводов требует огромных капитальных затрат и не является желательным моментом.

Что касается тепловых потерь, то дальнейшими расчетами установлено, что существует такая температура теплоносителя, при которой тепловые потери минимальны. Дальнейшее ее снижение при условии неизменности тепловой нагрузки приводит к повышению тепловых потерь из-за увеличения площади поверхности теплопроводов.

Расчеты тепловых потерь теплопроводов выполнялись с использованием известной зависимости:

$$Q = F_{mp} \cdot (t_{нов} - t_n) \cdot (\alpha_k + \alpha_l) \quad (1)$$

где:  $F_{mp}$  – площадь поверхности теплопровода,  $t_{нов}$  – температура поверхности теплопровода,  $t_n$  – температура наружного воздуха,  $\alpha_k$  – коэффициент конвективной теплоотдачи,  $\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи излучением.

Для примера на рис.1 приведена зависимость удельных тепловых потерь неизолированного подающего теплопровода от температуры теплоносителя.

Для изолированного теплопровода при других условиях кривая зависимости имеет вид, приведенный на рис. 2.

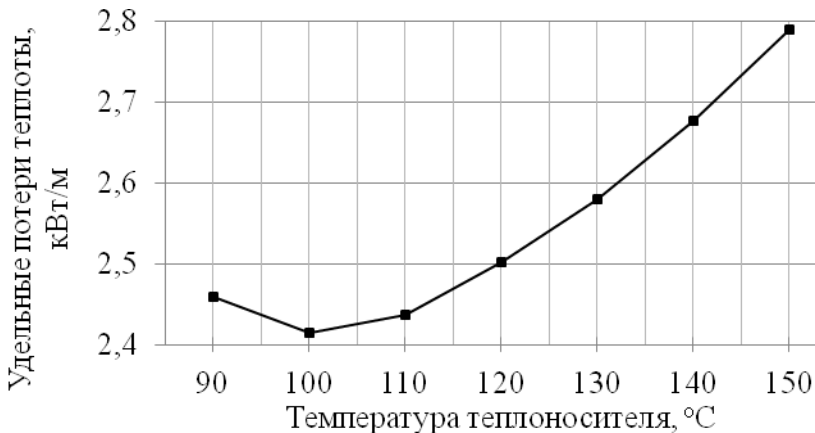


Рисунок 1. Потери тепла неизолированным теплопроводом в зависимости от температуры теплоносителя

В целом установлено, что низкотемпературные параметры регулирования в системах теплоснабжения могут быть выгодными из-за сокращения тепловых потерь при транспортировке теплоты, однако при этом следует учитывать необходимость увеличения расхода теплоносителя. При очень низких температурах теплоносителя эффективность низкотемпературного

теплоснабжения снижается либо из-за увеличения тепловых потерь вследствие увеличения площади поверхности теплопроводов, либо из-за увеличения расхода электрической энергии на перекачку теплоносителя.

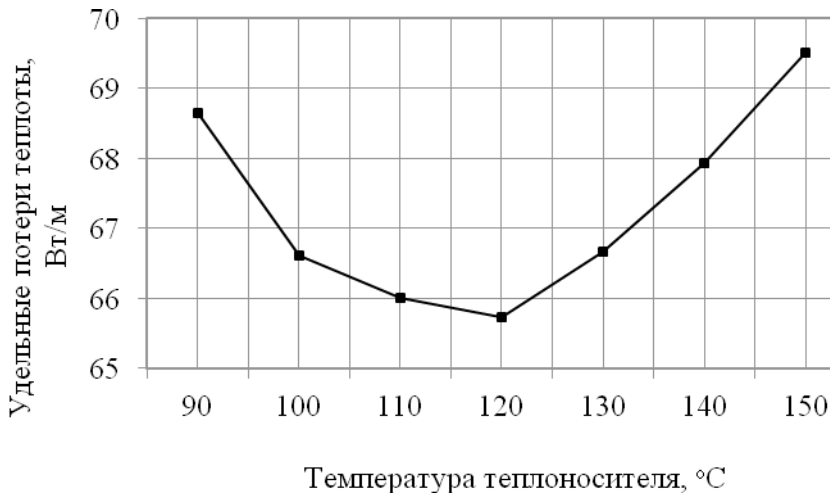


Рисунок 2. Потери тепла изолированным теплопроводом в зависимости от температуры теплоносителя

**В третьей главе** разработаны алгоритмы управления расходом теплоносителя в зависимости от степени снижения его температуры. Разработано также алгоритмическое обеспечение, необходимое для определения требуемых изменений диаметров теплопроводов, для оценки удельных потерь давления и изменений тепловых потерь в зависимости от изменения температуры теплоносителя. Конкретно, рассмотрены следующие задачи.

**Задача 1.** Как снижение температуры теплоносителя должно повлиять на увеличение его расхода с тем, чтобы доставляемая тепловая мощность (доставляемый теплоносителем поток теплоты) была бы прежней? В результате решения этой задачи был разработан алгоритм управления расходом теплоносителя, причем в двух вариантах – без учета и с учетом характеристик теплотребляющего оборудования. В частности, алгоритм

управления расходом, учитывающий характеристики теплопотребляющего оборудования, имеет вид:

$$G + \Delta G = \frac{KF \cdot (t - t_{\text{вн}})}{2c \cdot \Delta t + \frac{KF(t + \Delta t - t_{\text{вн}})}{G}} \quad (2)$$

где:  $KF$  – произведение коэффициента теплопередачи на площадь поверхности эквивалентного отопительного прибора (система отопления и/или теплоснабжения представляется эквивалентным отопительным прибором),  $G$  – расход теплоносителя для предыдущего (базового) режима теплоснабжения,  $\Delta G$  – необходимое изменение расхода теплоносителя для низкотемпературного режима,  $t_{\text{вн}}$ ,  $t$ ,  $\Delta t$  – температура внутреннего воздуха объекта теплоснабжения, температура теплоносителя в подающем теплопроводе в базовом режиме и изменение температуры теплоносителя при низкотемпературном теплоснабжении соответственно,  $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя. Здесь  $G + \Delta G$  – необходимый расход теплоносителя при новом режиме теплоснабжения.

По условию физической реализуемости определен допустимый диапазон снижения температуры теплоносителя, при котором потребителю в точности доставляется нужное по погоде количество теплоты ( $t$  базового режима является функцией температуры наружного воздуха  $t_{\text{н}}$ ), этот диапазон достаточно ограничен. Если  $\Delta t$  снижается на большую величину, то имеет место снижение качества теплоснабжения, потребителю может быть доставлено только меньшее количество теплоты – доля от теплоты базового режима.

Функциональная схема системы управления, реализующей алгоритм (2) представлена на рис. 3 (обозначения элементов по ГОСТ 21.404-85).

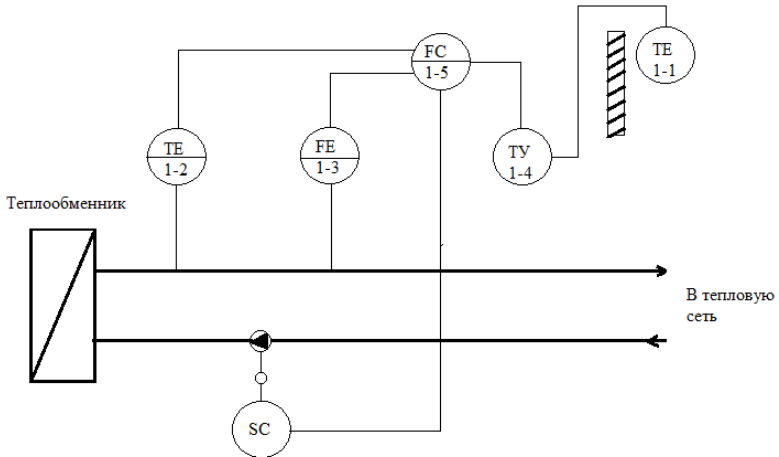


Рисунок 3. Функциональная схема системы управления, реализующая алгоритм 2

На представленном рисунке TE (1-1) – датчик температуры наружного воздуха, ТУ – блок вычисления базовых значений  $t$  и  $G$ , FC – блок для вычисления нового расхода теплоносителя ( $G + \Delta G$ ) в зависимости от показаний FC (1-3) и TE (1-1) по формуле 2.

**Задача 2.** Как должны измениться диаметры теплопроводов, чтобы при прокачке другого (нерасчетного) расхода по тепловым сетям потери давления остались прежними?

Результаты решения данной задачи иллюстрируются рис.4, в частности, для случая снижения температуры теплоносителя в подающем теплопроводе со  $150^{\circ}\text{C}$  на  $95^{\circ}\text{C}$  необходимо увеличить диаметр теплотрассы на 23 %.

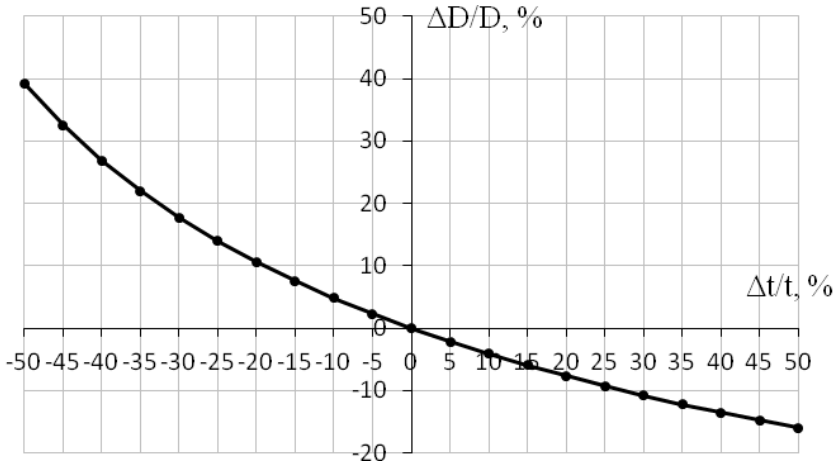


Рисунок 4. Зависимость доли изменения диаметра теплопровода от изменения относительной температуры теплоносителя с учетом свойств теплопотребляющего объекта

**Задача 3.** Как изменятся тепловые потери и расход электроэнергии на перекачку теплоносителя при снижении его температуры и изменении диаметров изолированных теплопроводов в соответствии с задачей 2.

Результаты решения данной задачи иллюстрируются рис.5.

Полученный в результате график показывает, что с уменьшением температуры теплоносителя значение тепловых потерь уменьшается. Однако при значительном снижении температуры тепловые потери начинают возрастать из-за существенного увеличения площади поверхности теплопроводов.

Соотношения, полученные в главе 3 позволяют оценить затратность мероприятий по переводу систем на низкотемпературное теплоснабжение и могут быть использованы при формировании критериев для принятия решений.

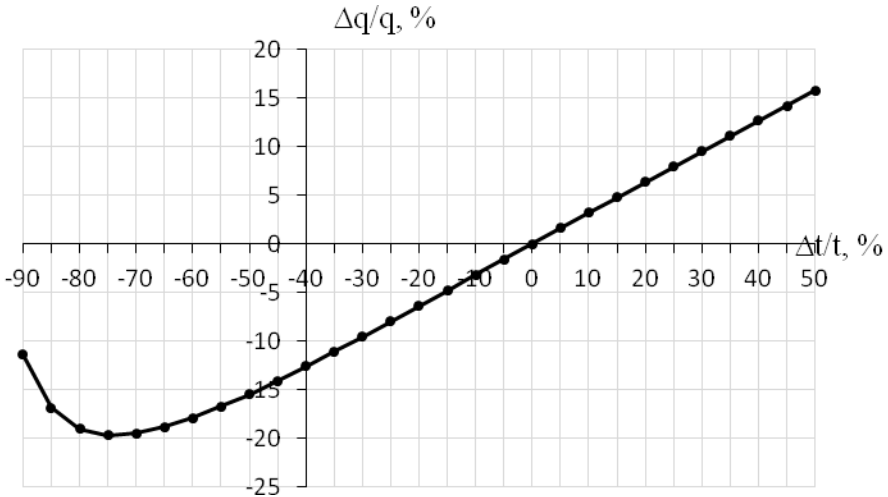


Рисунок 5. Зависимость изменения линейной плотности теплового потока от изменения температуры теплоносителя в относительных единицах. (при  $t_H = -34$  °С, и  $t = 80$  °С)

**В четвертой главе** поставлена и решена задача оптимального управления температурой и расходом теплоносителя по критерию минимума затрат электрической энергии на перекачку и сокращения тепловых потерь при его транспортировке по теплопроводам. Данная задача является условной задачей нелинейного программирования с двумя варьируемыми аргументами  $G$  и  $t$  и формально представляется следующим образом:

$$W_{\Sigma} = \frac{0,1 k_{\Sigma}^{0,25}}{D_{вн}^{5,25}} \cdot \frac{8G \cdot (1 + \alpha)}{\rho^2 \cdot \pi^2 \cdot \eta_H \cdot \eta_{\Sigma}} + \pi(t - t_H) / R_l \Rightarrow \min_{G, t \in \Omega} \quad (3)$$

Множество  $\Omega$  определяется следующим образом:

$$\Omega = \left\{ G, t \mid G - \frac{W_{об}}{2 \cdot c \cdot (t - t_{вн} - \frac{W_{об}}{KF})} = 0 \right\} \quad (4)$$

Здесь  $k_э$  - эквивалентная шероховатость внутренней поверхности теплопровода,  $\eta_n$  - КПД насоса,  $\eta_э$  - КПД электродвигателя насоса,  $\alpha$  - доля местных потерь давления,  $W$  – заданная тепловая нагрузка объекта теплоснабжения,  $R_l$  - линейное термическое сопротивление теплопередаче,  $D_{вн}$  – внутренний диаметр теплопровода.

Первое слагаемое в записи критерия оптимальности – это затраты электрической энергии на перекачку теплоносителя, второе – потери тепловой энергии через поверхность теплопровода.

При решении данную условную задачу оптимизации свели к безусловной методом подстановки. Задача решена до конца аналитическим методом как без, так и с учетом характеристик теплопотребляющего оборудования объекта теплоснабжения. Установлено, что оптимальную температуру теплоносителя при учете характеристик теплопотребляющего оборудования следует вычислять по формуле:

$$t_{np} = \gamma + 4 \sqrt[4]{\frac{3a}{b}} \quad (5)$$

где:

$$a = 0,11 \cdot \frac{k_э^{0,25}}{D_{вн}^{5,25}} \cdot \frac{W_{об}^3 \cdot (1 + \alpha)}{c^3 \cdot \rho^2 \cdot \pi^2 \cdot \eta_n \cdot \eta_э}, \quad (6)$$

$$b = \frac{\pi}{R_l}, \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{W_{об}}{KF} + t_{вн} \quad (8)$$

При этом оптимальный расход теплоносителя будет таким:

$$G = \frac{W_{об}}{2 \cdot c \cdot (t - t_{вн} - \frac{W_{об}}{KF})} \quad (9)$$

Полученное решение показывает, во-первых, что оптимальным является количественно-качественный метод регулирования процесса теплоснабжения и что, во-вторых, значения оптимальных температуры и расхода теплоносителя различны в зависимости от таких условий, как: КПД насосной



сетевой установки, состояния теплопроводов (коэффициент шероховатости, тепловая изоляция), количество местных сопротивлений, теплопотребляющих свойств объекта и т.п.

Важно отметить, что при решении задачи оптимизации учитывались тарифы на тепловую и электрическую энергию в виде весовых коэффициентов составляющих критерия оптимальности (в формуле (3) весовые коэффициенты опущены).

Одним из основных параметров, определяющих оптимальные значения расхода и температуры теплоносителя, является тепловая нагрузка системы теплоснабжения. Поэтому, зная потребность в теплоте объекта теплоснабжения для каждой температуры наружного воздуха, с помощью полученного решения можно построить графики качественно-количественного регулирования (для температуры и расхода) тепловой нагрузки рассматриваемого объекта теплоснабжения.

Функциональная схема системы оптимального управления расходом и температурой теплоносителя представлена на рис. 6 (обозначения элементов по ГОСТ 21.404-85). Здесь ТС (2-2) – блок вычисления новой температуры теплоносителя в зависимости от показаний блоков ТЕ (2-1), ТЕ (3-1) и FE (1-1).

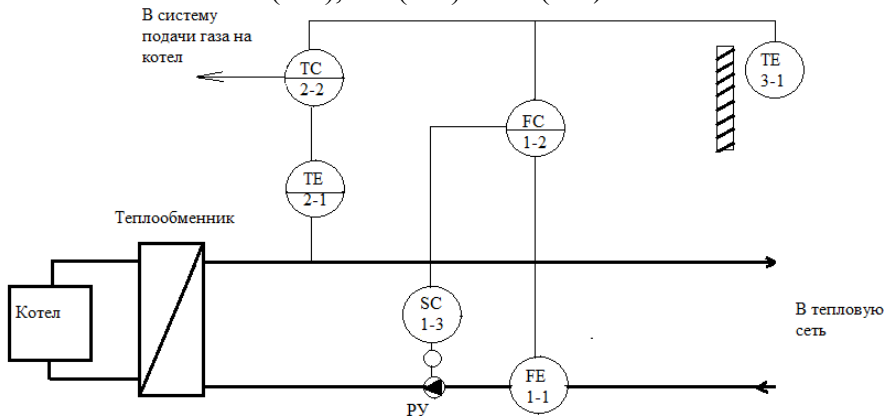


Рисунок 6. Схема качественно-количественного регулирования тепловой нагрузки в системе теплоснабжения

На рис. 7 и 8 приведены графики количественно-качественного регулирования процесса теплоснабжения АБК ККЦ ОАО «ММК». При этом для сбора экспериментальных данных (за период с 1.10.13г. по 30.04.14 г.), необходимых для определения параметра  $KF$  эквивалентного отопительного прибора, была использована автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ) ОАО «ММК». Параметр  $KF$  определялся методом наименьших квадратов.

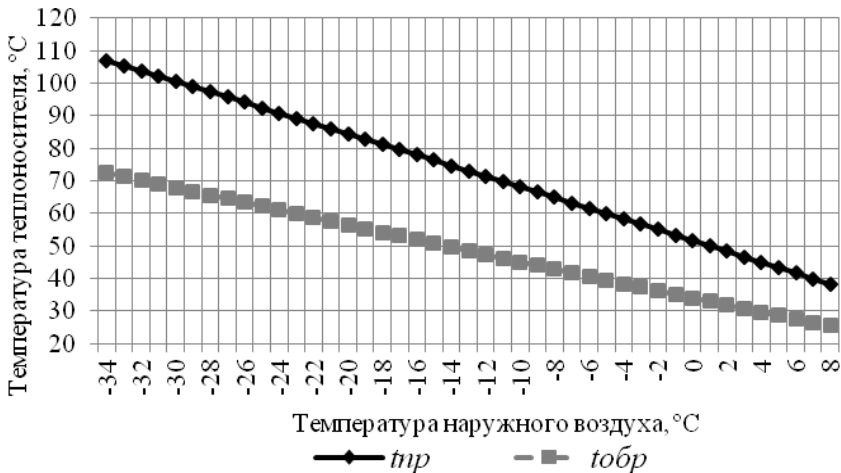


Рисунок 7. Оптимальный температурный график теплоснабжения АБК ККЦ ОАО «ММК»

Как видно из рис.7, оптимальная температура теплоносителя в подающем теплопроводе для расчетной температуры наружного воздуха  $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$  для рассматриваемого объекта должна быть равна всего  $106,91\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а не  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. оптимизация процесса теплоснабжения требует снижения температур теплоносителя (перехода к низкотемпературному теплоснабжению). Массовый расход теплоносителя при этом в течение отопительного сезона должен изменяться в пределах от  $3,54$  до  $1,82\text{ кг/с}$ . Эксперимент по реализации оптимального управления теплоснабжением АБК ККЦ ОАО «ММК» показал, что нормативные требования к температуре внутреннего воздуха при этом удовлетворяются.

Расчетный экономический эффект от внедрения оптимального режима количественно-качественного регулирования процесса теплоснабжения АБК ККЦ ОАО «ММК» составляет 177381,35 руб. за один отопительный сезон.

На основе полученных решений было разработано программное обеспечение по определению оптимальных параметров процесса теплоснабжения для конкретных условий. Описание программного обеспечения приведено в 4 главе.

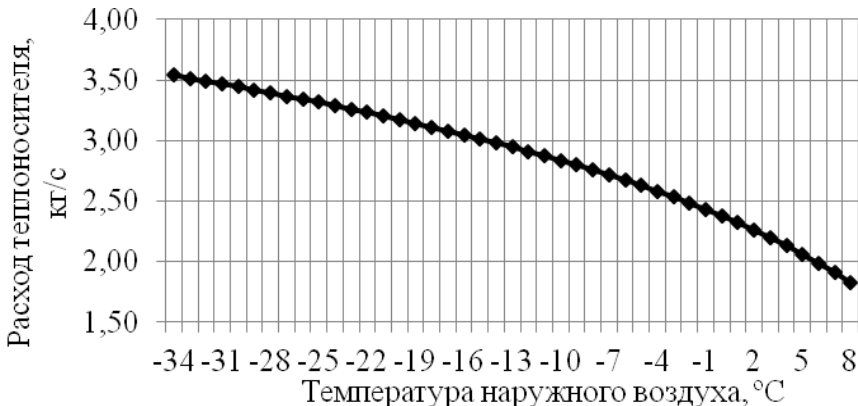


Рисунок 8. Оптимальный график расхода теплоносителя для АБК ККЦ ОАО «ММК»

Проведенные расчеты позволили также установить, что низкотемпературное теплоснабжение выгодно применять в системах с хорошим состоянием теплотрасс и оборудования (изоляция, теплопроводов и насосных установок) и при невысокой разности тарифов на электрическую и тепловую энергию (соотношение цен должно быть в пределах 2-4 раза).

**В заключении** приведены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения работы.

**В приложениях** описаны расчёты и методики расчётов по известным математическим моделям для главы 2 (прил. А-Г), программный комплекс и его интерфейс (прил. Д, Е), экспериментальные данные по теплоснабжению АБК ККЦ.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проектно-расчётными методами оценены характерные особенности систем низкотемпературного теплоснабжения. Установлено, что низкотемпературное теплоснабжение может быть выгодным из-за сокращения тепловых потерь при транспортировке теплоты, однако при этом следует учитывать необходимость увеличения расхода теплоносителя.

2. Разработаны два варианта алгоритма управления расходом в условиях изменяющейся температуры теплоносителя – без учета и с учетом характеристик теплопотребляющего оборудования. Также получены соотношения, позволяющие определить необходимые изменения диаметров теплопроводов в зависимости от изменения температуры теплоносителя, а также оценки удельных потерь давления и линейной плотности теплового потока.

3. Решена задача оптимального управления температурой и расходом теплоносителя с точки зрения минимизации затрат электрической энергии на перекачку и тепловых потерь при транспортировке. Полученное решение позволяет осуществлять выбор графиков количественно-качественного регулирования в зависимости от таких условий как степень изношенности теплопроводов, состояние тепловой изоляции, КПД сетевых насосных установок, соотношение тарифов на тепловую и электрическую энергию, теплотехнические характеристики объекта и т.д.

4. Разработано программное обеспечение для решения задач по определению оптимальной температуры и расхода теплоносителя в прямом и обратном теплопроводах в зависимости от конкретных условий работы системы теплоснабжения.

### Публикации автора по теме диссертации

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

- 1) Панферов, В.И. Оценка возможности применения низкотемпературных систем теплоснабжения в России. /

Панферов, В.И., Гавей, О.Ф., Голяк, С.А., Уливанов, А.М. // Научно-технический журнал Вестник МГСУ – М.: МГСУ, 2011 г. – № 7. – с. 440 – 443.

- 2) Гавей, О.Ф. Оценка влияния температуры теплоносителя на тепловые потери теплопроводов. / Гавей, О.Ф., Панферов, В.И. // Вестник ЮУрГУ. Строительство и архитектура. Выпуск 15. – Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 50-54.
- 3) Панферов, В.И. Об оптимальной температуре теплоносителя в теплотранспортных системах. / Панферов, В.И., Гавей, О.Ф. // Вестник ЮУрГУ. Строительство и архитектура. Том 13. – Издательский центр ЮУрГУ: 2013. – С. 63-66.
- 4) Панферов, В.И. Об оптимальном управлении температурой теплоносителя в тепловых сетях. / Панферов, В.И., Гавей, О.Ф. // Вестник ЮУрГУ. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. Том 14. – Издательский центр ЮУрГУ: 2014. – С. 65-70.

*Статьи в журналах и сборниках научных трудов:*

- 5) Голяк, С.А. Снижение температуры теплоносителя в системах теплоснабжения России: за и против / Голяк, С.А., Гавей, О.Ф. // Энергосбережение № 3. – М.: 2012. – С. 42-44.
- 6) Гавей, О.Ф. Сравнение эффективности различных температурных графиков теплоснабжения в современных условиях. / Гавей, О.Ф., Голяк, С.А., Панферов, В.И. // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России: Сб. материалов конференции – Магнитогорск, МГТУ, 2012. – С. 108-111.
- 7) Гавей, О.Ф. Оценка экономичности сетей теплоснабжения при различных температурных режимах. / Гавей, О.Ф., Панферов, В.И. // Устойчивость, безопасность и энергоресурсосбережение в современных архитектурных, конструктивных, технологических решениях и инженерных системах зданий и сооружений: Сб. материалов конференции. – М.: МГСУ, 2012. – С. 73-79.
- 8) Гавей, О.Ф. Пути повышения эффективности использования энергетических ресурсов в сфере теплоснабжения на промышленных предприятиях. / Гавей, О.Ф., Панферов, В.И. //

Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: Сб. материалов конференции. – М: МИСиС, 2012. – С. 116-117.

- 9) Гавей, О.Ф. Оптимальная температура теплоносителя в системах теплоснабжения с точки зрения сокращения затрат энергетических ресурсов. / Гавей, О.Ф., Панферов, В.И. // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: Сб. научных трудов SWorld. – Одесса: 2012. – С. 45-48.
- 10) Гавей, О.Ф. Об использовании низкотемпературного теплоносителя в системах централизованного теплоснабжения. / Гавей, О.Ф., Панферов, В.И., Голяк, А.С. // Актуальные проблемы автоматизации и управления: Сб. статей. – Издательский центр ЮУрГУ: 2013. – С. 206-210.
- 11) Гавей, О.Ф. Оптимальная температура теплоносителя в системах ЦТС. / О.Ф. Гавей, В.И. Панферов // С.О.К. (Сантехника. Отопление. Кондиционирование): ежемесячный специализированный журнал – 2014. – № 1. – С. 56 –58. Адрес в Интернете: [www.c-o-k.ru](http://www.c-o-k.ru), [www.forum.c-o-k.ru](http://www.forum.c-o-k.ru)
- 12) Гавей, О.Ф. О регулировании температурного графика теплоносителя в тепловых сетях. / О.Ф. Гавей, В.И. Панферов // Строительная физика. Системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях: сб. докл. Международной конф. - академические чтения. – М.: Изд-во МГСУ, 2014. – С. 76 –80.