

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт энергетики/Высшая школа атомной и тепловой энергетики

Работа допущена к защите

Руководитель ОП

\_\_\_\_\_ А.В. Ившин

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

### **РАБОТА БАКАЛАВРА**

#### **ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ ОТ КОТЕЛЬНОЙ ГУП «ТЭК СПБ»**

по направлению подготовки (специальности) 13.03.01 Теплоэнергетика и  
теплотехника

Направленность (профиль) 13.03.01\_01 Промышленная теплоэнергетика

Выполнил

студент гр.3231301/60101

М.В. Ямашкин

Руководитель

доцент ВШАиТЭ

к.э.н., доцент

О.В. Новикова

Консультант

ассистент ВШАиТЭ,

к.т.н.

Я.А. Владимиров

Консультант

по нормоконтролю

Е.А. Соколова

Санкт-Петербург  
2020



## РЕФЕРАТ

На 67 с., 11 рисунков, 14 таблиц.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАФИК, РЕГУЛИРОВАНИЕ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ, ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ

Тема выпускной квалификационной работы: «Обоснование способа регулирования отпуска теплоты от котельной ГУП «ТЭК СПб»». В качестве объекта исследования выбрана 1-Правобережная котельная ГУП «ТЭК СПб». Предметом работы является регулирование теплоотпуска.

Цель данной работы состоит в обосновании метода регулирования отпуска теплоты. При ее достижении применялся исключительно аналитический метод исследования. При этом решались следующие задачи:

1. Оценить влияние отклонения температуры теплоносителя от проектного значения на качество теплоснабжения.
2. Проанализировать проектные и фактические температурные графики и способы регулирования.
3. Разработать предложения по совершенствованию регулирования отпуска теплоты от котельной.
4. Произвести расчет нового способа регулирования отпуска теплоты и эффекта от его применения.

Котельная, установленной мощностью 280,5 Гкал/ч, обеспечивает договорную нагрузку в 289,5 Гкал/ч при проектном температурном графике 150/70 °С. Произведен анализ ее фактической нагрузки в совокупности с применяемым способом регулирования отпуска теплоты. По его результатам сформулированы предложения по усовершенствованию теплоотпуска с коллекторов источника. Наиболее перспективным оказалось использование качественно-количественного регулирования по существующему температурному графику со «срезкой» на 97 °С в случае подключения новых потребителей и количественное по температурному графику 110/70 °С – в случае сохранения существующей нагрузки.

## ABSTRACT

67 pages, 11 figures, 14 tables

KEYWORDS: HEAT SUPPLY, TEMPERATURE CHART, HEAT SUPPLY REGULATION, HEAT LOADS

The subject of the graduate qualification work is «The rationale for the method of heat supply regulation from the boiler house of State Unitary Enterprise "Fuel and Energy Complex of St. Petersburg"». 1-Right-bank boiler house was chosen as the object of research. The subject of this work is the heat supply regulation.

The purpose of this work is to substantiate the method of heat supply regulation. Analytical research method was exclusively used to achieve this goal. The following tasks were solved:

1. To evaluate the impact of the deviation of the coolant temperature from the design value on the quality of heat supply.
2. To analyze the design and actual temperature schedules and regulation methods.
3. To develop proposals for improving the heat supply regulation from the boiler house.
4. To calculate a new method for regulating heat release and the effect of its application.

The boiler house with an installed capacity of 280.5 Gcal/h provides a contractual load of 289.5 Gcal/h with a design temperature chart of 150/70 °C. The analysis of its actual load in conjunction with the applied method of heat supply regulation is made. Based on its results, proposals are formulated to improve the heat supply from the source's collectors. The most promising is the use of qualitative and quantitative regulation by an existing temperature chart with the "cut-off" at 97 °C in the case of connection of new consumers and quantitative with the temperature chart 110/70 °C in case of keeping the existing load.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ.....	8
1.1 Обзор способов регулирования.....	8
1.2 Анализ причин отклонения фактических температурных графиков от проектных .....	22
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ НА ВЫБРАННОМ ОБЪЕКТЕ .....	27
2.1 Определение фактической нагрузки на коллекторах источника теплоты.....	27
2.2 Анализ проектного и фактического регулирования отпуска теплоты	30
2.3 Влияние отклонений температурного графика на технико-экономические показатели котельной .....	37
2.4 Разработка предложений по совершенствованию отпуска теплоты...	42
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ГРАФИКА ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ И ЭФФЕКТА ОТ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ КОТЕЛЬНОЙ ГУП «ТЭК СПб» .....	45
3.1 Расчет графика отпуска теплоты .....	45
3.2 Рекомендации по реконструкции элементов системы теплоснабжения в связи с переходом на новый режим работы .....	49
3.3 Оценка эффекта от применения предложенного графика .....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	63

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящей выпускной квалификационной работе бакалавра рассматривается обоснование способа регулирования отпуска теплоты от котельной ГУП «ТЭК СПб».

На значительной территории Российской Федерации в течение последних десятилетий характерно отклонение фактических температурных графиков регулирования систем теплоснабжения от проектных. В свое время в СССР системы централизованного теплоснабжения (СЦТ), использующие в качестве источника теплоты ТЭЦ или районную котельную, проектировались с температурным графиком регулирования сезонной нагрузки 150/70 °С. Однако к началу 80-х годов XX века появились отклонения от заданных проектных значений, а в расчетных условиях по температуре наружного воздуха температура теплоносителя снизилась со 150 °С до 85...115 °С. В то же время работа источников теплоты оформлялась как работа по проектному графику 150/70°С со «срезкой» при пониженной температуре 110...130°С [1].

На данный момент значительная часть котельных и ТЭЦ продолжает работу по температурному графику со «срезкой», что влечет за собой неprojektные режимы работы установок за счет нарушения гидравлических режимов тепловых сетей и снижением фактических температур теплоносителя. Это, в совокупности с инерционностью систем теплоснабжения, достаточно низким уровнем автоматизации теплопотребляющих установок потребителей и недостатками центрального качественного регулирования тепловой нагрузки, нивелирует положительные стороны СЦТ.

В данной работе предпринята попытка обосновать переход на более совершенный способ регулирования теплоотпуска в условиях отклонения фактических тепловых нагрузок от проектных. Таким образом, объектом для работы служит 1-Правобережная котельная ГУП «ТЭК СПб». Предметом же является регулирование отпуска теплоты.

Цель данной работы состоит в обосновании метода регулирования отпуска теплоты. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить влияние отклонения температуры теплоносителя от проектного значения на качество теплоснабжения.
2. Проанализировать проектные и фактические температурные графики и способы регулирования.
3. Разработать предложения по совершенствованию регулирования отпуска теплоты от котельной.
4. Произвести расчет нового способа регулирования отпуска теплоты и эффекта от его применения.

# ГЛАВА 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ

## 1.1 Обзор способов регулирования

СЦТ являются основными частями энергетического комплекса. СЦТ города – это сложнейший технический комплекс источников теплоты, теплопотребляющих установок и разветвленных тепловых сетей, соединяющих первую группу объектов со второй. При этом стоит отметить, что существует значительное количество схем подключения абонентов к тепловым сетям. Внутри СЦТ в различных ее составляющих одновременно протекает и тесно взаимодействует множество физических и химических процессов: горение, течение жидкостей и газов, тепло- и массоперенос и др. Сложность данных систем компенсируется следующими преимуществами: низкие удельные затраты топливно-энергетических ресурсов на выработку теплоты и хорошие экологические показатели [2, 3]. Из отечественного и зарубежного опыта эксплуатации СЦТ следует вывод, что они обладают значительным потенциалом для совершенствования. Общемировые тенденции в данной области включают в себя мероприятия, связанные с повышением экономической, энергетической и экологической эффективности систем теплоснабжения. В то время как сама потенциальная возможность повышения комплексной эффективности закономерно связана с развитием техносферы в целом. Это проявляется в разработке и применении новых, более совершенных как методических, так и технических решений на уровне совершенствования технологической функции и развития функций управления и планирования систем теплоснабжения [4].

В отопительный период, начало и конец которого характеризуется установлением среднесуточной температуры на уровне  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура в системе отопления поддерживается в зависимости от фактической температуры наружного воздуха по температурному графику.

Системы теплоснабжения изначально проектировались в основном на температурный график  $150/70\text{ }^{\circ}\text{C}$  с использованием качественного



регулирования. Реже применялись и другие: 130/70 °С, 110/70 °С. Однако со временем широкое распространение получило снижение температуры в подающем трубопроводе до значений около 110...130 °С. Так, при температуре воды в подающей линии 110 °С температура в обратной линии составляет 54 °С. Такое решение сопровождается определенными последствиями: при уменьшении перепада температуры теплоносителя в 1,43 раза для обеспечения нагрузки требуется увеличивать расход сетевой воды пропорционально в 1,43 раза, что в свою очередь влечет за собой увеличение скорости движения теплоносителя и возрастание потерь давления в 2 раза. Конечно, мощность насосов, требуемая для прокачки воды, увеличивается, но вопрос обеспечения такого расхода лежит на установленном оборудовании, которое может быть не предназначено для пропуска такого объема. В то же время тепловые сети также могут быть не рассчитаны на увеличенный расход.

Главная и единственная причина перехода с графика 150/70 °С на график со срезкой на 110 или 115 °С это техническое состояние тепловых сетей и реальные опасения теплоснабжающих организаций (ТО), что при работе с высокой температурой в прямом трубопроводе количество дефектов увеличится и также возрастёт тяжесть последствий, также надо учитывать, что при резком падении давления в трубопроводе с температурой выше 100 °С вода вскипает и трубопроводы разрываются. Для решения проблемы необходимо проводить масштабные ремонты с заменой труб, арматуры, компенсаторов и т. д., что в условиях ограниченного бюджета на замену теплосетей трудно осуществимо.

В целом, написанное относится к отпуску потребителям сезонной нагрузки. В неё включают отопление и вентиляцию. Также необходимо при оценке полной нагрузки района учитывать и горячее водоснабжение (ГВС), которое должно обеспечиваться круглогодично. Определение тепловой нагрузки осуществляется либо на основании данных о теплопотреблении абонентов, либо по укрупненным показателям в случае их отсутствия

(например, при проектировании котельной для еще строящегося района). Естественно, что в процессе эксплуатации тепловая нагрузка уточняется.

Немаловажным также является определение расчетной температуры наружного воздуха, потому что именно данный параметр определяет величину тепловой нагрузки, присоединенной к источнику. Очевидно, что минимальная температура воздуха носит кратковременный характер и использование ее в качестве расчетной попросту некорректно ввиду избытка мощности установок. По этой причине используется средняя температура наиболее холодных пятидневок, взятых из восьми наиболее холодных зим за пятидесятилетний период. Для Санкт-Петербурга она составляет  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$  [5].

Основная задача отопления – поддержание температуры внутри помещений не ниже допускаемой. Причем ее значение рекомендуется санитарными нормами и составляет в зависимости от назначения здания от  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для жилых помещений минимально допустимая температура –  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [6]. Для осуществления возложенной на отопление функции необходимо уравновесить тепловые потери здания через наружные ограждения и путем инфильтрации с подводом теплоты системой отопления. Для жилых зданий при этом значения внутренних тепловыделений не учитываются из-за своего непериодического характера и малого вклада в общий баланс системы. Потери от инфильтрации при правильной эксплуатации помещений не превышают неопределенность расчета, т. к. составляют около 6...8%, поэтому для упрощения определения нагрузки их также не учитывают. Для промышленных зданий, конечно, такой подход не применим и расчеты носят более подробный характер [7].

Вентиляция является вторым типом сезонной тепловой нагрузкой, но для промышленных объектов расход теплоты на вентиляцию может превышать отопительную нагрузку. Для снижения отпуска теплоты на данный тип нагрузки расчетная температура для вентиляционных установок несколько выше отопительной и чаще всего берется как средняя температура наиболее холодного периода, составляющего около 15% продолжительности

отопительного периода [5]. Исключением из этого правила являются предприятия промышленности, вырабатывающие значительное количество вредных веществ. Это связано с тем, что для сохранения отпуска теплоты на вентиляцию снижают кратность обмена воздуха в помещении [7].

Такие источники как [7, 8] приводят следующие формулы для определения тепловых нагрузок жилых районов и населенных пунктов:

- Максимальная тепловая нагрузка на отопление жилых и общественных зданий, Вт:

$$Q_{\text{max}} = q_0 \cdot A \cdot (1 + K_1), \quad (1.1)$$

где  $q_0$  – укрупненный показатель максимального теплового потока на отопление жилых зданий на 1 м<sup>2</sup> общей площади, принимаемый по приложению В [9], в зависимости от расчетной температуры отопления, этажности здания и времени его постройки, Вт;

$A$  – общая площадь жилых зданий, м<sup>2</sup>;

$K_1$  – коэффициент, учитывающий тепловой поток на отопление общественных зданий. В условиях отсутствия данных принимают равным  $K_1 = 0,25$ .

- Максимальная тепловая нагрузка на вентиляцию, Вт:

$$Q_{v\text{max}} = q_0 \cdot A \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (1.2)$$

где  $K_2$  – коэффициент, учитывающий тепловой поток на вентиляцию общественных зданий, принимаемый при отсутствии данных равным 0,4 для общественных зданий постройки до 1985 г., а после 1985 г. – 0,6.

- Средний тепловой поток, Вт, на ГВС определяется как

$$Q_{hm} = \frac{m \cdot c \cdot (a + b) \cdot (55 - t_c) \cdot 1,2}{24 \cdot 3600} = q_h \cdot m, \quad (1.3)$$

где  $a$  – норма расхода горячей воды на 1 чел. в сутки, численные значения которой приведены в приложении Г [9];

$b$  – расход горячей воды для общественных зданий, отнесенный к одному жителю района, который в случае отсутствия конкретных данных рекомендуется принимать  $b = 25 \frac{\text{кг}}{\text{чел} \cdot \text{сут}}$ ;

$c = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  – теплоемкость воды;

$t_c$  – температура холодной воды, °С, значение которой при отсутствии данных о температуре холодной водопроводной воды принимают 5 °С и 15 °С в отопительный и летний периоды соответственно;

коэффициент 1,2 учитывает выстывание горячей воды в абонентских системах горячего водоснабжения;

$m$  – количество людей.

- Максимальный тепловой поток, Вт, на ГВС:

$$Q_{h\max} = 2,4 \cdot Q_{hm} \quad (1.4)$$

- Средняя тепловая нагрузка, Вт, за отопительный период на отопление:

$$Q_{om} = Q_{o\max} \frac{t_i - t_{om}}{t_i - t_o}, \quad (1.5)$$

где  $t_i$  – расчетная температура внутреннего воздуха в помещениях, °С;

$t_{om}$  – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С;

$t_o$  – расчетная температура наружного воздуха для проектирования систем отопления, °С.

- Средняя тепловая нагрузка за отопительный период на вентиляцию, Вт;

$$Q_{vm} = Q_{v\max} \frac{t_i - t_{om}}{t_i - t_o}, \quad (1.6)$$

Из написанного выше ясно, что на отрезке времени, когда температура наружного воздуха лежит между значениями начала отопительного периода и расчетной для отопления, тепловая нагрузка принимает значения от минимальной до максимальной, определяемой формулами (1.1) и (1.2). В данный промежуток она может быть определена аналогично средней тепловой нагрузке. Отличие в определении конкретных величин от формул (1.5) и (1.6) заключается в подстановке в данные формулы температуры наружного воздуха в данный момент вместо использования средней температуры за отопительный период. Касательно нагрузки ГВС, описываемой формулами (1.3) и (1.4), стоит отметить, что данный тип нагрузки несмотря на то, что носит круглогодичный характер, имеет суточную и недельную неравномерность, которая на котельных централизованного теплоснабжения сглаживается путем установки баков-аккумуляторов. Помимо этого, в отопительный период значения нагрузки ГВС увеличивается еще на примерно 10...20%, что связано со снижением температуры холодной воды, используемой для поддержания требуемой температуры в системе горячего водоснабжения потребителей.

Таким образом, на протяжении всего отопительного периода необходимо осуществлять регулирование отпуска теплоты с целью качественного обеспечения потребителей. В зависимости от точки осуществления этого процесса различают 4 типа регулирования [7]:

- Центральное: выполняется на ТЭЦ или котельной, иными словами – на источнике теплоснабжения и ведется по типовой тепловой нагрузке, характерной для большинства абонентов района, то есть, например, по отоплению или по двум различным нагрузкам – отоплению и горячему водоснабжению при определенном соотношении между ними.
- Групповое: выполняется на групповых тепловых подстанциях или иначе – пунктах (ГТП) для группы однотипных потребителей. На данный момент термин ГТП устарел, и вместо него используется такое понятие как

центральный тепловой пункт (ЦТП). ЦТП выступает промежуточным звеном между магистральными и распределительными тепловыми сетями. Его роль состоит в поддержании требуемого расхода и температуры теплоносителя в подающих трубопроводах.

- Местное: по аналогии с групповым – на МТП. Данный тип регулирования должен предусматриваться на абонентском вводе для дополнительной корректировки параметров воды в подающем трубопроводе. Однако стоит отметить, что на данный момент данный тип регулирования не выделяют, так как с развитием технологий стали получать распространение автоматизированные индивидуальные тепловые пункты (АИТП). Таким образом стали выделять просто ИТП.

- Индивидуальное: выполняется непосредственно на теплопотребляющих приборах и служит дополнением к остальным типам регулирования.

Разнородная тепловая нагрузка почти всегда обуславливает теплоснабжение района. Причем даже на один абонентский ввод подключают несколько типов нагрузки: отопление, вентиляция и горячее водоснабжение (ГВС). В дополнение ко всему стоит учитывать также и протяженность тепловых сетей, которая характерна для крупных населенных пунктов. Это связано с тем, что существует транспортное запаздывание теплоносителя из-за того факта, что потребители располагаются на различном расстоянии от источника теплоты.

В теории для обеспечения высокой экономичности должно применяться комбинированное регулирование, включающее в себя, в крайнем случае, 3 ступени – центральное, групповое или местное и индивидуальное. Ранее индивидуальное регулирование было невозможно, так как требовало применения большого количества индивидуальных регуляторов, что влекло за собой значительные затраты на реконструкцию теплопотребляющих

установок. В настоящее время данный тип регулирования вполне применим по причине развития технологий и их внедрения.

В 70-80 гг. широкое применение получило центральное регулирование отпуска теплоты по совмещенной нагрузке отопления и ГВС. Это связано с тем фактом, что данные 2 типа нагрузки составляют основную долю в теплопотреблении современных городов. Такой подход позволил обеспечить абонентов по нагрузке ГВС без дополнительного или с незначительным увеличением расхода сетевой воды относительно расчетного расхода на отопление. Следствием такого решения стало уменьшение диаметров трубопроводов тепловых сетей и, как следствие, снижение затрат на их прокладку.

Очевидно, что регулирование осуществляется не вручную, а с помощью систем автоматического регулирования (САР). Подобные системы управляют подачей теплоты по однотипным группам потребителей, что значительно снижает количество авторегуляторов. Но существует проблема, связанная с регулированием подачи по усредненному параметру, измеряемому в одной или нескольких контрольных точках системы. Среднее значение регулируемого параметра в таких точках выдерживается, но отдельные абоненты будут подвержены разрегулировке, что повлечет за собой отклонение от требуемого температурного режима. Во избежание подобных ситуаций необходима тщательная начальная регулировка теплосети.

В целом, в водяных системах централизованного теплоснабжения принципиально существует три метода регулирования:

- Качественный, заключающийся в сохранении расхода теплоносителя при регулировании его температуры на входе в теплопотребляющие приборы.
- Количественный, при котором регулированием происходит регулированием расхода теплоносителя.

- Качественно-количественный, комбинирующий подходы двух других методов за счет регулирования расхода и температуры.

Данные три метода являются выводом из уравнений теплового баланса потребителей. Теплоотдача всех теплопотребляющих приборов вне зависимости от нагрузки и типа абонента может быть выражена по следующей формуле:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \cdot n = W_{II} \cdot (\tau_1 - \tau_2) \cdot n, \quad (1.7)$$

где  $Q$  – количество теплоты, отданное за время  $n$  ;

$k \cdot F$  – произведение коэффициента теплопередачи потребляющих приборов на поверхность нагрева;

$\Delta t$  – средний температурный напор между греющей и нагреваемой средами;

$W_{II}$  – водяной эквивалент греющей среды;

$\tau_1, \tau_2$  – температуры греющей среды на входе в нагревательный прибор и на выходе из него.

Средний температурный напор для первичных, оценочных расчетов может быть представлен в виде разности среднеарифметических значений температур греющей и нагреваемой сред:

$$\Delta t = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - t_{cp}, \quad (1.8)$$

где  $t_{cp}$  – средняя температура нагреваемой среды;

$t_2, t_1$  – температуры вторичной, то есть нагреваемой среды.

Уравнения (1.7) и (1.8) можно свести в такую систему уравнений:

$$\begin{cases} \tau_2 = \tau_1 - \frac{Q}{n \cdot W_{II}} \\ Q = k \cdot F \cdot \left( \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} - t_{cp} \right) \cdot n \end{cases} \quad (1.9)$$



Из совместного решения тепловая нагрузка выражается следующим образом:

$$Q = \frac{(\tau_1 - t_{cp}) \cdot n}{\frac{1}{k \cdot F} + \frac{0,5}{W_{II}}} \quad (1.10)$$

Из полученного уравнения (1.10) логично заключить, что принципиально может использоваться целый ряд параметров для регулирования отпуска теплоты: коэффициент теплопередачи нагревательных приборов  $k$ , площадь включенной поверхности нагрева  $F$ , температура греющего теплоносителя на входе в прибор  $\tau_1$ , эквивалент расхода греющего теплоносителя  $W_{II}$ , время работы прибора  $n$ . На практике для источника теплоснабжения реально влиять только на 2 параметра из них: температуру и водяной эквивалент теплоносителя.

Конечно, стоит упомянуть, что даже регулирование этих величин несколько ограничено. Так, например, температура теплоносителя на входе в теплопотребляющую установку не может быть ниже требуемой для горячего водоснабжения (обычно 60 °С) и не выше предела, определяемого допустимым давлением воды в подающей линии теплоносителя. В то же время эквивалент расхода ограничивается располагаемым напором на ЦТП и ИТП и гидравлическим сопротивлением установок абонентов.

Для наглядности формулы (1.10) во многих источниках, как и в [7], приводят следующие выкладки на основе формулы (1.7) с графической интерпретацией полученной зависимости для различных методов регулирования:

- 1) Для систем непрерывного регулирования:

$$\bar{Q} = \bar{W} \cdot \bar{\delta t} = \bar{k} \cdot \bar{\Delta t}. \quad (1.11)$$

- 2) Для систем регулирования с переменным расходом задаются эмпирическим уравнением типа:

$$\bar{W} = \bar{Q}^m \text{ или } \bar{Q} = \bar{W}^{1/m}. \quad (1.12)$$

В первую очередь стоит пояснить величины, входящие в формулы (1.11) и (1.12), так как от абсолютных значений, применяемых в (1.7), выполнен переход к безразмерному (относительному) виду уравнения.

Пусть система теплоснабжения спроектирована на расчетную тепловую нагрузку  $Q'$ . В таком случае ей будет соответствовать определенный перепад температур между подающей и обратной линиями тепловой сети  $\delta t'$ ; коэффициент теплопередачи нагревательных приборов потребителей  $k'$  при температурном напоре местной системы  $\Delta t'$  и водяной эквивалент  $W'$ .

В зависимости от температуры наружного воздуха, лежащей в пределах от начала отопительного сезона до расчетного значения для данного региона, потребителям необходимо будет отпускать теплоту  $Q \leq Q'$ . Тогда ей будут соответствовать те же величины, но уже для произвольной тепловой нагрузки:  $\delta t, k, \Delta t, W$ .

Поскольку величины из (1.7), не описанные выше, остаются неизменными, то при отношении произвольной нагрузки к расчетной они сокращаются, а остальное можно обобщить, приняв следующие соотношения:

$$\bar{Q} = Q / Q'; \bar{W} = W / W'; \bar{\delta t} = \delta t / \delta t'; \bar{k} = k / k'; \bar{\Delta t} = \Delta t / \Delta t'.$$

Таким образом объясняется аналитический переход к безразмерному виду уравнения (1.7) – (1.11). В то же время формула (1.12) хоть и использует уже описанные относительные величины, но также имеет в своем составе эмпирический степенной параметр  $m$ , характеризующий способ регулирования.

Ввиду удобства и наглядности эмпирической формулы (1.12) именно по ней получают зависимость относительной нагрузки от относительного расхода теплоносителя, представленную на рис.1.

При качественном регулировании, иначе – постоянном расходе теплоносителя, ( $m = 0$ ) из формулы (1.5) следует  $\bar{Q} = \bar{\delta t}$ . При количественном регулировании  $m \geq 1$  получается соотношение  $\bar{Q} \leq \bar{W}$ . В таком случае комбинированный метод регулирования – качественно-количественный, лежит в пределах  $0 < m < 1$  и описывается соотношением  $\bar{Q} \geq \bar{W}$ .

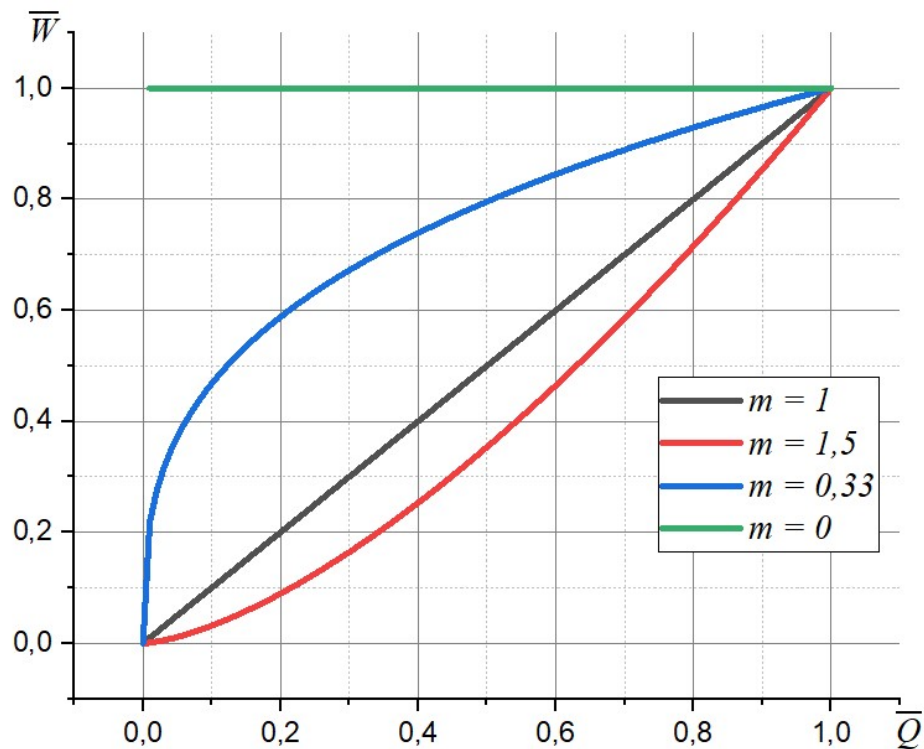


Рис.1. Зависимость  $\bar{Q} \leq f(\bar{W})$

При автоматизации абонентских вводов основное применение получило центральное качественное регулирование, которое дополняется количественным на ЦТП или ИТП. Также может применяться регулирование пропусками. Однако обеспечение надежного теплоснабжения при количественном регулировании или регулировании пропусками возможно только при подключении потребителей по независимой схеме или зависимой со смесительным насосом.

Наибольшее распространение в России получило присоединение по зависимой схеме с элеватором. Такой подход создает пропорциональную

зависимость между расходом теплоносителя в тепловой сети и в абонентских установках.

В настоящее же время система теплоснабжения, а если быть более точным – метод регулирования, требует кардинального пересмотра. Структура отпуска теплоты на данный момент отличается от таковой в СССР, что влечет за собой необходимость применения новых и более экономичных технологий. П.В. Ротов в [10] указывает на возможный переход к низкотемпературному теплоснабжению, количественному и качественно-количественному регулированию в качестве совершенствования технологий отпуска теплоты. Конечно, подобное легче реализовать на вновь строящихся объектах, потому что перевод существующих источников теплоснабжения на подобные способы отпуска теплоты может быть не оправдан по причине значительных средств, требуемых на переналадку тепловых сетей и модернизацию всех составных частей СЦТ. Не учитывая какие-либо экономические расчеты с целью обоснования данного перехода, можно сделать определенное сравнение преимуществ и недостатков способов регулирования, что представлено в работах [10] и [11].

Основное преимущество качественного регулирования – стабильный гидравлический режим тепловой сети. При этом данный способ имеет целый ряд недостатков. Среди них:

- a. Достаточно низкая надежность пиковых источников теплоты.
- b. Дорогостоящие методы обработки подпиточной воды.
- c. Повышенный температурный график для компенсации отбора воды на ГВС.
- d. Значительное транспортное запаздывание.
- e. Снижение качества теплоснабжения при регулировании температуры теплоносителя по средней за несколько часов температуре наружного воздуха.
- f. При переменной температуре усложняются режимы работы компенсаторов.

В то же время количественное и качественно-количественное регулирование по своим преимуществам и недостаткам полностью обратно рассмотренному выше качественному способу. Конечно, при переходе на такой метод регулирования имеет место переменный гидравлический режим работы тепловой сети, а капитальные затраты значительно возрастают. Однако, за счет снижения температуры воды в подающей линии до 110 °С имеется возможность для применения менее дорогих методов обработки подпиточной воды, а в местных и квартальных сетях возможна прокладка трубопроводов из неметаллических материалов, применение которых при качественном регулировании было невозможно по причине повышенных температур. Помимо этого, за счет более стабильной температуры в подающей и обратной линиях, компенсаторы находятся в более благоприятных условиях работы.

Так как количественное и качественно-количественное регулирование включают в себя изменение расхода теплоносителя, то инерционность системы теплоснабжения снижается. Это объясняется тем, что тепловые сети значительно быстрее реагируют на изменение давления в трубопроводах по сравнению с изменением температуры воды, характерной для качественного метода. Также стоит отметить, что в течение значительной части отопительного периода работа системы теплоснабжения может быть обеспечена с пониженным расходом теплоносителя.

Написанное выше суммарно дает еще одно преимущество – наилучшие тепловые и гидравлические показатели по режиму систем отопления. Это достигается тем, что при таком методе регулирования уменьшается влияние гравитационного напора на общий пьезометрический график, а отопительные приборы не подвержены значительному перегреву.

Таким образом логично заключить, что уход от принятого проектного графика 150/70 °С с качественным регулированием в сторону совмещения количественного и качественно-количественного регулирования является оптимальным для совершенствования отпуска теплоты.

## 1.2 Анализ причин отклонения фактических температурных графиков от проектных

Как было отмечено ранее отклонение фактических тепловых нагрузок от их проектного значения началось еще в 80-х годах прошлого столетия. В настоящее время это стало еще заметнее на фоне того факта, что в значительной части тепловых сетей не выдерживается проектный температурный график, но значительных проблем с обеспечением качественного теплоснабжения потребителей не наблюдается. Подобная ситуация позволяет сделать вывод, что проектная нагрузка теплосети завышена и в отпуске теплоты по проектному графику нет острой необходимости.

Изначальной причиной отклонения температурного графика от его проектного значения стал тот факт, что достаточно изношенные тепловые сети не способны выдержать ту температуру и давление, которые необходимы для работы по проектному температурному графику. При повышенном давлении, которое необходимо обеспечивать для сохранения воды в жидкой фазе, значительно увеличиваются протечки тепловых сетей, а аварии носят более опасный характер ввиду резкого вскипания теплоносителя.

В свою очередь, отклонение фактической нагрузки отопления от договорной послужило хорошим поводом для массового применения «срезки».

Здесь важно отметить, что в договорах и проектной документации для жилых домов и подобным им объектам указывается нагрузка на отопление. При этом понимается, что в эту нагрузку включены расходы теплоты на естественную вентиляцию, то есть нагрузка на вентиляцию для жилых домов есть, но в документации она не указывается.

В первую очередь автор [1] выделяет замену оконных блоков на стеклопакеты, то есть рассматриваются потери именно посредством теплопередачи через наружные ограждения в виде остекленных поверхностей.

Потери же теплоты от неплотности конструкции окон и балконов можно закладывать в потери с инфильтрацией.

Внедрение стеклопакетов имело широкое применение в начале 2000-х годов, а в настоящее время все проекты домов изначально предусматривают установленные стеклопакеты. Благодаря подобному решению термическое сопротивление окон увеличилось примерно на 33% (с 0,3 до 0,4 (м<sup>2</sup>·К)/Вт).

Тогда теплотопери, Вт, которые оцениваются по формуле:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1.13)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$F$  – площадь теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – разность температур внутренней стенки (принимаемой равной температуре в помещении) и наружного воздуха, °С.

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), в таком случае может быть записан как:

$$K = \frac{1}{R_B + R_{ок}}, \quad (1.14)$$

где  $R_B$  – термическое сопротивление стенка-воздух, (м<sup>2</sup>·К)/Вт, которое в случае стеклопакета может быть принято около 0,07 (м<sup>2</sup>·К)/Вт;

$R_{ок}$  – термическое сопротивление стеклопакета, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Тогда коэффициент теплопередачи при установке стеклопакета по отношению к случаю с обычным оконным блоком по уравнению (1.14) составит:

$$\overline{K} = \frac{K_{cn}}{K_{ок}} = \frac{\frac{1}{0,07 + 0,4}}{\frac{1}{0,07 + 0,3}} = \frac{0,07 + 0,3}{0,07 + 0,4} = 0,787. \quad (1.15)$$

Поскольку по уравнению (1.13) тепловые потери через окна прямо пропорциональны коэффициенту теплопередачи, то согласно равенству (1.15) они снизятся на 21,3%. В рамках общих теплотерь здания потери через окна

посредством теплопередачи составляют около 20% отопительной нагрузки [1]. Таким образом за счет установки стеклопакетов требуемый отпуск теплоты снижается на  $0,2 \cdot 0,213 \cdot 100\% = 4,26\%$ .

Во-вторых, стоит отметить повышение расчетной температуры для проектирования систем теплоснабжения. Так в [12] данная величина для Санкт-Петербурга составляет  $-26^\circ\text{C}$ . В то время как на данный момент по [5], как уже было отмечено выше, это  $-24^\circ\text{C}$ .

Подобное изменение в нормативных документах для расчета систем теплоснабжения снизило проектную нагрузку на  $\left(1 - \frac{18 + 24}{18 + 26}\right) \cdot 100\% \approx 4,55\%$ .

Помимо этого, в [1] указывается на такой немаловажный факт, как кратность воздухообмена в помещениях. В соответствии с [13] максимальная величина данного параметра в жилых зданиях составляет в настоящее время  $0,35 \text{ ч}^{-1}$ .

Тепловую нагрузку вентиляции принимают согласно проектам местных систем вентиляции у абонентов. В случае же действующих установок – по эксплуатационным данным. В целом оценить расход теплоты возможно по формуле, приводимой в [7]:

$$Q_B = m \cdot V_B \cdot c_B \cdot (t_{\text{вп}} - t_H), \quad (1.16)$$

где  $m$  – кратность воздухообмена, 1/с или 1/ч;

$V_B$  – вентилируемый объем здания,  $\text{м}^3$ ;

$c_B$  – объемная теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$t_{\text{вп}}, t_H$  – температура нагретого воздуха, подаваемого в помещение, и наружного воздуха соответственно,  $^\circ\text{C}$ .

Таким образом по (1.16) вентиляционная нагрузка прямо пропорциональна кратности воздухообмена. Согласно [13] данный параметр может быть снижен на 65 %. При этом доля нагрузки на вентиляцию в общем теплоснабжении зданий лежит в районе 45 %, на что указывает автор [14].



Тогда общее снижение отопительной нагрузке находится на уровне  $0,65 \cdot 0,45 \cdot 100\% \approx 29\%$ .

Также стоит отметить, что в жилых зданиях, как правило, применяется естественная вентиляция, организуемая жильцами при проветривании с помощью форточек и оконных створок. Вполне можно предположить, что при низких температурах наружного воздуха расход холодного воздуха, поступающего в помещения, особенно после практически полной замены оконных блоков на стеклопакеты далек от нормативного значения, то есть фактически снижается еще ниже, чем прописанные в [13]  $0,35 \text{ ч}^{-1}$ . Таким образом, сниженная естественная вентиляция при температурах ниже  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  влечет за собой дополнительное отклонение в подключенной нагрузке примерно на 10...15 %.

Суммируя перечисленные выше факторы, можно заключить, что за счет указанных мероприятий общая тепловая нагрузка источников теплоснабжения ниже проектных значений на величину около 48...53 %, что показано в таблице 1. По этой причине пониженный температурный график или наличие верхней «срезки» (на те же 48...53 %) не оказывают отрицательного влияния на качество теплоснабжения потребителей при сохранении проектных расходов в тепловых сетях.

Таблица 1

## Снижение фактической нагрузки потребителей

Фактор	Величина, %
Замена оконных блоков на стеклопакеты; остекление балконов и лоджий	4,26
Изменение расчетной температуры наружного воздуха	4,55
Снижение кратности воздухообмена	29
Эффект «закрытых форточек»	10...15
<b>Всего</b>	<b>47,81...52,81</b>

Конечно, не совсем корректно говорить о надлежащем теплоснабжении при условии, что нарушаются проектные режимы работы, которые в свою очередь были приняты по некорректным нормам кратности воздухообмена.

Если рассматривать с этой точки зрения на примере основной подключенной нагрузки (старый жилой фонд, подключенный к системе теплоснабжения по открытой схеме с элеваторами), то при срезке, начиная с температуры наружного воздуха около  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура теплоносителя в прямой линии при неизменном расходе не повышается. Частично недотоп компенсируется снижением температуры воды в обратной линии, но при этом все-таки не обеспечивается заданный проектом уровень теплоснабжения. И все-таки, говоря о качестве снабжения теплотой потребителей, стоит сказать, что жалоб с их стороны касательно данного вопроса не поступает, то есть фактически обеспечивается допустимая температура внутреннего воздуха в помещениях.

В целом, в данном пункте показаны общие тенденции по освещаемому вопросу, которые могут быть приведены в качестве обзорного представления проблемы, рассматриваемой в рамках данной выпускной работы.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ НА ВЫБРАННОМ ОБЪЕКТЕ

2.1 Определение фактической нагрузки на коллекторах источника теплоты

На рассматриваемой 1-Правобережной котельной, расположенной в Невском районе Санкт-Петербурга установлено оборудование, представленное в таблице 2.

Таблица 2

Оборудование котельной

Тип и марка	Количество
Котел ПТВМ-50	4
Котел ДКВР-20/13	4
Насос СЭ-1250-140	3

Реальная нагрузка потребителей может быть определена по данным приборов учета. По причине того, что тепловая нагрузка прямо пропорциональна температуре наружного воздуха, возможна экстраполяция заранее полученной методом аппроксимации данных кривой.

Касательно получения зависимости нагрузок от температуры наружного воздуха стоит пояснить две особенности:

1) Все точки, полученные при температуре воздуха выше 4 °С, были убраны из выборки по причине их отрицательного вклада в аппроксимацию данных. Их нежелательно использовать из-за особенностей теплоснабжения в начале отопительного периода, когда осуществляется периодическое протапливание и, в целом, работа источников теплоты носит еще не стабилизировавшийся характер.

2) По причине особенностей холодного периода 2019 года выборка имеет точки в диапазоне температур до -17 °С, что являлось минимальной среднесуточной температурой за рассматриваемый год. В свою очередь согласно [15, приложение 14] для фактической нагрузки использовались данные при температуре наружного воздуха до -10 °С. Это объясняется тем,

что  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  наружного воздуха является точкой, вблизи которой начинает применяться срезка температурного графика, которая согласно [15, приложение 14] не должна учитываться в данном расчете.

Результаты обработки данных приводятся на рис.2.

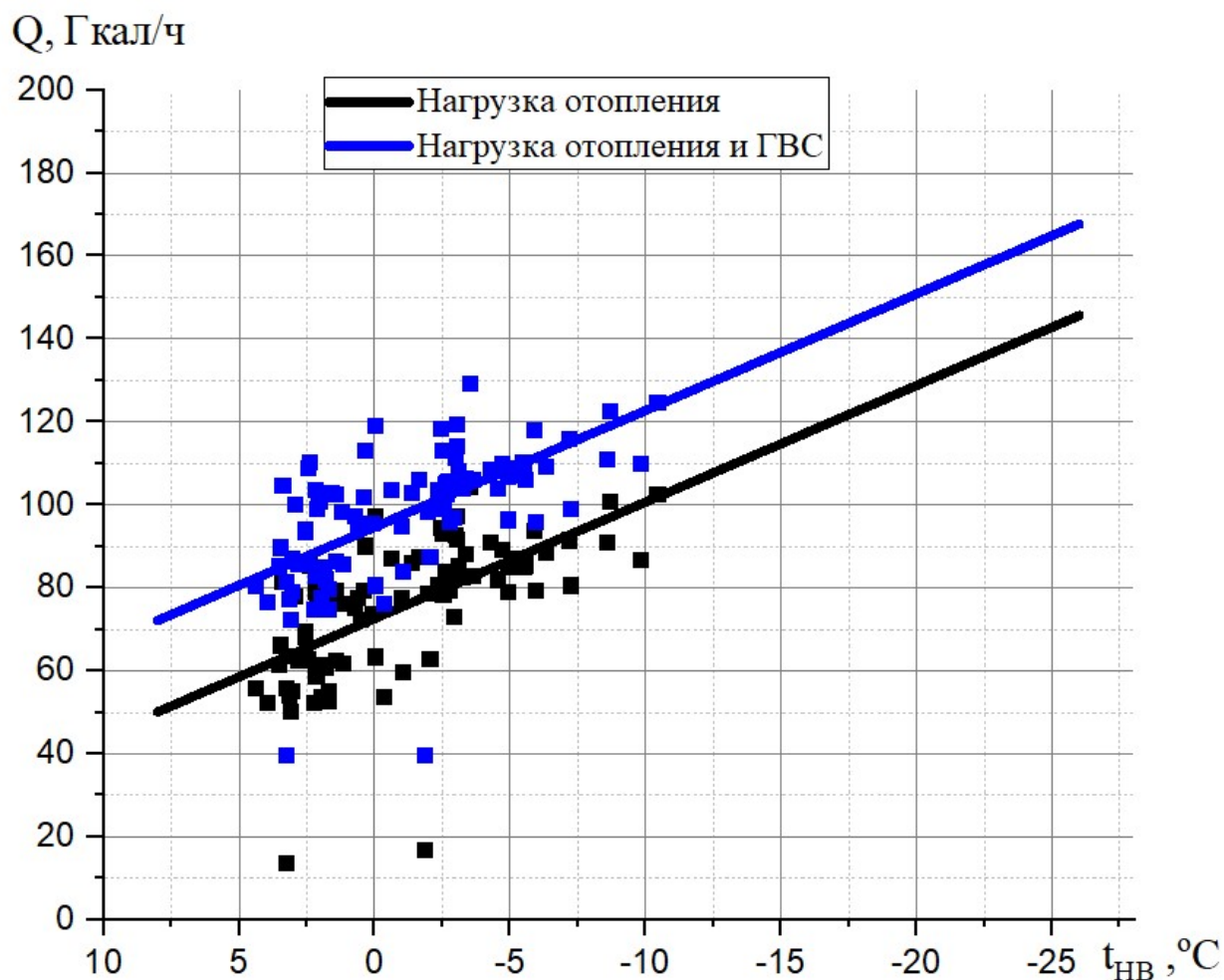


Рис.2. Фактическая нагрузка на коллекторах источника от температуры наружного воздуха

Как видно, нагрузка ГВС практически постоянна и лишь увеличивает общую подключенную нагрузку источника на величину около 22 Гкал/ч. При этом нагрузка отопления на момент становления расчетной температуры наружного воздуха ( $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) составляет около 140 Гкал/ч.

По состоянию на 2019 год баланс мощности данного объекта согласно [16, табл. 15] в сравнении с полученными при расчетах значениями представлен в таблице 3.

Таблица 3

## Баланс мощности

	Договорная [16, табл. 15]	Расчетная [16, табл. 15]	Фактическая (по данным приборов учета)
Установленная мощность, Гкал/ч	288,5		
Ограничения, Гкал/ч	53,8		
Располагаемая мощность, Гкал/ч	234,7		
Потери при передаче, Гкал/ч	10,98		
Подключенная нагрузка, Гкал/ч, в т.ч.:	289,5	225,68	162,12
Отопление и вентиляция, Гкал/ч	242,48	194,92	140,05
ГВС ср.сут., Гкал/ч	47,03	30,77	22,07
Резерв/Дефицит, Гкал/ч	-65,78	-1,96	61,6

Стоит отметить, что расчетная нагрузка из [16, табл. 15] тоже считалась в соответствии с [15, приложение 14]. Однако в соответствии с методикой учитывался диапазон температур наружного воздуха от +8 °С до –10 °С. Это и является причиной завышения расчетной нагрузки, как уже отмечалось ранее.

По полученным данным можно сделать два основных вывода:

- 1) Фактическая нагрузка значительно ниже договорной и расчетной и составляет соответственно около 56 % и 72 % от них.
- 2) По договорной нагрузке наблюдается дефицит мощности. В то время как по расчетной его величина достаточно мала и составляет около 2 Гкал/ч, а говоря о фактической нагрузке, можно заключить, что имеется значительный резерв мощности (около 62 Гкал/ч).

## 2.2 Анализ проектного и фактического регулирования отпуска теплоты

В целом, данная котельная является типовой, что видно по установленному оборудованию и по проектному температурному графику.

В соответствии с данными по 1-Правобережной котельной ГУП «ТЭК СПб» построены температурные графики ее работы, показанные на рис.3. и рис.4. Численные же значения режимов представлены для сравнения в общей таблице 4. При этом стоит отметить, что фактический температурный график работы котельной был получен методом аппроксимации данных с приборов учета, установленных на источнике теплоснабжения, с дальнейшей экстраполяцией по температуре наружного воздуха.

Таблица 4

Зависимости температуры теплоносителя от температуры наружного воздуха

Температура наружного воздуха, °С	Проектные		Утвержденные		Фактические	
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
-26	150,0	70,0	110	53	97	55
-25	147,3	69,1	110	53	97	55,26
-24	144,6	68,2	110	54	97	55,52
-23	141,9	67,3	110	54	97	55,78
-22	139,1	66,4	110	55	97	56,05
-21	136,4	65,5	110	55	97	56,31
-20	133,7	64,6	110	55	97	56,57
-19	130,9	63,6	110	56	97	56,84
-18	128,2	62,7	110	56	97	57,10
-17	125,4	61,8	110	56	97	57,36
-16	122,6	60,8	110	57	97	57,63
-15	119,9	59,9	110	57	97	57,89
-14	117,1	58,9	110	57	97	58,15
-13	114,3	57,9	110	58	97	58,42
-12	111,5	57,0	110	57	97	58,68
-11	108,7	56,0	107	56	97	58,94
-10	105,9	55,0	105	55	97	59,21
-9	103,1	54,0	102	54	97	59,47
-8	100,2	53,0	99	53	97	59,73
-7	97,4	51,9	97	52	97	60
-6	94,5	50,9	95	51	94,3	58,8

## Продолжение таблицы 4

-5	91,7	49,9	92	50	91,6	57,6
-4	88,8	48,8	89	49	88,9	56,4
-3	85,9	47,7	87	48	86,2	55,2
-2	83,0	46,6	84	46	83,5	54
-1	80,1	45,5	81	45	80,8	52,8
0	77,2	44,4	79	44	78,1	51,6
1	74,2	43,3	76	43	75,4	50,4
2	71,3	42,2	73	42	72,7	49,2
3	68,3	41,0	71	41	70	48
4	65,3	39,8	70	41	70	48,2
5	62,3	38,6	70	41	70	48,4
6	59,2	37,4	70	42	70	48,6
7	56,2	36,2	70	42	70	48,8
8	53,1	34,9	70	43	70	49

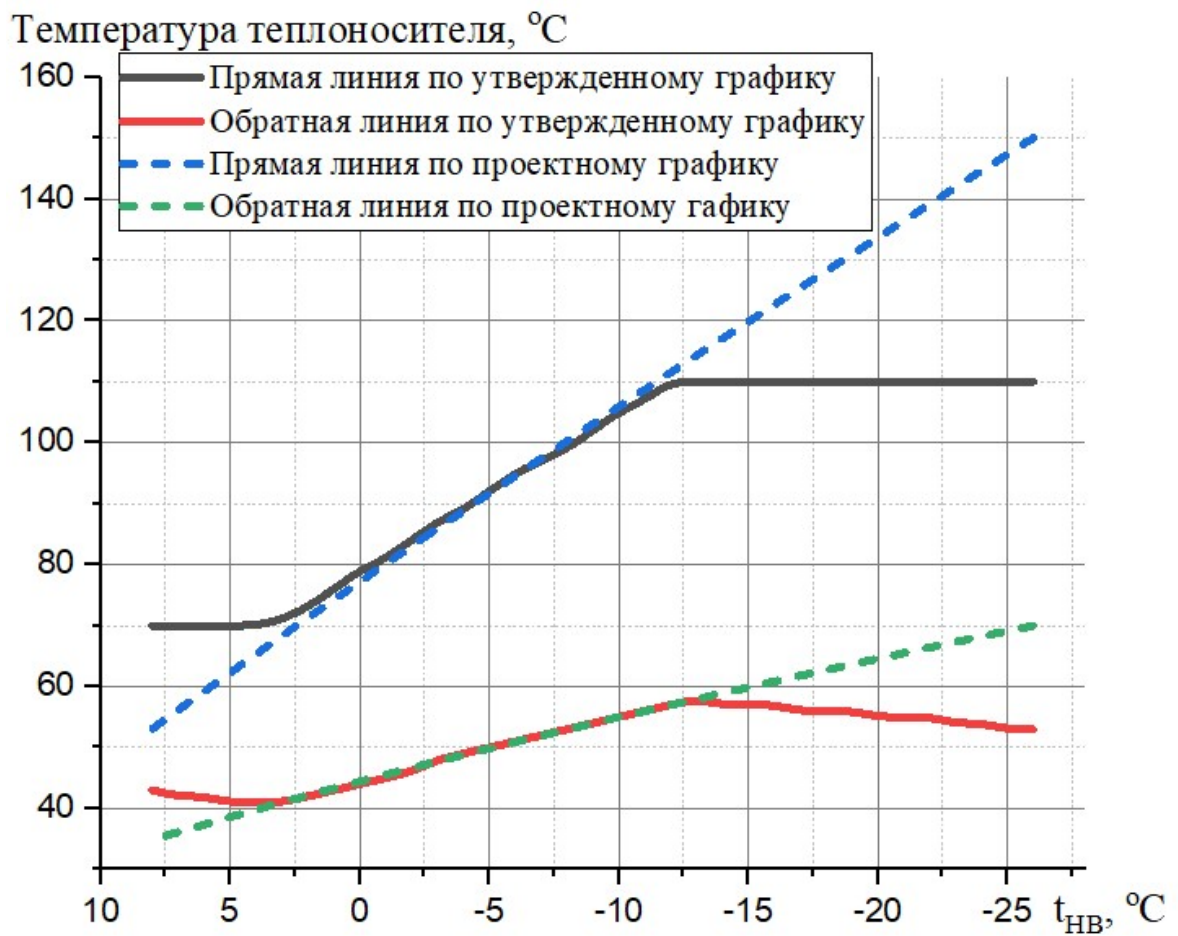


Рис.3. Проектный и утвержденные температурные графики

Температура теплоносителя, °С

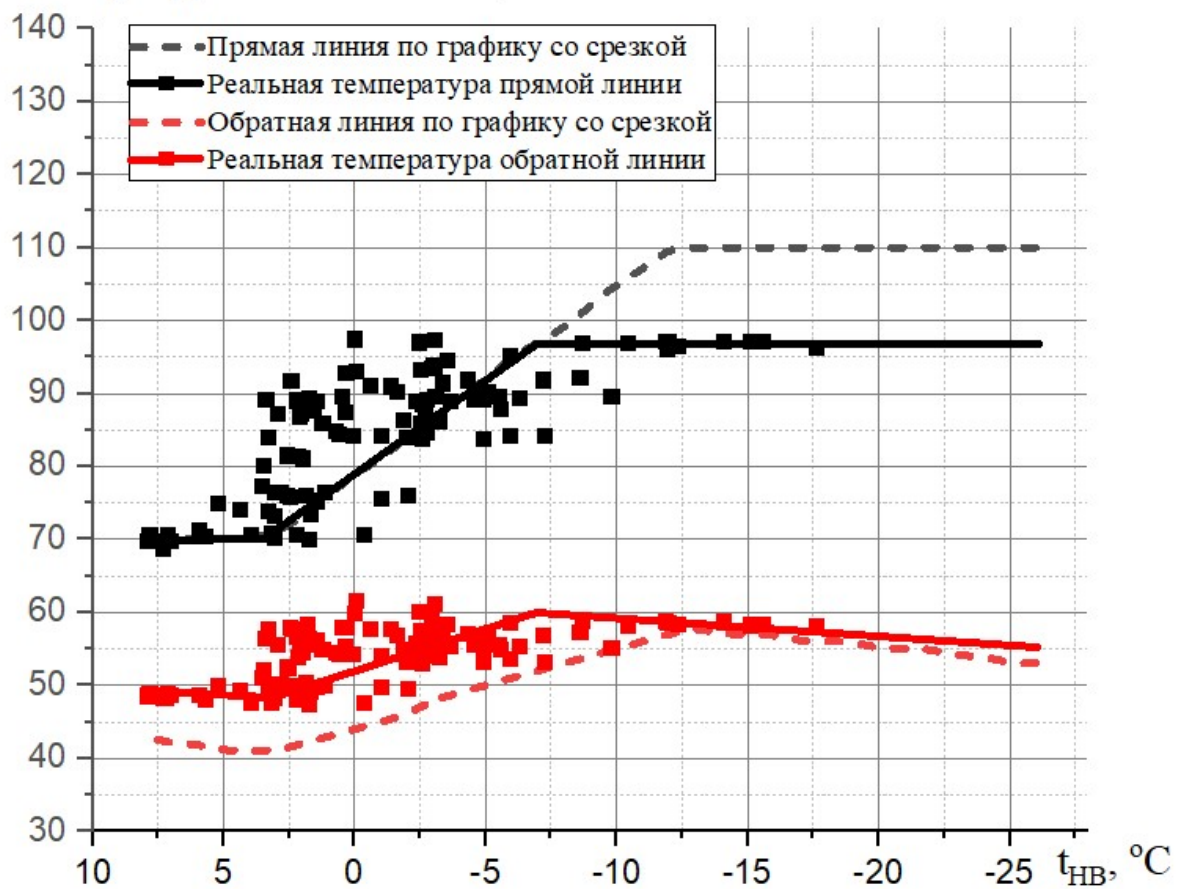


Рис.4. Утвержденный температурный график и аппроксимированный температурный график по данным приборов учета

На основании полученных данных можно заключить следующее:

- 1) Реальная температура срезки составляет 97 °С, что на 13 °С ниже утвержденного температурного графика. Соответственно температура воды в обратной линии также отличается и составляет при расчетной температуре наружного воздуха 55,5 °С.
- 2) Нижняя срезка неизменна и располагается на уровне 70 °С.
- 3) Только на интервале от 3 до -7 °С, согласно температурному графику, сохраняется качественное регулирование.

Помимо оценки температурного графика работы котельной необходимо также провести анализ по расходам теплоносителя. Оценить проектный расход, т/ч, при качественном регулировании и открытой системе ГВС возможно по формуле:



$$G = \frac{Q_{om+в} \cdot 10^3}{T_1 - T_2} + \frac{Q_{ГВС} \cdot 10^3}{t_1 - t_2}, \quad (2.1)$$

где  $Q_{om+в}$  – суммарная нагрузка отопления и вентиляции, Гкал/ч;

$Q_{ГВС}$  – нагрузка ГВС, Гкал/ч;

$T_1, T_2$  – температуры в прямой и обратной линии тепловых сетей;

$t_1, t_2$  – температуры прямой и обратной линии потребителя, равные 65 и 5 °С соответственно.

Тогда при проектном графике 150/70 °С и данным таблицы 3 получаем по (2.1), что расход в подающую линии тепловых сетей по договорной нагрузке составит:

$$G_{пл}^{Дог} = \frac{242,48 \cdot 10^3}{150 - 70} + \frac{47,03 \cdot 10^3}{65 - 5} = 3814 \text{ м / ч.}$$

Данный результат является весьма удовлетворительным по причине соответствия установленному оборудованию: для проектной нагрузки в 280 Гкал/ч установлено три насоса подающей линии с суммарной подачей 3650 т/ч. Иными словами, договорной расход теплоносителя в подающий трубопровод тепловых сетей пропорционален увеличенной договорной нагрузке (289,5 Гкал/ч).

В то же время наиболее показательным значением будет расход теплоносителя при утвержденном температурном графике со срезкой, которому соответствуют температуры теплоносителя для расчетной температуры наружного воздуха – 110/54 °С. В таком случае по (2.1) его величина составит:

$$G_{пл}^{Yme} = \frac{140,05 \cdot 10^3}{110 - 54} + \frac{22,07 \cdot 10^3}{65 - 5} = 2868 \text{ м / ч.}$$

Однако реальный расход теплоносителя в подающую линию по данным приборов учета котельной носит непостоянный характер. В соответствии с температурным графиком можно принять 2 реперные точки: 3 °С и -7 °С. По методике, аналогичной определению фактической нагрузки (аппроксимация с дальнейшей экстраполяцией), возможно построить зависимость расхода

теплоносителя от температуры наружного воздуха. Отличием является лишь разбиение отопительного периода на 3 независимых участка:  $-26 \dots -7$  °С,  $-7 \dots 3$  °С и  $3 \dots 8$  °С. Результаты расчетов представлены на рис.5. и в таблице 5.

Таблица 5

Результат аппроксимации и экстраполяции данных приборов учета

Температура наружного воздуха, °С	Расход, т/ч	Температура наружного воздуха, °С	Расход, т/ч	Температура наружного воздуха, °С	Расход, т/ч
-26	3096	-7	3096	3	3012
-25	3096	-6	3087,6	4	2990,2
-24	3096	-5	3079,2	5	2968,4
-23	3096	-4	3070,8	6	2946,6
-22	3096	-3	3062,4	7	2924,8
-21	3096	-2	3054	8	2903
-20	3096	-1	3045,6		
-19	3096	0	3037,2		
-18	3096	1	3028,8		
-17	3096	2	3020,4		
-16	3096	3	3012		
-15	3096				
-14	3096				
-13	3096				
-12	3096				
-11	3096				
-10	3096				
-9	3096				
-8	3096				
-7	3096				

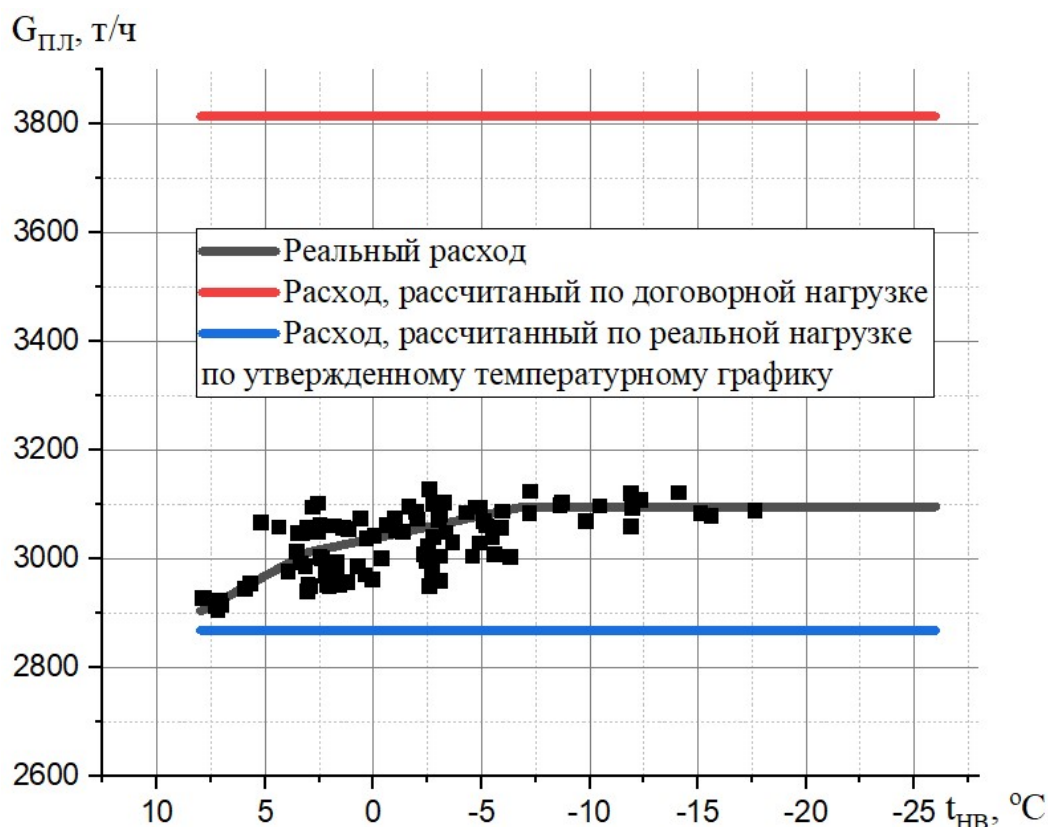


Рис.5. Зависимость расхода теплоносителя в подающую линию от температуры наружного воздуха

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1) Реальный расход теплоносителя в подающую линию значительно ниже рассчитанного по договорной нагрузке, что соответствует ожиданиям по результатам таблицы 3.

2) Несмотря на наличие ломаных участков кривой реального расхода, общее отклонение от постоянного участка составляет  $(3096 - 2903) / 3096 \cdot 100\% \approx 6,2\% < 7\%$ . Таким образом можно считать, что в действительности расход теплоносителя на подачу в тепловые сети условно постоянный.

3) Большой угол наклона на первом участке (8...3 °C) можно объяснить еще не установившимся режимом работы котельной и применением периодического протапливания, поэтому данная зона является наименее показательной.

4) Расход, рассчитанный по реальной нагрузке при утвержденном температурном графике со срезкой, несколько ниже реального. Разницу между их значениями возможно объяснить тем фактом, что фактический температурный график ниже утвержденного, а увеличенный расход теплоносителя позволяет скомпенсировать недостаток теплоотпуска, вызванный этим несоответствием температурных графиков.

Помимо сравнения с договорным расходом также необходимо оценить характер потерь теплоносителя с утечками и его расход на ГВС. Для этого по методике, описанной выше для подающей линии, произведено построение кривой расхода теплоносителя от температуры наружного воздуха для обратной линии. Результат представлен на рис.6.

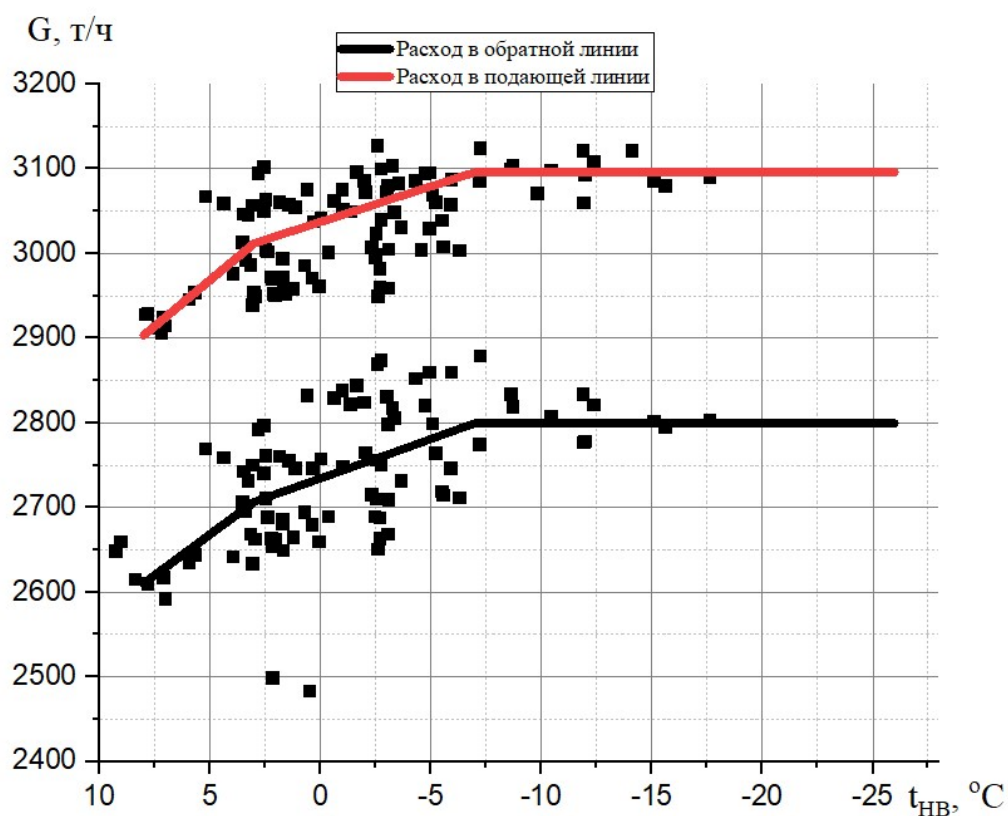


Рис.6. Расход теплоносителя в прямой и обратной линиях тепловых сетей

Как видно по рис.6., две кривые, характеризующие расход теплоносителя, фактически эквидистантны. Это позволяет судить о постоянстве расхода воды на ГВС и потери теплоносителя путем утечек в течение отопительного периода.

Также ввиду того, что основная часть потребителей подключена по открытой схеме, подтверждается отмеченное ранее постоянство нагрузки ГВС. Это связано с тем, что нагрузка ГВС прямо пропорциональна расходу теплоносителя на ГВС, что следует из написанного выше, и температурному перепаду в абонентских установках, который в таком случае возможно принимать постоянным и равным  $65 - 5 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 2.3 Влияние отклонений температурного графика на технико-экономические показатели котельной

Одним из технико-экономических показателей котельной является значение затрачиваемой электроэнергии на привод электродвигателей насосов для обеспечения нормального расхода теплоносителя и устойчивого гидравлического режима тепловых сетей.

На рассматриваемой котельной, как уже было отмечено выше установлено три насоса СЭ-1250-140. Для дальнейших расчетов необходима его рабочая характеристика, представленная на рис.7.

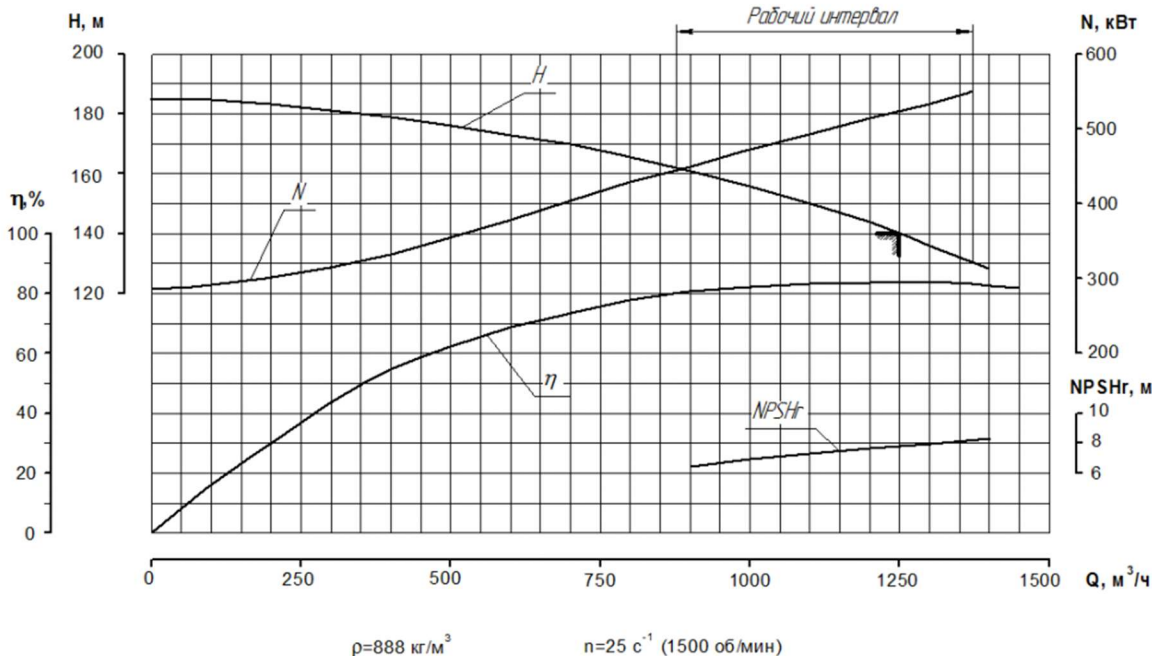


Рис.7. Рабочая характеристика насоса СЭ-1250-140

Мощность, кВт, требуемая на валу насоса, для подачи теплоносителя согласно [17] может быть определена по следующей формуле:

$$N = \frac{G \cdot \rho \cdot H}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{н}}}, \quad (2.2)$$

где  $G$  – объемный расход теплоносителя, перекачиваемого насосом, м<sup>3</sup>/ч;

$\rho$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – напор, развиваемый насосом при расходе  $G$ , м;

$\eta_n, \eta_{\text{н}}$  – КПД передачи и насоса; при расчетах можно принимать  $\eta_n = 0,98$ .

Затраты электроэнергии определяются путем произведения мощности, рассчитанной по (2.2), на число часов работы насоса. При сравнении двух способов отпуска теплоты за рассматриваемый период очевидно, что затраты электрической энергии при реальном режиме работы котельной, отнесенные к той же величине при работе по теоретическому режиму, будут прямо пропорциональны отношению мощностей электродвигателей насосов при этих способах отпуска теплоносителя. Численно это записывается следующим образом:

$$\frac{\mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_m} = \frac{N_p}{N_m}. \quad (2.3)$$

В таком случае, развивая мысль, продолжим упрощать (2.2), подставляя в соотношение (2.3):

$$\frac{\mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_m} = \frac{N_p}{N_m} = \frac{\frac{G_p \cdot \rho \cdot H_p}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{н}_p}}}{\frac{G_m \cdot \rho \cdot H_m}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{н}_m}}} = \frac{G_p \cdot H_p \cdot \eta_{\text{н}_m}}{G_m \cdot H_m \cdot \eta_{\text{н}_p}}. \quad (2.4)$$

По причине слабой зависимости плотности теплоносителя (воды) от давления данный член уравнения возможно сократить. Коэффициент полезного действия передачи по [17] остается неизменным и подобно переводным коэффициентам 3600 и 102 сокращается.

В то же время, напор, развиваемый насосами, служит для преодоления гидравлического сопротивления, которое при тепловых сетях значительной протяженности в основном является потерями на трение, то есть  $H = \Delta p$ .

Согласно известной формуле Дарси-Вейсбаха потери давления прямо пропорциональны квадрату скорости теплоносителя, то есть  $\Delta p \sim w^2$ . В свою очередь скорость возможно определить по расходу прокачиваемой жидкости:

$$G = w \cdot F / 3600 \Rightarrow w = \frac{G}{3600 \cdot F}, \quad (2.5)$$

где  $G$  – объемный расход теплоносителя, перекачиваемого насосом, м<sup>3</sup>/ч;

$F$  – площадь проходного сечения трубы, м<sup>2</sup>;

$w$  – скорость теплоносителя, м/с.

По причине того, что рассматривается неизменная тепловая сеть, то и проходное сечение трубопроводов останется неизменным вне зависимости от расхода теплоносителя. Тогда, продолжая упрощение формулы (2.4), на основе представленных выше рассуждений и зависимости (2.5) не представляет трудности прийти к результату в виде:

$$\frac{\mathcal{E}_p}{\mathcal{E}_m} = \frac{G_p \cdot H_p \cdot \eta_{нм}}{G_m \cdot H_m \cdot \eta_{нр}} = \frac{G_p \cdot \frac{G_p^2}{3600 \cdot F} \cdot \eta_{нм}}{G_m \cdot \frac{G_m^2}{3600 \cdot F} \cdot \eta_{нр}} = \frac{G_p^3 \cdot \eta_{нм}}{G_m^3 \cdot \eta_{нр}}. \quad (2.6)$$

В первую очередь следует провести сравнение двух наиболее близких режимов работы котельной: фактического и утвержденного (с выдачей отопительной нагрузки по утвержденному температурному графику). Дальнейший расчет удобно представлен в таблице 6. При этом стоит пояснить, что КПД агрегата определялся методом оцифровки характеристики (рис.7.) и соотносением с рассчитанными ранее расходами, отнесенными к одному насосу. Учитывая, что в обоих вариантах необходимо задействовать всё установленное насосное оборудование, то расчет, произведенный для соотношения затрат электроэнергии на один насос, будет характеризовать и режим работы котельной в целом.

Таблица 6

Расчет относительных затрат электроэнергии на привод насосов при сравнении реального режима отпуска теплоты с утвержденным

$T_{НВ}$	$G_p$ (через один насос)	Число включенных насосов	$\eta_{np}$	$G_T$ (через один насос)	Число включенных насосов	$\eta_{nm}$	$\mathcal{E}_p / \mathcal{E}_m$
°С	т/ч	шт	%	т/ч	шт	%	-
-26...-7	1032	3	82,46	956	3	81,5	1,24
-6	1029,2		82,43				1,23
-5	1026,4		82,41				1,22
-4	1023,6		82,38				1,21
-3	1020,8		82,35				1,20
-2	1018		82,32				1,19
-1	1015,2		82,295				1,18
0	1012,4		82,25				1,17
1	1009,6		82,22				1,16
2	1006,8		82,19				1,16
3	1004		82,15				1,15
4	996,73		82,05				1,12
5	989,47		81,95				1,10
6	982,2		81,84				1,08
7	974,93		81,72				1,06
8	967,67	81,61	1,04				

Также возможно провести анализ данного соотношения, если за теоретический режим отпуска теплоты принято обеспечение фактической нагрузки котельной по проектному температурному графику. В таком случае расход теплоносителя по (2.1) составит:

$$G_{пл}^{пр} = \frac{140,05 \cdot 10^3}{150 - 70} + \frac{22,07 \cdot 10^3}{65 - 5} = 2118 \text{ т / ч.}$$

При этом в случае реального режима отпуска теплоты общий расход распределялся между тремя насосами, а в случае определенного по реальным нагрузкам и проектному температурному графику – между двумя. По этой причине рассчитанное соотношение для приведения к истинному соотношению расходов электроэнергии необходимо умножить на коэффициент 3/2, вносящий поправку на отношение количества насосов при



заданных режимах. Результат аналогично рассмотренному ранее соотношению приведен в таблице 7.

Таблица 7

Расчет относительных затрат электроэнергии на привод насосов при сравнении реального режима отпуски теплоты с теоретическим по проектному температурному графику

$T_{нв}$	$G_p$ (через один насос)	Число включенных насосов	$\eta_{np}$	$G_{пр}$ (через один насос)	Число включенных насосов	$\eta_{np}$	$\mathcal{E}_p / \mathcal{E}_{np}$
°С	т/ч	шт	%	т/ч	шт	%	-
-26...-7	1032	3	82,46	1059	2	82,68	1,39
-6	1029,2		82,43				1,38
-5	1026,4		82,41				1,37
-4	1023,6		82,38				1,36
-3	1020,8		82,35				1,35
-2	1018		82,32				1,34
-1	1015,2		82,295				1,33
0	1012,4		82,25				1,32
1	1009,6		82,22				1,30
2	1006,8		82,19				1,29
3	1004		82,15				1,28
4	996,73		82,05				1,26
5	989,47		81,95				1,23
6	982,2		81,84				1,21
7	974,93		81,72				1,18
8	967,67	81,61	1,16				

Для оценки соотношения затрат электроэнергии с каким-либо режимом необходимо определить средневзвешенный коэффициент по продолжительности стояния температур наружного воздуха. В данном случае за 2019 год по имеющимся данным и согласно приведенным таблицам 6 и 7:

- При сравнении реального режима отпуски теплоты с утвержденным средневзвешенное значение относительных затрат электроэнергии составляет 1,172.

- При сравнении реального режима отпуска теплоты с теоретическим по проектному температурному графику для покрытия фактической нагрузки тот же показатель равен 1,313.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) Расход электроэнергии при нынешнем способе отпуска теплоты превышает этот же показатель при обеспечении реальной нагрузки по утвержденному температурному графику в среднем в 1,172 раза. При годовом расходе электроэнергии на уровне 5600 тыс. кВт·ч, что в денежном эквиваленте составляет 27350 тыс. руб (по данным ГУП «ТЭК СПб» при тарифе 4,88 руб/кВт·ч), экономия затрат на электроэнергию при работе по утвержденному температурному графику составит около 4 млн.руб.

2) В случае сравнения фактического режима работы котельной с теоретическим по обеспечению реальной нагрузки источника теплоты по проектному температурному графику, соотношение расходов электроэнергии составляет в среднем 1,313, что в денежном эквиваленте при работе по проектному графику оценивается в 6,5 млн.руб.

3) КПД насосов на всех рассмотренных вариантах колеблется вблизи 82%. Отклонения от этой величины незначительны, что позволяет считать эффективность насосов на всех режимах одинаковой.

#### 2.4 Разработка предложений по совершенствованию отпуска теплоты

По полученным результатам можно утверждать, что на данной котельной в качестве способа регулирования отпуска теплоты реализован качественный метод со срезкой на 97 °С. При этом изменение расхода, отмеченное для температур наружного воздуха выше –7 °С, незначительно и находится в пределах 7 %, что мало сказывается на режиме теплоотпуска.

Наличие верхней и нижней срезов на 97 °С и 70 °С соответственно в фактическом температурном графике позволяет утверждать, что полноценное регулирование, которое максимально приближено к проектному, осуществляется только в интервале температур наружного воздуха 3... –7 °С. При этом регулирование во время применения срезов затруднено, так как

смесительные узлы ИТП, чаще всего – элеваторные, работают в нерасчетных режимах. На это также обращает внимание автор [18]: «Переход на более низкий температурный график тепловой сети неизбежно приведет к уменьшению тепловой мощности системы отопления, то есть к недоотпуску тепла. Любая корректировка температурного графика в таких условиях не может решить проблему отпуска расчетного количества тепла с помощью установленных приборов отопления, рассчитанных на работу в условиях проектного температурного графика регулирования...».

Согласно [19] для обеспечения максимальной эффективности теплоснабжения в котельной рекомендуется применять схему количественного регулирования отпуска теплоты с поддержанием постоянной температуры в подающей линии трубопровода и переменным гидравлическим режимом. В то же время на ИТП следует применять количественно-качественное регулирование теплоснабжения. Также в [19] указано, с помощью чего может быть обеспечено данное регулирование – циркуляционные и смесительные насосы с регулируемым электроприводом.

Касательно температурных графиков [20] предусматривает, что под ведомством Ростехнадзора находятся трубопроводы тепловых сетей и тепловых пунктов, если избыточное давление составляет более 0,07 МПа и температура воды превышает 115 °С. Таким образом возможно при определенном температурном графике вывести данные составляющие системы теплоснабжения из-под надзора Ростехнадзора. Также подобное решение позволит отказаться от обязательной страховки, что уменьшит эксплуатационные затраты. Конечно, у подобного решения есть и недостатки, основным из которых является снижение надзора за безопасной эксплуатацией, что в условиях существующей фактической аварийности нежелательно.

В связи с выкладками, приведенными выше, для 1-Правобережной котельной возможно на основе полученных результатов предложить два вида регулирования:

1) Количественное на температурном графике 110/70 °С, что позволит провести мероприятия, описанные ранее, по выводу тепловых сетей из-под ведомства Ростехнадзора.

2) Качественно-количественное по тому фактическому температурному графику, который используется на данный момент, что также позволит вывести тепловые сети из-под ведомства Ростехнадзора. Однако отдельным вопросом в таком случае является необходимость пересмотреть график изменения расхода теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха.

Полученные предложения являются целью данной главы и ее основным результатом. В свою очередь обоснование выбора оптимального способа регулирования для 1-Правобережной котельной ГУП «ТЭК СПб» приведено в Главе 3.

## ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ГРАФИКА ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ И ЭФФЕКТА ОТ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ КОТЕЛЬНОЙ ГУП «ТЭК СПб»

### 3.1 Расчет графика отпуска теплоты

Согласно выводам по материалам прошлой главы необходимо рассчитать два варианта регулирования отпуска теплоты:

1) Количественное при температурах в прямой и обратной линии 110 и 70 °С соответственно.

2) Качественно-количественное по фактическому температурному графику со срезкой на 97 °С.

Температурные графики обоих способов регулирования для наглядности представлены на рис.8.

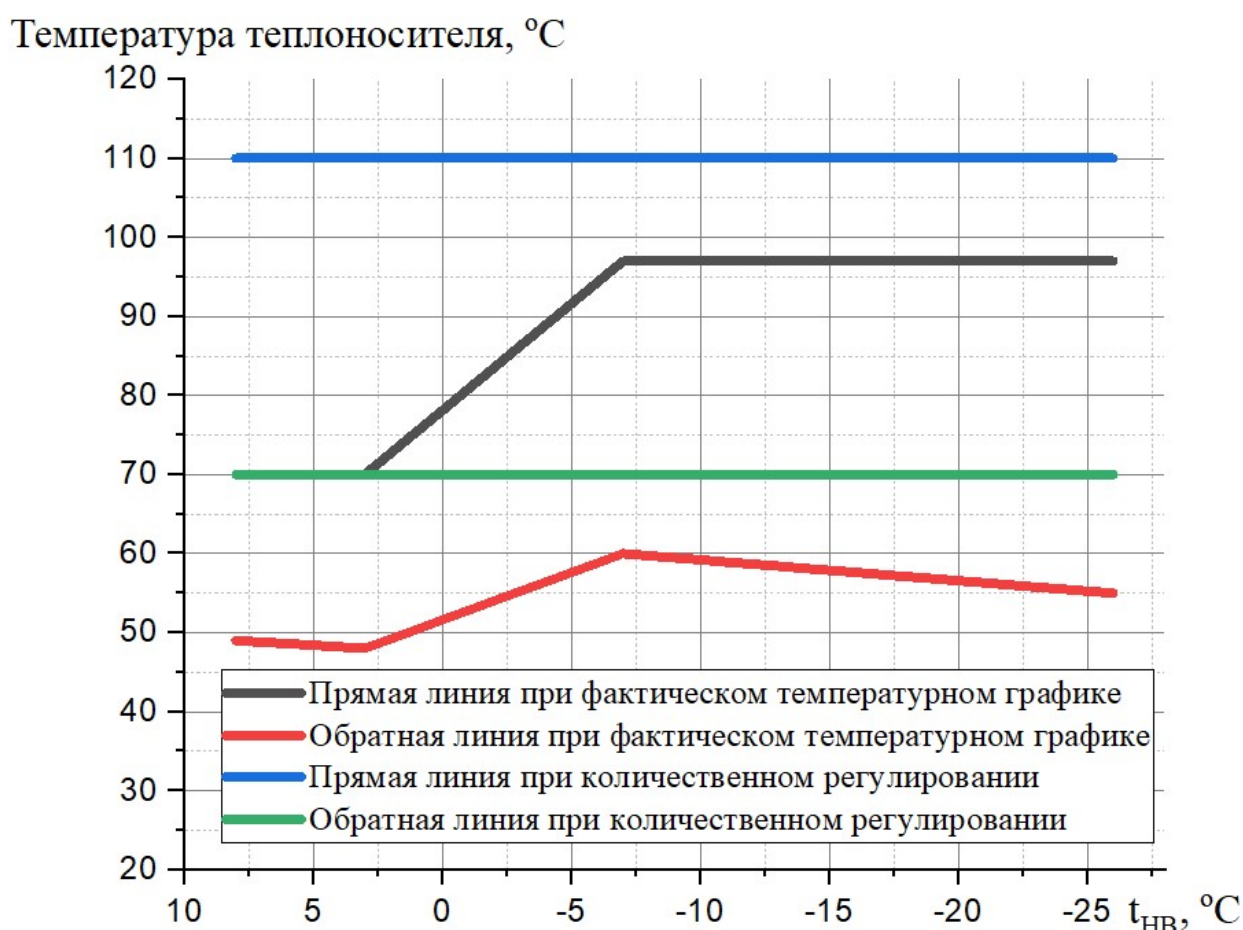


Рис.8. Температурные графики предлагаемых вариантов регулирования теплоотпуска

Как уже отмечалось — для определения режима теплоотпуска необходимо знать расход теплоносителя. В случае количественного

регулирования для каждого значения температуры наружного воздуха необходимо рассчитать количество теплоносителя, подаваемого в тепловые сети для покрытия отопительной нагрузки (совмещенной нагрузки отопления и вентиляции), определенной в пункте 2.1. Это возможно осуществить по формуле (2.1). При этом второе слагаемое будет отвечать за нагрузку ГВС и останется неизменным по причинам, отмеченным ранее. Для удобства представления результатов расчет представлен в таблице 8.

В случае рассмотрения второго предложенного варианта все обстоит несколько сложнее ввиду совмещения качественного и количественного регулирования. В первую очередь по методике, описанной в пункте 2.2, выделяются три интервала регулирования:  $-26...-7$  °С,  $-7...3$  °С и  $3...8$  °С. Далее расчет повторяет первый рассмотренный вариант, а вычисления аналогично представлены в таблице 9.

Таблица 8

## Определение расхода теплоносителя при количественном регулировании

Температура наружного воздуха, °С	Отопительная нагрузка, Гкал/ч	Нагрузка ГВС, Гкал/ч	Температура в прямой линии, °С	Температура в обратной линии, °С	Расход, т/ч
-24	140,04	22,07	110	70	3868
-23	137,23				3798
-22	134,42				3728
-21	131,61				3658
-20	128,80				3587
-19	125,90				3517
-18	123,18				3447
-17	120,37				3377
-16	117,56				3306
-15	114,75				3236
-14	111,93				3166
-13	109,12				3095
-12	106,31				3025
-11	103,50				2955
-10	100,69				2885
-9	97,88				2814
-8	95,07				2744
-7	92,26				2674
-6	89,45				2604
-5	86,64				2533
-4	83,83				2463
-3	81,02				2393
-2	78,21				2323
-1	75,40				2252
0	72,58				2182
1	69,77				2112
2	66,96				2042
3	64,15				1971
4	61,34	1901			
5	58,53	1831			
6	55,72	1761			
7	52,91	1690			
8	50,10	1620			

Таблица 9

Определение расхода теплоносителя при качественно-количественном регулировании

Температура наружного воздуха, °С	Отопительная нагрузка, Гкал/ч	Нагрузка ГВС, Гкал/ч	Температура в прямой линии, °С	Температура в обратной линии, °С	Расход, т/ч
-24	140,04	22,07	97	55,52	3008
-23	137,23		97	55,78	2961
-22	134,42		97	56,05	2914
-21	131,61		97	56,31	2866
-20	128,80		97	56,57	2817
-19	125,90		97	56,84	2769
-18	123,18		97	57,1	2719
-17	120,37		97	57,36	2668
-16	117,56		97	57,63	2618
-15	114,75		97	57,89	2566
-14	111,93		97	58,15	2513
-13	109,12		97	58,42	2460
-12	106,31		97	58,68	2406
-11	103,50		97	58,94	2351
-10	100,69		97	59,21	2296
-9	97,88		97	59,47	2240
-8	95,07		97	59,73	2183
-7	92,26		97	60	2125
-6	89,45		94,3	58,8	2151
-5	86,64		91,6	57,6	2180
-4	83,83		88,9	56,4	2211
-3	81,02		86,2	55,2	2245
-2	78,21		83,5	54	2283
-1	75,40		80,8	52,8	2325
0	72,58		78,1	51,6	2371
1	69,77		75,4	50,4	2423
2	66,96		72,7	49,2	2481
3	64,15		70	48	2548
4	61,34		70	48,2	2446
5	58,53	70	48,4	2342	
6	55,72	70	48,6	2236	
7	52,91	70	48,8	2128	
8	50,10	70	49	2018	



Наиболее показательным с точки зрения сравнения расходов теплоносителя в рассматриваемых вариантах является их графическая интерпретация, что и представлено на рис.9.

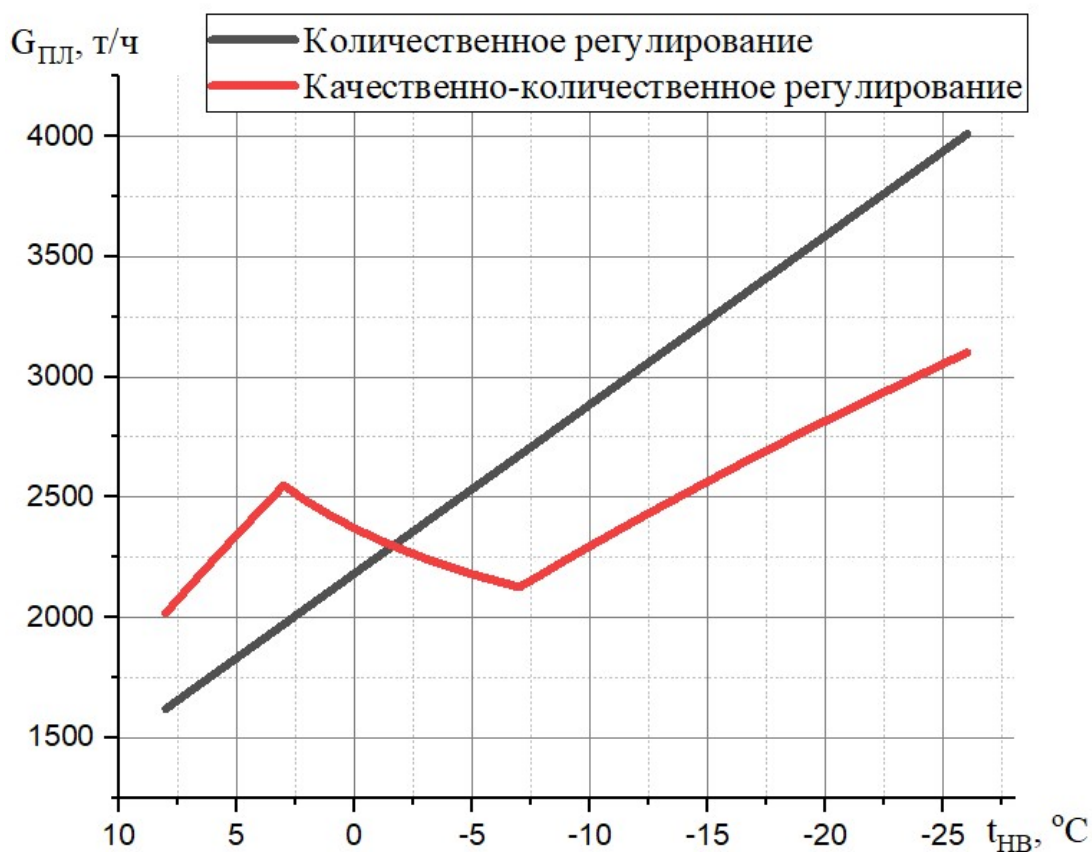


Рис.9. Расход теплоносителя при соответствующем регулировании отпуска теплоты

Полученные в данном пункте результаты являются основой для последующего сравнения способов регулирования теплоотпуска, а выбор окончательного варианта будет выполнен на основании оценки эффекта от их применения.

### 3.2 Рекомендации по реконструкции элементов системы теплоснабжения в связи с переходом на новый режим работы

Для определения возможности перехода на предложенные выше способы регулирования отпуска теплоты в первую очередь следует оценить пропускную способность существующих тепловых сетей. Изначально они, совместно с котельной, проектировались на температурный график 150/70 °C и договорную нагрузку на уровне 280 Гкал/ч, что соответствует расходу около

3650 т/ч. При этом, как было отмечено ранее, при договорной нагрузке в 289,5 Гкал/ч расчетный расход составляет около 3814 т/ч. При рассмотрении предлагаемых вариантов его максимальная величина составляет 3868 и 3008 т/ч соответственно для полностью количественного и совмещенного регулирования.

На основании сравнения этих значений можно утверждать, что существующей пропускной способности тепловых сетей для варианта с качественно-количественным регулированием при покрытии существующей нагрузки хватит со значительным запасом. Это также позволяет утверждать, что есть возможность для увеличения количества подключенных абонентов.

В случае оценки количественного регулирования ситуация складывается значительно хуже. При обеспечении существующей нагрузки можно заключить, что запаса по пропускной способности нет, хотя и возможно обеспечить отпуск теплоты при расчетной температуре наружного воздуха. Также возможно предположить, что такой уровень отрицательных наружных температур не будет долгосрочным, что позволит обеспечить потребителей теплотой без увеличения расхода за счет теплоаккумулирующей способности зданий. Однако если говорить об увеличении числа потребителей, подключенных к рассматриваемой котельной, то это невозможно без реконструкции тепловых сетей и соответствующего увеличения их пропускной способности.

Во-вторых, следует провести оценку соотношения характеристики сети с характеристикой насосной группы. Как было отмечено выше, на котельной установлено 3 сетевых насоса СЭ-1250-140, которые способны развивать максимальную подачу на уровне 1350 т/ч каждый, обеспечивая при этом напор около 132 м вод. столба. В свою очередь при суммарном расходе в 2932 т/ч на данный момент в сети обеспечивается располагаемый напор 55 м [21].

Для обеспечения наглядности подобная оценка для максимальной и минимальной подачи, требуемых при соответствующем способе регулирования отпуска теплоты, представлена в таблице 10. При этом

требуемый для соответствующей подачи напор в сети определялся путем пересчета текущих значений через квадратичную зависимость от скорости, которая является функцией расхода теплоносителя. Такой способ определения требуемого располагаемого напора применим, так как тепловая сеть принята неизменной. Стоит также отметить, что промежуточные значения расхода теплоносителя будут достигаться путем установки частотно-регулируемого привода (ЧРП) и задействованием в работе разного количества сетевых насосов.

Таблица 10

Оценка соотношения подачи и напора сетевых насосов при различном способе регулирования теплоотпуска

Способ	Количественное	Смешанное
Макс. подача, т/ч	3868	3008
Требуемый напор, м	95,8	57,9
Мин. подача, т/ч	1620	2018
Требуемый напор, м	16,8	26
Кол-во насосов для максимальной подачи, шт.	3	3
Кол-во насосов для минимальной подачи, шт.	2	2

На основании представленного выше расчета можно заключить следующее:

1) При смешанном регулировании обеспечиваются гидравлические режимы, приближающиеся к существующему (максимально необходимый располагаемый напор составляет 57,9 м).

2) Количественное регулирование ожидаемо дает значительное различие по гидравлическим режимам. При этом необходимый располагаемый напор варьируется от 16,8 м до 95,8 м.

3) При обоих способах регулирования необходимо задействовать в зависимости от температуры наружного воздуха от 2 до 3 сетевых насосов для обеспечения их работы в близких к рабочему диапазону режимах.

4) Разница между необходимым располагаемым напором и напором, развиваемым насосами, покрывается посредством потерь давления на котельной и регулированием насоса с помощью установленного ЧРП [22].

5) С точки зрения необходимого располагаемого напора сети существует запас по подключению абонентов в обоих случаях. При этом при смешанном регулировании он значительно (примерно в 2 раза) больше.

В-третьих, для обеспечения надежного и качественного теплоснабжения потребуется реконструкция существующих ИТП. При этом стоит отметить тот факт, что согласно данным схемы теплоснабжения в зоне действия котельной находится 243 абонента [23], средняя договорная нагрузка которых составляет 1,19 Гкал/ч (фактическая – 0,67 Гкал/ч). В первом случае согласно [19] должна обеспечиваться возможность качественно-количественного регулирования в ИТП. При этом принципиальная схема такого теплового пункта должна включать подмешивающий насос по примеру рис.10. При этом такая схема будет применима и для центрального качественно-количественного регулирования. Стоит, однако, отметить, что приведенная схема отражает принципиальные решения только по контуру отопления и не рассматривает различные способы подключения нагрузки ГВС.

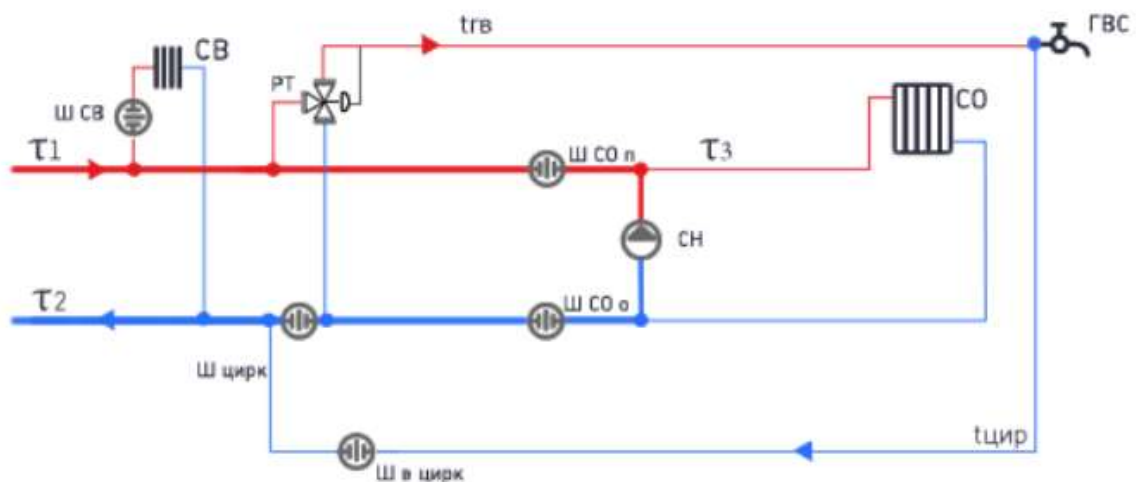


Рис.10. Принципиальная схема ИТП с подмешивающим насосом: Ш – место установки шайбы или регулирующего клапана; СВ – система вентиляции; РТ – регулятор температуры; СО – система отопления; ГВС – горячее водоснабжение; СН – смесительный насос.

### 3.3 Оценка эффекта от применения предложенного графика

В первую очередь необходимо провести оценку затрат электроэнергии на транспорт теплоносителя. Аналогично пункту 2.3 второй главы данной работы возможно провести сравнение предложенных способов регулирования с имеющимся на данный момент. Соответствующий расчет представлен в таблицах 11 и 12.

При этом стоит отметить, что при температуре наружного воздуха выше  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  при количественном регулировании в работе находятся только два сетевых насоса для обеспечения их эффективного функционирования. Таким образом в данном температурном интервале необходимо соотношение расходов электроэнергии на один насос для получения общего соотношения умножать на  $2/3$ , так как при существующем способе регулирования постоянно задействованы все насосные агрегаты. В случае же смешанного регулирования такая ситуация возникает при температуре наружного воздуха выше  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 11

Расчет относительных затрат электроэнергии на привод насосов при сравнении количественного способа регулирования отпуска теплоты с  
**НЫНЕШНИМ**

$T_{НВ}$	$G_p$ (через один насос)	Число включенных насосов	$\eta_{нр}$	$G_T$ (через один насос)	Число включенных насосов	$\eta_{нм}$	$\mathcal{E}_p / \mathcal{E}_m$
°С	т/ч	шт	%	т/ч	шт	%	-
-24	1289,3	3	82,9	1032	3	82,46	1,93
-23	1266		83,05	1032		82,46	1,83
-22	1242,7		83,14	1032		82,46	1,73
-21	1219,3		83,26	1032		82,46	1,63
-20	1195,7		83,35	1032		82,46	1,53
-19	1172,3		83,42	1032		82,46	1,45
-18	1149		83,48	1032		82,46	1,36
-17	1125,7		83,43	1032		82,46	1,28
-16	1102		83,36	1032		82,46	1,21
-15	1078,7		83,29	1032		82,46	1,13
-14	1055,3		83,18	1032		82,46	1,06
-13	1031,7		82,95	1032		82,46	0,99
-12	1008,3		82,76	1032		82,46	0,93
-11	985		82,53	1032		82,46	0,87
-10	961,7		82,19	1032		82,46	0,82
-9	938		81,9	1032		82,46	0,76
-8	914,7		81,5	1032		82,46	0,71
-7	891,3	81,19	1032	82,46	0,66		
-6	868	80,74	1029,2	82,43	0,62		
-5	1266,5	2	80,2	1026,4	82,41	1,24	
-4	1231,5		79,656	1023,6	82,38	1,15	
-3	1196,5		83,26	1020,8	82,35	1,06	
-2	1161,5		83,34	1018	82,32	0,98	
-1	1126		83,48	1015,2	82,295	0,89	
0	1091		83,4	1012,4	82,255	0,83	
1	1056		83,29	1009,6	82,22	0,76	
2	1021		83,06	1006,8	82,19	0,69	
3	985,5		82,79	1004	82,15	0,63	
4	950,5		82,43	996,7	82,05	0,58	
5	915,5		81,9	989,5	81,95	0,53	
6	880,5		81,32	982,2	81,84	0,49	
7	845		80,82	974,9	81,72	0,45	
8	810	79,81	967,7	81,61	0,41		

Таблица 12

Расчет относительных затрат электроэнергии на привод насосов при сравнении смешанного способа регулирования отпуска теплоты с  
**НЫНЕШНИМ**

$T_{нв}$	$G_p$ (через один насос)	Число включенных насосов	$\eta_{np}$	$G_r$ (через один насос)	Число включенных насосов	$\eta_{nm}$	$\mathcal{E}_p / \mathcal{E}_m$
°С	т/ч	шт	%	т/ч	шт	%	-
-24	1002,7	3	82,16	1032		82,46	0,92
-23	987		81,92	1032		82,46	0,88
-22	971,3		81,72	1032		82,46	0,84
-21	955,3		81,46	1032		82,46	0,80
-20	939		81,24	1032		82,46	0,76
-19	923		81	1032		82,46	0,73
-18	906,3		80,63	1032		82,46	0,69
-17	889,3		80,15	1032		82,46	0,66
-16	872,7		79,65	1032		82,46	0,63
-15	1283		83,1	1032		82,46	1,27
-14	1256,5	83,24	1032	82,46	1,19		
-13	1230	83,41	1032	82,46	1,11		
-12	1203	83,5	1032	82,46	1,04		
-11	1175,5	83,46	1032	82,46	0,97		
-10	1148	83,45	1032	82,46	0,90		
-9	1120	83,34	1032	82,46	0,84		
-8	1091,5	83,06	1032	82,46	0,78		
-7	1062,5	82,75	1032	82,46	0,72		
-6	1075,5	82,86	1029,2	82,43	0,75		
-5	1090	82,96	1026,4	82,41	0,79		
-4	1105,5	83,15	1023,6	82,38	0,83		
-3	1122,5	83,32	1020,8	82,35	0,87		
-2	1141,5	83,4	1018	82,32	0,93		
-1	1162,5	83,45	1015,2	82,295	0,99		
0	1185,5	83,48	1012,4	82,255	1,05		
1	1211,5	83,5	1009,6	82,22	1,13		
2	1240,5	83,34	1006,8	82,19	1,23		
3	1274	83,14	1004	82,15	1,34		
4	1223	83,45	996,7	82,05	1,21		
5	1171	83,47	989,5	81,95	1,08		
6	1118	83,32	982,2	81,84	0,96		
7	1064	82,78	974,9	81,72	0,85		
8	1009	82,17	967,7	81,61	0,75		

Стоит, однако, уточнить, что полученные относительные значения расхода электроэнергии на привод насосов, не учитывают применение ЧРП. Данный вопрос требует дополнительной проработки и наличия полной гидравлической схемы источника теплоснабжения. В целом же применение частотного регулирования позволит дополнительно снизить затраты электроэнергии.

При этом средневзвешенное по времени стояния температур наружного воздуха значение относительных затрат электроэнергии, полученные при расчете, составляет 0,809 и 1,018 для количественного и качественно-количественного регулирования соответственно. На рис.11. показано комплексное представление рассматриваемого параметра.

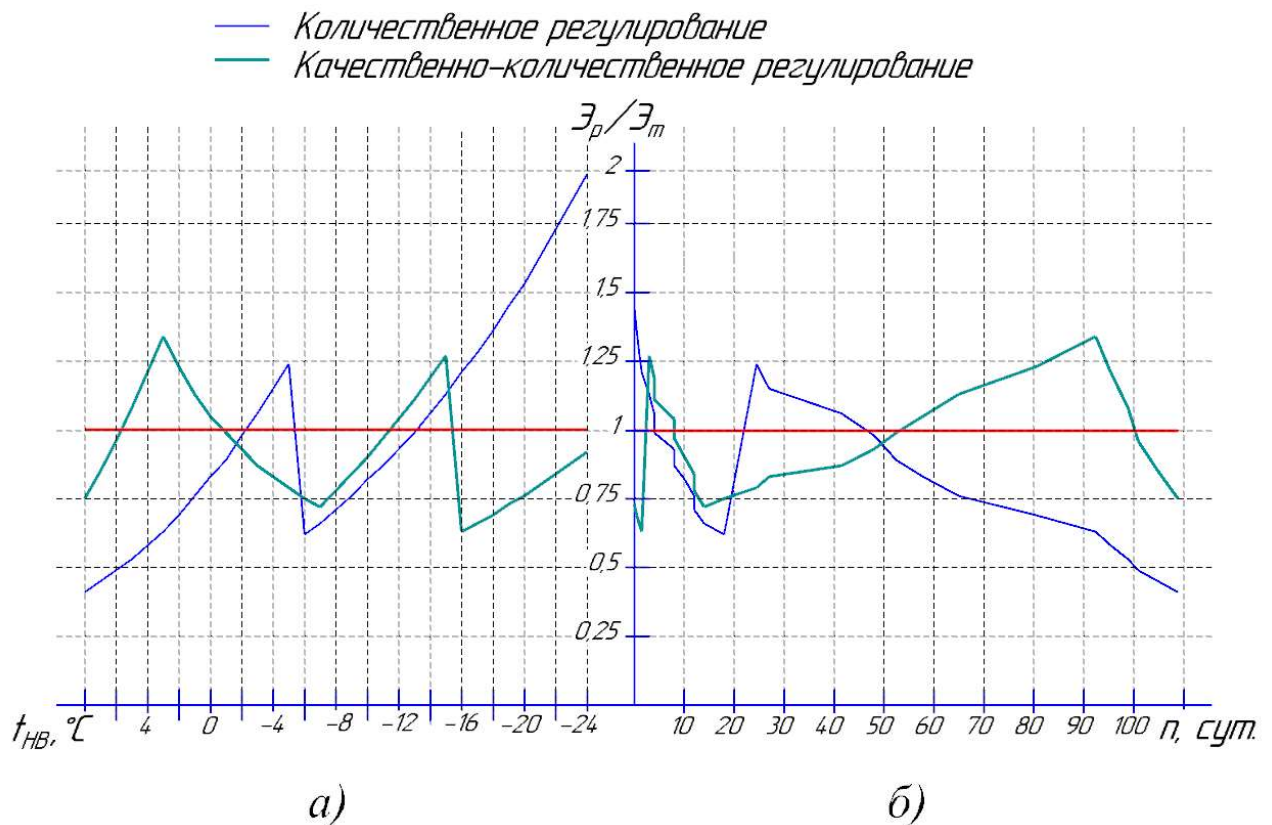


Рис.11. Зависимости относительных затрат электроэнергии:  
а) от температуры наружного воздуха; б) от времени стояния температур наружного воздуха.

Подобный характер кривых, представленных рис.11. а), требует пояснения. В первую очередь, резкий скачок, присущий обоим способам регулирования при температурах наружного воздуха  $-5^{\circ}\text{C}$  для



количественного регулирования и  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  для смешанного, связан с тем фактом, что при определенной температуре наружного воздуха происходит изменение числа включенных в работу сетевых насосов.

Дополнительно стоит пояснить превышение затрат электроэнергии смешанным регулированием по сравнению с количественным на интервале температур наружного воздуха от  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это связано с тем, что по формуле (2.1) относительные затраты электроэнергии зависят от расхода теплоносителя через насос кубически. В свою очередь, на данном интервале температур расход теплоносителя по смешанному способу регулирования превышает аналогичное значение при количественном, что при кубической зависимости дает значительное расхождение искомой величины. Отсюда и вытекает полученный результат, что при включенных двух насосах по одному способу регулирования электроэнергии тратится больше, чем при трех насосах – по второму.

Во-вторых, плавное изменение кривой относительных затрат электроэнергии для смешанного регулирования на интервале температур наружного воздуха от  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  объясняется характером кривой изменения расхода, присущей такому способу регулирования и продемонстрированным на рис.9. Данный интервал соответствует на температурном графике одному из основных его участков, на котором активно происходит как качественное регулирование, так и количественное.

В целом по рис.11. заметно, что при рассмотрении начала отопительного периода, количественное регулирование заметно эффективнее остальных вариантов. В свою очередь смешанное регулирование демонстрирует сходный результат только на интервале температур наружного воздуха  $-2\text{...}-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Далее при понижении температуры несколько эффективнее показывает себя количественное регулирование вплоть до отметки около  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при приближении к расчетной смешанный способ отпуска теплоты позволяет говорить об экономии средств, затрачиваемых на электроэнергию для привода сетевых насосов.

Также стоит рассматривать возможность увеличения числа подключенных абонентов. Для этого необходимо определить точную разницу проектного расхода и максимального рассчитанного по вариантам. Однако как уже было определено ранее, количественное регулирование не обладает подобным запасом, поэтому оценить дополнительную нагрузку котельной возможно только при варианте с качественно-количественным регулированием. Расчет для удобства представлен ниже в таблице 13.

Таблица 13

Определение максимальной дополнительной нагрузки котельной при смешанном регулировании

Параметр	Формула или обоснование	Результат
Проектный расход, т/ч	По пункту 2.2 второй главы	3814
Максимальный расход по предлагаемому варианту, т/ч	По пункту 3.1 данной главы	3008
Запас расхода, т/ч	$G_{пр} - G_{max}$	806
Максимальная дополнительная нагрузка отопления, Гкал/ч	По соотношению нагрузки ГВС и отопления и (2.1)	30,15
Максимальная дополнительная нагрузка ГВС, Гкал/ч		4,73
Максимальная дополнительная нагрузка, %	$Q_{доп} / Q_{подкл}$	21,5

Как видно из представленного расчета суммарная подключенная нагрузка при предлагаемом смешанном регулировании может быть увеличена на 34,88 Гкал/ч (21,5% от подключенной), 30,15 Гкал/ч из которой приходится на отопление, а остальное – на ГВС. Конечно, необходимо проводить подробный гидравлический расчет системы при перекладке сети. Однако если нагрузка конкретной ветки, к которой осуществляется подключение новых абонентов, увеличится не более, чем на указанную величину, то перекладка не потребуется, так как сети имеют достаточный запас по пропускной способности и развиваемому располагаемому напору на источнике, что обуславливается установленным оборудованием и проектированием данной котельной изначально на договорные нагрузки и проектный график 150/70 °С.

При рассмотрении предлагаемых методов регулирования стоит отметить, что установка новых насосов не предусматривалась. В таком случае единственным мероприятием по модернизации насосной группы котельной по части подачи теплоносителя в тепловые сети является установка ЧРП. Причем в обоих случаях необходимо оборудовать все три СЭ-1250-140 таким типом привода, что делает в этом плане оба предложенных варианта равноправными.

Сходная ситуация наблюдается и в случае с реконструкцией ИТП, так как их схема в рассматриваемых вариантах идентична. Это позволяет заключить, что и предполагаемые затраты будут сопоставимы.

В свою очередь, полностью оценить экономический эффект не представляется возможным по причине влияния на него множества факторов и отсутствия значительной доли требуемых для полноценного экономического расчета данных. С другой стороны, это и не является целью данной работы. С точки зрения увеличения выручки возможно только принять во внимание возможность подключения дополнительных абонентов в случае утверждения предложенного качественно-количественного регулирования.

Подводя итоги оценки эффекта от применения предложенных способов регулирования логично представить результат в виде таблицы 14.

Таблица 14

## Сравнение эффекта от применения способа регулирования

Параметр	Количественное регулирование	Смешанное регулирование
Затраты средств на привод насосов по сравнению с нынешним режимом работы, %	-19,1	+1,8
Запас пропускной способности тепловых сетей, т/ч	Отсутствует	806
Количество насосов, требующих установку ЧРП, шт.	3	
Реконструкция ИТП по схеме:	ИТП с подмешивающим насосом	
Допустимая дополнительная нагрузка, Гкал/ч	Отсутствует	34,88
Возможность вывести тепловые сети из-под контроля Ростехнадзора	Присутствует	

Таким образом представляется возможность сделать основные выводы:

1) Если нет необходимости подключения новых абонентов, то покрытие существующей нагрузки котельной при помощи количественного регулирования по температурному графику 110/70 °С значительно эффективнее представленной альтернативы.

2) В случае подключения новых абонентов, что предусмотрено мероприятиями, представленными в [24], наиболее выгодным становится качественно-количественное регулирование по существующему температурному графику со «срезкой» на 97 °С.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была достигнута ее цель – проведено обоснование метода регулирования отпуска теплоты на примере котельной ГУП «ТЭК СПб». При написании были выполнены все поставленные изначально задачи:

1. Произведена оценка влияния отклонения температуры теплоносителя от проектного значения на качество теплоснабжения, в ходе которой было показано, что фактическая нагрузка потребителей может быть ниже расчетной на величину до 52,81 %. Такой результат позволяет утверждать, что снижение температуры воды в подающей линии тепловых сетей не оказывает негативного влияния на качество теплоснабжения абонентов и позволяет обеспечивать требуемую температуру внутренних помещений.

2. Проанализированы проектные и фактические температурные графики рассматриваемой котельной в совокупности с регулированием отпуска теплоты. Основным результатом анализа является выявление фактической нагрузки подключенных к котельной потребителей, значение которой составило около 56 % от договорной. Действительное регулирование отпуска теплоты несколько отличается от утвержденного по температурному графику со «срезкой» на 110 °С. При этом фактический способ регулирования теплоотпуска, близкий к качественному с точки зрения постоянства расхода теплоносителя, не является оптимальным.

3. Разработаны предложения по совершенствованию регулирования отпуска теплоты от котельной. На основе рекомендаций нормативных документов и произведенного анализа предложено два альтернативных варианта: количественное регулирование при температурном графике 110/70 °С и качественно-количественное регулирование с сохранением существующего температурного графика.

4. Произведен расчет графиков отпуска теплоты и проанализирован эффект от их применения. Наиболее перспективным оказалось использование качественно-количественного регулирования по существующему

температурному графику со «срезкой» на 97 °С в случае подключения новых потребителей и количественное по температурному графику 110/70 °С – в случае сохранения существующей нагрузки.

Стоит отметить, что в дальнейшем возможно осуществление более подробного рассмотрения данной проблемы с приведением значительно лучше проработанного технико-экономического анализа и оценкой большего числа факторов, влияющих на теплоснабжение в целом и на котельные в частности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Петрущенко, В. А. Обоснование пониженного температурного графика регулирования централизованных систем теплоснабжения / В. А. Петрущенко. – Текст : непосредственный // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 8 (180) – С. 30-37.
- 2) Исследование систем теплоснабжения: монография / Л. С. Попырин, К. С. Светлов, Г. М. Беляева [и др.] ; под общей редакцией Ю. А. Юдиной ; Академия наук СССР, Научный совет по комплексным проблемам энергетики, Государственный научно-исследовательский энергетический институт им Г. М. Кржижановского. – Москва : Наука, 1989. – 215 с. – Авт. Указаны на обороте тит. л. – Библиогр.: с. 210-213. – 1300 экз. – ISBN 5-02-006538-2. – Текст : непосредственный.
- 3) Теория и практика создания автоматизированных систем управления теплоснабжением: монография / В. А. Седнин ; Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2005. – 190 с., [1] с., [2] л. : ил. ; 20 см. – Библиогр.: с. 148-150 – 200 экз. – ISBN 985-479-357-5. Текст : непосредственный.
- 4) Седнин, В. А. Тенденции развития систем централизованного теплоснабжения / В. А. Седнин, А. В. Седнин. – Текст : непосредственный // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая Международная научно-техническая конференция, 21–22 апреля 2017 г.: сборник научных трудов / главный редактор В. И. Шарапов ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет». – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – С. 55-58.
- 5) СП 131.13330.2018 «СНИП 23-01-99\* Строительная климатология». Строительная климатология = Building climatology : официальное издание : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28 ноября

2018 г. № 763/пр : дата введения 2019-05-29 / разработан Федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (ФГБУ ГГО НИИСФ РААСН). – Москва : Стандартиформ, 2019. – 110 с., табл. – Текст : непосредственный.

6) ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях = Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 июля 2012 г. N 191-ст: введен впервые : дата введения 2013-01-01 / разработан ОАО «СантехНИИпроект», ОАО «ЦНИИПромзданий». – Москва : Стандартиформ, 2013. – 12 с. ; 29 см. – Текст : непосредственный.

7) Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети : учебник для вузов / под редакцией В. А. Малафеева, Е. А. Улановской. – 9-е издание, стереотипное. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. – 472 с.: ил. – Текст : непосредственный.

8) Копко, В. М. Теплоснабжение: курс лекций для студентов специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» высших учебных заведений / В. М. Копко. – Москва : Изд-во АСВ, 2012. – 336 с. – Текст : непосредственный.

9) СП 124.13330.2012 Тепловые сети = Thermal networks. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003 : официальное издание : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 280 : дата введения 2013-01-01 / разработан ОАО «ВНИПИэнергопром», ОАО «МТК». – Москва : Минрегион России, 2012. – 74 с., табл. – Текст : непосредственный.

10) Ротов, П. В. Способы регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения. Перспективы развития. / П. В. Ротов. – Текст : непосредственный // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 2 (78) – С. 30-35.



11) Шарапов, В. И. Технологии обеспечения пиковой мощности систем теплоснабжения / В. И. Шарапов, М. Е. Орлов, П. В. Ротов. – Текст : непосредственный // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 5 (93) – С. 32-40.

12) СНиП 2.01.01-82 Строительная климатология и геофизика : издание официальное : утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 21 июля 1982 г. № 188 : дата введения 1984-01-01 / разработаны НИИСФ , ПНИИИС, НИИОСП им Н.М. Герсеванова Госстроя СССР. Дальневосточным Промстройинипроектом Минстроя СССР, МГУ им. М.В. Ломоносова, МИСИ им В.В. Куйбышева Минвуза СССР при участии ГГО им. А.И. Воейкова Госкомгидромета. – Москва : Стройиздат, 1983. – 136 с., табл. – Текст : непосредственный.

13) СП 54.13330.2016 Здания жилые многоквартирные = Multicompartment residential buildings. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003 (с изменениями N 1, 2, 3) : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 883/пр : дата введения 2017-06-04 / разработан АО «ЦНИИпромзданий», ОАО «Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова», АО «ЦНИИЭП жилища - институт комплексного проектирования жилых и общественных зданий», ОАО «Центр методологии нормирования и стандартизации в строительстве», ООО «Верхне-Волжский Институт Строительной Экспертизы и Консалтинга». – Москва : Стандартинформ, 2017. – 31 с., табл. – Текст : непосредственный.

14) Самарин, О. Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность : монография / О. Д. Самарин. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ), 2009. – 296 с. : схем., табл. – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-93093-665-0. – Текст : электронный.

15) Об утверждении Методических указаний по разработке схем теплоснабжения : приказ Министерства энергетики Российской федерации от 5 марта 2019 года № 212. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения:

26.03.2020). – Режим доступа: КонсультантПлюс : [справ.-правовая система], свободный.

16) Обосновывающие материалы. Схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на период до 2033 года (актуализация на 2020г.): в 18 главах. – Санкт-Петербург, 2019. – Текст : электронный.

Глава 4. Существующие и перспективные балансы тепловой мощности источников тепловой энергии и тепловой нагрузки потребителей. – 2019. – 129 с. : ил., табл.

17) МДК 4-05.2004. Методика определения потребности в топливе, электрической энергии и воде при производстве и передаче тепловой энергии и теплоносителей в системах коммунального теплоснабжения : утверждена заместителем председателя Госстроя России 12.08.2003 / разработана Закрытым акционерным обществом «Роскоммунэнерго» при участии Российской ассоциации «Коммунальная энергетика» и Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова. – Москва : ФГУП ЦПП, 2004. – 76 с. : ил., табл. – Текст – непосредственный.

18) Петрущенко, В. А. Анализ режимов работы системы отопления с элеваторным смешением: монография / В. А. Петрущенко – Санкт-Петербург : ООО «Страта», 2016. – 64 с.

19) СП 89.13330.2016 Котельные установки = Boiler installations. Актуализированная редакция СНиП II-35-76 : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. № 944/пр : дата введения 2016-03-17 / разработан ООО "СанТехПроект", ОАО НТЦ "Промышленная безопасность", ФГБОУ ВО НИУ МГСУ, ПКБ ООО "Теплоэнергетика". – Москва : Стандартинформ, 2017. – 74 с., табл. – Текст : непосредственный.

20) Российская Федерация. Законы. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон № 116-ФЗ : [принят Государственной думой 20 июня 1997 года : с изменениями на 29 июля 2018

года]. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 09.04.2020). – Режим доступа: КонсультантПлюс : [справ.-правовая система], свободный.

21) Обосновывающие материалы. Схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на период до 2033 года (актуализация на 2020г.): в 18 главах. – Санкт-Петербург, 2019. – Текст : электронный.

Глава 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения. Том 4 (части 5, 6, 7, 8, 9). Приложение К. – 2019. – 179 с. : ил.

22) Афанасьев, А. В. Применение ЧРП для повышения энергоэффективности насосной установки. / А. В. Афанасьев, Л. М. Беккер, И. Б. Твердохлеб – Текст : электронный // XIII Международная научно-техническая конференция «ГЕРВИКОН-2011», 6-9 сентября 2011 / Сумский государственный университет (СумГУ). – Сумы, 2011.

23) Обосновывающие материалы. Схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на период до 2033 года (актуализация на 2020г.): в 18 главах. – Санкт-Петербург, 2019. – Текст : электронный.

Глава 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения. Том 3 (части 3, 4). Приложение А. – 2019. – 226 с.

24) Обосновывающие материалы. Схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на период до 2033 года (актуализация на 2020г.): в 18 главах. – Санкт-Петербург, 2019. – Текст : электронный.

Глава 8. Предложения по строительству и реконструкции тепловых сетей. Приложение А. Том 2. – 2019. – 218 с. : табл.