

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи

Долгов Николай Викторович

**МНОГОКОНТУРНЫЙ ТЕПЛООБМЕННЫЙ АППАРАТ ДЛЯ
НЕЗАВИСИМОЙ СХЕМЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО
ТЕПЛОВОГО ПУНКТА**

05.23.03 - теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

Олексюк А. А.

Идентичность всех экземпляров заверяю:

Ученый секретарь диссертационного

совета Д 01.005.01



З. В. Удовиченко

Макеевка – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Раздел 1. Исследование вопросов энергетической эффективности и гидравлической устойчивости абонентских вводов в системах теплоснабжения.....	11
1.1 Основные схемы подключения систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения (ГВС)	11
1.1.1. Зависимые схемы присоединения абонентов к системе отопления	11
1.1.2 Схемы ИТП для независимого подключения абонентов к системе отопления	15
1.1.3 Принципиальные схемы присоединения систем горячего водоснабжения.....	19
1.1.4 Групповые тепловые пункты	24
1.2 Математическое моделирование потокораспределения в системах теплоснабжения	27
1.3 Выводы по первому разделу	32
Раздел 2. Математические модели потокораспределения в оборудовании и трубопроводах тепловой сети и индивидуальных тепловых пунктов с МТА	34
2.1 Потокораспределение теплоносителя в трубопроводах и узлах индивидуального теплового пункта	34
2.1.2 Расчет потокораспределения в ИТП на основе метода контурного расхода.....	38
2.2 Математическая модель потокораспределения внутриквартальной тепловой сети.....	50

2.2.1 Расчет потокораспределения внутриквартальной тепловой сети на основе метода контурного расхода (МРК)	53
2.3 Регулирование режимов гидравлической цепи в автоматизированных ИТП	60
2.4 Выводы по второму разделу	62
Раздел 3. Экспериментальные исследования потокораспределения на ИТП с трехконтурным теплообменником	63
3.1 Описание экспериментально-лабораторного стенда ИТП с МТА и методика проведения эксперимента	63
3.1.1 Методика проведения исследований характеристик тепловых и гидравлических потоков	66
3.2 Планирование и обработка результатов эксперимента	67
3.2.1 Экспериментальные исследования работы контура системы тепловой сети	67
3.2.2 Экспериментальные исследования работы контура системы отопления	75
3.2.3 Экспериментальные исследования работы контура системы горячего водоснабжения	79
3.2.4 Экспериментальные исследования изменения давления в контуре системы тепловой сети	84
3.2.5 Экспериментальные исследования перепада давления в контуре системы отопления	88
3.2.6 Экспериментальные исследования работы контура системы горячего водоснабжения	91
3.3 Метрологический анализ выполнения эксперимента	95

	4
3.3.1 Погрешность температурных измерений	95
3.3.2 Погрешность измерений расходов воды	96
3.3.3 Погрешность измерений перепада давлений	96
3.6. Выводы по третьему разделу	97
Раздел 4. Практическая реализация и технико-экономическое обоснование результатов работы	98
4.1 Подключение абонентов к тепловой сети	98
4.2 Конструктивный расчет МТА змеевикового типа	102
4.3 Схема автоматизированного ИТП с МТА	108
4.4 Техничко-экономическая оценка реконструкции внутриквартальной тепловой сети	113
4.5 Выводы по четвертому разделу	119
Заключение	120
Список литературы	122
Приложение А	138
Приложение Б	140
Приложение В	150

ВВЕДЕНИЕ

Энергосбережение в коммунально-бытовой и промышленной сфере в последнее десятилетие находится в центре внимания широкого круга специалистов. Это связано с тем, что 20% производимой тепловой энергии затрачивается на промышленные нужды, а остальная часть – на отопление и горячее водоснабжение.

Вместе с тем эффективность использования топлива в жилищно-коммунальном хозяйстве является сегодня крайне низкой по двум причинам: неэффективное потребление тепловой энергии и низкая эффективность существующих систем теплоснабжения.

Для повышения энергоэффективности централизованного теплоснабжения становится актуальным применение автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов с независимым подключением абонентов к системе теплоснабжения, которое позволяет отказаться от металлоёмких четырехтрубных тепловых сетей, а также значительно сэкономить тепловую и электрическую энергию. Применение индивидуальных тепловых пунктов становится актуальным при возведении вновь строящихся зданий, а также при реконструкции систем централизованного теплоснабжения.

Актуальность темы. Основой любой системы теплоснабжения является источник теплоты: котельные, теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и т.п. В схеме централизованного теплоснабжения потребителю не всегда поставляется теплоноситель с необходимыми параметрами, подходящими для систем теплоснабжения зданий, поэтому возникает необходимость регулирования отпуска теплоты в тепловом пункте. В странах СНГ широкое распространение получили центральные тепловые пункты (ЦТП), к которым подключаются разветвленные внутриквартальные тепловые сети. В свою очередь это приводит к дополнительным тепловым потерям трубопроводами, большим затратам электроэнергии, увеличению металлоёмкости систем теплоснабжения, нерациональному использованию теплоты вследствие неэффективного регулирования отпуска теплоносителя.

Одним из направлений энергосберегающих технологий в системах теплоснабжения является применение индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) с многоконтурными теплообменными аппаратами (МТА) при независимом подключении абонентов к тепловой сети, устанавливаемых в непосредственной близости к потребителю, что позволяет эффективнее использовать теплоноситель, поступающий от ТЭЦ или районной котельной. Регулирование отпуска теплоты в непосредственной близости к потребителю, а также отказ от четырехтрубной и переход на двухтрубную внутриквартальную тепловую сеть, позволяет уменьшить тепловые потери и снизить количество утечек теплоносителя.

Применение ИТП с МТА остается актуальным решением проблемы энергосбережения в системах теплоснабжения и вызвано необходимостью прогнозируемого функционирования системы внутриквартальной тепловой сети с ИТП, являющимся важнейшим связующим звеном между потребителем, тепловой сетью и источником теплоты. Приведенная актуальность проблемы систем теплоснабжения и определила выбор темы диссертационной работы.

Степень разработанности темы.

Фундаментальными исследованиями в области применения абонентских вводов в системах централизованного теплоснабжения, а также анализом их эффективности занимались такие известные ученые как Л. А. Мелентьев, Е. Я. Соколов, Б.И. Генкин, В. И. Манюк, Н. М. Зингер, В. Е. Козин, А. А. Николаев, М. Л. Загс, К. В. Тихомиров.

В работах А. М. Тарадая, В. И. Панфилова, А. А. Олексюка, В. В. Пыркова, А. С. Терлецкой, М. А. Айзена, А. Teekaram, А. Palmer, R. Petitjean, Ю. М. Варфоломеева исследовались современные разработки абонентских подключений к тепловым сетям.

В работах таких ученых как А.П. Меренков, В.Я. Хасилев, С.А. Сазонова, А.В. Стрекалов, L. Gullev, R.K. Ahuja, T.L. Magnati, D.P. Bertsekas. Рассматривается потокораспределение в гидравлических цепях тепловых сетей, а также потокораспределение с установившимся и неустойчивым режимом течения теплоносителя.

Проблемным вопросом существующих схем ИТП и имеющихся в этой области разработок является малая изученность использования ИТП с МТА, а также отсутствие четкого математического описания потокораспределения в пределах теплового пункта в течение отопительного периода при изменении тепловых нагрузок.

Цель работы. Повышение эффективности работы системы теплоснабжения за счет использования индивидуального теплового пункта на базе многоконтурного теплообменного аппарата с прогнозированием рационального потокораспределения при регулировании отпуска теплоты.

Задачи исследования:

- провести аналитические исследования принципиальных схем абонентских подключений к тепловой сети, математических моделей потокораспределения;
- разработать математическую модель потокораспределения для индивидуального теплового пункта с МТА и проанализировать распределение расхода теплоносителей и давлений в сети;
- разработать математическую модель потокораспределения в двухтрубной внутриквартальной тепловой сети для анализа распределения потоков при непрогнозируемых режимах работы тепловой сети;
- создать экспериментально-лабораторную установку и провести исследования режима работы ИТП с МТА при регулировании отпуска теплоты в зависимости от температуры наружного воздуха;
- разработать принципиальную схему автоматического регулирования ИТП с МТА для независимой схемы подключения абонентов;
- оценить технико-экономическую эффективность от внедрения разработанной схемы ИТП на базе МТА.

Объект исследования – тепловые и гидравлические процессы, протекающие в ИТП при различных режимах работы.

Предмет исследования – закономерности распределения потоков теплоносителей в схеме индивидуального теплового пункта с многоконтурным теплообменным аппаратом для независимого подключения абонентов.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые получена математическая модель потокораспределения в ИТП на базе МТА, что позволяет определять распределение расходов теплоносителя и давления в контурах ИТП;
- дополнена и усовершенствована математическая модель потокораспределения во внутриквартальной тепловой сети, подключенной к ИТП с многоконтурным теплообменным аппаратом и работающей в закрытом режиме;
- установлены закономерности влияния температуры наружного воздуха на количественное регулирование отпуска теплоносителя в контурах МТА, предложенного автором (патент № 84172, опубл. 10.10.2013).

Теоретическая и практическая значимость:

- предложена математическая модель потокораспределения на ИТП с многоконтурным теплообменным аппаратом, позволяющая рассчитывать режимы работы ИТП с МТА для различных температурных режимов;
- предложена математическая модель для расчета двухтрубной внутриквартальной тепловой сети, позволяющая анализировать и учитывать распределение потоков теплоносителя и давления при совместной работе ИТП с МТА;
- предложена методика расчета МТА для ИТП, на основе полученной математической модели потокораспределения и экспериментальных исследований определены тепловые и гидравлические характеристики теплоносителя во всех контурах сети, и предложена эффективная схема регулирования работы ИТП с МТА;
- материалы диссертационной работы включены в рабочие программы учебных дисциплин «Централизованное теплоснабжение», «Надежность систем теплогазоснабжения и вентиляции и пути ее повышения», «Испытание и наладка систем теплоснабжения» для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Строительство» профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Практическая значимость результатов исследований:

- предложена методика расчета МТА для ИТП;

- разработана рациональная схема ИТП на базе МТА (патент № 84172, опубл. 10.10.2013);

- предложена методика прогнозирования распределения потоков теплоносителя и давления в контурах при сложно прогнозируемых режимах работы тепловой сети.

Данные разработки внедрены при реконструкции внутриквартальной тепловой сети в Кировском районе г. Донецк.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы автором был применен системный подход к анализу тепловых и гидравлических процессов, протекающих в узлах ИТП с МТА, и моделированию гидравлических потоков в узлах ИТП с МТА. В ходе выполнения расчетно-аналитических и экспериментальных исследований в силу сложности и многофакторности процессов, протекающих в ИТП с МТА, были применены численные методы обработки данных и приняты определенные упрощения, не влияющие на итоговый результат исследований. Планирование экспериментальных исследований осуществлялось с применением дробного факторного эксперимента.

Личный вклад соискателя включает постановку цели и задач исследования, разработку математической модели потокораспределения в узлах ИТП с МТА, а также математической модели потокораспределения в двухтрубной внутриквартальной тепловой сети, работающей совместно с ИТП на базе МТА, методики расчета МТА, принципиальной и конструктивной схемы экспериментальной установки, проведение теоретических и экспериментальных исследований, разработку принципиальной схемы ИТП с МТА и формирование выводов о целесообразности применения ИТП с МТА в системах централизованного теплоснабжения.

Основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель потокораспределения в узлах ИТП на базе МТА;
- математическая модель потокораспределения в двухтрубной внутриквартальной тепловой сети, работающей совместно с ИТП на базе МТА;
- принципиальная конструктивная схема установки ИТП на базе МТА;

– принципиальная схема автоматического регулирования отпуска теплоты потребителю на ИТП с МТА.

Степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

Достоверность результатов исследований подтверждается использованием основополагающих положений теории тепломассообмена, современных методов математического моделирования, а также адекватностью результатов экспериментальных исследований. Достоверность обеспечивается также широкой публикацией работ по данной теме и обсуждением их на конференциях различного уровня.

Основные результаты диссертации докладывались на:

- X-XIII Международных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка, 2011 – 2014 гг.);

- III Международной конференции «Научно-техническое и организационно-экономическое содействие реформам в строительстве и ЖКХ» (г. Макеевка, 2012 г.);

- IV Республиканской научно-практической конференции (г. Бендеры, Приднестровская Молдавская Республика, 2012 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором и в соавторстве в 14 печатных научных работах, общим объемом 12,11 п.л., в том числе 10 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденный МОН Украины, одно из которых в индексируемом в базах данных РИНЦ (РФ); 1 – в зарубежном издании, индексируемом в базах данных РИНЦ (РФ); технические решения, полученные автором в процессе работы, закреплены в трех патентах Украины на полезные модели № 58630 (опубл. 26.04.2011), № 70731 (опубл. 25.06.2012), № 84172 (опубл. 10.10.2013).

РАЗДЕЛ 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АБОНЕНТСКИХ ВВОДОВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Основой любой системы теплоснабжения является котельная, ТЭЦ или местные источники теплоты. При централизованном теплоснабжении потребителю не всегда подается теплоноситель с требуемыми параметрами, поэтому возникает необходимость регулирования отпуска теплоты, которое производится в тепловом пункте, который может обслуживать как группу зданий, так отдельно стоящее здание.

Разработкой схем абонентских подключений к тепловым сетям занимались такие ведущие ученые как Соколов Е.Я., Зингер Н.М., Тихомиров К.В., Олексюк А.А., Тарадай А.М., Пырков В.В., Панфилов В.И., Козин В.Е., Варфоломеев Ю.М., Меренков А.П., Хасилев В.Я., Teekaram A., Hartman T. Rimmer P., Bjork H., Fulkerson D.R., Ford L.R. и др.

1.1 Основные схемы подключения систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения (ГВС)

1.1.1. Зависимые схемы присоединения абонентов к системе отопления

Схемы присоединения абонентских систем разделяются на зависимые и независимые. В странах СНГ широкое применение получили схемы с зависимым подключением. Схемы с таким подключением гидравлически связаны с местной системой отопления и системой теплоснабжения и работают под давлением близким к давлению в обратном трубопроводе централизованной тепловой сети. Циркуляция теплоносителя в системе обеспечивается за счет разности давления в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети. Если давление в подающем трубопроводе тепловой сети превышает требуемое, то оно должно

быть уменьшено с помощью автоматического регулятора или дроссельной шайбой [1 – 9].

Наибольшую популярность при присоединении потребителей тепловой энергии получила зависимая схема с элеваторным узлом. Преимуществом данной схемы является низкая стоимость и высокая надёжность (Рис. 1.1).

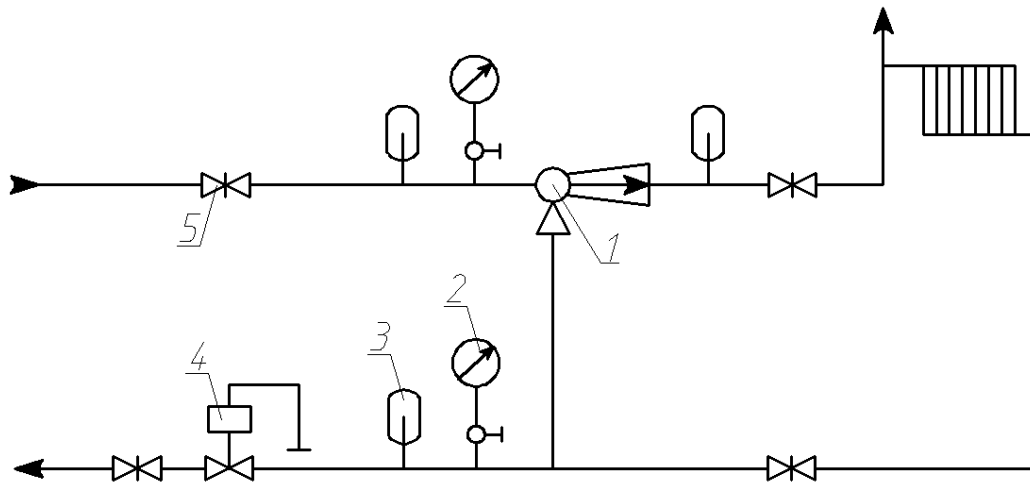


Рисунок 1.1. Схема присоединения системы отопления с элеватором:

- 1 – элеваторный узел;
- 2 – манометр;
- 3 – термометр;
- 4 – температурный датчик расхода теплоносителя;
- 5 – задвижка.

Системы отопления, как правило, имеют завышенное значение площади поверхности нагревательных приборов. Для устранения перегрева отапливаемых помещений необходимо соответственно снижение температуры подаваемого в систему теплоносителя и, следовательно, увеличение необходимого коэффициента смешения [1, 8, 10 – 13].

Для большинства случаев необходимая разность напоров воды перед элеватором должна составлять не менее 12 м и перед тепловым пунктом с элеватором не менее 15 м. Несоблюдение необходимой разности напоров воды перед элеватором неизбежно приведет к пониженному коэффициенту смешения, перерасходу сетевой воды, а также перерасходу тепловой энергии. Элеваторный

тепловой пункт должен располагаться, как правило, в непосредственной близости от начала системы отопления (первого отопительного стояка).

Для случаев, когда напор на вводе не может обеспечить работу элеватора для подмешивания воды, применяются схемы с центробежными насосами (Рис. 1.2).

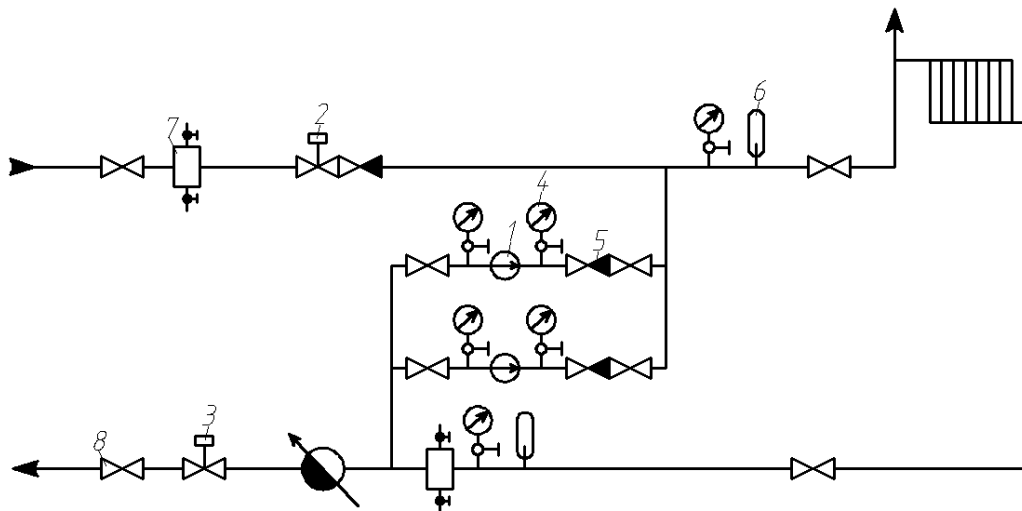


Рисунок 1.2. Схема присоединения отопительной системы с насосом смешения на перемычке:

- 1 – насос;
- 2 – регулятор расхода;
- 3 – регулятор давления;
- 4 – манометр;
- 5 – обратный клапан;
- 6 – термометр;
- 7 – грязевик;
- 8 – задвижка.

Для обеспечения работы теплового узла вводы оборудуются регуляторами расхода теплоносителя 2 и регуляторами давления теплоносителя 3, кроме тех участков, где устанавливаются насосы 1.

Насосы подсасывают воду из обратной линии и направляют ее в подающую, где происходит смешение. Регулирование количества подмешиваемой воды производится задвижкой, которая устанавливается на

напорном патрубке насоса [10, 13]. Регулирование коэффициента смешения в данной схеме производится в ручном режиме.

Для случаев, когда давления в подающей магистрали недостаточно для нормальной работы системы отопления, применяется схема теплового пункта с насосами на подающем участке трубопровода (Рис. 1.3).

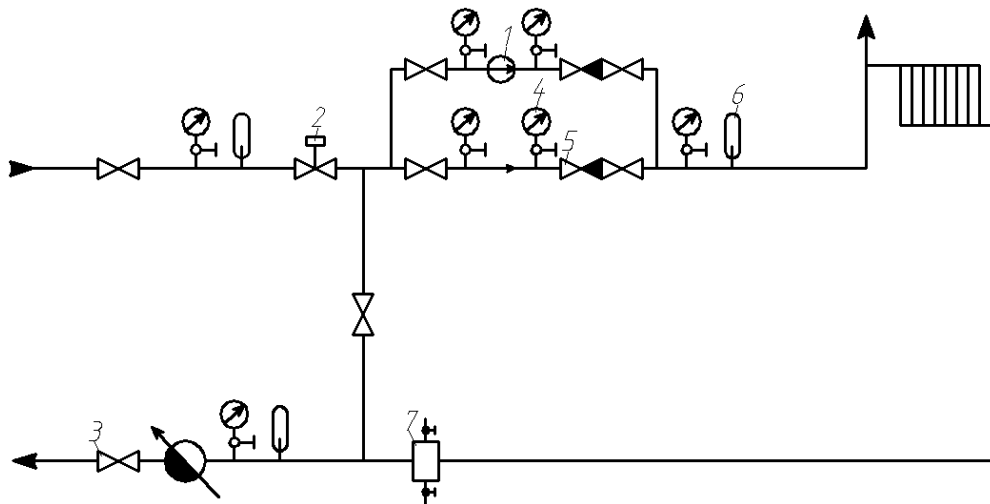


Рисунок 1.3. Схема присоединения системы отопления с насосом на подающей линии:

- 1 – циркуляционный насос;
- 2 – регулятор расхода теплоносителя;
- 3 – задвижка; 4 – манометр;
- 5 – обратный клапан;
- 6 – термометр;
- 7 – грязевик.

В этой схеме смешение происходит путем подсоса воды из обратного трубопровода через перемычку. Регулирование смешения также производится в ручном режиме путем открывания или закрывания задвижки, находящейся на перемычке.

В случае, когда наблюдается повышенное давление в обратном трубопроводе, применяется схема с установкой насосов на обратном трубопроводе (Рис. 1.4).

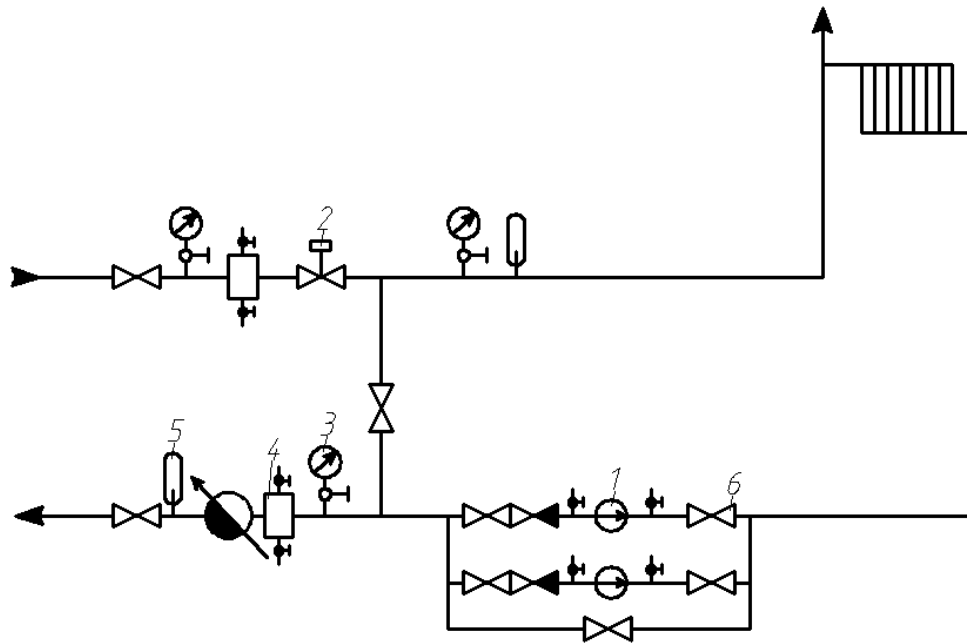


Рисунок 1.4 Схема отопительного ввода с насосом на обратной линии:

- 1 – циркуляционный насос,
- 2 – регулятор расхода теплоносителя;
- 3 – манометр;
- 4 – грязевик;
- 5 – термометр;
- 6 – задвижка.

Повышение давления происходит на действующих сетях вследствие их перегрузки. Насос, устанавливаемый на обратном трубопроводе, снижает давление в отопительной системе, обеспечивая циркуляцию воды и одновременно осуществляя подмешивание обратной воды в подающую линию [13...17].

1.1.2 Схемы ИТП для независимого подключения абонентов к системе отопления

Независимые схемы присоединения абонентов к тепловой сети основываются на отделении системы отопления от тепловой сети с помощью теплообменного аппарата, вследствие чего давление в тепловой сети не может

передаваться теплоносителю системы отопления. Циркуляция теплоносителя осуществляется с помощью циркуляционных насосов.

Расход теплоносителя, который циркулирует в системе отопления, можно определить по формуле

$$G = \frac{Q}{c \cdot (\tau_3 - \tau_4)}, \quad (1.1)$$

где Q – мощность системы отопления, Вт;

c – теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

τ_3 и τ_4 – расчетные температуры воды соответственно в подающем и обратном трубопроводах системы отопления, °С.

Потребляемый напор насоса должен быть равен $H = 1,15 \cdot h$ (где h – гидравлическое сопротивление системы отопления). При подборе насоса следует стремиться к минимальному запасу напора, в противном случае из-за повышенных расходов воды в системе отопления будет возникать шум. Независимые схемы, как правило, оборудуются расширительными баками. Утечки воды в системе отопления восполняются из тепловой сети автоматически по уровню теплоносителя в расширительном баке [14, 17...20].

Для независимого присоединения абонента к тепловой сети применяются схемы с поверхностными водоподогревателями (Рис. 1.5).

Система отопления в данном случае работает под давлением собственного расширительного бака [20...24]. Если система отопления рассчитана на работу с температурным перепадом 105 – 70°С, то для недопущения вскипания воды в верхних точках системы расширительный бак должен быть поднят на 2,5 – 3 м.

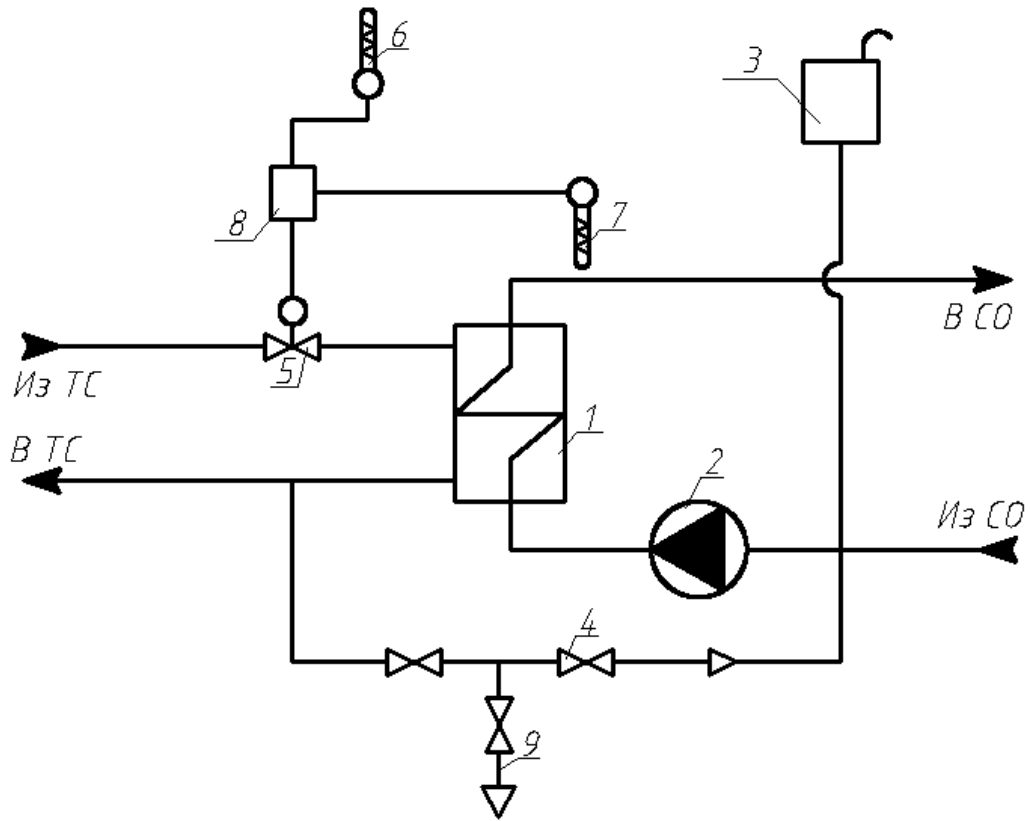


Рисунок 1.5. Схема независимого присоединения местных систем отопления:

- 1 – подогреватель;
- 2 – насос циркуляционный;
- 3 – расширительный бак;
- 4 – задвижки;
- 5 – регулирующий клапан;
- 6 – датчики температуры теплоносителя;
- 7 – датчики температуры наружного воздуха;
- 8 – контроллер регулирования расхода теплоносителя;
- 9 – слив воды из системы отопления.

Схемы пофасадных независимых присоединений абонентов, разработанных Московским научно-исследовательским и проектным институтом типологии экспериментального проектирования (МНИИТЭП), представлены на (Рис. 1.6) [31].

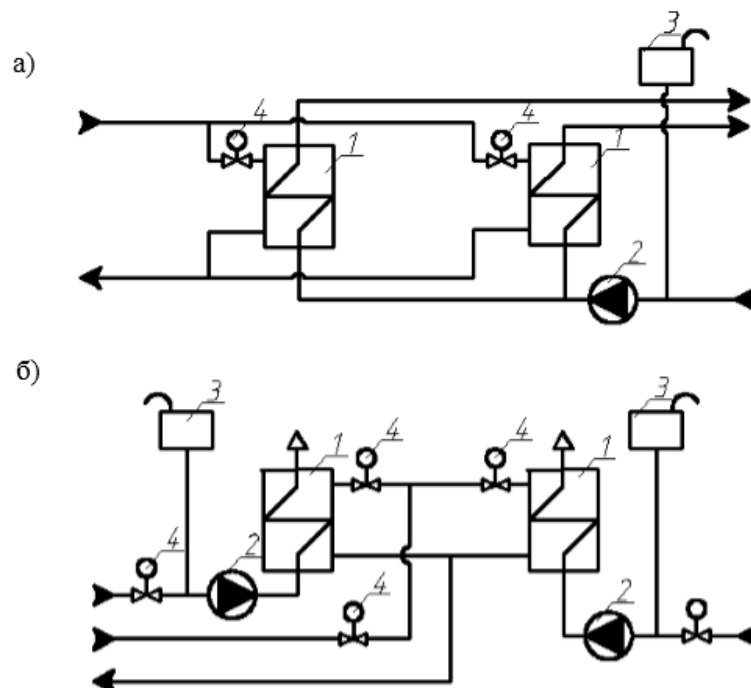


Рисунок 1.6. Схемы присоединения пофасадных систем отопления

а) с циркуляционным насосом;

б) с помощью гравитационного давления;

1 – теплообменный аппарат;

2 – циркуляционный насос;

3 – расширительный бак;

4 – регулятор расхода теплоносителя.

Схемы, представленные на рис. 1.6., применяются в зданиях с повышенной ответственностью (больницы, детские сады и т.д.), в таких схемах также могут устанавливаться две группы подогревателей. Расчет каждой группы может быть произведен на любую нагрузку в пределах от 50 до 100% расхода теплоты на отопление в зависимости от степени желаемой надежности [25 – 31]. Наличие подогревателя в схеме присоединения принципиально позволяет осуществлять более рациональный режим регулирования. Это особенно целесообразно при наличии в графике центрального регулирования постоянной температуры воды. Циркуляция теплоносителя в системе отопления осуществляется с помощью гравитационного давления (Рис. 1.6 а) или с помощью циркуляционного насоса (Рис.1.6 б).

1.1.3 Принципиальные схемы присоединения систем горячего водоснабжения (ГВС)

Различают два вида систем ГВС, которые выбирают исходя из технико-экономического обоснования:

- открытая, в которой теплоноситель на нужды ГВС отбирается непосредственно из тепловой сети;

- закрытая, в которой теплоноситель не отбирается из тепловой сети, а нагревается с помощью теплообменных аппаратов. Данные теплообменные аппараты присоединяются по следующим схемам: с последовательным присоединением водоподогревателя, параллельным присоединением водоподогревателя, двухступенчатым смешанным присоединением водоподогревателей I и II ступени, двухступенчатым последовательным присоединением водоподогревателей I и II ступени [7,32 – 38].

При непосредственном водоразборе из тепловой сети подключают систему горячего водоснабжения с помощью смесительного клапана (Рис 1.7).

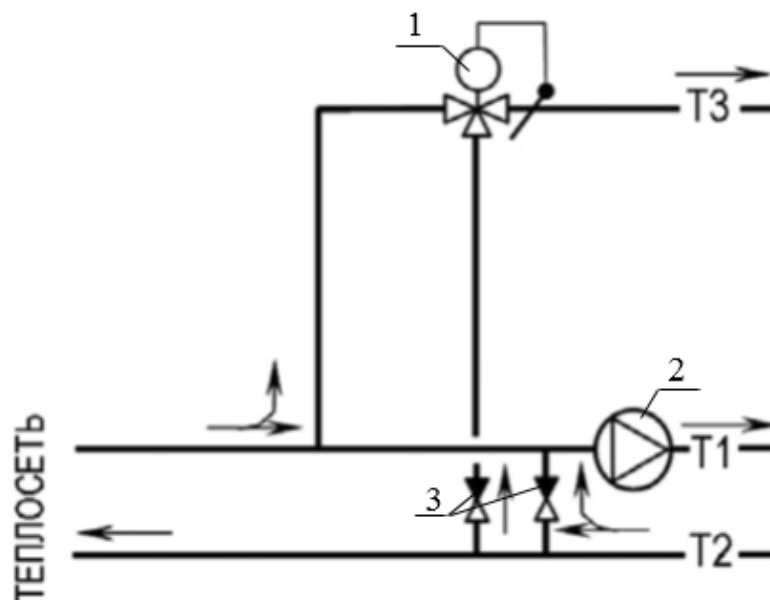


Рисунок 1.7. Схема подключения к системе ГВС через смесительный клапан:

- 1 – смесительный клапан;
- 2 – циркуляционный насос;
- 3 – обратный клапан.

Смесительный клапан пропускает воду либо из подающего трубопровода тепловой сети, либо из обратного трубопровода, либо смешивает воду из этих трубопроводов до заданных параметров. Для предотвращения перетекания воды из подающего трубопровода в обратный через смесительный клапан при отсутствии водоразбора устанавливают обратный клапан на ответвлении к обратной магистрали [39 – 42].

Обязательным требованием к узлам с непосредственным водоразбором из тепловой сети является установка двух расходомеров: на подающем трубопроводе и на обратном трубопроводе тепловой сети. Основным условием применения таких узлов является соответствие воды в системе теплоснабжения требованиям, предъявляемым к хозяйственно-питьевой воде, что в значительной мере ограничивает их применение.

Наибольшее распространение получили узлы присоединения систем ГВС через рекуперативные теплообменники. Холодная вода под напором городского водопровода (или с помощью дополнительных насосов) поступает в теплообменник, нагревается сетевым теплоносителем системы горячего водоснабжения. При этом применяют одну либо две ступени нагрева, соответственно один или два теплообменника.

В закрытых системах теплоснабжения водоподогреватели следует присоединять к тепловой сети исходя из соотношения максимальных тепловых потоков на горячее водоснабжение Q_{hmax} и на отопление $Q_{отmax}$:

при $\frac{Q_{hmax}}{Q_{отmax}} - 0,2 \dots 1,0$ по двухступенчатой схеме;

при $\frac{Q_{hmax}}{Q_{отmax}} \leq 0,6$ – по двухступенчатой смешанной схеме;

при остальных соотношениях – по одноступенчатой параллельной [17].

Последовательная одноступенчатая схема присоединения теплообменника к системе ГВС представлена на рис. 1.8.

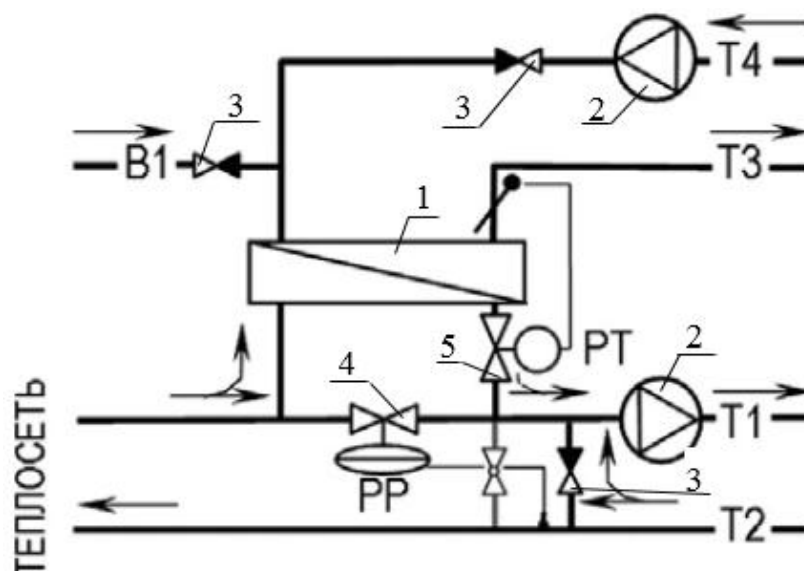


Рисунок 1.8 Одноступенчатая последовательная схема:

- 1 – теплообменный аппарат;
- 2 – циркуляционный насос;
- 3 – обратный клапан;
- 4 – дроссельный клапан регулирующего типа (PP);
- 5 – клапан регулирующий температуру теплоносителя (PT).

Основное назначение схемы состоит в подтверждении возможности расчета наружных тепловых сетей при закрытой схеме теплоснабжения не на максимальную, а на среднюю нагрузку ГВС. Сетевая вода, поступающая из теплосети для отопления и горячего водоснабжения, проходит через теплообменник, а затем остывший теплоноситель из теплообменного аппарата поступает в смесительный узел системы отопления. Задвижка на перемычке перекрыта. PP, установленный на перемычке теплообменника, получая командный сигнал от измерительной диафрагмы, открывается обратно пропорционально закрытию клапана PT и компенсирует недостающий расход теплоносителя для системы отопления. При этом гидравлический режим системы отопления, в отличие от теплового, остается постоянным [14,43 – 45].

В параллельной одноступенчатой схеме при соблюдении теплогидравлического режима тепловой сети работа контура ГВС не влияет на систему отопления (Рис. 1.9).

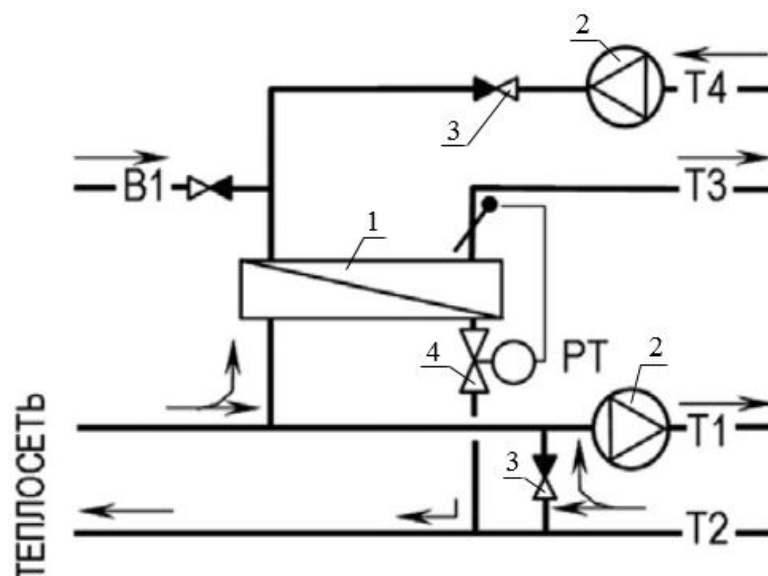


Рисунок 1.9 Параллельная схема включения ГВС

1 – 4 – тоже что и на рис. 1.8.

Сетевая вода поступает в теплообменный аппарат системы ГВС и возвращается в обратный трубопровод тепловой сети. Расход сетевой воды зависит от ее температуры и изменяется при работе клапана РТ. Поскольку работа параллельно включенного теплообменного аппарата не зависит от работы системы отопления, как в предыдущей схеме, пуск и регулировка ГВС осуществляется при отключенной системе отопления.

Одноступенчатые схемы подключения ГВС имеют ряд преимуществ в системах теплоснабжения небольшого радиуса действия, подключенных к районной котельной. Считается, что при увеличении мощности и радиуса действия системы теплоснабжения двухступенчатые схемы присоединения ГВС являются более экономичными, способствуя уменьшению диаметров тепловой сети. Однако параллельную одноступенчатую схему целесообразно оценивать с современных позиций энергосбережения [35, 46, 47]. По сравнению с двухступенчатой она обеспечивает меньшие гидравлические потери, меньшие тепловые потери и, что немаловажно, она гораздо проще. Двухступенчатые схемы с использованием теплоты из обратного трубопровода системы отопления обеспечивают работу системы в заданном режиме очень короткий промежуток времени, что влечет за собой в остальных случаях дополнительные затраты на перекачку теплоносителя.

В двухступенчатой смешанной схеме присоединения системы ГВС теплообменный аппарат разделен на два теплообменника (Рис. 1.10), [14,17].

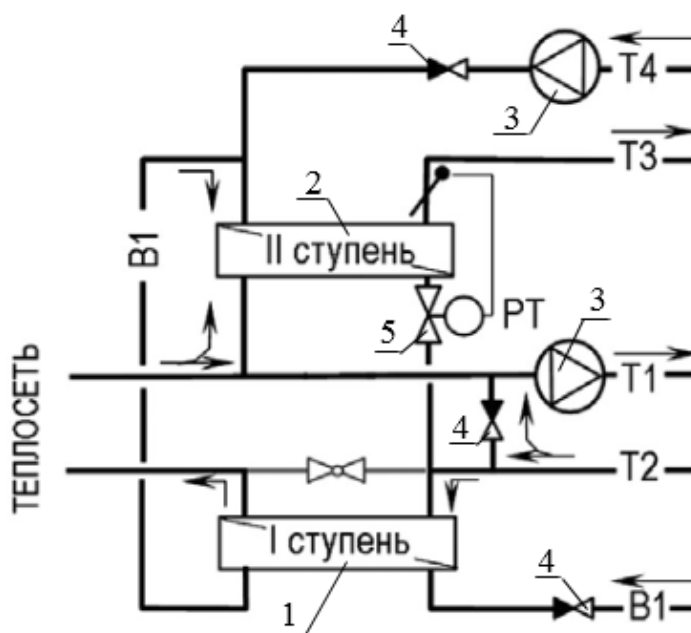


Рисунок 1.10 Двухступенчатая схема присоединения системы ГВС:

В1 – подающий трубопровод на вторую ступень нагрева;

1 – теплообменный аппарат первой ступени;

2 – теплообменный аппарат второй ступени;

3 – циркуляционный насос;

4 – обратный клапан;

5 – клапан регулирования температуры теплоносителя.

Первый теплообменный аппарат подключен последовательно к системе отопления, а второй параллельно. Вода из городского водопровода поступает в теплообменный аппарат первой ступени, где подогревается за счет остаточной теплоты воды в обратном трубопроводе теплообменного аппарата второй ступени и обратного трубопровода системы отопления, после чего вода поступает в теплообменный аппарат второй ступени, где нагревается до требуемой температуры за счет теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети, и подается в систему ГВС. В летний период времени подогрев осуществляется в таком же режиме с небольшим отличием, система отопления в данном случае отключена, а подогрев в первой ступени осуществляется лишь за счет теплоносителя, поступающего от теплообменного аппарата второй ступени [48].

1.1.4 Групповые тепловые пункты

В общей системе теплоснабжения тепловой пункт имеет важнейшее значение как для тепловой сети, так и для потребителя. Правильность работы теплового пункта определяет экономичность использования теплоты, подаваемой потребителю. Такой потребитель является юридической границей, которая предполагает необходимость его оснащения контрольно-измерительными приборами, позволяющими определять взаимную ответственность сторон. Схемы и оборудование тепловых пунктов необходимо определять в соответствии не только с техническими характеристиками местных систем теплоснабжения, но и обязательно с характеристиками внешней тепловой сети, режимом работы ее источника теплоты.

Тепловые пункты подключаются к большой тепловой сети, поэтому необходимо учитывать неравномерности графиков потребления тепловой энергии разными потребителями, которые при изменении расхода у одного потребителя неизбежно будут отражаться на расходе другого потребителя [1,5,49 – 52]. График расхода теплоносителя представлен на рис. 1.11

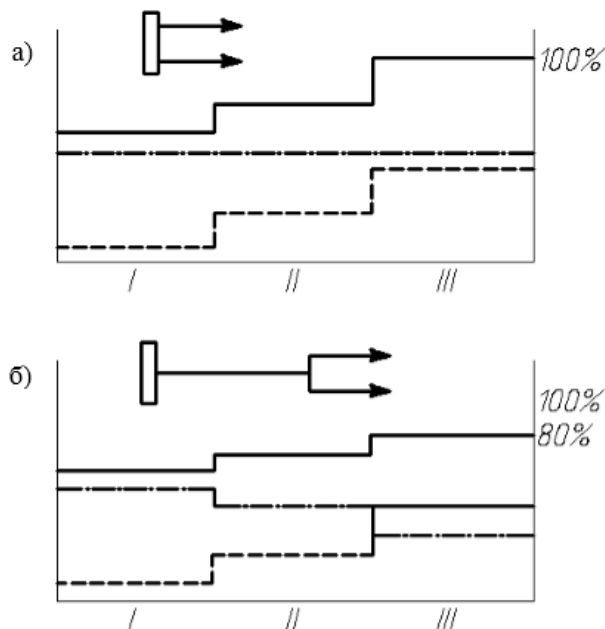


Рисунок 1.11 График расхода теплоносителя:

а) при подключении абонентов непосредственно к коллектору источника теплоты;

б) при подключении потребителей к тепловой сети;

—— — суммарный расход теплоносителя;

— · — — расход теплоносителя на отопление;

— — — — расход теплоносителя на ГВС

В первом случае суммарный расход теплоносителя зависит от водоразбора в системе ГВС (режим I, II, III), а во втором случае имеет место увеличение расхода теплоносителя, однако автоматически снижается расход на отопление, в результате чего суммарный расход теплоносителя при подключении потребителей к тепловой сети (Рис. 1.11 б) составляет на 20% меньше, чем при непосредственном подключении абонента к коллектору источника теплоты (Рис. 1.11 а).

Широкое применение получили групповые тепловые пункты с подключением системы отопления через элеваторный узел, а система ГВС через теплообменный аппарат [53 – 55].

Регулирование теплового пункта при параллельной схеме включения подогревателей горячего водоснабжения производится таким образом, что в часы максимального водоразбора некоторая часть сетевой воды не подаётся в систему отопления (Рис. 1.12).

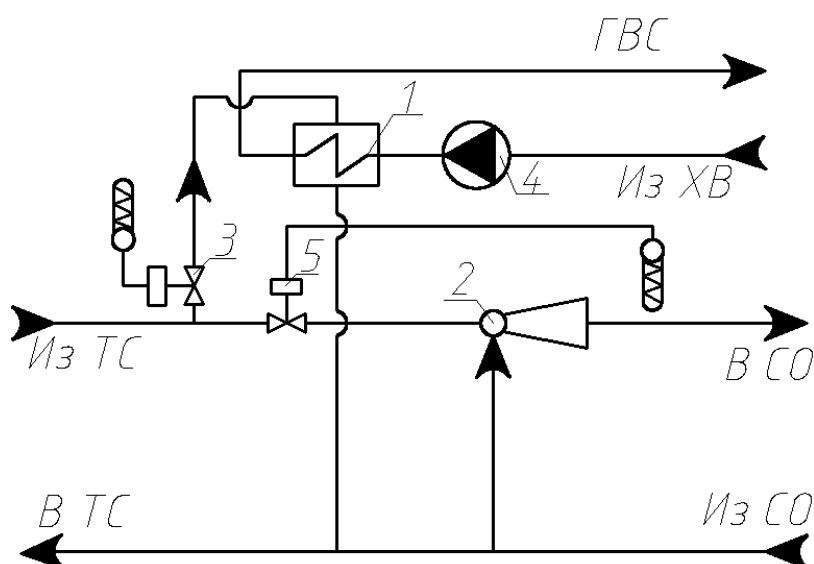


Рисунок 1.12 Схема теплового пункта с параллельным включением системы ГВС:

1 – теплообменный аппарат системы ГВС;

2 – элеватор;

3 – регулятор температуры воды;

4 – циркуляционный насос;

5 – регулятор температуры от датчика наружной температуры воздуха.

Более эффективной схемой теплового пункта является схема с предвключенным теплообменным аппаратом (Рис. 1.13), при таком подключении абонентов есть возможность заранее учитывать аккумулирующую способность здания [10, 13, 56 – 63].

Преимуществом предвключенной схемы является возможность работы теплового пункта с постоянным расходом теплоносителя в течение всего отопительного периода, что позволяет сбалансировать гидравлический режим [48, 49, 64 – 70].

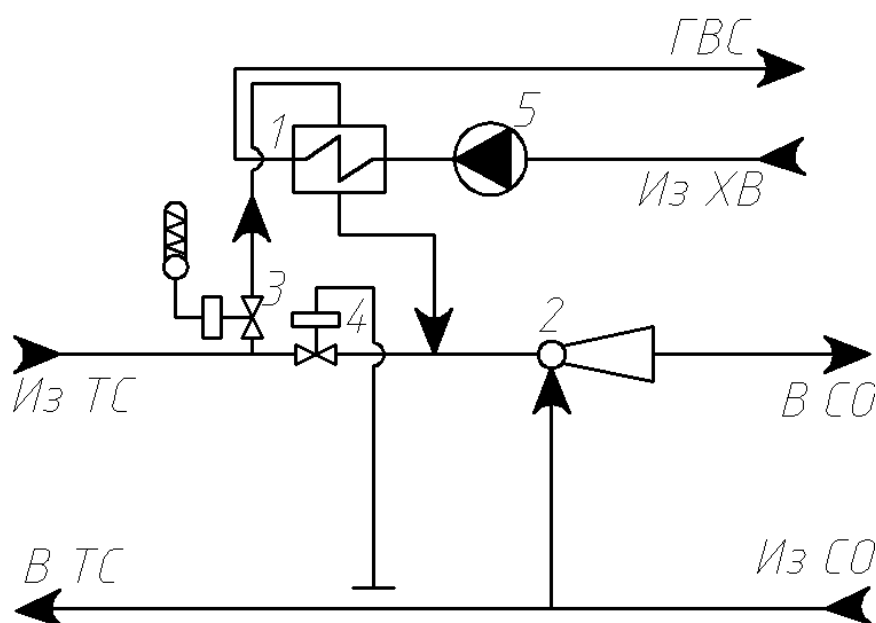


Рисунок 1.13 Схема теплового пункта с предвключенным теплообменным аппаратом:

1 – теплообменный аппарат;

2 – элеватор;

3 – регулятор температуры воды;

4 – регулятор расхода;

5 – циркуляционный насос.

В настоящее время большую популярность приобретают тепловые пункты с независимым подключением системы отопления и ГВС. Данными

разработками занимаются ряд ученых: Тарадай А.М., Пырков В.В., Олексюк А.А., Панфилов В.И. и др.

Применение комбинированных тепловых пунктов с независимым подключением систем отопления и ГВС по сравнению с традиционными абонентскими вводами позволяет:

- уменьшить занимаемую площадь помещения;
- уменьшить срок монтажа;
- сократить энергетические затраты и затраты на вложения на монтаж трубопроводов;
- повысить надежность теплоснабжения здания;
- упростить дальнейшую модернизацию инженерных систем здания.

1.2 Математическое моделирование потокораспределения в системах теплоснабжения

Проблема определения фактических расходов в распределительной сети ИТП является актуальной проблемой и востребована при решении нескольких важнейших задач. Первоочередная задача состоит в наладке распределительной сети теплоснабжения. Второй задачей является определение расходов в системе ИТП. Оптимизация конфигураций и режимов характеристик систем ИТП не является новой в исследуемой области. В настоящее время опубликовано много научных работ на эту тему.

Еще в 1985 году была опубликована монография А.П. Меренкова и В.Я. Хасилева. В работе рассмотрены вопросы, относящиеся к тогда еще новому направлению распределению потоков в гидравлической цепи, где показывается преемственная связь между теорией потокораспределения и теорией электрических цепей. Основное внимание уделяется вопросам распределения теплоносителя в контурах отрывных систем теплоснабжения (СТ) с зависимым подключением абонента. Вопросы математического описания и расчета электрических и гидравлических систем имеет несомненно обобщенный ряд исходных физико-математических положений. Вместе с тем теория цепей

начинается с работ Ома, Гельмгольца и Максвелла, результаты которой используются в теоретической и прикладной электрике, радиотехнике, теории автоматического регулирования и математическом программировании. Но практически не затрагиваются вопросы распределения потоков в системах ИТП с независимым подключением абонентов [73].

Также графический метод расчета напорных сетей использовался в работах Б.Л. Шифринсона, С.Ф. Копьева, Л.А. Мелентьева, Л.Г. Скрицкого, Е.Я. Соколова, Н.К. Громова, Сафонова, Е.П. Шубина. Этот метод применялся для иллюстрации переменных режимов в тепловых сетях [71 – 97].

В настоящее время Н.И. Карасев обратился к новому подходу формирования моделей узловых напоров для гидравлических цепей, который опирается на инверсные характеристики пассивных и активных элементов трубопроводных сетей, замыкающих системы уравнений стационарного изотермического режима ТС [71, 72]. Это позволило получить решение задачи потокораспределения на всех активных и пассивных ветках ТС, которое сводится к вычислению компонентов вектора расходов с помощью следующих инверсионных характеристик

$$\begin{aligned} g_i^* &= Sgn(\Delta h_i^*) \sqrt{|\Delta h_i^*|/r_i}, \forall i = \overline{n_1 + 1, n}; \\ g_i^* &= R_{0i} + R_{1i}\Delta h_i^* + R_{2i}(\Delta h_i^*)^2, \forall i = \overline{1, n_1}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где Sgn – кусочно-постоянная функция;

Δh_i^* - вектор гидравлического сопротивления;

r_i – гидравлическое сопротивление i – го участка;

n_1 – узловой напор в i - ом узле;

n – количество участков в гидравлических контурах;

R_{0i}, R_{1i}, R_{2i} – параметры энергетической характеристики i – го насосного агрегата.

Решение этой задачи сводится к тому, что потокораспределение на всех активных и пассивных ветках ТС вычисляется компонентами векторов расходов инверсионных характеристик.

Также в работах С.А. Сазоновой [74 – 78] подробно рассмотрен процесс разработки комплекса моделей анализа потокораспределения для ТС. Результаты данных исследований – модели потокораспределения (МП) с установившимся и не установившимся течением транспортируемой среды в системе ТС. Их аппаратное оформление предполагает наличие разнообразных подсистем (АП). Наличие в системе регуляторов расхода, давления, температуры приводит к необходимости представления моделей систем ТС как моделей с регулярными параметрами. Для реализации МП применялась методика вложенных интегративных циклов.

Формирование МП в системе ТС составляет вариационный принцип виртуальных скоростей. Исследуемым объектом рассматривается фрагмент полной системы, ограничиваемой узлами, через которые осуществляется обмен ТС между ним и метасистемой. Такие узлы считаются энергетическими узлами (ЭУ). Исследуемый фрагмент системы ограничен множеством $J_{\pi(f)}^Z J_{\eta(P)}^Z J_{\eta(g)}^Z J_{\eta(f)}^Z$ энергоузлов, содержащих подмножества: $J_{\pi(f)}^Z$ – источников и $J_{\eta(P)}^Z J_{\eta(g)}^Z J_{\eta(f)}^Z$ – стоков.

При индексации множеств верхний индекс показывает, что элементы системы принадлежат к расчетной зоне, то есть индивидуальному объекту для моделирования. Нижний индекс определяет характер элемента (η – потребитель; π – источник питания; χ – энергетически нейтральный узел или узел ответвления, то есть без обмена массой с метасистемой). В скобках помечен параметр, фиксируемый в качестве исходных данных.

Гидравлические параметры режима, связанные МП, включают: расходы среды на ветвях Q , отборы в узлах g , потенциалы в узлах H , изменение напора на ветвях h и т.д.

В работе [74] используется дополнительный тип псевдопеременных, выражающих потоки среды на независимых цепях. В результате объединения

подсистемы контурных, цепных уравнений и узловых балансов получена математическая модель с неустановившимся режимом

$$A_{m \times n} \times Q_{n \times 1}^{u(k)} = g_{m \times 1}^{c(k)}, \quad (1.3)$$

$$C_{p \times n} \times \left\{ \left(R_{n(d)} + R(Q)_{n(d)}^{u(k)} \right) \times Q_{n \times 1}^{u(k)} + E_{n(d)} \times \dot{Q}_{n \times 1}^{u(k)} \right\} = \\ = M_{e \times 1}^{c(k)} + \sum_i H(Q)_i^{u(k)}, \quad (1.4)$$

$$K_{r \times n} \times \left\{ \left(R_{n(d)} + R(Q)_{n(d)}^{u(k)} \right) \times Q_{n \times 1}^{u(k)} + E_{n(d)} \times \dot{Q}_{n \times 1}^{u(k)} \right\} = 0_{r \times 1} \pm \sum_i H(Q)_i^{u(k)}, \quad (1.5)$$

где $n = \{I^z\}$; $m = \{J_{\eta(q)}^z \cup J_{\chi}^z\}$; $e = \{J_{\pi(f)}^z \cup J_{\eta(P)}^z \cup J_{\eta(f)}^z\}$ – число ЭУ с фиксированным потенциалом;

P – число независимых цепей ($P = e - 1$);

$R_i = S_i |Q_i|^{\alpha-1}$ – элемент диагональной матрицы;

S_i – коэффициент гидравлического сопротивления i – того участка;

$E_i = (\rho L_i / g F_i)$ – гидравлическая индуктивность i – того участка, то есть производная расхода по времени, вычисляемая по результатам двух предыдущих итераций $(k - 1)$ и $(k - 2)$ в процессе решения;

g – ускорение свободного падения;

$R(Q)_i$ – элемент диагональной матрицы, выражающий переменное сопротивление регулятора (расхода, давления, температуры), установленного на i – ом участке;

ρ – плотность транспортируемой среды;

L_i, F_i – длина и площадь поперечного сечения i – того участка соответственно;

H^c, g^c – матрицы-столбцы фиксируемых граничных условий для энергетических узлов;

$\sum_i H(Q)_i^{u(k)}$ – сумма напоров насосов, размещенных на i – том участке и входящих в состав соответствующей цепи или контура;

$u(k)$ – номер итерации вложенного цикла, внешний цикл (k) определяет шаг интегрирования по времени, а в пределах внутреннего цикла (u) выполняется расчет объекта как системы с сосредоточенными параметрами;

C, K, A – матрицы смежности независимой цепи, контуров и матрицы инцидентий;

M – матрица маршрутов;

" t " – символ транспортирования;

" d " – признак диагональной матрицы;

" I " – признак матрицы-столбца.

Для установившегося режима течения математическая модель потокораспределения [75]:

$$C_{p \times n} \times \{(R_{n(d)} + R(Q)_{n(d)}^u) \times Q_{n \times 1}^u\} = M_{p \times 1}^t \times H_{e \times 1}^C \pm \sum_i H(Q)_i^u; \quad (1.6)$$

$$K_{r \times n} \times \{(R_{n(d)} + R(Q)_{n(d)}^u) \times Q_{n \times 1}^u\} = 0_{r \times 1} \pm \sum_i H(Q)_i^u; \quad (1.7)$$

$$A_{m \times n} \times Q_{n \times 1}^u = g_{m \times 1}^C. \quad (1.8)$$

Математическая модель потокораспределения для неизотермического течения [76]:

$$C_{p \times n} \times \{(R_{n(d)} + R(Q)_{n(d)}^u) \times Q_{n \times 1}^u\} = M_{p \times e}^t \times H_{e \times 1}^C \pm \sum_i H(Q)_i^u; \quad (1.9)$$

$$K_{r \times n} \times \{(R_{n(d)} + R(Q)_{n(d)}^u) \times Q_{n \times 1}^u\} = 0_{r \times 1} \pm \sum_i H(Q)_i^u; \quad (1.10)$$

$$A_{m \times n} \times Q_{n \times 1}^u = g_{m \times 1}^C; \quad (1.11)$$

$$E_{n(d)} \times (B_{n(d)} \times \theta_{n \times 1} + T''_{n \times 1}) = -\vec{A}_{n \times m}^t \times T'_{m \times 1}; \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned} \vec{A}_{m \times n} \times Q_{n(d)}^u \times T''_{n \times 1} - \vec{A}_{m \times n} \times Q_{n(d)}^u \times T'_{n \times 1} = \\ = \vec{g}_{m(d)} \times T'_{m \times 1} - \vec{g}_{m(d)} \times T_{m \times 1}^C. \end{aligned} \quad (1.13)$$

где T', T'' - температуры в начальном узле после смешения и в конечном до смешения.

В этой математической модели предполагается, что изменение температуры осуществляется только из-за теплообмена трубопровода с окружающей средой и в результате смешения потоков, то есть не учитывается эффект дросселирования в регулирующих устройствах, адиабатное сжатие теплоносителя в насосах и т.д.

Для тепловых сетей рассматривались задачи с распределением потоков в открытых тепловых сетях, не затрагивая вопросов применения закрытой системы ТС с независимым подключения абонента. А также это исключало возможность поиска оптимальных размеров и тепловых режимов ТС, особенно для независимых систем с теплообменниками, а тем более с многоконтурными теплообменными аппаратами.

1.3 Выводы по первому разделу

Высокая цена на энергетические ресурсы требует создания новых и модернизации существующих технологий для более эффективного использования тепла. Поэтому на сегодняшний момент становится актуальным использование индивидуальных тепловых пунктов с независимым подключением абонентов. Это позволит снизить затраты энергетических ресурсов за счет погодного регулирования непосредственно у потребителя и тепловых потерь внутриквартальными тепловыми сетями. Сооружение ИТП с МТА позволит разделить зону ответственности между ТС и потребителем тепловой энергии.

К преимуществам индивидуальных тепловых пунктов можно отнести:

- более эффективное использование энергетических ресурсов за счет рационального регулирования;
- уменьшение металлоёмкости внутриквартальной тепловой сети, и, как следствие, уменьшение затрат на монтаж тепловой сети;
- снижение тепловых потерь внутриквартальными тепловыми сетями;
- значительное снижение количества утечек теплоносителя в трубопроводах;
- снижение затрат на водоподготовку;

- более рациональное использование подающего и обратного теплоносителя;

- повышение надежности тепловой сети;

- оборудование зданий современными системами отопления с более совершенными регуляторами теплоты.

Для более эффективной работы ИТП и удешевления конструкции следует провести экспериментальные и теоретические исследования и разработать эффективную схему ИТП на базе МТА.

Задачи исследования состоят в следующем:

- провести аналитические исследования принципиальных схем абонентских подключений к тепловой сети, математических моделей потокораспределения;

- разработать математическую модель потокораспределения для индивидуального теплового пункта с МТА и проанализировать распределение расхода теплоносителей и давлений в сети;

- разработать математическую модель потокораспределения в двухтрубной внутриквартальной тепловой сети для анализа распределения потоков при непрогнозируемых режимах работы тепловой сети;

- создать экспериментально-лабораторную установку и провести исследования режима работы ИТП с МТА при регулировании отпуска теплоты в зависимости от температуры наружного воздуха;

- разработать принципиальную схему автоматического регулирования ИТП с МТА для независимой схемы подключения абонентов;

- оценить технико-экономическую эффективность от внедрения разработанной схемы ИТП на базе МТА.

РАЗДЕЛ 2

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБОРУДОВАНИИ И ТРУБОПРОВОДАХ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ И ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ С МТА

При работе ИТП с регулируемыми параметрами, а также в зависимости от неравномерности потребления тепловой энергии требуется знать, как будет распределяться теплоноситель в контурах ИТП. Существует много исследований в этой области [34, 39, 40], но работа ИТП с многоконтурными теплообменными аппаратами не исследовалась.

2.1 Потокораспределение теплоносителя в трубопроводах и узлах индивидуального теплового пункта

Исследование работы индивидуального теплового пункта производится с целью определения режима стабильной работы насосов, балансировочной, термостатической арматуры и др.

Для схемы индивидуального теплового пункта с установившемся режимом течения теплоносителя, имеет место зависимость линейно независимых контуров

$$(m - 1 + b = d), \quad (2.1)$$

где d – произвольное количество участков ИТП;

b – линейно-независимые контуры ИТП;

m – узлы ИТП.

Будем считать, что для каждой ветви $i = (j, j + 1)$, где j и $j + 1$ ее начальный и конечный узлы, задан закон гидравлического сопротивления, связывающий общую потерю h_i давления на трение, перепад y_i (Рис. 2.1). Тогда получаем зависимость:

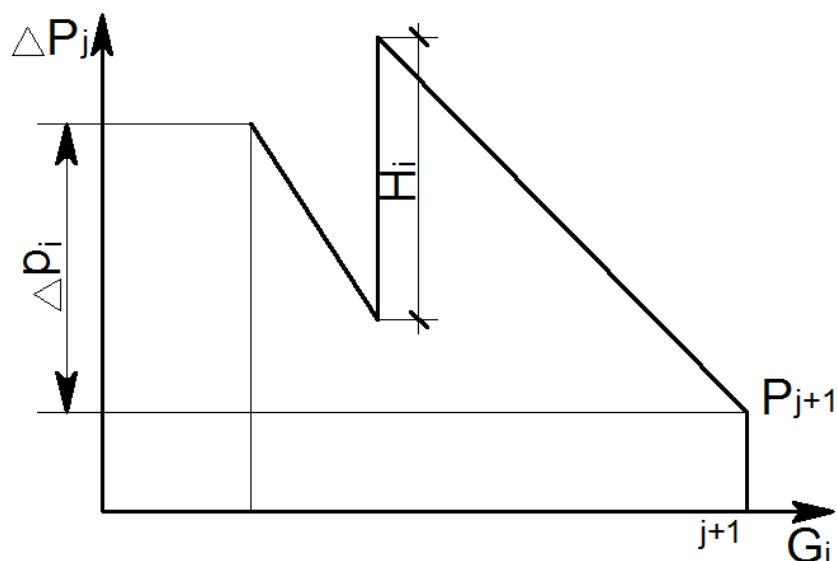


Рисунок 2.1 Изменение давления на участке с побудителем движения

На каждом участке действует закон квадратичного гидравлического сопротивления

$$\Delta p_i + H_i = \Delta P_i G_i^2, \quad (2.2)$$

где Δp_i – потеря давления на i – том участке;

H_i – активный напор на i – том участке;

ΔP_i – гидравлическое сопротивление участка на i – том участке;

G_i – расход теплоносителя на i – том участке.

Однако о расходе G_i необходимо судить в зависимости от направления потока на участке и характерного сопротивления. В работах академика Хасилева В.Я. [73,84 – 86] вводятся векторные обозначения и диагональные матрицы $\overrightarrow{\Delta p}$, \vec{G} , \vec{H} , \mathbf{A} и \mathbf{B} , тогда тепловой пункт в целом описывает уравнение, относящееся к каждому участку ($i = 1, \dots, n$) [86]

$$\overrightarrow{\Delta p} + \vec{H} = \mathbf{\Delta P} \cdot \mathbf{G} \cdot \vec{G}, \quad (2.3)$$

где $\overrightarrow{\Delta p}$ – вектор искомых потерь давления на участке;

\vec{H} – вектор известных перепадов давления, создаваемых циркуляционными, смесительными насосами на участках ИТП;

ΔP – диагональная матрица характеристик гидравлического сопротивления всех участков ИТП от $(i = 1)$ до $(i = n)$;

G – диагональная матрица расходов теплоносителя всех участков теплового пункта от $(i = 1)$ до $(i = n)$;

\vec{G} – вектор расходов теплоносителя на искомых участках ИТП.

При расчете потокораспределения должно выполняться два «сетевых» закона Кирхгофа. В первом законе в каждом узле j будет соблюдаться математический баланс

$$\sum_j G_i = G_j, j = 1, \dots, m, \quad (2.4)$$

где $\sum_j G_i$ – алгебраическая сумма по всем участкам, имеющая общий узел j . Если в узле j потребляется тепловая энергия, то $G_j > 0$, источник тепловой энергии $G_j < 0$, если это разветвление $G_j = 0$.

Для ИТП на базе МТА должны быть заданы значения G_j таким образом, чтобы имел место их общий нулевой баланс по всем узлам m

$$\sum_{j=1}^m G_i = 0; \quad G_m = -\sum_{j=1}^{m-1} G_i. \quad (2.5)$$

С использованием матрицы соединений A , которая однозначно отображает топологию схемы ИТП на базе МТА, фиксируя соединение всех ее d – участков и $(m - 1)$ линейно независимых узлов, балансы уравнения (2.4) для всей системы запишем в виде

$$A\vec{G} = \vec{G}_{yp}, \quad (2.6)$$

где \vec{G}_{yp} – вектор узловых расходов в отдельных узлах ИТП.

Второй закон Кирхгофа требует нулевого суммарного изменения потерь давления Δp_i для любого гидравлического контура

$$\sum_c \Delta p_i = 0. \quad (2.7)$$

Применимо для любого независимого контура ($c = 1, \dots, b$), выбранной системы независимого подключения ИТП, применяя матрицу \mathbf{B} , получаем сокращение закона Кирхгофа

$$\mathbf{B} \overrightarrow{\Delta p} = 0, \quad (2.8)$$

где \mathbf{B} – матрица совпадения мест обходов контуров.

Первая математическая модель сводится к системе уравнений

$$\mathbf{A} \vec{G} = \vec{G}_{yp}, \mathbf{B} \overrightarrow{\Delta p} = 0, \overrightarrow{\Delta p} + \vec{H} = \Delta \mathbf{P} \cdot \mathbf{G} \cdot \vec{G}. \quad (2.9)$$

Уравнение (2.3), составляющее последнюю группу из n уравнений, называется замыкающим соотношением – оно дополняет $m - 1$ уравнений первого закона и b уравнений второго закона Кирхгофа до полной системы (2.9) из $2n$ уравнений относительно $2n$ неизвестных G_i и Δp_i [86].

В этой системе можно исключить вектор $\overrightarrow{\Delta p}$ путем подстановки (2.3) в (2.8):

$$\mathbf{A} \vec{G} = \vec{G}_{yp} \quad (2.10)$$

Для определения степени открытия регулирующей арматуры в математическую модель должна быть введена матрица \mathbf{E} , которая будет учитывать степень открытия балансировочной и регулирующей арматуры. После введения дополнительной матрицы она будет иметь вид

$$\mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{P} \cdot \vec{G} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{B} \vec{H} \quad (2.11)$$

2.1.1 Расчет потокораспределения в ИТП на основе метода контурного расхода

В работе исследуется потокораспределение в принципиальной схеме ИТП с МТА представленная на (Рис. 2.2).

Метод контурных расходов (МКР) – аналог известного метода контурных токов для расчета линейных электрических цепей в сочетании с методом Ньютона [87 – 90] для решения системы нелинейных алгебраических уравнений.

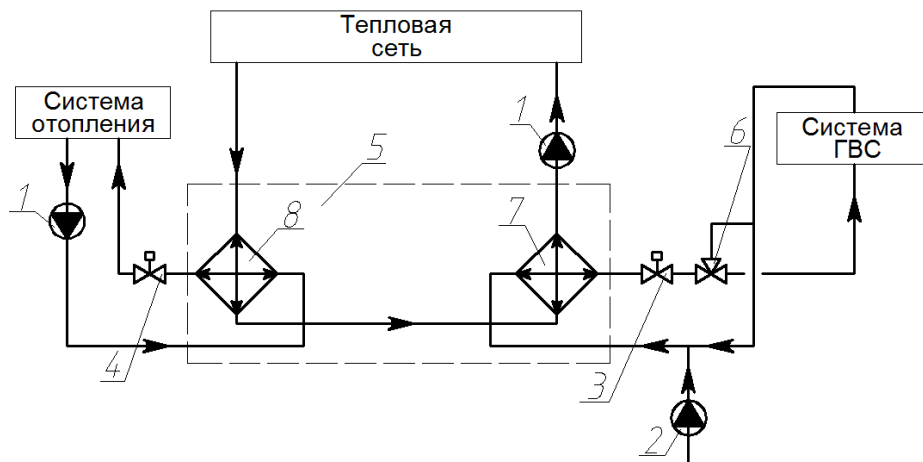


Рисунок 2.2 Принципиальная схема индивидуального пункта:

- 1 – циркуляционный насос;
- 2 – насос повышения давления контура системы ГВС;
- 3 – регулирующий клапан контура системы ГВС;
- 4 – регулирующий клапан контура системы отопления;
- 5 – корпус теплообменного аппарата (контур циркуляции первичного теплоносителя);
- 6 – термосмесительный клапан;
- 7 – теплообменный аппарат (контур вторичного теплоносителя ГВС);
- 8 – теплообменный аппарат (контур вторичного теплоносителя системы отопления).

Для рассматриваемой схемы ИТП строится оргграф-схема (Рис. 2.3). При построении этой схемы, как правило, выбирают одну из систем контуров.

На схеме выделяется дерево, связывающее все ее $m = 19$ узлов, в результате все участки разбиваются на $d = 16$ участков дерева и $i = 4$ участка, не входящих в это дерево, которые назовем хордами.

Каждая хорда замыкает какую-то последовательность участков дерева и определяет контур, который и фиксируется соответствующей строкой в матрице B .

Матрицы и векторы цепи «расщепляются» на матрицы и векторы хорд $(A_x, B_x, g_x, \Delta p_x, H_x)$ и дерева $(A_d, B_d, g_d, \Delta p_d, H_d)$.

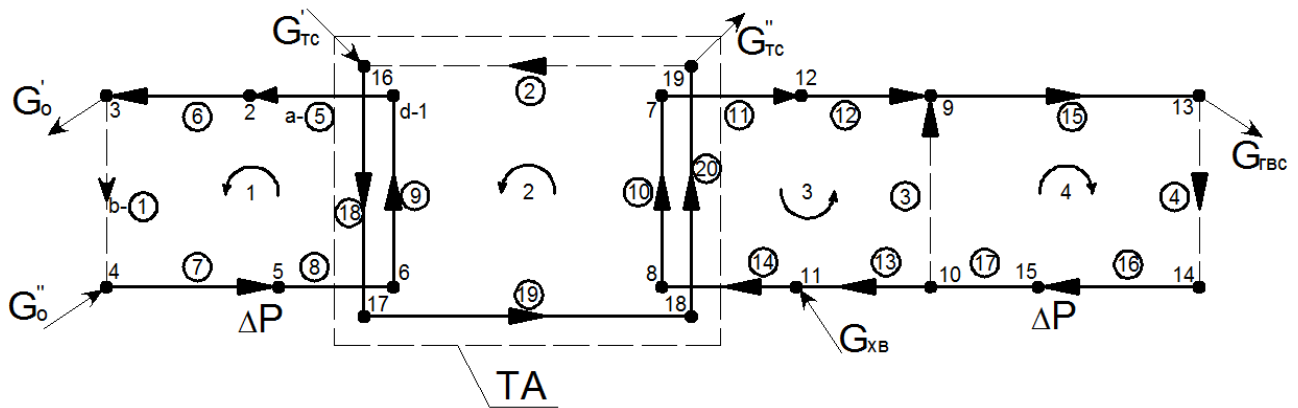


Рисунок 2.3 Эквивалентная схема ИТП, оргграф-схема:

ТА – теплообменный аппарат;

ΔP – перепад давления, кПа;

G_o' – теплоноситель, подаваемый в систему отопления, m^3/c ;

G_o'' – обратный теплоноситель из системы отопления, m^3/c ;

$G_{хв}$ – подпитка из хозяйственного водопровода, m^3/c ;

$G_{ГВС}$ – расход горячей воды, m^3/c ;

$G_{Тс}'$ – греющий теплоноситель из тепловой сети, m^3/c ;

G_o'' – обратный теплоноситель, уходящий в тепловую сеть, m^3/c ;

i – хорда;

c – контур.

В трехконтурном теплообменном аппарате процессы передачи теплоты обусловлены взаимодействием тепловых потоков, направленных от греющего теплоносителя (воды тепловой сети) к нагреваемым теплоносителям (горячее водоснабжение и отопление). Процесс передачи теплоты в теплообменном аппарате характеризуется уравнением Ньютона-Рихмана, которое описывает передачу теплоты через твердую стенку с учетом коэффициентов теплоотдачи и тепловосприятости.

Количество теплоты, передаваемое площадью F за время τ , пропорционально температурному напору

$$\bar{Q} = \alpha \cdot \Delta t \cdot F \cdot \tau, \quad (2.12)$$

где α – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·град.

С другой стороны, количество передаваемой теплоты зависит от характеристик потока теплоносителя [98 – 100, 135].

$$Q_i = c \cdot G_i (T_i^1 - T_i^2), \quad (2.13)$$

где c – удельная массовая теплоемкость теплоносителя при данной температуре, Дж/(кг · К);

G_i – расход теплоносителя в i -том контуре, кг/с;

T_i^1 – температура в подающем трубопроводе i – го контура теплоносителя, °С;

T_i^2 – температура в обратном трубопроводе i –го контура теплоносителя, °С.

Поскольку для математического моделирования потоков теплоты необходимо в комплексе учитывать тепловую мощность систем как теплоснабжения, так и отопления и горячего водоснабжения, то тепловой баланс систем в целом будет описываться системой уравнений

$$\begin{cases} Q_{ТС} = c \cdot G_{ТС} (T_{ТС}^1 - T_{ТС}^2) \\ Q_0 = c \cdot G_0 (T_0^1 - T_0^2) \\ Q_{ГВС} = c \cdot G_{ГВС} (T_{ГВС}^1 - T_{ГВС}^2) \end{cases} . \quad (2.14)$$

В силу того, что в данном случае рассматривается количественное регулирование систем теплоснабжения, то определяющим фактором, рассматриваемым в качестве регулируемого, будет расход теплоносителя. Тогда система уравнений 2.14 примет вид

$$\begin{cases} G_{TC} = \frac{Q_{TC}}{c \cdot (T_{TC}^1 - T_{TC}^2)} \\ G_O = \frac{Q_O}{c \cdot (T_O^1 - T_O^2)} \\ G_{ГВС} = \frac{Q_{ГВС}}{c \cdot (T_{ГВС}^1 - T_{ГВС}^2)} \end{cases} \quad (2.15)$$

Формируется из выбранной принципиальной схемы теплового пункта схема дерева и системы контуров (Рис. 2.4, 2.5). Участки, не вошедшие в дерево, становятся хордами 1, 2, 3, 4, и их номера взяты совпадающими с номерами контуров $b = 1, 2, 3, 4$ – хорды; $d = 5, 6, 7, \dots, 20$ – дерево; направления обходов $c = 1, 2, 3, 4$; $a = 1, \dots, 20$. В качестве линейно независимых принято первые 18 узлов.

Нумерация элементов эквивалентной схемы ИТП на базе МТА произведена таким образом, что первые номера присвоены хордам, $G_x = (G_1 \dots G_k)^t$, $G_d = (G_{k+1} \dots G_n)^t$, а номера контуров и направления их обхода совпадает с номерами и ориентацией хорд, то тогда $A = (A_x, A_d)$, а $B = (I, B_d)$, где I – единичная матрица порядка k , t – знак транспортирования.

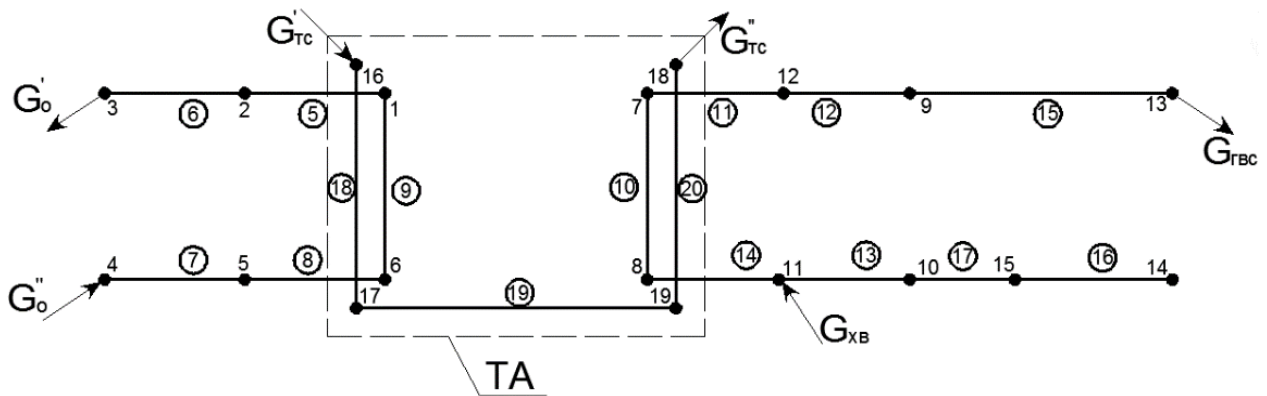


Рисунок 2.4 Схема дерева рассматриваемого ИТП

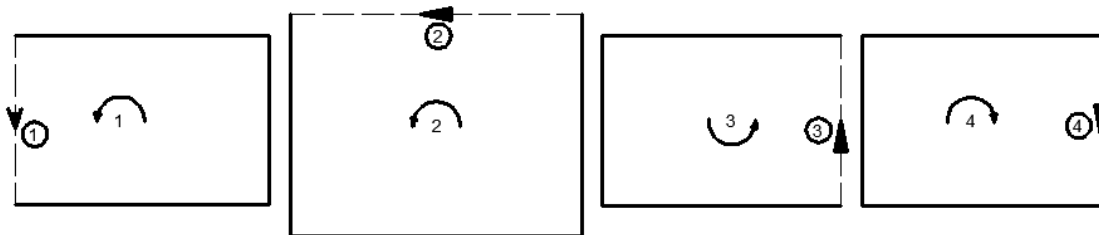


Рисунок 2.5 Система контуров принятого ИТП

По выбранному варианту дерева формируется система независимых контуров, число которых равно $k = b - m + 1$.

Выбирается направление обходов контуров, совпадающее с предварительно принятым направлением хорд, стрелки для контуров отвечают выбранным направлениям их обхода.

Эквивалентная математическая модель потокораспределения опирается на использование в качестве основных переменных, помимо расходов G_i , и напоров ΔP_i , также и узловых давлений p_j ($j = 1, \dots, m$), составляющих вместе с заданными давлениями p'_m вектор \vec{p} . Соответствующая ей система уравнений не требует обращения к контурам, так как при любом \vec{p} уравнения второго закона Кирхгофа обращаются в тождества, но вместо этого должна описываться связь с напором h_i и этими давлениями, имеющая для участка $i = (j, j + 1)$ будет иметь вид

$$\Delta p_i = p_j - p_{j+1}. \quad (2.16)$$

Так как полная матрица \vec{A} соединений узлов и участков схемы будет содержать информацию о конечных узлах данного участка и его ориентации, то последовательным умножением этих столбцов на один и тот же вектор \vec{p} получаем соотношение (2.16) для всех участков

$$\mathbf{A}_{\vec{G}} = \vec{G}_{yp}; \vec{\Delta p} = -\vec{A}^t \vec{p}, \vec{\Delta p} + \vec{H} = -\Delta P \mathbf{G} \vec{G} \quad (2.17)$$

которое будет состоять из $a - 1 + 2b$ уравнений относительно векторов x , h , и $m - 1$ значений p_j для линейно независимых узлов. В результате уравнения 2.17 получим

$$\mathbf{A}_{\vec{G}} = \vec{G}_{yp}; h = \vec{A}^t \vec{p} + \Delta P \mathbf{G} G_i = \vec{H}. \quad (2.18)$$

Полная матрица соединений и узлов

$A =$

j	i																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	-	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
9	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	-	0	0	0	0	0
10	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	+	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0
14	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0
16	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-

Формируются векторы узловых расходов в цепи

$$\vec{G} = (0, 0, G_3, -G_4, 0, 0, 0, 0, -G_9, G_{10}, G_{11}, 0, -G_{13}, 0, 0, -G_{16}, 0, 0)^T,$$

присваивается потребителю знак «-», источнику «+», а там, где водоразбора не осуществляется присваивается знак «0».

Формируются векторы действующих напоров по все участкам теплового пункта:

$$\overrightarrow{\Delta P} = (0, 0, 0, 0, \Delta P_5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \Delta P_{15}, 0, 0, 0, 0, 0)^h, \quad \text{ветки, где}$$

установлены насосы обозначаются « ΔP », а пассивные ветки обозначаются знаком «0».

Далее для определения гидравлических сопротивлений на участках ИТП и расходов составляются диагональные матрицы.

Диагональная матрица узловых расходов ИТП

$$\mathbf{G} = \begin{Bmatrix} g_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{20} \end{Bmatrix}.$$

Матрица гидравлических сопротивлений участков

$$\Delta \mathbf{P} = \begin{Bmatrix} \Delta p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta p_{20} \end{Bmatrix}.$$

Исследуемое распределение потоков определяется векторами расходов $\vec{G} = (G_1, G_2, G_3 \dots G_{20})^T$ и гидравлических напоров $\vec{\Delta P} = (\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3 \dots \Delta p_{20})^T$. Для данного дерева ИТП и соответствующей ему хордовой системы контуров составляем матрицу В совпадающих участков и контуров

Полная матрица совпадений участков и контуров

c	i																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
$B=$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	22	23	24
	1	+	0	0	0	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+
	3	0	0	+	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0

Числа в строке означают: «0» отсутствие участка на i – м контуре, «+» совпадение, а «-1» несовпадение принятого направления движения на участке с принятым направлением обхода.

В каждом столбце матрицы не более двух нулевых элементов «-» или «+», а это значит, что в определенный узел входит не более чем два контура, что

является признаком плоской схемы. После построения матриц \mathbf{B} , \mathbf{G} , $\Delta\mathbf{P}$ запишем производную трех матриц:

Производная матрица \mathbf{B} , \mathbf{G} , $\Delta\mathbf{P}$

$\mathbf{BG}\Delta\mathbf{P}$	$G_1 \Delta p_1 $	0	0	0	$G_5 \Delta p_5 $	$G_6 \Delta p_6 $	$G_7 \Delta p_7 $	$G_8 \Delta p_8 $	$G_9 s\Delta p_9 $	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	$G_2 \Delta p_2 $	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$G_{18} \Delta p_{18} $	$G_{19}[\Delta p_{19}]$
	0	0	$G_3 \Delta p_3 $	0	0	0	0	0	0	$-G_{10} s\Delta p_{10} $	$-G_{11} s\Delta p_{11} $	$-G_{12} \Delta p_{12} $	$-G_{13} \Delta p_{13} $	$-G_{14} \Delta p_{14} $	0	0	0	0	0
	0	0	$G_3 \Delta p_3 $	$G_4 \Delta p_4 $	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$G_{15} \Delta p_{15} $	$G_{16} \Delta p_{16} $	$G_{17} \Delta p_{17} $	0	0

Составим систему уравнений исходя из матриц \mathbf{A} и $\mathbf{BG}\Delta\mathbf{P}$, решение которых является коэффициентами системы уравнений (2.10, 2.11), относительно G_1, G_2, \dots, G_{20} :

$$\left\{ \begin{array}{l} -G_5 + G_9 = 0; \\ G_5 - G_6 = 0; \\ -G_1 + G_6 = \vec{G}_3; \\ G_1 - G_7 = -\vec{G}_4; \\ G_7 - G_8 = 0; \\ G_8 - G_9 = 0; \\ G_{10} - G_{11} = 0; \\ -G_{11} + G_{12} = 0; \\ G_3 + G_{12} = -\vec{G}_9; \\ -G_3 - G_{13} + G_{17} = \vec{G}_{10}; \\ -G_{13} + G_{14} = \vec{G}_{11}; \\ -G_4 + G_{15} = \vec{G}_{12}; \\ G_4 - G_{16} = 0; \\ G_{16} - G_{17} = 0; \\ -G_2 - G_{21} = -\vec{G}_{15}; \\ G_{21} - G_{22} = 0; \\ G_{22} - G_{23} = 0. \end{array} \right. \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} G_1 \Delta p_1^2 + G_5 \Delta p_5^2 + G_6 \Delta p_6^2 + G_7 \Delta p + G_8 \Delta p_8^2 + G_9 \Delta p_9^2 = -\Delta P; \\ G_2 \Delta p_2^2 + G_{21} \Delta p_{21}^2 + G_{22} \Delta p_{22}^2 + G_{23} \Delta p_{23}^2 = 0; \\ G_3 \Delta p_3^2 - G_{10} \Delta p_{10}^2 - G_{11} \Delta p_{11}^2 - G_{12} \Delta p_{12}^2 - G_{13} \Delta p_{13}^2 - G_{14} \Delta p_{14}^2 = 0; \\ G_3 \Delta p_3^2 + G_4 \Delta p_4^2 + G_{15} \Delta p_{15}^2 + G_{16} \Delta p_{16}^2 + G_{17} \Delta p_{17}^2 = -\Delta P. \end{cases} \quad (2.20)$$

Искомой для МРК является система (2.10, 2.11) относительно вектора \vec{G} . В процессе последующих приближений

$$\vec{G}^{(N+1)} = \vec{G}^N + \Delta \vec{G}^{(N+1)}, \quad (2.21)$$

где N – порядковый номер приближений, применяется таким образом, что для любого \vec{G} выполняет условия (2.10) математических балансов в узлах. Для этого необходимо, чтобы выполнялось начальное приближение (2.6), а все приращения $\Delta G = (\Delta G_1 \dots \Delta G_n)^T$ к расходам имели бы нулевые балансы

$$A \Delta G = A_x \Delta G_x + A_d \Delta G_d = 0. \quad (2.22)$$

Из выражения (2.22) следует, что в качестве независимых переменных можно принять приращения к расходам на хордах $-\Delta G_x$, тогда поправки на соответствующих участках к расходам на участках дерева ΔG_d можно будет определить

$$\Delta G_d = -(\mathbf{A}_d^{-1} \cdot \mathbf{A}_x) \Delta G_x. \quad (2.23)$$

При этом матрицу \mathbf{A}_d обращать не требуется, это следует из работ Меренкова А.П. [99].

$$-\mathbf{A}_d^{-1} \cdot \mathbf{A}_x = \mathbf{B}_d^T, \quad (2.24)$$

уравнение будет иметь вид

$$\Delta G = (\Delta G_x^T, \Delta G_d^T) = (\mathbf{I}, \mathbf{B}_d)^T \Delta G_x = \mathbf{B}^T \Delta G_x, \quad (2.25)$$

Приращения расходов на хордах ΔG_x принимаются из условия уменьшения невязок, которые получаем при подстановке в (2.11)

$$\mathbf{B} \mathbf{G} \Delta \mathbf{P}^N \cdot \mathbf{G}^N = \Delta \mathbf{h}^N, \quad (2.26)$$

где $\Delta \mathbf{h}^N$ – вектор невязок напоров для вычисляемых контуров по данным N – го приближения. Для пассивных цепей

$$\Delta h_c^N = \sum_c h_i^N, \quad (2.27)$$

где h^N – вектор-столбец невязок давлений, численных для контуров по данным N – го приближения.

Для системы контуров, которые содержат на своих ветках циркуляционные насосы или насосы, которые повышают давление, напор определяется по формуле

$$\Delta h_c^N = \sum_c h_i^N - H_c, \quad (2.28)$$

при этом является алгебраической суммой напоров, действующих на участках, которые входят в контур c

$$H_c = \sum_c H_i. \quad (2.29)$$

Далее добиваемся равенства

$$\mathbf{B} \Delta \mathbf{P} = (\mathbf{G}^N + \Delta \mathbf{G}^{(N+1)}) \cdot (\mathbf{G}^N + \Delta \mathbf{G}^{(N+1)}) = 0. \quad (2.30)$$

Раскрывая скобки, пренебрегая членами, содержащими ΔG_i^2 , и подставляя вместо ΔG его выражение (2.25) приходим с помощью (2.26) к системе линейных уравнений

$$\mathbf{M}^N \Delta G_x^{N+1} = -\Delta p_x^N, \quad (2.31)$$

эту линейную систему надо решать на каждом шаге вычисляемого процесса.

Симметрическая матрица Максвелла, рассмотренного преобразования переменных к контурным величинам

$$\mathbf{M}^N = 2\mathbf{B}\mathbf{G}\Delta\mathbf{P}^N\mathbf{B}^T. \quad (2.32)$$

Обращая матрицы системы (2.32) методами линейной алгебры [89...95] определяем приращения расходов на хордах ΔG_x^{N+1} к расходам на участках дерева, что позволит получить по формулам (2.23, 2.24) новые приближения для вектора расходов.

В окончании расчетов потокораспределения проводится анализ сходимости вычисления процесса

$$|G^{N+1} - G^N| \leq \delta, \quad (2.33)$$

где δ – вектор допустимых погрешностей значений расходов, и по новому приближению G^{N+1} опять формируется и решается система уравнений (2.31).

Результаты теоретических исследований потокораспределения при максимальной тепловой нагрузке представлены на рисунке 2.6

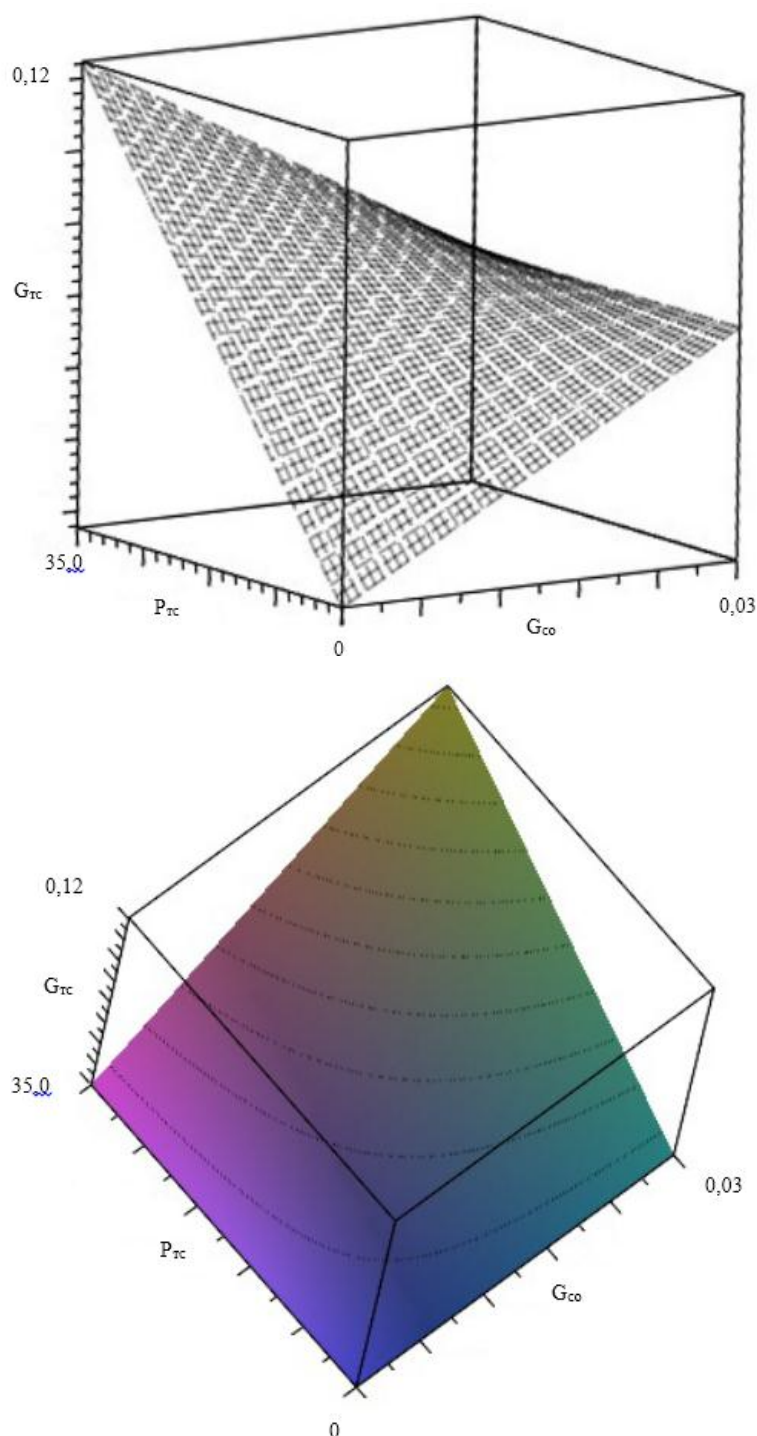


Рисунок 2.6 Зависимость расходов теплоносителей тепловой сети и контура системы отопления от перепада давления в контуре системы тепловой сети

Анализ зависимости (Рис. 2.6) показал, что рост сопротивления в контуре системы тепловой сети от срабатывания регулирующей арматуры у потребителя тепловой энергии приводит к чрезмерному расходу теплоносителя, поэтому на обратных трубопроводах контура отопления и тепловой сети необходима установка клапана расхода теплоносителя.

Проводя анализ зависимости можно сделать вывод о том, что при изменении расхода в контуре тепловой сети в результате погодного регулирования происходит резкий перепад давлений в контуре тепловой сети и контуре отопления, поэтому необходима установка насосного оборудования с частотным регулированием.

2.2 Математическая модель потокораспределения внутриквартальной тепловой сети

Исследования потокораспределения проводились на примере реальной внутриквартальной тепловой сети Кировского района г. Донецка.

В данной тепловой сети рассматривался количественный отпуск тепловой энергии, определяющими факторами являлись давление и расход теплоносителя. Расход теплоносителя определялся из выражения (2.3).

В данной математической модели рассматривалось распределение потоков теплоносителя в двухтрубной закрытой внутриквартальной тепловой сети. Исследуемая внутриквартальная тепловая сеть имела произвольное количество участков d , узлов a и b линейно-неизвестных контуров. Для каждой ветки тепловой сети принималась $i = (j, j + 1)$, где $j, j + 1$ ее начальные и конечные узлы, закон гидравлического связывающий общую потерю h_i , давление на трение, перепад давления Δp_i . Воспользуемся зависимостью (2.1).

На каждом участке действует закон квадратичного гидравлического сопротивления (ф-ла 2.2).

По закону величины G_i необходимо судить о направлении потока. По работам академика Хасилева В.Я., [73,84–86,136], вводится векторное обозначение и диагональные матрицы $\overrightarrow{\Delta P}, \overrightarrow{\Delta G}, \overrightarrow{\Delta H}, C, D$, тогда работу тепловой сети будет описывать уравнение, относящееся к каждому участку ($i = 1, \dots, n$)

$$\overrightarrow{\Delta p} + \vec{H} = \Delta P \cdot G \cdot \vec{G}, \quad (2.34)$$

где $\overrightarrow{\Delta p}$ – вектор искомых потерь давления на участке;

\vec{H} – вектор известных перепадов давления, создаваемых циркуляционными, смесительными насосами на участках внутриквартальной тепловой сети;

ΔP – диагональная матрица характеристик гидравлического сопротивления всех участков внутриквартальной тепловой сети от $(i = 1)$ до $(i = n)$;

G – диагональная матрица расходов теплоносителя всех участков внутриквартальной тепловой сети от $(i = 1)$ до $(i = n)$;

$\overrightarrow{G_{ур}}$ – вектор расходов на искомых участках внутриквартальной тепловой сети.

Для любого потокораспределения должны выполняться два сетевых закона Кирхгофа. В каждом законе в каждом узле будет соблюдаться математический баланс

$$\sum j G_i = G_j, j = 1, \dots, m, \quad (2.35)$$

Используя матрицы соединений D , которая однозначно отображает топологию схемы внутриквартальной тепловой сети, фиксируя соединения всех ее d участков и $a - 1$ неизменных узлов, балансы уравнения (2.4) для всей системы записываем в виде

$$D\vec{G} = \vec{G}_{уз}, \quad (2.36)$$

где $\vec{G}_{уз}$ – вектор отдельных расходов в отдельных узлах внутриквартальной тепловой сети.

Второй сетевой закон требует нулевого суммарного изменения потерь давления Δp_i для любого гидравлического контура (2.7). Применимо для любого

независимого контура ($s = 1, \dots, k$) выбранной системы независимого подключения к тепловой сети.

Применяя матрицу \mathbf{C} , получаем сокращение закона Кирхгофа.

$$\mathbf{C}\Delta p = 0 \quad (2.37)$$

где \mathbf{C} – матрица совпадений мест обходов контуров.

Одна из искомым математических моделей сводится к системе уравнений

$$\mathbf{D}\vec{G} = G_{уз}, \mathbf{C}\Delta P_p = 0, \vec{\Delta p} + \vec{H} = \Delta \mathbf{P} \cdot \mathbf{G} \cdot \vec{G} \quad (2.38)$$

Уравнение (2.3), составляющее последнюю группу из n уравнений, называется замыкающим совпадением, оно дополняет $a - 1$ первого закона и k уравнений второго закона Кирхгофа до полной системы (2.9) из $2n$ уравнений относительно $2n$ независимых \vec{G} и $\vec{\Delta p}$.

В этой системе можно исключить вектор $\vec{\Delta p}$ путем подстановки (2.3) в (2.8)

$$\mathbf{D}\vec{G} = \vec{G}_{ур}. \quad (2.39)$$

Для определения степени открытия регулирующей арматуры в математическую модель вводится матрица \mathbf{K} . После введения матрицы \mathbf{K} она будет иметь вид

$$\mathbf{C} \cdot \Delta \mathbf{P} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{K} = \mathbf{P}\vec{H} \quad (2.40)$$

2.2.1 Расчет потокораспределения внутриквартирной тепловой сети на основе метода МРК

Схема исследуемой внутриквартирной тепловой сети представлена на рис. 2.7

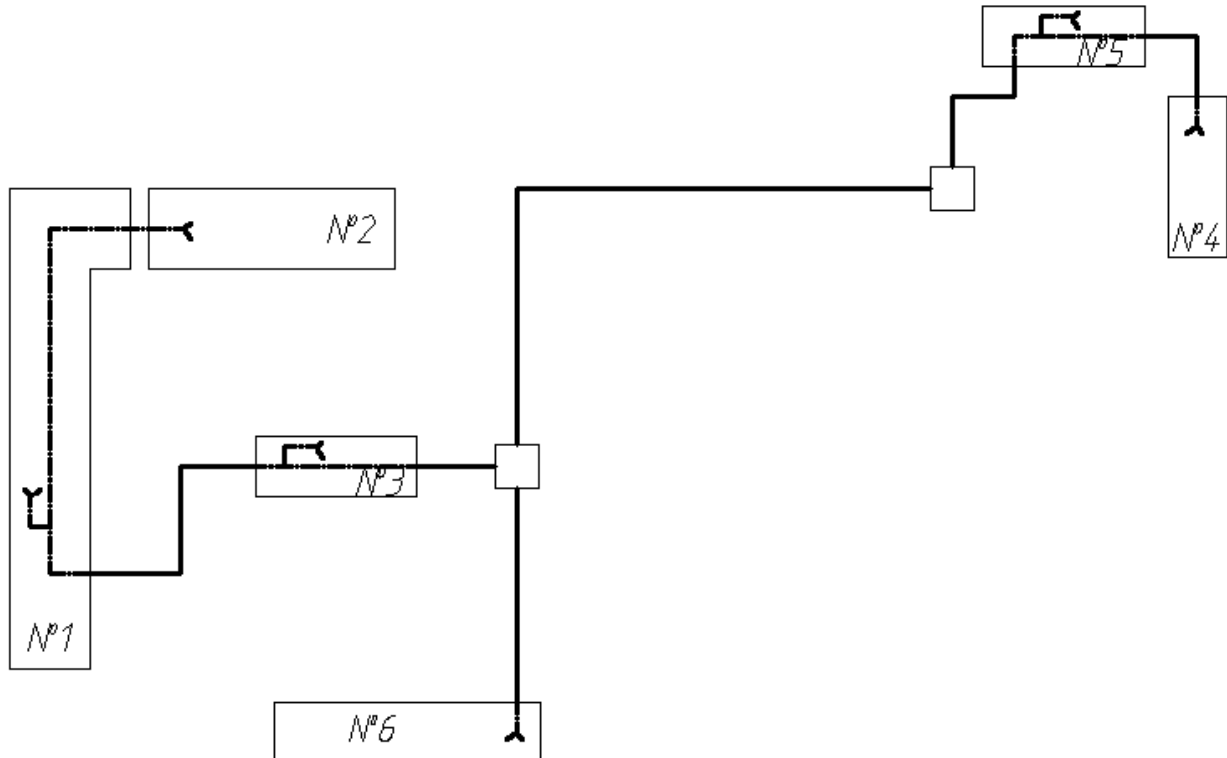


Рисунок 2.7 Схема рассматриваемой внутриквартирной тепловой сети:

№1 - №6 – потребители тепловой энергии.

Для рассматриваемой двухтрубной внутриквартирной тепловой сети построим оргграф схему. При построении указывают произвольно направление движения теплоносителя, нумеруют все узлы j и участки i , а также определяют направление обходов контуров c .

Фиксируют расчетные участки сети с насосами циркуляционными, смесительными, повысительными, регулируемыми клапанами и т.д.

Указывают активную ветку G_A , также потребителей и разделение потоков (ответвление к абонентам).

Далее на основании построенной оргграф схемы определяется схема дерева и схема контуров (Рис. 2.8,2.9), связывая все ее m – узлов, в результате получая $(m - 1)$ участков дерева и k – хорд.

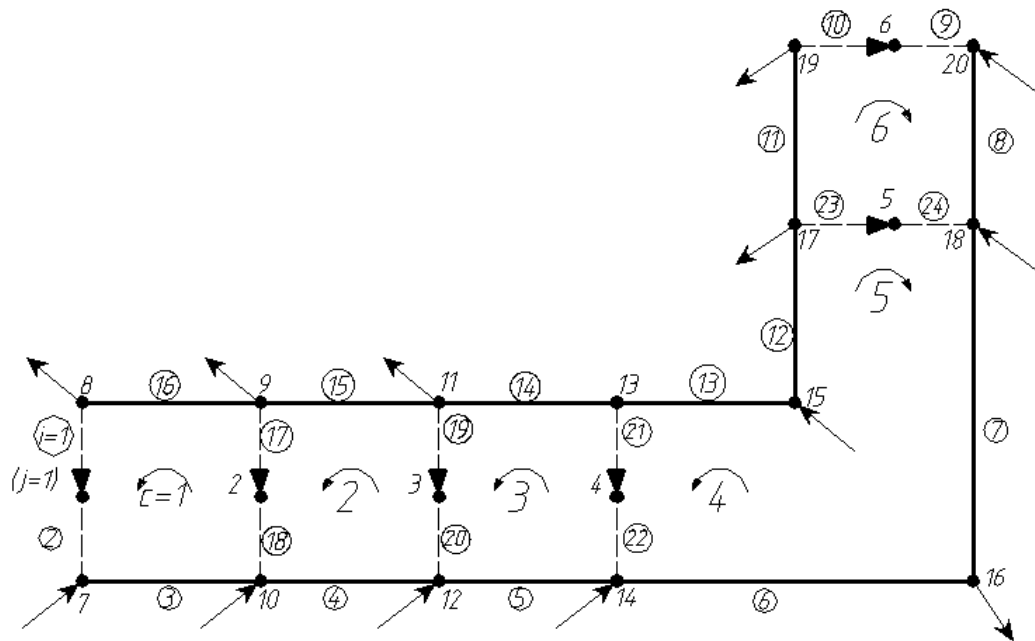


Рисунок 2.8 Эквивалентная схема внутриквартирной тепловой сети, оргграф схема

Нумерацию участков производим таким образом, чтобы первые номера присваивались хордам (местам обхода), т.е., $\vec{G}_x = (G_1, \dots, G_k)^T$, $\vec{G}_d = (G_{k+1}, \dots, G_n)^T$.

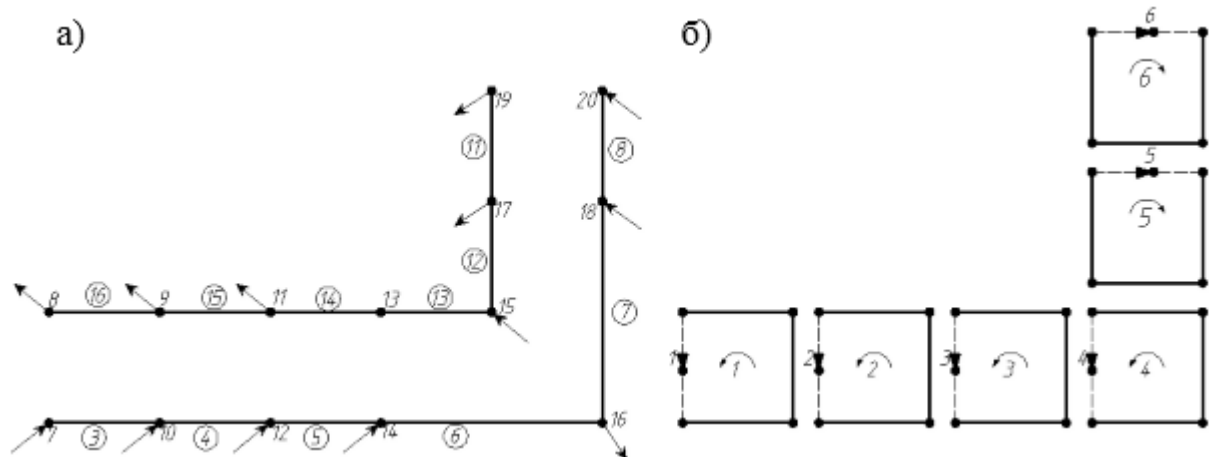


Рисунок 2.9 Схема дерева (а) и контуров (б) рассматриваемой внутриквартирной тепловой сети

Схема контуров $k = n - m + 1$ определяется одним из возможных вариантов дерева схемы. Участки 1-6, не вошедшие в схему дерева, называются хордами, и их номера совпадают с номерами контуров, т.е., $i = 1 - 7$; n – дерево;

$c = 1 - 7$ – контура; $j = 1, \dots, m - 1$ линейно независимые узлы, кроме последнего.

Далее определяется направление обхода контуров, совпадающее с предварительно определенными направлениями хорд, стрелки для контуров отвечают выбранным направлениям их обхода.

Для первой математической модели определяют искомые и задаваемые векторы.

Формируем искомые векторы расходов рабочей жидкости $\vec{G} = (G_1, \dots, G_n)^T$ – «расщепляется» на векторы хорд (G_x) и дерева (\vec{G}_d).

Составим вектор искомых векторов потерь давления всех участков гидравлической цепи $\Delta P = (\Delta P_1, \dots, \Delta P_n)^T$, – «расщепляется» на векторы хорд ($\Delta P_1, \dots, \Delta P_6$) и дерева ($\Delta P_1, \dots, \Delta P_{18}$).

Далее для математической модели потокораспределения формируем матрицу соединений **D**.

Полная матрица соединений

j	i																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
14	0	0	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	+1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
18	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Формируются векторы узловых расходов в цепи:

$$\vec{G} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, -G_7, G_8, G_9, -G_{10}, G_{11}, -G_{12}, G_{13}, -G_{14}, -G_{15}, G_{16},)$$

Проанализировав матрицу отметим, что в каждом столбце наблюдается не более двух совпадений 1 или +1, это указывает на плоскую схему. Далее составим производную трех матриц $C, G, \Delta P$.

Производная матрица $C, G, \Delta P$

CGAP	1	$G_1 \Delta p_1 $																							
	2	$G_2 \Delta p_2 $																							
	3	$G_3 \Delta p_3 $																							
	4		$G_4 \Delta p_4 $																						
	5			$G_5 \Delta p_5 $																					
	6				$G_6 \Delta p_6 $																				
	7				$-G_7 s_7 $																				
	8					$G_8 \Delta p_8 $																			
	9					$G_9 \Delta p_9 $																			
	10					$G_{10} \Delta p_{10} $																			
	11					$G_{11} \Delta p_{11} $																			
	12					$G_{12} \Delta p_{12} $																			
	13					$G_{13} \Delta p_{13} $																			
	14						$G_{14} \Delta p_{14} $																		
	15							$-G_{15} \Delta p_{15} $																	
	16								$G_{16} \Delta p_{16} $																
	17								$-G_{17} \Delta p_{17} $																
	18								$-G_{18} \Delta p_{18} $																
	19									$G_{19} \Delta p_{19} $															
	20									$G_{20} \Delta p_{20} $															
	21									$-G_{21} \Delta p_{21} $															
	22									$G_{22} \Delta p_{22} $															
	23										$G_{23} \Delta p_{23} $														
	24										$G_{24} \Delta p_{24} $														

Составим систему уравнений исходя из матриц A и $BG\Delta P$, решение которых является коэффициентами системы уравнений (2.10, 2.11), относительно G_1, G_2, \dots, G_{19}

$$\left. \begin{aligned} G_1|\Delta p_1| + G_2|\Delta p_2| + G_3|\Delta p_3| + G_{16}|\Delta p_{16}| - G_{17}|\Delta p_{17}| - G_{18}|\Delta p_{18}| &= 0; \\ G_4|\Delta p_4| - G_{15}|\Delta p_{15}| + G_{17}|\Delta p_{17}| + G_{18}|\Delta p_{18}| - G_{19}|\Delta p_{19}| + G_{20}|\Delta p_{20}| &= 0; \\ G_5|\Delta p_5| - G_{14}|\Delta p_{14}| + G_{19}|\Delta p_{19}| + G_{20}|\Delta p_{20}| - G_{21}|\Delta p_{21}| - G_{22}|\Delta p_{22}| &= 0; \\ G_4|\Delta p_4| - G_7|\Delta p_7| + G_{13}|\Delta p_{13}| + G_{21}|\Delta p_{21}| + G_{22}|\Delta p_{22}| &= 0; \\ G_7|\Delta p_7| + G_{12}|\Delta p_{12}| + G_{23}|\Delta p_{23}| + G_{24}|\Delta p_{24}| &= 0; \\ G_8|\Delta p_8| + G_9|\Delta p_9| + G_{10}|\Delta p_{10}| + G_{11}|\Delta p_{11}| - G_{23}|\Delta p_{23}| - G_{24}|\Delta p_{24}| &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

$$\left. \begin{aligned}
 G_1 - G_2 &= 0; \\
 G_{17} - G_{18} &= 0; \\
 G_{19} - G_{20} &= 0; \\
 G_{21} - G_{22} &= 0; \\
 G_{23} - G_{24} &= 0; \\
 -G_9 + G_{10} &= 0; \\
 G_2 - G_3 &= -\vec{G}_7; \\
 -G_1 + G_{16} &= \vec{G}_8; \\
 G_{15} - G_{16} - G_{17} &= \vec{G}_9; \\
 G_3 - G_4 + G_{18} &= -\vec{G}_{10}; \\
 G_{14} - G_{15} - G_{19} &= \vec{G}_{11}; \\
 G_4 - G_5 + G_{20} &= \vec{G}_{12}; \\
 G_{13} - G_{14} - G_{21} &= \vec{G}_{13}; \\
 G_5 - G_6 + G_{22} &= \vec{G}_{14}; \\
 -G_{12} - G_{13} &= -\vec{G}_{15}; \\
 G_6 + G_7 &= \vec{G}_{16}; \\
 -G_{11} + G_{12} - G_{23} &= \vec{G}_{17}; \\
 -G_7 + G_8 + G_{24} &= -\vec{G}_{18}; \\
 -G_{10} + G_{11} &= \vec{G}_{19}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Далее формируем симметричную матрицу Максвелла, расщепляя матрицу \mathbf{C} на матрицы хорд (\mathbf{C}_x) и дерева (\mathbf{C}_d), т.е. $\mathbf{C} = (\mathbf{E}, \mathbf{C}_d)$, где \mathbf{I} -единичная матрица порядка $k = 6$.

$$\mathbf{M}^{(N)} = 2 \cdot \mathbf{C} \cdot \Delta \mathbf{P} \cdot \mathbf{G}^N \cdot \mathbf{C}^T, \quad (2.43)$$

где N – порядковый номер приближения;

T – знак транспортирования.

Решаем систему линейных уравнений на каждом шаге вычислительного процесса последовательных приближений

$$\mathbf{M}^{(N)} \Delta \mathbf{G}_x^{(N+1)} = -\Delta h_x^N. \quad (2.44)$$

Путем обращения матрицы (2.10) и непосредственного решения системы (2.11) одним из методов линейной алгебры определяется приращение расходов на хордах $\Delta G_x^{(N+1)}$, а по ним вычисляются поправки Δh_x^N к расходам на участках дерева (Рис. 2.9 а). Это позволяет получить новое приближение для вектора расхода

$$\Delta G_x^{(N+1)} = G^N + \Delta G^{(N+1)}. \quad (2.45)$$

Далее производится анализ сходимости вычислительного процесса

$$|\Delta G^{(N+1)} - G^N| \leq \delta, \quad (2.46)$$

где δ – вектор допустимых погрешностей значений расходов, и по новому приближению $\Delta G^{(N+1)}$, опять формируя и решая уравнение (2.39) до выполнения условия (2.40).

Вариант получения данных на примере двухтрубной тепловой сети показан на рисунке 2.10.

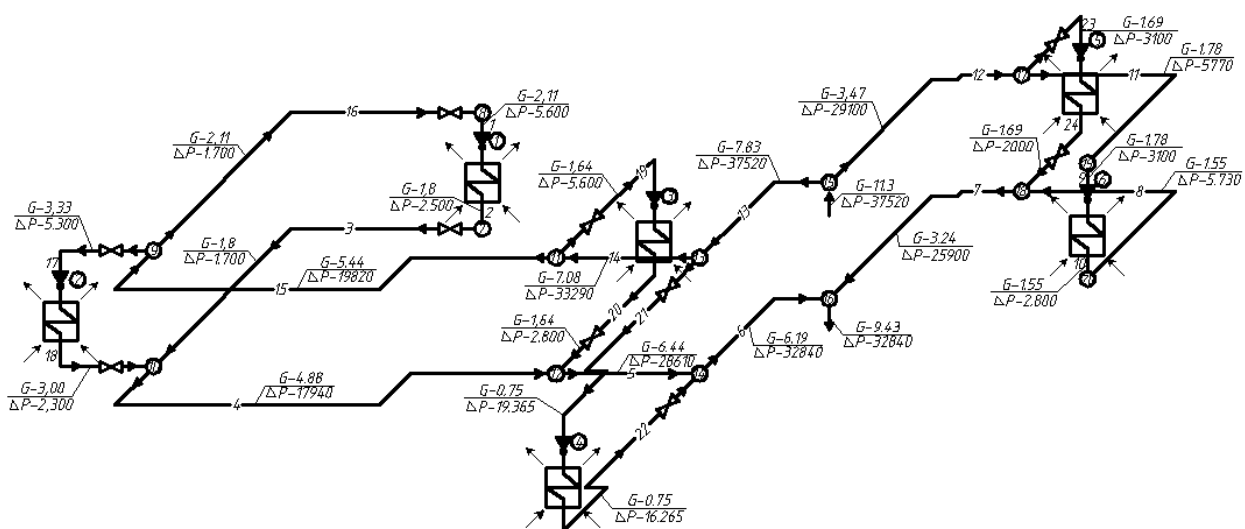


Рисунок 2.10 Двухтрубная система теплоснабжения с узловыми расходами и распределениями давления

Использование данной методики расчета позволяет анализировать трудно прогнозируемые гидравлические режимы при проектировании, а также при

реконструкции старых абонентских вводов (при переходе на ИТП) и эксплуатации тепловой сети. Данная методика позволяет рассчитать режим работы тепловой сети для определения потокораспределения при максимальном (зимний период) и минимальном (летний период) режимах потокораспределения, что делает возможным подбор наиболее рациональных диаметров трубопроводов для этих режимов, а также определять необходимую степень открытия регулирующей арматуры.

2.3 Регулирование режимов гидравлической цепи в автоматизированных ИТП

Под автоматизированным тепловым пунктом подразумевается, что математическая модель базируется на элементах, основными параметрами которых являются гидравлические сопротивления ΔP , напор H , узловые расходы G , считаются сосредоточенными постоянными. Такое математическое моделирование дает упрощенное описание реальных задач во многих случаях, когда следует учитывать наличие регулирующих устройств, трансформацию транспортируемой жидкости и другие факторы.

Если обобщить эти случаи, можно перейти к пониманию, что величины $\Delta P_i, H_i, G_i$, будут считаться функциями неизвестных расходов G_{yp} , потери давления ΔP_i , узловое давление Δp , а также температура T_i , определяющее потокораспределение в гидравлическом кольце, которое можно записать в виде

$$\begin{aligned}\Delta p_i &= \Delta p_i(G_{yp}, \Delta P_i^{cp}, T_i^{cp}); \\ H_i &= H_i(G_{yp}); \\ G_i &= G_i(G_{yp})(P),\end{aligned}\tag{2.47}$$

где ΔP_i^{cp} - средние i -тые потери давления в контуре;

T_i^{cp} – средняя i -тая температура теплоносителя в контуре.

Из общей характеристики РР и РД (Рис. 2.11) видно, что при $\Delta P_i \geq \Delta P'_i$ РР обеспечивает режим регулирования, увеличивая внутреннее сопротивление таким образом, чтобы уменьшить давление на вводе до $\Delta P'_i$ и обеспечивает пропуск требуемого расхода G'_i . Когда $\Delta P_i < \Delta P'_i$ включается режим дросселирования с минимально допустимым гидравлическим сопротивлением, соответствующим полному открытию клапана и в определяющем в этом режиме пропуск теплоносителя G_i в зависимости от ΔP_i .

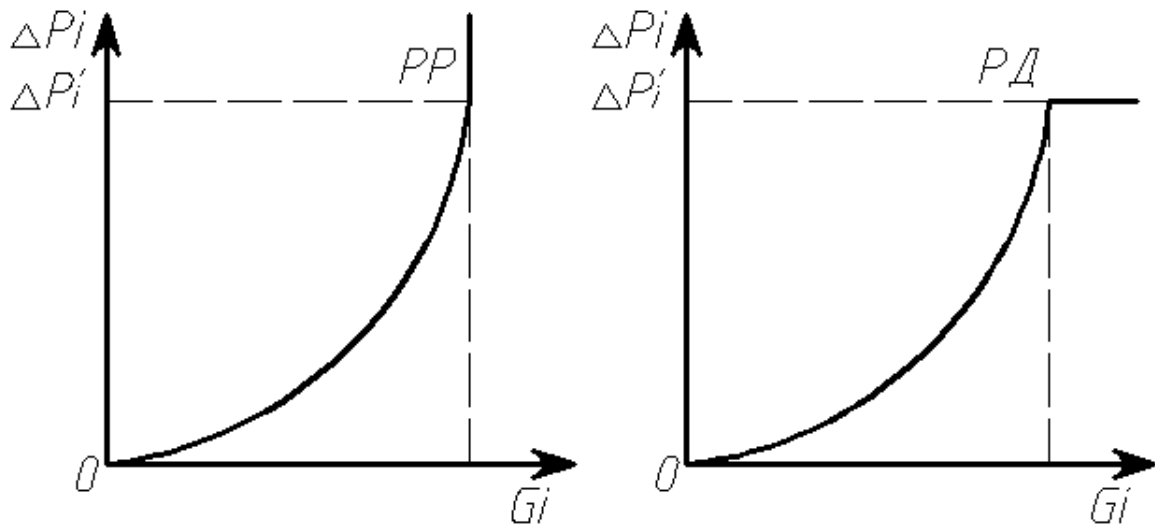


Рисунок 2.11 Общие характеристики перепада давления (РД) и расхода теплоносителя (РР)

Данные характеристики изменяются от установившегося режима к последующему изменяемому режиму, и определяются в протекающем потокораспределении.

$$G_i = G_i(P_i) = \begin{cases} G_i, & \text{если } P_i \geq P'_i \\ \sqrt{P_i / \Delta p} & \text{при } 0 \leq P_i < P'_i \end{cases} \quad (2.48)$$

Для регулирования давления

$$P_i = P_i(G_i) = \begin{cases} P_i, & \text{если } G_i \geq G'_i \\ \Delta p' G_i^2 & \text{при } 0 \leq G_i < G'_i \end{cases} \quad (2.49)$$

Применение математической модели акад. В.Я. Хасилева и проф. А.П. Меренкова позволит анализировать нестационарные режимы в гидравлической цепи с регулируемыми параметрами. Метод расчета сводится к определению гидравлических параметров и состоит в том, что многократно пересчитывается гидравлическая цепь с сосредоточенными параметрами, что приводит к двойным циклам итерации [64], что, в свою очередь, приводит к тому, что внутренний цикл сводится к применению одного из вариантов гидравлического расчета МРК или МД для очередной увязки давлений с условием, что регуляторы привязаны к какому-то значению. Внешний цикл предназначен для пересчета регулируемых параметров по значениям G_i и Δp_i получаемых в цикле.

2.4 Выводы по второму разделу

1. Разработана математическая модель потокораспределения теплоносителей и давления для непрогнозируемых режимов ИТП. Полученная математическая модель позволяет рассчитывать узловые расходы с целью определения мест установки регулирующей арматуры.

2. Дополнена и усовершенствована математическая модель потокораспределения для внутриквартальной тепловой сети, позволяющая рассчитать потоки теплоносителей и давлений при изменении режима работы ИТП. Полученная математическая модель позволяет рассчитать летний режим работы тепловой сети (при наличии нагрузки только на ГВС) с целью дальнейшего подбора оптимальных диаметров трубопроводов.

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ИТП С ТРЕХКОНТУРНЫМ ТЕПЛООБМЕННИКОМ

Несмотря на достигнутые результаты по исследованию потокораспределения на ИТП с различными теплообменными аппаратами и различными смесительными устройствами (элеваторами, трехходовыми клапанами и т.д.), работа ИТП на базе МТА не рассматривалась, многие основные вопросы остаются недостаточно изученными. Слабо проанализированы возможности повышения эффективности теплообмена и потокораспределения за счет разработки эффективной схемы ИТП. Целью экспериментальных исследований является проверка адекватности разработанной математической модели потокораспределения в ИТП на базе МТА.

С этой целью были проведены экспериментальные исследования распределения потоков теплоносителя и давления в ИТП с МТА.

3.1 Описание экспериментально-лабораторного стенда ИТП с МТА и методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (г. Макеевка) на экспериментальной установке (Рис. 3.1), смонтированной для подтверждения основных выводов, полученных разделе 2.



Рисунок 3.1 Экспериментально-лабораторная установка ИТП на базе МТА

Принципиальная схема лабораторной установки для исследования гидравлических характеристик потоков приведена на рис. 3.2.

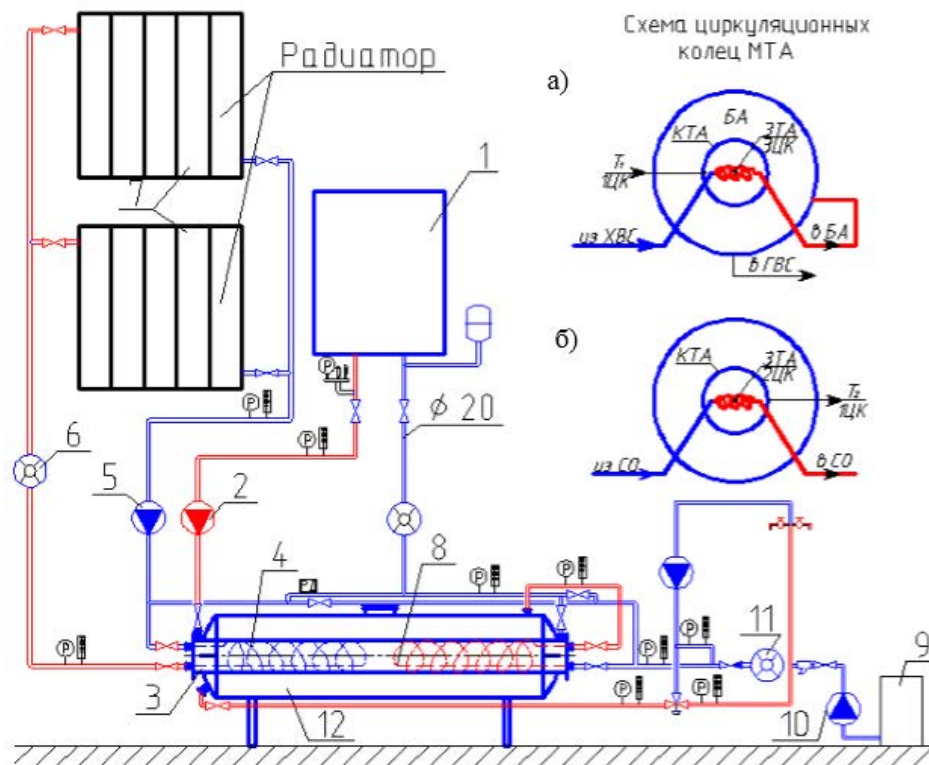


Рисунок 3.2 Принципиальная схема лабораторной установки:

а) схема циркуляционного контура системы ГВС;

б) схема циркуляционного контура системы отопления;

КТА – корпус МТА;

БА- бак аккумулятор;

T_1 – греющий теплоноситель из емкостного котла;

T_2 – обратный теплоноситель в емкостной котел;

1 ЦК – первый циркуляционный контур;

ЗТА – змеевиковый теплообменный аппарат;

2ЦК – второе циркуляционное кольцо контура отопления;

3ЦК – третье циркуляционное кольцо контура ГВС;

СО – теплоноситель системы отопления;

ГВС – система горячего водоснабжения.

Теплоноситель из емкостного котла 1 с помощью циркуляционного насоса 2 по подающему трубопроводу попадает в первый контур 3 многоконтурного теплообменного аппарата змеевикового типа. Подача греющего теплоносителя осуществляется из верхней части теплообменника, из нижней части осуществляется забор остывшего теплоносителя на повторный нагрев. Нагрев теплоносителя для системы отопления осуществляется с помощью теплообменника змеевикового типа 4. Циркуляция теплоносителя происходит по смешанному типу на противотоке с греющим теплоносителем. Движение в замкнутом контуре системы теплоснабжения осуществляется с помощью циркуляционного насоса 5 через узел учета расхода теплоносителя 6. Теплоноситель контура отопления после нагрева попадает в алюминиевые радиаторы 7, расположенные на различной высоте, в которых происходит его остывание. Подпитка системы отопления осуществляется в автоматическом режиме с помощью реле давления из обратного трубопровода системы источника теплоты. В третий контур 8, в котором осуществляется нагрев теплоносителя на нужды горячего водоснабжения (ГВС), подается холодная вода из накопительной емкости 9 с помощью автоматической станции бесперебойного водоснабжения 10 через узел учета расхода воды 11. Затем нагретая в теплообменном аппарате вода попадает в бак-аккумулятор 12, откуда происходит непосредственно водоразбор на нужды горячего водоснабжения.

3.1.1 Методика проведения исследований характеристик тепловых и гидравлических потоков

Перед началом эксперимента и в конце его проведения фиксируются следующие параметры:

- температура наружного воздуха;
- температура воздуха внутри помещения;
- давление воды во всех подающих и обратных магистралях;
- температуры воды во всех магистралях;
- расходы теплоносителей во всех магистралях.

Параметры установки определяются при различных расходах и давлениях теплоносителя всех энергопотребляющих контуров. Для стабильной работы ИТП с МТА предусматривается установка запорной и регулирующей арматуры.

Испытания проводятся при установившемся температурном и гидравлическом режиме в ИТП с МТА. Интервал снятия показаний с измерительных приборов составляет 25-30 мин. Испытания проводятся для температурного графика с температурами наружного воздуха +8, +5, 0, -5, -10, -15, -20 °С. Для каждой из этих температур варьируются параметры теплового и гидравлического режима работы ИТП с МТА.

Получение достоверных данных исследуемого ИТП с МТА зависит от правильности выбора контрольно-измерительной арматуры, которая обеспечивает: заданную точность исследуемых измерений, стабильность работы при воздействии неизбежных внешних факторов.

Использовались следующие измерительные приборы:

- для измерения температур использовались биметаллические термометры ТБ – 150 класс точности 2,5;
- фиксация расходов осуществлялась счетчиками воды КВ – 1,5 класс точности 2;
- для определения давления применялись радиальные манометры Watts F+R200 50/6 1/4".

3.2 Планирование и обработка результатов эксперимента

Для разработки плана планирования эксперимента на основе априорной методики были выявлены факторы, влияющие на работу ИТП, а входные параметры в ходе эксперимента изменялись от нижней до верхней границы варьирования.

Функциями отклика были приняты следующие переменные:

$Y_{G_{TC}}(x_1, \dots, x_n)$ – расход сетевого теплоносителя из экспериментальной установки контура источника теплоты, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Y_{G_{CO}}(x_1, \dots, x_n)$ – расход сетевого теплоносителя из контура системы отопления, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Y_{G_{ГВС}}(x_1, \dots, x_n)$ – расход жидкости в системе горячего водоснабжения, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Y_{\Delta P_{TC}}(x_1, \dots, x_n)$ – перепад давления в контуре тепловой сети, кПа ;

$Y_{\Delta P_{CO}}(x_1, \dots, x_n)$ – перепад давления в контуре отопления, кПа ;

$Y_{\Delta P_{ГВС}}(x_1, \dots, x_n)$ – перепад давления в контуре горячего водоснабжения, кПа .

3.2.1 Экспериментальные исследования работы контура системы тепловой сети (G_{TC}).

Перед разработкой плана эксперимента были определены уровни варьирования факторов, влияющих на G_{TC} , выявленных на основе априорной информации, результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Уровни варьирования факторов, влияющих на расход теплоносителя для тепловой сети G_{TC}

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
1	2	3
Расход теплоносителя в системе отопления G_{CO} , м ³ /с	0,011	0,027
Расход теплоносителя в контуре горячего водоснабжения $G_{ГВС}$, м ³ /с	0,055	0,066
Разница давления в контуре тепловой сети ΔP_{TC} , кПа	19,81	32,3
Разница давления в контуре системы отопления ΔP_{CO} , кПа	0,33	0,52
Разница давления в контуре для системы горячего водоснабжения $\Delta P_{ГВС}$, кПа	0,91	1,1
Температура наружного воздуха, t_n , °С	-20	+8

Вышеперечисленные факторы (расход теплоносителя в системе отопления G_{CO} , расход теплоносителя в системе горячего водоснабжения $G_{ГВС}$, разница давления в контуре тепловой сети ΔP_{TC} , разница давления в контуре системы отопления ΔP_{CO} , разница давления в контуре для системы горячего водоснабжения $\Delta P_{ГВС}$, а также температура наружного воздуха t_n) можно охарактеризовать как количественные, которые, в свою очередь, задаются численными значениями, определяющими возможные области изменения рассматриваемого параметра.

При построении математической модели необходимо осуществить переход от действительного значения факторов к кодированному (стандартизированному) по формуле [107]

$$x_i = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j}, \quad (3.1)$$

где x_i – нормированное значение фактора;

x_j – натуральное значение фактора;

x_{j0} – основной уровень фактора;

Δx_j – интервал варьирования фактора.

В результате нормировки таблица 3.1 будет иметь вид:

Таблица 3.2 - Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
1	2	3	4	5
x_1 – Расход теплоносителя в системе отопления G_{CO} , м ³ /с	0,011	0,019	0,027	0,008
x_2 – Расход теплоносителя в системе горячего водоснабжения $G_{ГВС}$, м ³ /с	0,055	0,1125	0,066	0,0085
x_3 – Разница давления в контуре тепловой сети $\Delta P_{ТС}$, кПа	19,81	26,055	32,3	6,245
x_4 – Разница давления в контуре системы отопления ΔP_{CO} , кПа	0,33	0,425	0,52	0,095
x_5 – Разница давления в контуре для системы горячего водоснабжения $\Delta P_{ГВС}$, кПа	0,91	1,005	1,1	0,095
x_6 – Температура наружного воздуха, t_n , °С	-20	-5	+8	15

Для экспериментального исследования объекта с шестью факторами с помощью полнофакторного плана проведено 64 опыта ($N=2^6$). Для упрощения предполагалось, что эффекты взаимодействия факторов в исследуемом объекте маловероятны и пренебрежимо малы, поэтому воспользовались $1/4$ репликой полного факторного эксперимента (ПФЭ), то есть дробным факторным экспериментом (ДФЭ) типа 2^{6-3} [108, 109]. Применена процедура смешивания и составлена матрица плана дробного факторного эксперимента. Число опытов в итоговом плане ДФЭ определено по формуле

$$N_{ДФЭ} = P^{k-m}, \quad (3.2)$$

где k – число факторов в итоговом плане ДФЭ;

P – число уровней их варьирования;

m – число применённых процедур смешивания.

Выполнено три процедуры смешивания и получена матрица планирования. С целью оценки чистой ошибки эксперимента план был реплицирован, результаты репликации с двумя параллельными опытами приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Матрица планирования эксперимента для G_{TC}

№	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	1	2	Среднее	Модель	Построчная
	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 \cdot X_3 \rightarrow X_4$	$X_2 \cdot X_3 \rightarrow X_5$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \rightarrow X_6$	G_{TC}	G_{TC}	\bar{y}_{cp}	$Y_{mod, G_{TC}}$	Дисперсия S_j^2
1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	0,113	0,113	0,113	0,1129	0
2	1	1	-1	-1	-1	1	1	0,117	0,116	0,1165	0,1166	0,00000125
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	0,116	0,116	0,116	0,1166	0
4	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,110	0,111	0,1105	0,1099	0,00000125
5	1	-1	-1	1	-1	-1	1	0,115	0,115	0,115	0,1151	0
6	1	1	-1	1	1	-1	-1	0,111	0,112	0,1115	0,1114	0,00000125
7	1	-1	1	1	-1	1	-1	0,111	0,111	0,111	0,1114	0
8	1	1	1	1	1	1	1	0,118	0,119	0,1185	0,1181	0,00000125

Проверим гипотезу о воспроизводимости опытов при помощи критерия Кохрена, расчетное значение которого, G_p , вычислим по формуле

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad (3.3)$$

где S_j^2 – оценка дисперсии для каждой j -той точки факторного пространства, определяемая по формуле

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y}_{j.cp})^2, \quad (3.4)$$

где n – количество параллельных опытов;

y_j – значение выходного параметра в j -той строке;

$\bar{y}_{j.cp}$ – среднее значение параметра j -той строке.

Сумма построчных выборочных дисперсий составит $\sum_{j=1}^n S_j^2 = 0,000002$ отсюда расчетное значение критерия $G_p = 0,25$. По

таблице распределения Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение критерия Кохрена составит $G_{кр} = 0,6798$. Так как $G_p < G_{кр}$, то гипотеза об однородности дисперсий принимается, таким образом, нет необходимости проводить эксперимент повторно.

Имитационная модель представлена в виде

$$Y_{(x_1, \dots, x_6)} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (3.5)$$

где b_0 – свободный член;

b_i – коэффициент при линейных членах, отражающий влияние i -го фактора на функцию отклика;

k – число входных параметров.

Коэффициенты уравнения регрессии b_i определяются скалярным произведением столбца y_i на соответствующий столбец x_j , отнесённый к опытам в матрице планирования N

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N y_i; \\ b_i &= \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_{ij} y_i, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где y_i – значение параметра оптимизации в i -том опыте;

N – число опытов в матрице;

i, j – индексы при обозначении переменных.

Определяя коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.6), получим численные значения коэффициентов регрессии для $G_{ТС}$, приведенные в табл. 3.4.

Таблица 3.4 Численные значения коэффициентов регрессии для $G_{ТС}$

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
0,114	0,00025	0	0	0,00075	0,00075	0,0025

Проверим значимость коэффициентов регрессии. Предварительно определим дисперсию воспроизводимости (отклика), по формуле

$$S_{\text{восп}}^2 = \frac{S_{\Sigma}^2}{N} = 2,5 \cdot 10^{-7}. \quad (3.7)$$

Дисперсия коэффициентов уравнения регрессии

$$S_b^2 = \frac{S_{\text{восп}}^2}{nm} = 1,5625 \cdot 10^{-7}, \quad S_b = \sqrt{S_b^2} = 1,25 \cdot 10^{-4}. \quad (3.8)$$

Найдем значение доверительного интервала для коэффициентов регрессии по формуле

$$\Delta b_i = t_{\alpha, m^*} \cdot S_b, \quad (3.9)$$

где t_{α, m^*} – теоретическое значение критерия Стьюдента.

По таблице распределения Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ значение критерия Стьюдента будет равно $t_{0,05,8} = 2,31$, откуда $\Delta b_j = 2,8275 \times 10^{-4}$. Из сопоставления доверительного интервала Δb_j с абсолютными значениями коэффициентов модели следует, что коэффициенты b_1 , b_2 и b_3 являются незначимыми и поскольку все коэффициенты уравнения оценивались независимо, то исключение коэффициентов b_1 , b_2 и b_3 из уравнения (3.5) не приведет к изменению других оценок и их дисперсий, поэтому их можно исключить из уравнения, остальные коэффициенты являются значимыми. Таким образом, окончательное уравнение регрессии можно записать в виде

$$\hat{y}_{\text{мод}, GTC} = 0,114 + 0,00075x_1x_2 + 0,00075x_2x_3 + 0,0025x_1x_2x_3. \quad (3.10)$$

Занесем результаты расчета выходных параметров по уравнению полученной модели в таблицу 3.3.

Проверим адекватность полученного уравнения регрессии (3.10) экспериментальным данным с помощью критерия Фишера, предварительно определив дисперсию адекватности по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{m \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_{\text{мод}})^2}{N-l}, \quad (3.11)$$

где l – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии, получим

$$S_{ад}^2 = 4,32 \cdot 10^{-7}.$$

Найдем экспериментальное значение критерия Фишера по формуле

$$F_{\text{эксп}} = \frac{S_{ад}^2}{S_{\text{восп}}^2} = 1,728. \quad (3.12)$$

По таблице распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,01$ найдем критическое значение критерия Фишера $F_{\text{крит}} = 3,69$. Поскольку $F_{\text{эксп}} < F_{\text{крит}}$, то гипотезу об адекватности полученной модели необходимо принять.

Для записи математической модели в реальных физических величинах произведем обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив таким образом окончательный вид модели

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{мод}, G_{\text{ТС}}} = & -0,1781 + 17,56 \cdot G_{\text{CO}} + 0,0126 \cdot G_{\text{ГВС}} + 2,663 \cdot \Delta P_{\text{ТС}} - 0,6738 \cdot G_{\text{CO}} \times \\ & \times G_{\text{ГВС}} - 0,1022 \cdot G_{\text{ГВС}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}} - 159,5 \cdot G_{\text{CO}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}} + 6,122 \cdot G_{\text{ГВС}} \cdot G_{\text{CO}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Адекватность полученных моделей подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований (Рис. 3.3).

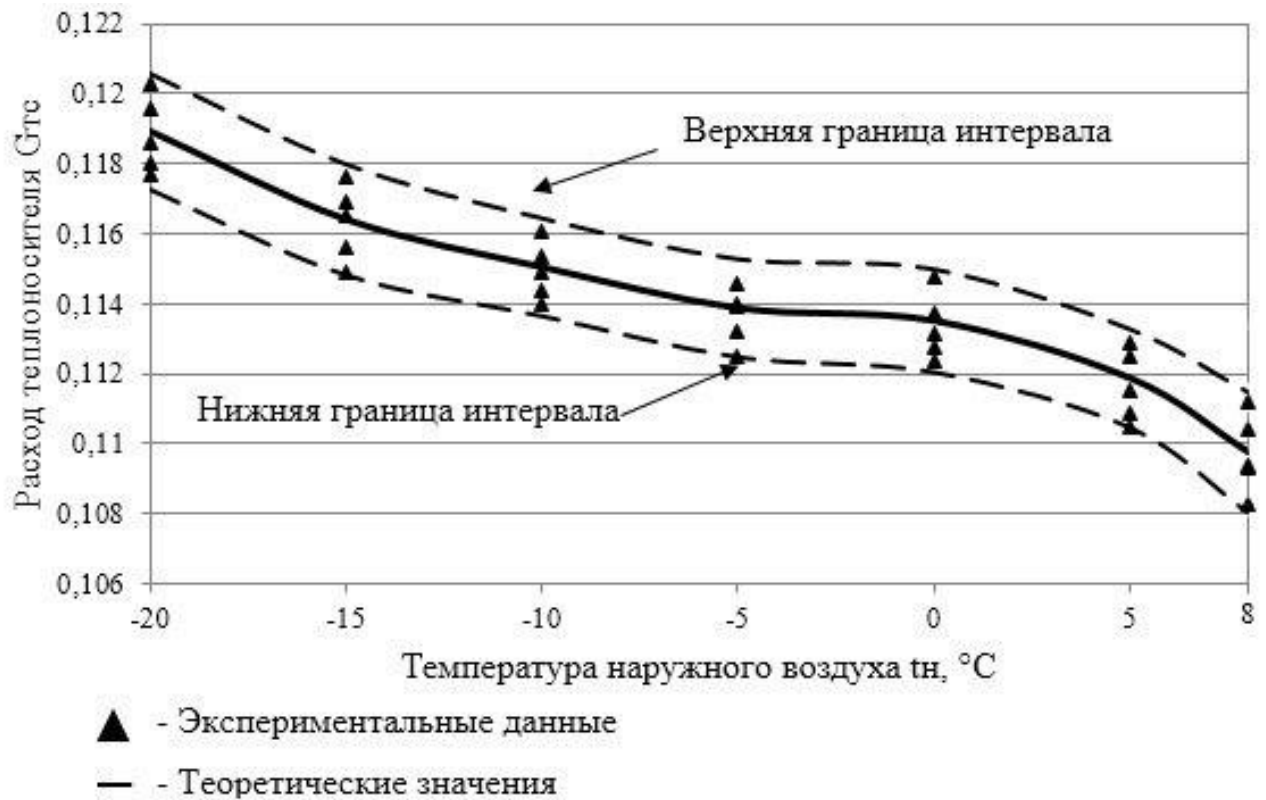


Рисунок 3.3. Определение доверительных интервалов расхода теплоносителя для контура тепловой сети в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

Для каждой выборки экспериментальных значений, была произведена гипотеза о нормальности распределения данных, приведенные на (Рис.3.3), определялись по методике, приведенной в [132]. Построены интервальные оценки для каждой из температуры, температурного графика, которые определяются концами интервала.

Математическое ожидание нормально распределённой случайной величины, а мы можем полагать, что в нашем случае мы имеем дело с нормальным распределением согласно центральной предельной теоремы, которая применима, так как объем выборки велик ($n=30$), доверительный интервал вычисляется по формуле

$$\bar{x} - t_{\gamma} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq a \leq \bar{x} + t_{\gamma} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.14)$$

где \bar{x} – выборочное среднее значение;

t_γ – квантиль распределения Стьюдента уровня значимости $\alpha = 0,95$ при уровне свободы $f = n - 1$, t_γ – принимаем равной 1,96;

a – среднее значение генсовокупности;

s – выборочное среднеквадратичное отклонение;

n – число элементов выборки.

Результаты расчета представлены в приложении Б.

3.2.2 Экспериментальные исследования работы контура системы отопления (G_{CO}).

Перед разработкой плана эксперимента в таблицу 3.5 внесены уровни варьирования факторов, влияющих на G_{CO} , выявленных на основе априорной информации.

Таблица 3.5. Уровни варьирования факторов, влияющих на расход теплоносителя для тепловой сети G_{CO}

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
1	2	3
Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения G_{TC} , м ³ /с	0,104	0,121
Разница давления в контуре тепловой сети ΔP_{TC} , кПа	19,81	32,3
Разница давления в контуре системы отопления ΔP_{CO} , кПа	0,33	0,52
Температура теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата для системы отопления t_{CO} , °C	55,5	69,5
Температура наружного воздуха, t_n , °C	-20	+8

Нормируя заданные факторы по формуле (3.1), получим значения приведенные в таблице (3.6)

Таблица 3.6 Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
x_1 – Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения G_{TC} , м ³ /с	0,104	0,1125	0,121	0,0085
x_2 – Разница давления в контуре тепловой сети ΔP_{TC} , кПа	19,81	26,055	32,3	6,245
x_3 – Разница давления в контуре системы отопления ΔP_{CO} , кПа	0,33	0,425	0,52	0,095
x_4 – Температура теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата для системы отопления t_{CO} , °C	55,5	62,5	69,5	7
x_5 – Температура наружного воздуха, t_n , °C	-20	-5	+10	15

Здесь также будем предполагать, что эффекты взаимодействия факторов в исследуемом объекте маловероятны и пренебрежимо малы, поэтому будем пользоваться $1/4$ репликой полного факторного эксперимента и проведем дробный факторный эксперимент типа 2^{5-2} . Применив процедуру смешивания, составим матрицу плана дробного факторного эксперимента, которая представлена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 Матрица планирования эксперимента G_{CO}

№	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	1	2	Среднее	Модель	Построчная
	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 \cdot X_2 \rightarrow X_4$	$X_1 X_2 X_3 \rightarrow X_5$	G_{OT}	G_{OT}	\bar{y}_{cp}	$Y_{mod, G_{OT}}$	Дисперсия S_j^2
1	1	1	1	1	1	1	0,027	0,027	0,027	0,02738	0
2	1	-1	1	1	-1	-1	0,024	0,025	0,0245	0,024998	0,0000005
3	1	1	-1	1	-1	-1	0,024	0,024	0,024	0,023498	0
4	1	-1	-1	1	1	1	0,024	0,023	0,0235	0,023128	0,0000005
5	1	1	1	-1	1	-1	0,018	0,018	0,018	0,017628	0
6	1	-1	1	-1	-1	1	0,02	0,02	0,02	0,019498	0
7	1	1	-1	-1	-1	1	0,017	0,018	0,0175	0,017998	0,0000005
8	1	-1	-1	-1	1	-1	0,013	0,013	0,013	0,013376	0

Вновь проверяя гипотезу о воспроизводимости опытов, получим: сумма построчных выборочных дисперсий составит $\sum_{j=1}^N S_j^2 = 15 \cdot 10^{-6}$, расчетное значение критерия $G_p = 0,3333333$. По таблице распределения Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение критерия Кохрена составит $G_{кр} = 0,6798$. Таким образом, $G_p < G_{кр}$, следовательно, гипотеза об однородности дисперсий принимается [110].

Уравнение математической модели будем строить без учета парных взаимодействий, и она будет иметь вид

$$Y_{(x_1, \dots, x_5)} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i. \tag{3.15}$$

Определяя коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.6), получим значения, приведенные в таблице 3.8.

Таблица 3.8 Численные значения коэффициентов регрессии для G_{CO}

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{123}
0,020938	0,000688	0,001438	0,003813	-0,00056	0,001063

Проверим значимость коэффициентов регрессии. Дисперсия коэффициентов уравнения регрессии в данном случае составит $S_b = \sqrt{S_b^2} = 0,000108$. Значение доверительного интервала для коэффициентов регрессии при уровне значимости $\alpha = 0,05$ составит $\Delta b_j = 0,00024948$. Из сопоставления доверительного интервала Δb_j с абсолютными значениями коэффициентов модели приходим к выводу, что все коэффициенты являются значимыми. Таким образом, окончательное уравнение регрессии можно записать в виде

$$\hat{y}_{\text{мод}, G_{OT}} = 0,020938 + 0,000688x_1 + 0,001438x_2 + 0,003813x_3 - 0,00056x_1x_2 + 0,001063x_1x_2x_3. \tag{3.16}$$

Результаты расчета выходных параметров по уравнению полученной модели представлены в таблице 3.7.

Проверим адекватность полученного уравнения регрессии (3.16) экспериментальным данным с помощью критерия Фишера. Экспериментальное значение критерия Фишера составит

$$F_{\text{эксп}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{восп}}^2} = 5,54. \quad (3.17)$$

Используя таблицу распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,01$, найдем критическое значение критерия Фишера $F_{\text{крит}} = 8,64$. Так как $F_{\text{эксп}} < F_{\text{крит}}$, то гипотезу об адекватности полученной модели необходимо принять.

Для записи математической модели в реальных физических величинах произведем обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив, таким образом, окончательный вид модели

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{мод}, G_{\text{CO}}} = & -4,440 + 2,352 \cdot G_{\text{TC}} + 0,170 \cdot \Delta P_{\text{TC}} + 0,658 \cdot \Delta P_{\text{CO}} - 5,492 \cdot \Delta P_{\text{CO}} \cdot G_{\text{TC}} - \\ & -0,0237 \cdot \Delta P_{\text{CO}} \cdot \Delta P_{\text{TC}} - 0,0897 \cdot G_{\text{TC}} \cdot \Delta P_{\text{TC}} + 0,2108 \cdot \Delta P_{\text{CO}} \cdot G_{\text{TC}} \cdot \Delta P_{\text{TC}}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Адекватность полученной модели подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований (Рис. 3.4).

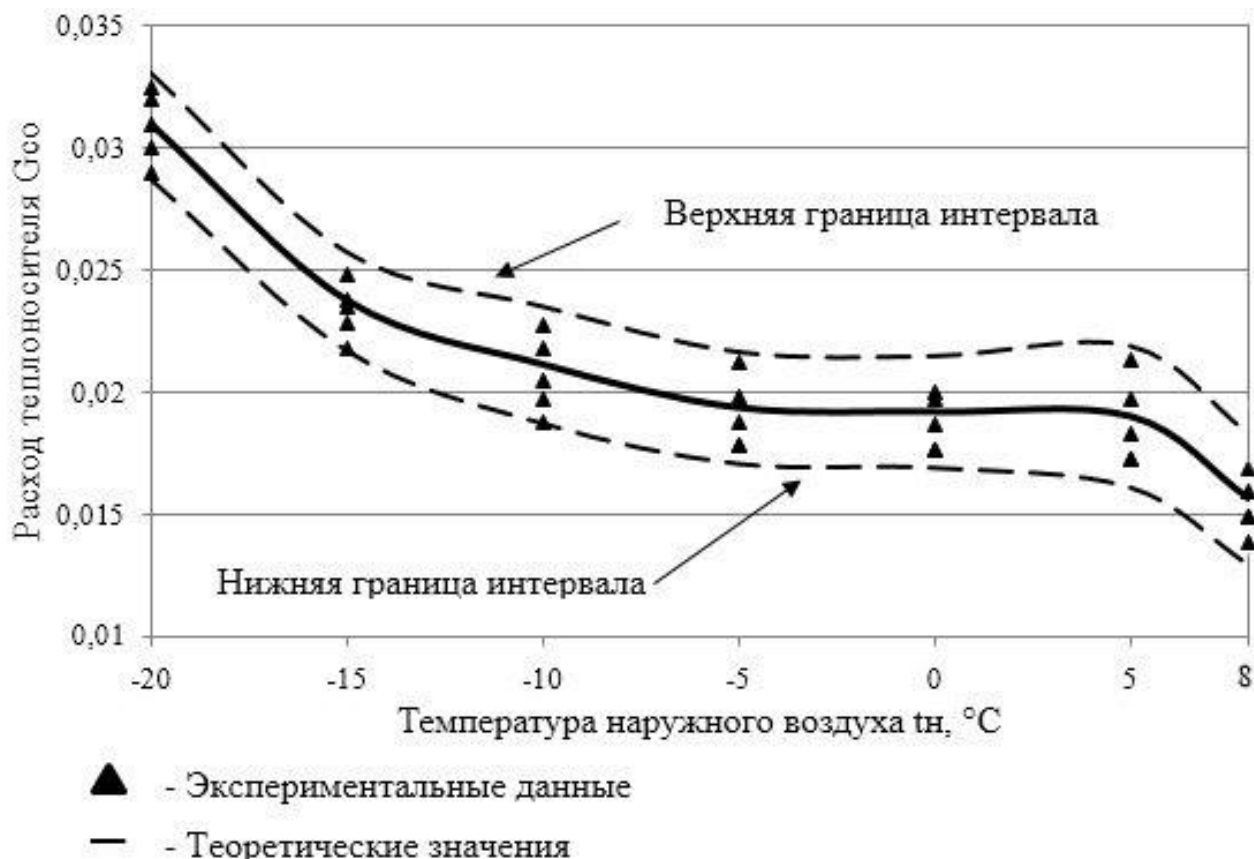


Рисунок 3.4 Определение доверительных интервалов расхода теплоносителя для контура системы отопления в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

По результатам полученных данных, касающихся работы системы отопления, становится видно, что эффективная работа системы отопления достигается за счет более эффективного использования теплоносителя и минимизации перегревов помещений. Экспериментальные значения и расчет доверительно интервала представлен в приложении Б.

3.2.3 Экспериментальные исследования работы контура системы горячего водоснабжения ($G_{ГВС}$).

Перед разработкой плана эксперимента в таблицу 3.9 внесены уровни варьирования факторов, влияющих на $G_{ГВС}$, выявленных на основе априорной информации.

Таблица 3.9. Уровни варьирования факторов, влияющих на расход горячей воды $G_{ГВС}$

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
1	2	3
Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения $G_{ТС}$, м ³ /с	0,104	0,121
Разница теплоносителя в контуре тепловой сети $\Delta P_{ТС}$, кПа	19,81	32,3
Разница давления в контуре для системы $\Delta P_{ГВС}$, кПа	0,91	1,1
Температура воды на выходе из теплообменного аппарата для $G_{ГВС}$, °С	49,5	57,5
Температура наружного воздуха, t_n , °С	-20	+8

Нормируя заданные факторы по формулам (3.6), получим следующие результаты, представленные в таблице 3.10.

Таблица 3.10 Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
x_1 – Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения $G_{ТС}$, м ³ /с	0,104	0,1125	0,121	0,0085
x_2 – Разница давлений в контуре тепловой сети $\Delta P_{ТС}$, кПа	19,81	26,055	32,3	6,245
x_3 – Разница давлений в контуре для системы $\Delta P_{ГВС}$, кПа	0,91	1,005	1,1	0,095
x_4 – Температура воды на выходе из теплообменного аппарата для $G_{ГВС}$, °С	49,5	53,5	57,5	4
x_5 – Температура наружного воздуха, t_n , °С	-20	-5	+8	15

Здесь не будем пренебрегать эффектами взаимодействия факторов в исследуемом объекте, а также воспользовавшись $\frac{1}{4}$ репликой полного

факторного эксперимента, проведем дробный факторный эксперимент типа 2^{5-2} . Применяв две процедуры смешивания, составим матрицу плана дробного факторного эксперимента, которая представлена в таблице 3.11.

Таблица 3.11 Матрица планирования эксперимента

№	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₇	B ₈	1	2	Среднее	Модель	Построчная
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ ·X ₂ → X ₄	X ₁ X ₂ X ₃ → X ₅	X ₂ X ₃	X ₁ X ₃	G _{ГВС}	G _{ГВС}	\bar{y}_{cp}	Y _{mod, Гот}	Дисперсия S_j^2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,04	0,041	0,0615	0,04052	0,0000005
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,045	0,048	0,0605	0,046482	0,0000005
3	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	0,055	0,05	0,06	0,054018	0
4	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	0,056	0,05	0,06	0,052972	0
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,058	0,06	0,06	0,058982	0
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,06	0,06	0,06	0,060002	0
7	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	0,061	0,06	0,0605	0,058992	0,0000005
8	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	0,062	0,061	0,06	0,061518	0

Вновь проверяя гипотезу о воспроизводимости опытов, получим: сумма построчных выборочных дисперсий составит $\sum_{j=1}^N S_j^2 = 5,95 \cdot 10^{-5}$, расчетное значение критерия $G_p = 0,53781512$. По таблице распределения Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение критерия Кохрена составит $G_{кр} = 0,6798$. Таким образом, $G_p < G_{кр}$, следовательно, гипотеза об однородности дисперсий принимается.

Уравнение математической модели с учетом парных взаимодействий будет иметь вид

$$Y_{(x_1, \dots, x_5)} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{j=1}^k \sum_j^k b_{ij} x_i x_j. \quad (3.19)$$

Определяя коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.6), получим значения, представленные в таблице 3.12.

Таблица 3.12 Численные значения коэффициентов регрессии для ($G_{ГВС}$)

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{123}	b_{23}	b_{13}
0,121688	-0,06856	0,064813	-0,07356	-0,06819	0,066813	-0,06981	0,067313

Проверим значимость коэффициентов регрессии. Дисперсия коэффициентов уравнения регрессии в данном случае составит: $S_b = \sqrt{S_b^2} = 6,81 \cdot 10^{-4}$. Значение доверительного интервала для коэффициентов регрессии при уровне значимости $\alpha = 0,05$ составит $\Delta b_j = 0,00157311$. Из сопоставления доверительного интервала Δb_j с абсолютными значениями коэффициентов модели приходим к выводу, что все коэффициенты являются значимыми. Таким образом, окончательное уравнение регрессии можно записать в виде

$$\hat{y}_{\text{мод}, G_{ГВС}} = 0,121688 - 0,06856x_1 + 0,064813x_2 - 0,07356x_3 - 0,06819x_1x_2 + 0,066813x_1x_2x_3 - 0,06981x_2x_3 + 0,067313x_1x_3. \quad (3.20)$$

Занесем результаты расчета выходных параметров по уравнению полученной модели в таблицу 3.11.

Проверим адекватность полученного уравнения регрессии (3.20) экспериментальным данным с помощью критерия Фишера. Экспериментальное значение критерия Фишера составит:

$$F_{\text{эксп}} = 0,000815736.$$

Используя таблицу распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,01$, найдем критическое значение критерия Фишера $F_{\text{крит}} = 8,64$. Поскольку $F_{\text{эксп}} < F_{\text{крит}}$, то гипотезу об адекватности полученной модели необходимо принять.

Для записи математической модели в реальных физических величинах произведем обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив, таким образом, окончательный вид модели

$$\hat{Y}_{\text{мод}, G_{\text{ГВС}}} = 8,362 - 97,14 \cdot G_{\text{ТС}} + 0,1296 \cdot \Delta P_{\text{ТС}} - 10,78 \cdot \Delta P_{\text{ГВС}} + 116,2 \cdot G_{\text{ТС}} \times \\ \times \Delta P_{\text{ГВС}} + 0,0239 \cdot \Delta P_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ГВС}} + 0,0433 \cdot G_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}} - 1,259 \cdot \Delta P_{\text{ГВС}} \cdot G_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}}. \quad (3.21)$$

Адекватность полученной имитационной модели подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований (Рис. 3.5).

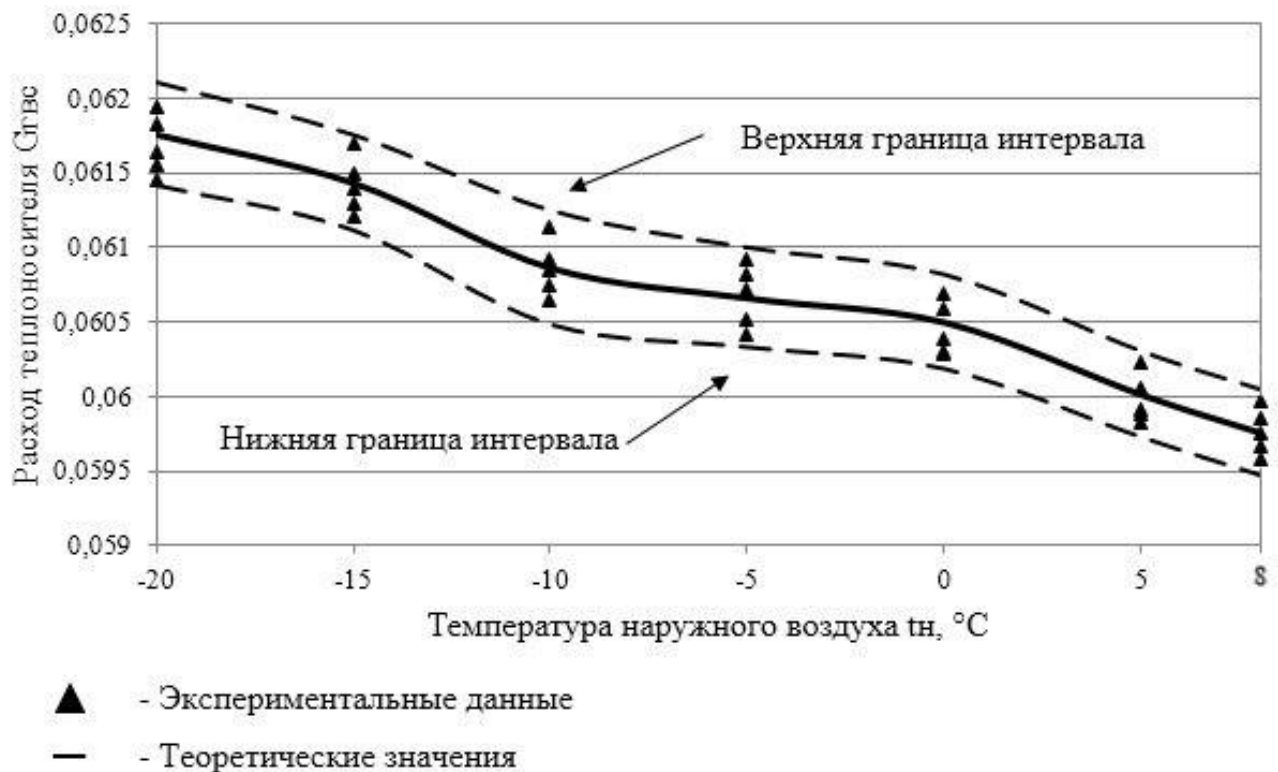


Рисунок 3.5 Определение доверительных интервалов расхода теплоносителя для контура горячего водоснабжения в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

По результатам полученных данных, касающихся расхода воды на нужды горячего водоснабжения, становится видно, что эффективная работа контура горячего водоснабжения достигается за счет использования бака аккумулятора, размещенного на теплообменном аппарате, который сглаживает пиковую нагрузку. Все полученные значения исследуемого параметра лежат в пределах

доверительного интервала. Расчет доверительного интервала представлен в приложении Б.

3.2.4 Экспериментальные исследования изменения давления в контуре системы тепловой сети (ΔP_{TC})

Перед разработкой плана эксперимента в таблице 3.13 были определены уровни варьирования факторов, влияющих на перепад давления в тепловой сети (ΔP_{TC}), выявленных на основе априорной информации.

Таблица 3.13 Уровни варьирования факторов, влияющих на ΔP_{TC}

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
1	2	3
Расход теплоносителя в системе отопления G_{CO} , м ³ /с	0,011	0,027
Расход теплоносителя в контуре горячего водоснабжения $G_{ГВС}$, м ³ /с	0,055	0,066
Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения G_{TC} , м ³ /с	0,104	0,121
Разница давления в контуре системы отопления ΔP_{CO} , кПа	0,33	0,52
Разница давления в контуре системы горячего водоснабжения $\Delta P_{ГВС}$, кПа	0,91	1,1
Температура наружного воздуха, t_n , °С	-20	+8

Вышеперечисленные факторы (расход теплоносителя G_{CO} и разница давлений ΔP_{CO} в контуре системы отопления, расход теплоносителя $G_{ГВС}$ и разница давлений $\Delta P_{ГВС}$ в контуре системы горячего водоснабжения, расход теплоносителя в контуре тепловой сети G_{TC} , а также температура наружного воздуха t_n) можно охарактеризовать как количественные, которые в свою очередь задаются численными значениями, определяющими возможные области изменения рассматриваемого параметра [109].

Нормируя заданные факторы по формулам (3.1), получим значения, приведенные в таблице 3.14

Таблица 3.14 Уровни варьирования факторов, влияющих на ΔP_{TC}

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
1	2	3	4	5
x_1 – Расход теплоносителя в системе отопления G_{CO} , м ³ /с	0,011	0,019	0,027	0,008
x_2 – Расход теплоносителя в системе горячего водоснабжения $G_{ГВС}$, м ³ /с	0,055	0,0605	0,066	0,0055
x_3 – Расход жидкости в контуре теплоснабжения G_{TC} , м ³ /с	0,104	0,1125	0,121	0,0085
x_4 – Разница давления в контуре системы отопления ΔP_{CO} , кПа	0,33	0,425	0,52	0,095
x_5 – Разница давления в контуре системы ГВС $\Delta P_{ГВС}$, кПа	0,91	1,005	1,1	0,095
x_6 – Температура наружного воздуха, t_n , °C	-20	-5	+8	15

Здесь также воспользуемся $1/4$ репликой ПФЭ, то есть ДФЭ типа 2^{6-3} с тремя процедурами смешивания. Применим процедуру смешивания и составим матрицу плана дробного факторного эксперимента. Число опытов в итоговом плане ДФЭ будем определять по формуле (3.2). В данном случае матрица планирования эксперимента представлена в табл. 3.15.

Таблица 3.15. Матрица планирования эксперимента

№	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	1	2	Среднее	Модель	Построчная
	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 \cdot X_3 \rightarrow X_4$	$X_2 \cdot X_3 \rightarrow X_5$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \rightarrow X_6$	ΔP_{TC}	ΔP_{TC}	\bar{y}_{cp}	$Y_{mod, ГTC}$	Дисперсия S_j^2
1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	23,5	24,2	23,85	23,95875	0,245
2	1	1	-1	-1	-1	1	1	26,54	26,54	26,54	26,34875	0
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	26,54	25,7	26,12	26,01125	0,3528
4	1	1	1	-1	-1	-1	-1	24,01	24,2	24,105	24,29625	0,01805
5	1	-1	-1	1	-1	-1	1	28,13	28,13	28,13	28,74125	0
6	1	1	-1	1	1	-1	-1	28,13	27,8	27,965	28,27625	0,05445
7	1	-1	1	1	-1	1	-1	27,7	26,9	27,3	26,68875	0,32
8	1	1	1	1	1	1	1	30,08	31,2	30,64	30,32875	0,6272

Проверим гипотезу о воспроизводимости опытов при помощи критерия Кохрена, расчетное значение которого вычислим по формуле (3.3).

В данном случае расчетное значение критерия составит $G_p = 0,38775889$. Критическое значение критерия Кохрена составит $G_{кр} = 0,6798$, и так как $G_p < G_{кр}$, необходимость в повторном проведении эксперимента отсутствует. Имитационную модель будем искать в виде (3.5). Определяя коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.6), получим значения, представленные в таблице 3.16.

Таблица 3.16 Численные значения коэффициентов регрессии для ΔP_{TC}

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
26,83125	0,48125	0,21	1,6775	0,3125	0,25125	1,02625

Проверим значимость коэффициентов регрессии по формуле (3.8). Значение доверительного интервала для коэффициентов регрессии по формуле (3.9) составит $\Delta b_j = 0,02596744$.

Из сопоставления доверительного интервала Δb_j с абсолютными значениями коэффициентов модели следует, что коэффициенты b_2 и b_{23} являются незначимыми и их можно исключить из уравнения, что не повлечет за собой изменение других оценок. И окончательно уравнение регрессии можно записать в виде

$$\hat{y}_{\text{мод}, \Delta P_{TC}} = 26,83125 + 0,48125x_1 + 1,6775x_3 + 0,3125x_1x_3 + 1,02625x_1x_2x_3. \quad (3.22)$$

Занесем результаты расчета выходных параметров по уравнению полученной модели в таблицу 3.15.

Проверим адекватность полученного уравнения регрессии (3.22) экспериментальным данным с помощью критерия Фишера. Экспериментальное значение критерия Фишера по формуле (3.12)

$$F_{\text{экс}} = 2,66439432.$$

Используя таблицу распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,01$, найдем критическое значение критерия Фишера $F_{\text{крит}} = 3,69$. Так как $F_{\text{эксп}} < F_{\text{крит}}$, то гипотезу об адекватности полученной модели необходимо принять.

Для записи математической модели в реальных физических величинах произведем обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив таким образом окончательный вид модели

$$\hat{y}_{\text{мод}, \Delta P_{\text{ТС}}} = -341,5 + 18219,4 \cdot G_{\text{CO}} + 3264,2 \cdot G_{\text{ТС}} - 161415,4 \cdot G_{\text{CO}} \cdot G_{\text{ТС}} - 52135,7 \times \\ \times G_{\text{ГВС}} \cdot G_{\text{ТС}} + 5865,3 \cdot G_{\text{ГВС}} - 308698,2 \cdot G_{\text{CO}} \cdot G_{\text{ГВС}} + 2743984,0 \cdot G_{\text{CO}} \cdot G_{\text{ГВС}} \cdot G_{\text{ТС}}. \quad (3.23)$$

Адекватность полученной имитационной модели подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований (Рис. 3.6).

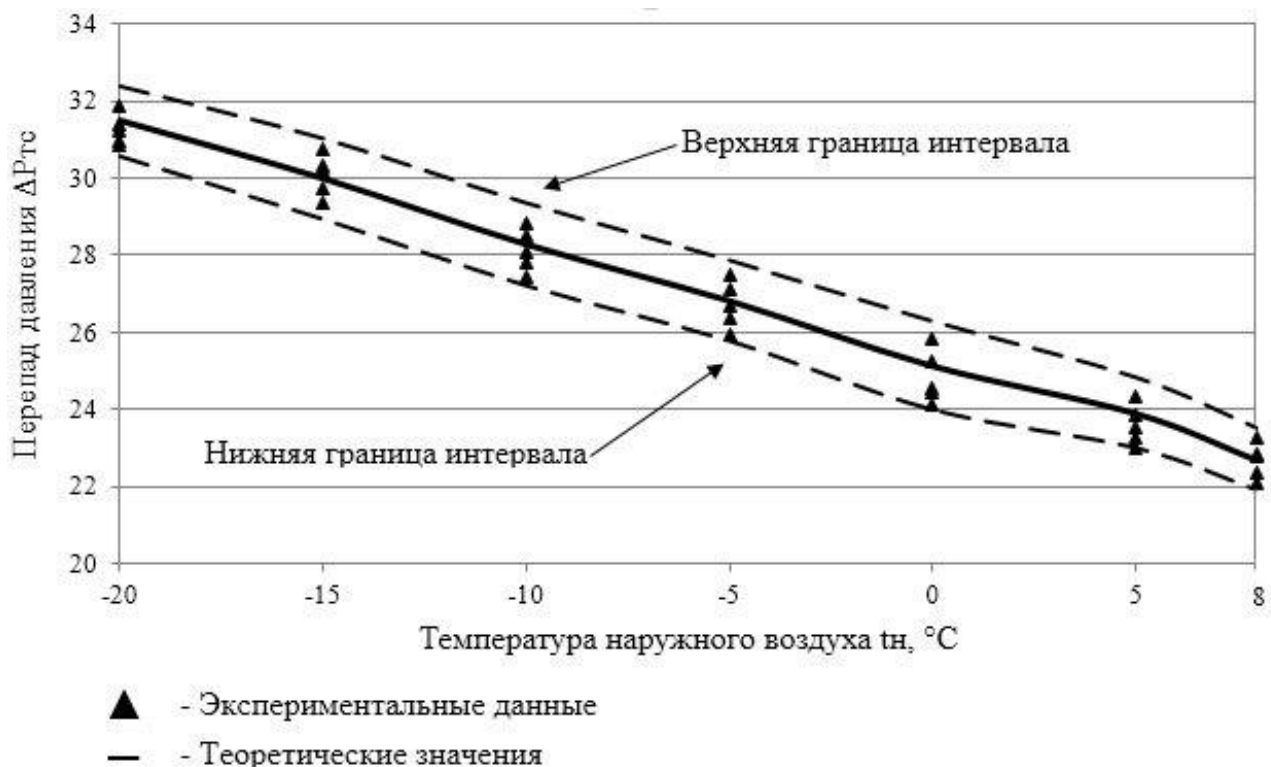


Рисунок 3.6 Определение доверительных интервалов перепада давлений теплоносителя для контура тепловой сети в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

В результате полученных данных можно сделать вывод о том, что распределение давлений в подающем и обратном трубопроводе не превышает допустимых значений, что позволяет применять менее мощное и, соответственно, менее шумное насосное оборудование, а также делает целесообразным применение насосов с частотным регулированием. Все полученные значения исследуемого параметра лежат в пределах доверительного интервала. Экспериментальные значения и расчет доверительного интервала представлен в приложении Б.

3.2.5 Экспериментальные исследования перепада давления в контуре системы отопления (ΔP_{CO}).

Перед разработкой плана эксперимента были определены уровни варьирования факторов, влияющих на ΔP_{CO} , выявленных на основе априорной информации, результаты представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 Уровни варьирования факторов ΔP_{CO}

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
1	2	3
Количественные факторы		
Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения G_{TC} , м ³ /с	0,104	0,121
Разница давления в контуре тепловой сети ΔP_{TC} , кПа	19,81	32,3
Расход теплоносителя в системе отопления G_{CO} , м ³ /с	0,011	0,027
Температура теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата для системы отопления t_{CO} , °C	55,5	69,5
Температура наружного воздуха, t_n , °C	-20	+8

Нормируя заданные факторы по формулам (3.1), получим значения, представленные в таблице 3.18.

Таблица 3.18 Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
1	2	3	4	5
x_1 – Расход жидкости в контуре теплоснабжения G_{TC} , м ³ /с	0,104	0,1125	0,121	0,0085
x_2 – Разница давления в контуре тепловой сети ΔP_{TC} , кПа	19,81	26,055	32,3	6,245
x_3 – Расход жидкости в системе отопления G_{CO} , м ³ /с	0,011	0,019	0,027	0,008
x_4 – Температура теплоносителя на выходе из теплообменного аппарата для системы отопления t_{CO} , °C	55,5	62,5	69,5	7
x_5 – Температура наружного воздуха, t_n , °C	-20	-5	+10	15

Здесь будем пользоваться $1/4$ репликой ПФЭ, то есть проведем ДФЭ типа 2^{5-2} . Дважды применив процедуру смешивания, составим матрицу плана ДФЭ, которая представлена в таблице 3.19.

Таблица 3.19 Матрица планирования эксперимента

№	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	1	2	Среднее	Модель	Построчная
	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 \cdot X_2 \rightarrow X_4$	$X_1 X_2 X_3 \rightarrow X_5$	ΔP_{CO}	ΔP_{CO}	\bar{y}_{cp}	$Y_{mod, Got}$	Дисперсия S_j^2
1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,52875	0
2	1	-1	1	1	-1	-1	0,47	0,47	0,47	0,48375	0
3	1	1	-1	1	-1	-1	0,47	0,48	0,475	0,46125	5E-05
4	1	-1	-1	1	1	1	0,47	0,47	0,47	0,44125	0
5	1	1	1	-1	1	-1	0,45	0,44	0,445	0,41625	5E-05
6	1	-1	1	-1	-1	1	0,450	0,45	0,45	0,43625	0
7	1	1	-1	-1	-1	1	0,4	0,4	0,4	0,41375	0
8	1	-1	-1	-1	1	-1	0,3	0,3	0,3	0,32875	0

Гипотезу о воспроизводимости опытов принимаем, поскольку $G_p < G_{кр}$ ($G_p = 0,5$, $G_{кр} = 0,6798$), следовательно, необходимость в повторном проведении эксперимента отсутствует. Уравнение математической модели будем строить без учета парных взаимодействий, и она будет иметь вид уравнения (3.14).

Определяя коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.6), получим значения, представленные в таблице 3.20.

Таблица 3.20 Численные значения коэффициентов регрессии ΔP_{CO}

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{123}
0,43875	0,01625	0,0275	0,04	-0,01	0,01625

Проверяя значимость коэффициентов регрессии, пришли к выводу о том, что все коэффициенты являются значимыми (поскольку $\Delta b_j = 0,002041771$). Таким образом, окончательное уравнение регрессии можно записать в виде

$$\hat{y}_{\text{мод}, \Delta P_{CO}} = 0,43875 + 0,01625x_1 + 0,0275x_2 + 0,04x_3 - 0,01x_1x_2 + 0,01625x_1x_2x_3. \quad (3.24)$$

Результаты расчета выходных параметров по уравнению полученной модели занесены в таблицу 3.20.

В результате проверки на адекватность полученного уравнения регрессии (3.24) экспериментальным данным при помощи критерия Фишера установлено, что гипотезу об адекватности полученной модели необходимо принять, поскольку $F_{\text{эксп}} < F_{\text{крит}}$ ($F_{\text{эксп}} = 2,1664$, $F_{\text{крит}} = 8,64$, уровень значимости $\alpha = 0,01$).

Для записи математической модели в реальных физических величинах произведем обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив таким образом окончательный вид модели

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{мод}, \Delta P_{CO}} = & -1,470 + 15,95 \cdot G_{TC} + 0,065 \cdot \Delta P_{TC} + 107,2 \cdot G_{CO} - 0,5387 \cdot G_{TC} \cdot \Delta P_{TC} - \\ & - 997,0 \cdot G_{TC} \times G_{CO} - 4,305 \cdot \Delta P_{TC} \cdot G_{CO} + 38,26 \cdot G_{TC} \cdot \Delta P_{TC} \cdot G_{CO} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Адекватность полученной модели подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований (Рис. 3.7).

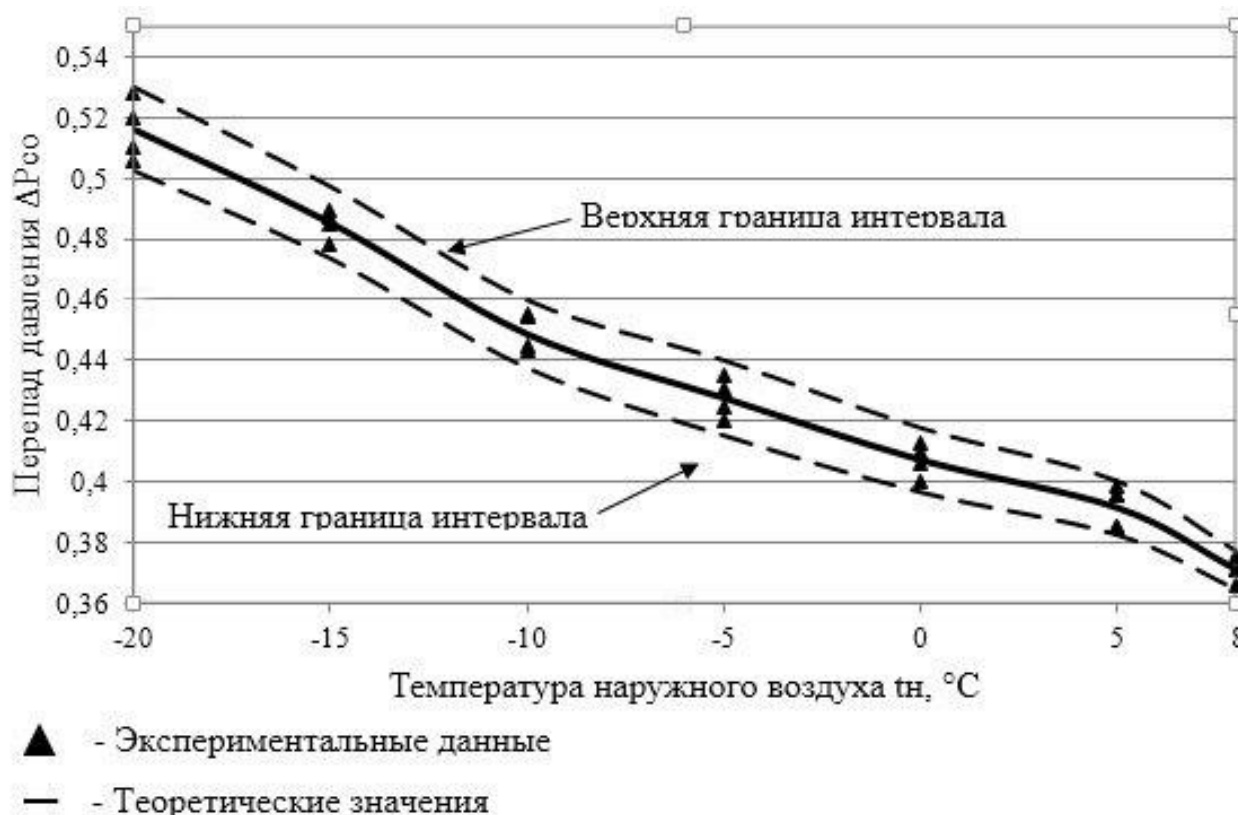


Рисунок 3.7 Определение доверительных интервалов перепада давлений теплоносителя для контура системы отопления в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

Все полученные значения исследуемого параметра лежат в пределах доверительного интервала. Расчет доверительного интервала представлен в приложении Б.

3.2.6 Экспериментальные исследования работы контура системы горячего водоснабжения ($\Delta P_{ГВС}$).

Перед разработкой плана эксперимента были определены уровни варьирования факторов, влияющих на $\Delta P_{ГВС}$, выявленных на основе априорной информации, результаты внесены в таблицу 3.21.

Таблица 3.21 Уровни варьирования факторов, влияющих на перепад давления $\Delta P_{ГВС}$

Фактор	Нижний уровень фактора	Верхний уровень фактора
1	2	3
Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения $G_{ТС}$, м ³ /с	0,104	0,121
Разница давления в контуре тепловой сети $\Delta P_{ТС}$, кПа	19,81	32,3
Расход теплоносителя в контуре горячего водоснабжения $G_{ГВС}$, м ³ /с	0,055	0,066
Температура воды на выходе из теплообменного аппарата для $t_{ГВС}$, °С	49,5	57,5
Температура наружного воздуха, t_H , °С	-20	+10

Нормируя заданные факторы по формулам (3.1), получим значения, представленные в таблице 3.22.

Таблица 3.22 Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
1	2	3	4	5
x_1 – Расход теплоносителя в контуре теплоснабжения $G_{ТС}$, м ³ /с	0,104	0,1125	0,121	0,0085
x_2 – Разница давления в контуре тепловой сети $\Delta P_{ТС}$, кПа	19,81	26,055	32,3	6,245
x_3 – Расход теплоносителя в системе горячего водоснабжения $G_{ГВС}$, м ³ /с	0,055	0,0605	0,066	0,0055
x_4 – Температура воды на выходе из теплообменного аппарата для $t_{ГВС}$, °С	49,5	53,5	57,5	4
x_5 – Температура наружного воздуха, t_H , °С	-20	-5	+8	15

Матрица плана ДФЭ представлена в виде таблицы 3.23.

Таблица 3.23 Матрица планирования эксперимента

№	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	1	2	Среднее	Модель	Построчная
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ ·X ₂ → X ₄	X ₁ X ₂ X ₃ → X ₅	ΔРГВС	ΔРГВС	\bar{y}_{cp}	Y _{mod, Got}	Дисперсия S _j ²
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,99375	0
2	1	-1	1	1	-1	-1	0,98	1	0,99	0,96375	0,0002
3	1	1	-1	1	-1	-1	0,99	0,98	0,985	1,01125	5E-05
4	1	-1	-1	1	1	1	0,98	0,98	0,98	0,98625	0
5	1	1	1	-1	1	-1	0,99	1	0,995	1,00125	5E-05
6	1	-1	1	-1	-1	1	0,9	0,9	0,9	0,92625	0
7	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0,97375	0
8	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,99375	0

Вновь проверяя гипотезу о воспроизводимости опытов, получим $G_p < G_{кр}$ ($G_p = 0,6666667$, $G_{кр} = 0,6798$, уровень значимости $\alpha = 0,05$) следовательно, гипотеза об однородности дисперсий принимается.

Уравнение математической модели будем строить без учета парных взаимодействий в виде уравнения 3.14.

Определяя коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.6), получим значения, представленные в таблице 3.24.

Таблица 3.24 Численные значения коэффициентов регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{123}
0,98125	0,01375	-0,01	0,0075	0,0125	-0,01125

Из сопоставления доверительного интервала Δb_j ($\Delta b_j = 0,003536451$) с абсолютными значениями коэффициентов модели приходим к выводу, что все коэффициенты являются значимыми. Таким образом, окончательно уравнение регрессии можно записать в виде:

$$\hat{y}_{\text{мод, ΔРГВС}} = 0,98125 + 0,01375x_1 - 0,01x_2 + 0,0075x_3 + 0,0125x_1x_2 - 0,01125x_1x_2x_3. \quad (3.26)$$

Занесем результаты расчета выходных параметров по уравнению полученной модели в таблицу 3.23.

Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии (3.26) экспериментальным данным с помощью критерия Фишера показала, что $F_{\text{эксп}} < F_{\text{крит}}$ ($F_{\text{эксп}} = 5,177778667$, $F_{\text{крит}} = 8,64$, уровень значимости $\alpha = 0,01$), следовательно, гипотеза об адекватности полученной модели принимается.

Для записи математической модели в реальных физических величинах произведем обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному, получив таким образом окончательный вид модели

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{мод}, \Delta P_{\text{ГВС}}} = & -5,303 + 56,22 \cdot G_{\text{ТС}} + 0,2374 \cdot \Delta P_{\text{ТС}} + 111,6 \cdot G_{\text{ГВС}} - 2,096 \cdot G_{\text{ТС}} \times \\ & \times \Delta P_{\text{ТС}} - 1004,0 \cdot G_{\text{ТС}} \cdot G_{\text{ГВС}} - 4,335 \cdot \Delta P_{\text{ТС}} \cdot G_{\text{ГВС}} + 38,53 \cdot G_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}} G_{\text{ГВС}}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Адекватность полученной модели подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований (Рис. 3.8).

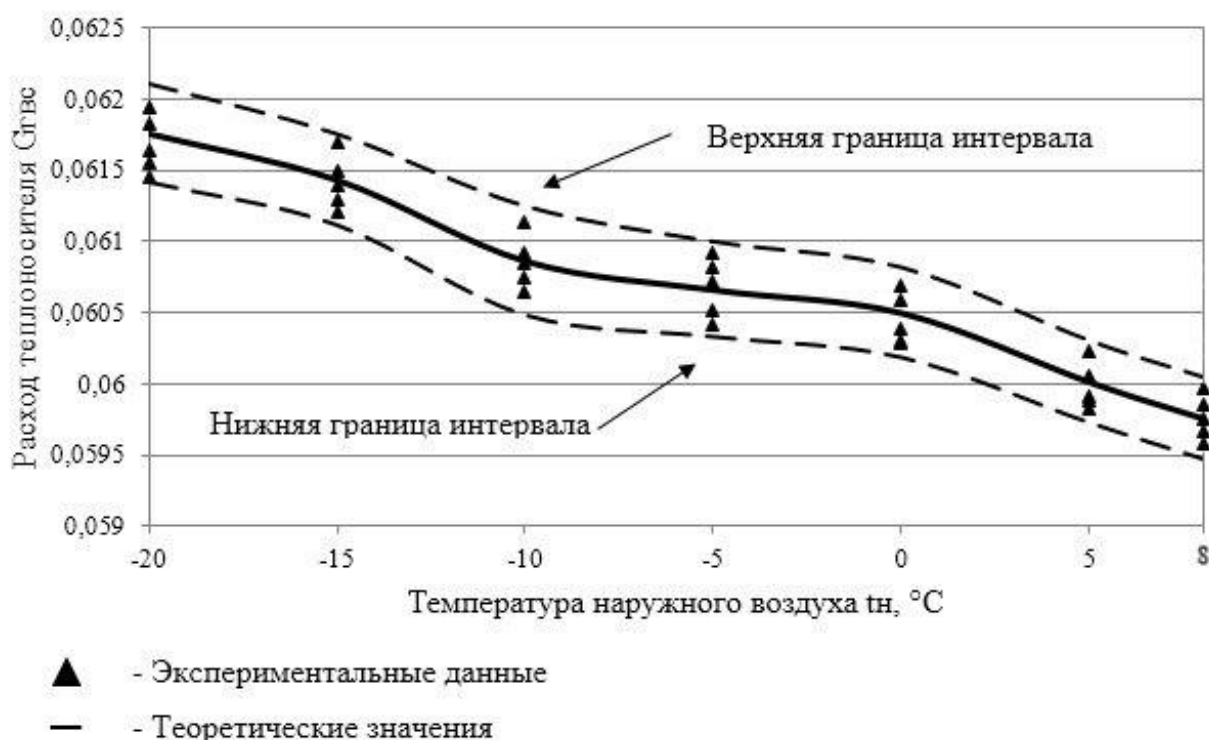


Рисунок 3.8 Определение доверительных интервалов перепада давлений теплоносителя для контура горячего водоснабжения в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

Полученные данные позволили определить места установки смешивающей арматуры с целью понижения температуры теплоносителя на выходе из бака-аккумулятора. Все полученные значения исследуемого параметра лежат в пределах доверительного интервала. Расчет доверительного интервала приведен в приложении Б.

3.3 Метрологический анализ выполнения эксперимента

3.3.1 Погрешность температурных измерений

Для определения общей ошибки результатов был использован закон сложения ошибок. Так при определении температуры теплоносителя возникают следующие ошибки:

$\sigma_{\text{п}}$ – погрешность прибора;

$\sigma_{\text{окр}}$ – погрешность округления;

$\sigma_{\text{суб}}$ – субъективная ошибка.

Согласно закону сложения ошибок суммарная ошибка составит

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{п}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2 + \sigma_{\text{суб}}^2}. \quad (3.28)$$

Погрешность термометра согласно паспортным данным в диапазоне измерений ТБ – 150 составляет 2,5%.

Ошибка округления определялась по формуле

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{\bar{w}}{\sqrt{12}}, \quad (3.29)$$

где \bar{w} - цена деления прибора.

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,29.$$

Субъективная ошибка определялась в соответствии с [111,112] и составила $\sigma_{\text{суб}} = 0,3\%$.

Учитывая вышеприведенные погрешности, суммарная погрешность экспериментов составила

$$\sigma_{\Sigma} = 2,535\%.$$

По нормативным документам допустимая погрешность при измерении температуры составляет 5%.

Это дает возможность сделать вывод о том, что используемая в настоящей работе методика измерений температуры позволяет получить достаточно достоверные результаты.

3.3.2 Погрешность измерений расходов воды

Для определения ошибки при измерении расходов воды с помощью расходомеров типа КВ – 1,5 использован метод сложения ошибок.

Погрешность прибора составляет 1,5%.

Субъективная ошибка $\sigma_{\text{суб}} = 0,3\%$.

Ошибка округления $\sigma_{\text{окр}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,029$

Суммарная ошибка эксперимента составила $\sigma_{\Sigma} = 2,251\%$, что не превышает допустимой погрешности при измерении расхода жидкости в 5%.

3.3.3 Погрешность измерений перепада давлений

Для определения ошибки при измерении перепада давлений радиальными манометрами Watts F+R200 50/6 1/4" использован метод сложения ошибок.

Погрешность прибора составляет 2,5%.

Субъективная ошибка $\sigma_{\text{суб}} = 0,3\%$.

Ошибка округления $\sigma_{\text{окр}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,29$.

Суммарная ошибка эксперимента составила $\sigma_{\Sigma} = 2,535\%$, что не превышает допустимой погрешности при измерении расхода жидкости в 5%.

3.6. Выводы по третьему разделу

1. Использованная методика проведения эксперимента дала возможность обосновать теоретические предпосылки и получить исходные данные для оптимизации параметров работы ИТП на базе МТА.

2. В результате математической обработки результатов, полученных в ходе проведения дробно факторного эксперимента, получены уравнения регрессии, отображающие зависимость расхода теплоносителей и изменения давлений на различных участках схемы ИТП на базе МТА в зависимости от изменения наружной температуры. С помощью критерия Фишера и Стьюдента доказана адекватность полученных уравнений регрессии.

3. Полученные уравнения регрессии могут быть использованы при разработке методики проектирования ИТП на базе МТА.

4. Метрологический анализ выполнения эксперимента показал, что погрешность измерений температур, давлений в контурах и расходов теплоносителей не превышает допустимых значений.

5. Полученные экспериментальные данные позволили построить номограммы для определения оптимальных режимов работы ИТП на базе МТА в пределах экспериментальной установки. Что дает возможность построения номограмм для промышленной установки, при соответствующем анализе внедрения (Приложение В).

РАЗДЕЛ 4

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

4.1 Подключение абонентов к тепловой сети

При расчете гидравлических режимов работы тепловой сети при независимом подключении систем отопления и горячего водоснабжения основополагающим становится определение потерь давления как в самой тепловой сети, так и в местных абонентских установках, а затем по полученным данным строится пьезометрический график и подбираются циркуляционные насосы для контура отопления и систем горячего водоснабжения.

Суммарные потери давления в тепловой сети складываются из потерь давления в бойлерах ТЭЦ или в котлах при централизованном теплоснабжении от больших районных котельных, которые составляют 300-350 кПа, потерь давления в подающем и обратном трубопроводе тепловой сети и потерь давления в наиболее удаленных абонентских установках

$$\Delta H_{\text{CH}} = \Delta H_{\text{бойл.}}^{\text{ТЕЦ}} + \Delta H_{\text{под}}^{\text{ТР}} + \Delta H_{\text{обр}}^{\text{ТР}} + \Delta H_{\text{аб}}, \quad (4.1)$$

где $\Delta H_{\text{бойл.}}^{\text{ТЕЦ}}$ – потери давления в бойлере тепловой сети или в котле, кПа;

$\Delta H_{\text{под}}^{\text{ТР}}$ – потери давления в подающем трубопроводе тепловой сети, кПа;

$\Delta H_{\text{обр}}^{\text{ТР}}$ – потери давления в обратном трубопроводе тепловой сети, кПа;

$\Delta H_{\text{аб}}$ – потери давления в абонентской установке потребителя, кПа.

Построив график давлений для тепловой сети, можно определить потери давления в местных системах отопления и горячего водоснабжения, а также давления в точках подключения этих абонентов (Рис. 4.1).

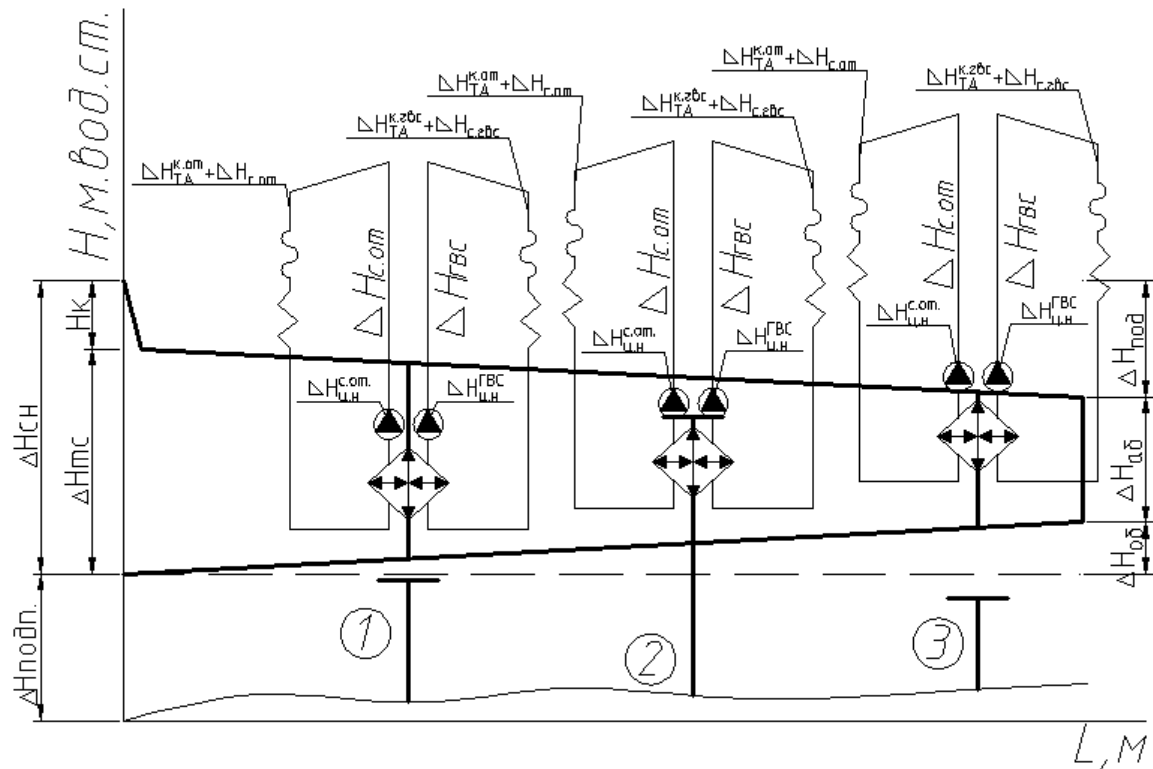


Рисунок 4.1 Пьезометрический график тепловой сети с независимым присоединением абонентских систем ОВ и ГВС с помощью ИТП на базе МТА

По пьезометрическому графику можно определить давление циркуляционного насоса для систем отопления по формуле

$$\Delta H_{\text{ЦН}}^{\text{ОТ}} = \Delta H_{\text{ТА}}^{\text{ОТ.кон.}} + \Delta H_{\text{сист.}}^{\text{ОТ}} + \Delta H_{\text{геом.}}^{\text{зд.}}, \quad (4.2)$$

где $\Delta H_{\text{ТА}}^{\text{ОТ.кон.}}$ – потери давления в теплообменном аппарате, принимаются 50...80 кПа на п.м.;

$\Delta H_{\text{сист.}}^{\text{ОТ}}$ – потери давления в системе отопления, кПа.

$\Delta H_{\text{геом.}}^{\text{зд.}}$ – высота здания, м.

Подбор циркуляционного насоса, устанавливаемого в контуре системы горячего водоснабжения, осуществляется по формуле

$$\Delta H_{\text{ЦН}}^{\text{ГВС}} = \Delta H_{\text{ТА}}^{\text{ГВС}} + \Delta H_{\text{сист.}}^{\text{ГВС}} + \Delta H_{\text{геом.}}^{\text{зд.}} + \Delta H_{\text{ЦН}}^{\text{ГВС}} + \Delta H_{\text{своб.}}, \quad (4.3)$$

где $\Delta H_{\text{ТА}}^{\text{ГВС}}$ – потери давления в теплообменном аппарате контура ГВС, кПа;

$\Delta H_{\text{сист.}}^{\text{ГВС}}$ – потери давления в системе горячего водоснабжения, кПа;

$\Delta H_{\text{своб.}}$ – свободное падение на выходе из водоразборного смесителя, принимается равным 50 кПа.

Пьезометрическое давление, создаваемое совместной работой сетевыми и повысительными насосами, определяет давление во всех точках системы.

Так как абонентская система отопления и горячего водоснабжения подключается по независимой схеме к тепловой сети, то в задание расчета гидравлического режима входит определение потерь давления в этих системах.

Сопротивление, развиваемое насосом, можно определить по формуле

$$S_{\text{н}} = \frac{H_{\text{п}}}{V_{\text{п}}^2}, \quad (4.4)$$

где $H_{\text{п}}$ – давление развиваемое насосом, кПа;

$V_{\text{п}}$ – перекачиваемый теплоноситель, м³/ч.

Гидравлические характеристики теплообменников определяются по формулам

$$\begin{aligned} S_{\text{ТА}}^{\text{ОТ}} &= \frac{\Delta H_{\text{ТА}}^{\text{ОТ}}}{V_{\text{ОТ}}^2}, \\ S_{\text{ТА}}^{\text{ГВС}} &= \frac{\Delta H_{\text{ТА}}^{\text{ГВС}}}{V_{\text{ГВС}}^2}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $\Delta H_{\text{ТА}}^{\text{ОТ}}$ и $\Delta H_{\text{ТА}}^{\text{ГВС}}$ – потери давления, кПа в соответствующих контурах теплообменного аппарата для прохода объема теплоносителей контура отопления $V_{\text{ОТ}}$, м³/ч и системы горячего водоснабжения $V_{\text{ГВС}}$, м³/ч.

Суммарное падение давления на участке трубопровода длиной l , м, складывается из потерь давления по длине и на местных сопротивлениях

$$\Delta H = \Delta H_{\text{л}} + \Delta H_{\text{м.с.}} = \Delta h_{\text{л}} \cdot (l + l_{\text{э}}) = S_{\text{у}} \cdot (l + l_{\text{э}}) \cdot V^2. \quad (4.6)$$

Удельные линейные потери давления $h_{\text{л}}$, определяются по формуле Д'Арс

$$h_{\text{л}} = \frac{\lambda \omega^2}{d \cdot 2g} = 6,35 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda \cdot \frac{V^2}{d^2}, \quad (4.7)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

ω – скорость движения теплоносителя, м/с;

d – внутренний диаметр трубы, м;

V – объемный расход теплоносителя, м³/ч.

Коэффициент гидравлического трения определяется по формуле

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_{\text{э}}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (4.8)$$

где $k_{\text{э}} = 0,5$ мм или $k_{\text{э}} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м – эквивалентная шероховатость трубопровода для водяных тепловых сетей.

При больших числах критерия Рейнольдса формула А.Д. Альтшуля совпадает с формулой Б.Л. Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25}. \quad (4.9)$$

В данном случае величина λ не зависит от расхода теплоносителя, а линейное падения давления в трубопроводе согласно формуле (4.7) пропорционально расходу теплоносителя, тогда формула имеет вид

$$h_{\text{л}} = \frac{0,7}{10^9} k_{\text{э}}^{0,25} \frac{V^2}{d^{5,25}}. \quad (4.10)$$

Удельное сопротивление трубопровода

$$S_y = \frac{h_{\text{л}}}{V^2} = \frac{0,7}{10^2} \cdot \frac{k_{\text{э}}^{0,25}}{d^{5,25}}. \quad (4.11)$$

При $k_3 = 0,5 \cdot 10^{-4}$ (м) эквивалентная шероховатость трубопровода определяется

$$S_y = \frac{1,05}{10^7} \cdot \frac{1}{d^{5,25}} = \frac{1,05}{10^7 \cdot d^{5,25}}. \quad (4.12)$$

Значения удельных сопротивлений в зависимости от их диаметров представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 Удельные потери давления в трубопроводах при изменении диаметров

1	Условный проход D_y , мм	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150
2	$S_y = \frac{1,05}{10^7 \cdot d^{5,25}} \text{ мм} \cdot \text{ч}^2 / (\text{м}^6 \cdot \text{м})$	567,6	67,5	18,1	6,3	2,3	0,64	0,121	$4,97 \cdot 10^{-2}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$	$5,55 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$

4.2 Конструктивный расчет МТА змеевикового типа

Конструктивный тепловой расчет связан с проектированием новых аппаратов и имеет конечной целью определение поверхности теплообмена, обеспечивающей необходимую теплопроизводительность при заданных температурах и расходах рабочих сред. Для выполнения конструктивного расчета исходят из опыта эксплуатации существующих теплообменных установок или на основании результатов опытно – конструкторских разработок и проведенных испытаний выбирают тип аппарата, его конструктивную схему, схему относительного движения потоков, материалы для изготовления конструктивных элементов [69...72].

Расчет трехконтурного теплообменника змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения от централизованных систем теплоснабжения основан на совместном решении уравнения теплового баланса и уравнения теплопередачи

$$Q = G_1 \cdot \Delta i_1 = G_2 \cdot \Delta i_2 + G_3 \cdot \Delta i_3 + Q_{\text{п}}, \quad (4.13)$$

где G_1, G_2, G_3 – расход первичного и вторичного теплоносителей для систем отопления и горячего водоснабжения, кг/с;

$\Delta i_1, \Delta i_2, \Delta i_3$ – изменение энтальпий первичного и двух вторичных теплоносителей, кДж/кг;

$Q_{\text{п}}$ – тепловые потери теплообменным аппаратом, Вт.

Если тепловые потери в окружающую среду выражать в долях от количества теплоты, полученного вторичными теплоносителями, то уравнение (4.13) примет вид

$$Q = G_1 \cdot \Delta i_1 = \eta_{\text{п}}(G_2 \cdot \Delta i_2 + G_3 \cdot \Delta i_3), \quad (4.14)$$

где $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент тепловых потерь, определяемый опытным путем, для систем теплоснабжения с ИТП тепловые потери в пределах здания составляют не более 5%, т.е. принимается $\eta_{\text{п}} = 0,95 \dots 0,98$.

Расходы теплоносителей при теплообмене без изменения агрегатного состояния теплоносителей определяют на основании уравнения (4.14) по формулам

$$G_1 = \frac{G_2 \cdot c_2 (t_2^{\text{II}} - t_2^{\text{I}})}{c_1 (t_1^{\text{I}} - t_1^{\text{II}}) \cdot \eta_{\text{п}}}, \text{ кг/с}; \quad (4.15)$$

$$G_2 = \frac{G_1 \cdot c_1 (t_1^{\text{II}} - t_1^{\text{I}})}{c_2 (t_2^{\text{I}} - t_2^{\text{II}}) \cdot \eta_{\text{п}}}, \text{ кг/с}; \quad (4.16)$$

$$G_3 = \frac{G_1 \cdot c_1 (t_1^{\text{II}} - t_1^{\text{I}})}{c_3 (t_3^{\text{I}} - t_3^{\text{II}}) \cdot \eta_{\text{п}}}, \text{ кг/с}, \quad (4.17)$$

где $G_2 \cdot c_2 = W_2, G_3 \cdot c_3 = W_3$ и $G_1 \cdot c_1 = W_1$ – водяные эквиваленты теплоносителей, отношение которых при $\eta_{\text{п}} = 1,0$ обратно пропорционально изменению температур однофазных сред, т.е.

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{t_2^{\parallel} - t_2^{\perp}}{t_1^{\parallel} - t_1^{\perp}} \text{ и } \frac{W_1}{W_3} = \frac{t_3^{\parallel} - t_3^{\perp}}{t_1^{\parallel} - t_1^{\perp}}. \quad (4.18)$$

Уравнение теплоотдачи в общем виде можно представить следующим образом, Вт

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}}, \quad (4.19)$$

для ИТП на базе МТА уравнение теплопередачи будет иметь вид, Вт

$$Q_{\text{МТА}} = Q_o + Q_{\text{ГВ}} + Q_{\text{п}}, \quad (4.20)$$

где Q_o – теплота, расходуемая в системе отопления здания, Вт;

$Q_{\text{ГВ}}$ – то же, в системе горячего водоснабжения, Вт;

$Q_{\text{п}}$ – тепловые потери, Вт.

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·град);

F – расчетная поверхность теплообмена, м²;

$\Delta t_{\text{ср}}$ – средний температурный напор, °С.

Расчетная поверхность теплообмена, м², определяется как

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{\text{ср}}}, \quad (4.21)$$

для МТА змеевикового типа

$$F = F_1 + F_2;$$

$$F_1 = \frac{Q_o}{K_1 \cdot \Delta t_1^{\text{ср}}}; \quad F_2 = \frac{Q_{\text{ГВ}}}{K_2 \cdot \Delta t_2^{\text{ср}}}, \quad (4.22)$$

где Q_o и $Q_{ГВ}$ – расчетные расходы теплоты на отопление, и горячее водоснабжение, Вт;

k_1 и k_2 – коэффициенты теплопередачи соответствующих контуров, Вт/(м²·°С);

$\Delta t_{ср1}$ и $\Delta t_{ср2}$ – средние температурные напоры, °С.

Конструктивно поверхности нагрева F_1 и F_2 для змеевикового теплообменника определяются из выражения

$$F_1 = L_1 \cdot \pi d_1^{тр}, F_2 = L_2 \cdot \pi d_2^{тр}, \quad (4.23)$$

где L_1 и L_2 – общая длина змеевиков, соответствующих контуров системы отопления и горячего водоснабжения, м;

$d_1^{тр}$ и $d_2^{тр}$ – наружные диаметры трубок змеевиков, м.

Общая длина змеевиков L_1 и L_2 определяется из выражения

$$L_1 = l_1 \cdot n_1 = \pi \cdot D_{зм1} \cdot n_1; \quad L_2 = l_2 \cdot n_2 = \pi \cdot D_{зм2} \cdot n_2, \quad (4.24)$$

где $D_{зм1}$ и $D_{зм2}$ – диаметры витков змеевиков для системы отопления и ГВ, м;

l_1 и l_2 – длина одного витка змеевиков для отопления и горячего водоснабжения, м;

n_1 и n_2 , – число витков в змеевиках, шт.

Более точно длину одного витка змеевиков в трехконтурном теплообменнике можно определить, м,

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{\pi D_{зм1}^2 + h_1^2} \approx \pi D_{зм1} \\ l_2 &= \sqrt{\pi D_{зм2}^2 + h_2^2} \approx \pi D_{зм2} \end{aligned} \quad (4.25)$$

где h_1 и h_2 – расстояние между осями сходных витков змеевика с их диаметрами $D_{зм1}$ и $D_{зм2}$, м.

Характер расчетной зависимости для определения температурного напора $\Delta t_{\text{ср}}$ зависит от направлений взаимного движения теплоносителей [98...106].

При противотоке и прямотоке, а также при постоянной температуре одной из сред, °С

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}}, \quad (4.26)$$

где Δt_6 и Δt_M – соответственно больший и меньший температурный напор между теплоносителями по краям поверхности теплообмена, °С.

Для трехконтурного теплообменника определяются температурные напоры $\Delta t_{\text{ср1}}$ и $\Delta t_{\text{ср2}}$, соответственно для отопительного контура и горячего водоснабжения, °С

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{ср1}} &= \frac{(t_1^I - t_2^{II}) - (t_1^{II} - t_2^I)}{\ln \frac{t_1^I - t_2^{II}}{t_1^{II} - t_2^I}} \cdot \varphi_1; \\ \Delta t_{\text{ср2}} &= \frac{(t_1^I - t_3^{II}) - (t_1^{II} - t_3^I)}{\ln \frac{t_1^I - t_3^{II}}{t_1^{II} - t_3^I}} \cdot \varphi_2, \end{aligned} \quad (4.27)$$

где t_1^I и t_1^{II} – температуры греющего теплоносителя на входе в аппарат и выходе из него, °С;

t_2^I и t_2^{II} – то же для нагреваемого теплоносителя для отопительного контура, °С;

t_3^I и t_3^{II} – то же для контура горячего водоснабжения, °С;

φ_1 и φ_2 – поправочные коэффициенты, определяемые как функция вспомогательных величин P_1 , P_2 и R_1 , R_2 , причем

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{t_1^{II} - t_2^I}{t_1^I - t_2^{II}} \text{ и } R_1 = \frac{t_1^I - t_2^{II}}{t_2^{II} - t_2^I}; \\ P_2 &= \frac{t_3^{II} - t_3^I}{t_1^I - t_3^{II}} \text{ и } R_2 = \frac{t_1^I - t_3^{II}}{t_3^{II} - t_3^I}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Значения поправочных коэффициентов ϕ_1 и ϕ_2 для различных схем движения теплоносителей приведены на графиках [49–52], а их действительная величина колеблется от 0,5 до 1,0. В большинстве случаев $\phi=0,7\dots0,85$.

Определение среднего коэффициента теплоотдачи в гладких трубах определяется:

- для ламинарного режима

$$Nu = 0.15 Re_{ж,d}^{0.33} \cdot Pr_{ж}^{0.33} (Gr_{ж,d} \cdot Pr_{ж})^{0.1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0.25} \cdot \bar{\varepsilon}_e; \quad (4.29)$$

- для турбулентного режима

$$Nu_{ж,d} = 0,021 Re_{ж,d}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \bar{\varepsilon}_e, \quad (4.30)$$

где $Re_{ж,d} = \frac{\bar{v} \cdot d_3}{\nu}$ – критерий Рейнольдса;

$Pr_{ж} = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля при средней температуре жидкости;

$G_{ж,d} = \frac{g \beta \Delta T d^3}{\nu^2}$ – критерий Грасгофа при средней температуре жидкости;

$Pr_{ст}$ – критерий Прандтля при средней температуре стенки;

\bar{v} – средняя скорость движения жидкости, м/с;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

g – ускорение свободного падения, м/с²;

d – определяющий диаметр, м;

a – коэффициент температуропроводности жидкости, м²/с;

β – температурный коэффициент объемного расширения, 1/°С;

ΔT – температурный напор между средней температурой жидкости и средней температурой стенки, 1/°С;

$\bar{\varepsilon}_e$ – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы [72].

Коэффициент теплопередачи для контура системы отопления определяется, Вт/(м²·°C)

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1-1}} + \frac{\delta_{тр1}}{\lambda_{тр1}} + \frac{\delta_{нак1}}{\lambda_{нак1}} + \frac{1}{\alpha_{2-1}}}; \quad (4.31)$$

для контура ГВС, Вт/(м²·°C)

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1-2}} + \frac{\delta_{тр2}}{\lambda_{тр2}} + \frac{\delta_{нак2}}{\lambda_{нак2}} + \frac{1}{\alpha_{2-2}}}. \quad (4.32)$$

Суммарный коэффициент теплопередачи для трехконтурного теплообменника змеевикового типа составит, Вт/(м²·°C)

$$K_{общ}^{3-x} = \frac{K_1 \cdot F_1^{OT} + K_2 \cdot F_2^{ГВ} + K_3 \cdot F_3^{ТО}}{F_1^{OT} + F_2^{ГВ} + F_3^{ТО}}. \quad (4.33)$$

где K_3 – коэффициент теплопередачи через корпус теплообменника горячей воде, находящейся в емкости бака-аккумулятора ПАУ с трехконтурным теплообменником, Вт/(м² · °C);

F_3 – поверхность корпуса теплообменника, м².

4.3 Схема автоматизированного ИТП с МТА

Разработка автоматизированной схемы ИТП на базе МТА осуществляется для усовершенствования теплоснабжения здания в соответствии с современными требованиями. Основными задачами является организация учета потребления тепловой энергии потребителем, а также сокращение потребления тепла при улучшении уровня теплового комфорта в обслуживаемых помещениях.

Применение ИТП на базе МТА позволит:

- оптимизировать распределение тепловой нагрузки;
- автоматически управлять гидравлическими и тепловыми режимами внутренней системы теплоснабжения здания;
- снизить расход теплоносителя в тепловой сети;
- сэкономить энергоресурсы;
- уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Разработанная схема решает множество задач, а именно:

- регулирование температуры теплоносителя, подаваемого в систему отопления, в зависимости от температуры наружного воздуха;
- регулирование температуры воды на выходе из теплообменного аппарата и на выходе из бака-аккумулятора;
- контроль температуры теплоносителя, поступающего и уходящего в тепловую сеть;
- ускоренный прогрев здания после энергосберегающего режима;
- коррекция режима теплоснабжения по температуре воздуха в помещении;
- ограничение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе системы отопления.

Существует множество программных комплексов и датчиков для автоматизации ИТП, но иерархическая схема автоматизированных систем управления у всех комплексов примерно одинакова, как показано на рис. 4.2.

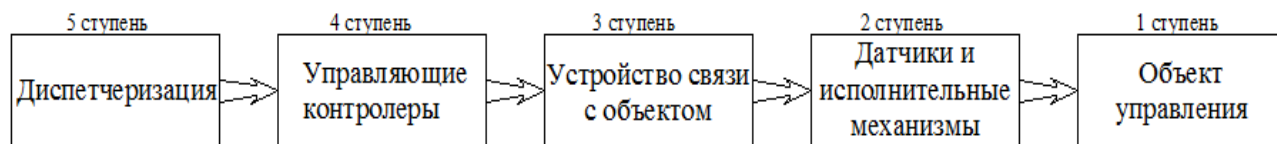


Рисунок 4.2 Иерархическая схема автоматизированных систем управления ИТП.

Уровень 1 - объект управления. Под объектом управления понимается не только отдельное технологическое устройство (например, насос), а все объекты и установки, участвующие в процессе теплоснабжения (в данном случае) или во взаимосвязанных процессах (например, отопление и горячее водоснабжение).

Уровень 2 - датчики и исполнительные устройства. Этот уровень содержит компоненты, предоставляющие информацию о состоянии процессов теплоснабжения (датчики), и компоненты, воздействующие на объекты управления (исполнительные устройства).

Уровень 3 - устройства связи с объектами. Данный уровень включает компоненты, обеспечивающие сопряжение (преобразование сигналов) вычислительных устройств и управляющих контроллеров с датчиками и исполнительными устройствами.

Уровень 4 - управляющие контроллеры. Уровень включает вычислительные устройства, обеспечивающие непосредственное управление объектами управления или компонентами схемы систем автоматизированного управления.

Уровень 5 – диспетчеризация. Этот уровень систем автоматизированного управления содержит компоненты, обеспечивающие визуализацию, архивирование и распечатку данных о параметрах процессов теплоснабжения и воздействиях эксплуатационного или ремонтного персонала на регулируемые процессы [111-121].

Такая иерархическая схема автоматизации была применена при разработке схемы ИТП на базе МТА (Рис. 4.3).

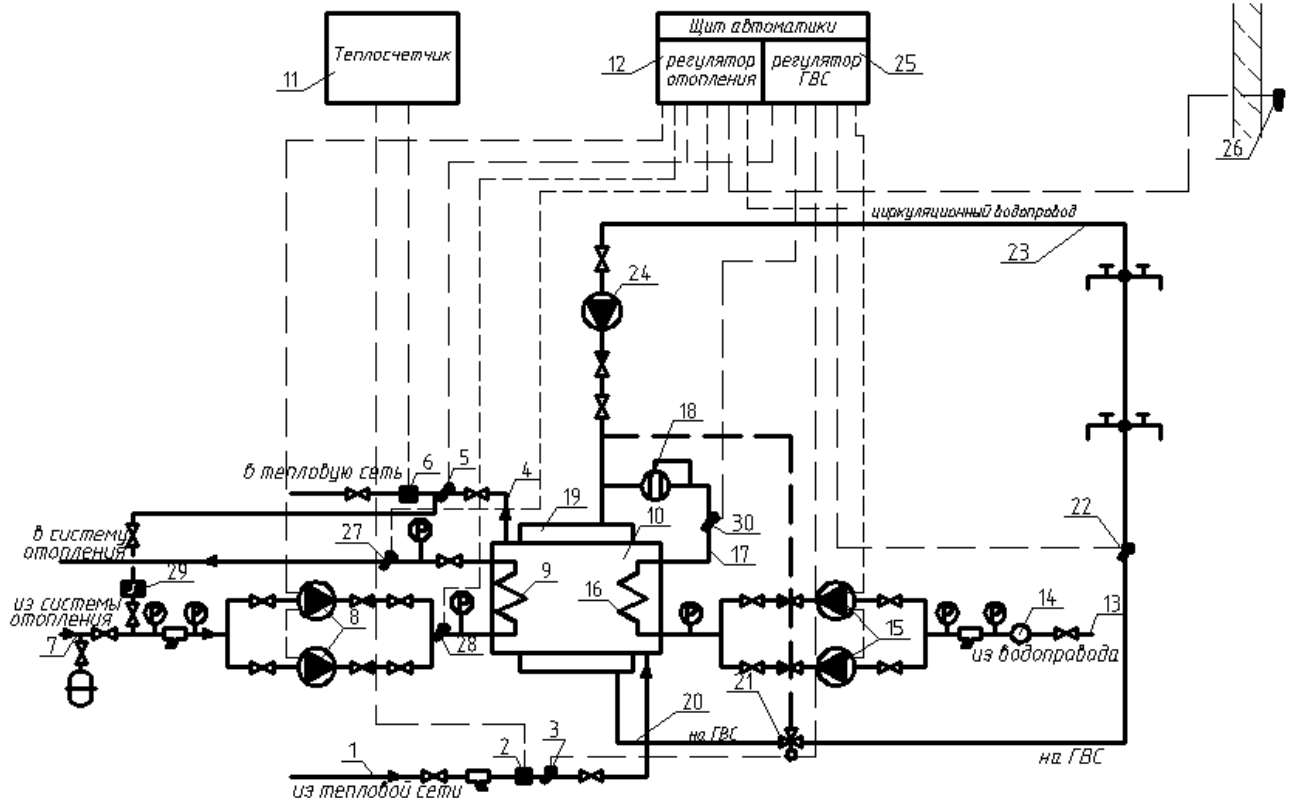


Рисунок 4.3 Принципиальная автоматизированная схема ИТП на базе МТА

☰ – мембранный расширительный бак;

✕ – кран шаровой;

◀ – обратный клапан;

□ – фильтр сетчатый.

Принцип работы ИТП с МТА заключается в следующем.

В первичный контур по трубопроводу 1 поступает теплоноситель из тепловой сети, проходит через регулирующий клапан 2 и тепловой датчик 3, в котором считывается температура греющего теплоносителя и подается сигнал на ультразвуковой тепловой счетчик 11. Затем теплоноситель поступает в МТА и отдает часть теплоты вторичным контурам отопления и ГВС, после чего поступает в обратный трубопровод 4, где обратный теплоноситель проходит через датчик температуры 5 и регулирующий клапан 6. Далее теплоноситель возвращается на повторный нагрев к источнику теплоты.

Теплоноситель для системы отопления по трубопроводу 7 с помощью циркуляционных насосов 8 поступает во вторичный контур МТА 9 (контроль

температуры на входе в теплообменный аппарат осуществляется с помощью датчика 28). В МТА происходит теплообмен между первичным теплоносителем, который циркулирует в контуре 10 и поступает в подающий трубопровод системы отопления, и вторичным теплоносителем. В трубопроводе вторичный теплоноситель проходит через датчик измерения температуры и регулятор расхода 27, после чего поступает в систему отопления. Подпитка системы отопления осуществляется с помощью реле давления 29 из обратной линии тепловой сети. Корректировка работы контура отопления в зависимости от изменения температуры наружного воздуха осуществляется с помощью датчика температуры наружного воздуха 26, сигнал от которого поступает на щит автоматики регулирования контура отопления 12.

Работа контура ГВС осуществляется с помощью трубопровода с холодной водой 13, из которого наполняется накопительная емкость запаса воды 14 (во избежание падения давления в трубопроводе холодного водоснабжения у потребителя), после чего из накопительной емкости с помощью насосов 15 теплоноситель попадает в теплообменный аппарат контура ГВС 16. В результате осуществления процесса теплообмена горячая вода попадает в трубопровод 17, проходит через температурный датчик 30 и регулятор расхода 18, попадает в бак-аккумулятор 19, где теплоноситель дополнительно догревается за счет теплообмена с корпусом теплообменного аппарата 10 (что позволяет получать более высокие температуры на выходе из бака-аккумулятора). Из бака-аккумулятора горячая вода поступает в трубопровод 20 и проходит через термосмесительный элемент 21 и датчик температуры 22, затем поступает к потребителю горячей воды. Невостребованная горячая вода по циркуляционному трубопроводу 23 с помощью циркуляционного насоса 24 поступает в бак-аккумулятор 19 на повторный нагрев. Регулирование работы контура ГВС осуществляется с помощью автоматики регулирования 25.

Предложенная схема позволяет полностью автоматизировать работу ИТП с МТА и исключить присутствие обслуживающего персонала в нормальном режиме эксплуатации теплового пункта [133, 134].

4.4 Технико-экономическая оценка реконструкции внутриквартальной тепловой сети

В данной работе производится анализ экономической эффективности реконструкции внутриквартальной тепловой сети, которая расположена в Кировском районе города Донецка. Данная реконструкция производилась для девятиэтажной и пятиэтажной жилой застройки. Проектом предусмотрен отказ от ЦТП и соответственно переход на двухтрубную внутриквартальную тепловую сеть с использованием ИТП на базе МТА.

Целью данного анализа будет определение экономической эффективности реализации данных проектов реконструкции внутриквартальной тепловой сети. В результате экономического анализа получены характеристики данных проектов и выделены основные приблизительные удельные показатели, которые станут основой для дальнейших оценок экономической эффективности в этой сфере.

Для реконструкции внутриквартальной тепловой сети с девятиэтажной застройкой с внедрением ИТП на базе МТА был разработан проект для десяти зданий, где для каждого здания в подвальном помещении устанавливается ИТП на базе МТА.

Основными параметрами для проектирования были приняты:

- тепловая нагрузка на отопление одного здания $Q = 223$ кВт;
- тепловая нагрузка на ГВС одного здания $Q = 250$ кВт.

Параметры теплоносителей тепловой сети:

- температура на входе в МТА $t_1 = 120^\circ\text{C}$;
- температура на выходе из МТА $t_1 = 70^\circ\text{C}$.

Параметры теплоносителя для системы отопления:

- температура на входе в теплообменный аппарат $t_1 = 90^\circ\text{C}$;
- температура на выходе из теплообменного аппарата $t_1 = 65^\circ\text{C}$.

Параметры теплоносителя для системы ГВС:

- температура на входе в теплообменный аппарат $t_1 = 5^\circ\text{C}$;
- температура на выходе из теплообменного аппарата $t_1 = 55^\circ\text{C}$.

Прибыль от реализации проекта состоит в основном из средств, высвобожденных при экономии энергоресурсов в процессе эксплуатации ИТП на базе МТА.

Затраты на проект определяются следующими пунктами:

- капитальные затраты при реконструкции внутриквартальной тепловой сети с ИТП на базе МТА;
- затраты на электроэнергию, потребляемую электрооборудованием ИТП;
- заработная плата обслуживающего персонала с необходимыми отчислениями в социальные фонды;
- затраты на плановые и капитальные ремонты в процессе эксплуатации оборудования;
- амортизационные отчисления.

Экономические характеристики инвестиционного проекта реконструкции ИТП на базе МТА для девятиэтажной застройки сведены в (Табл. 4.2).

Таблица 4.2 Показатели рентабельности инвестиционного проекта для девятиэтажной застройки

Показатель	Единицы измерения	Значение
Чистый дисконтированный доход	тыс.руб.	646,602
Индекс рентабельности инвестиций	-	1,12
Дисконтированный период окупаемости	лет	15,1
Внутренняя норма доходности	%	9,92

Чистый дисконтированный доход представляет собой разницу между суммой дисконтированных денежных поступлений, получаемых в результате реализации инвестиционного проекта, и суммой затрат, необходимых для реализации этого проекта. В инвестиционном проекте реконструкции внутриквартальной тепловой сети с девятиэтажной застройкой этот показатель составил 646,602 тыс. руб.

Индекс рентабельности инвестиций – это показатель, позволяющий определить, в какой мере возрастает ценность фирмы (богатство инвестора) в расчете на 1 ед. инвестиций. Данный показатель характеризует уровень доходов на единицу затрат, т.е. эффективность вложений, а его экономический смысл заключается в следующем: чем больше значение этого показателя, тем выше отдача каждой денежной единицы, инвестированной в данный проект. В проекте с девятиэтажной застройкой этот показатель составляет 1,12 и показывает, что каждый вложенный рубль приносит 1,12 руб.

Дисконтированный период окупаемости - это время, требуемое для покрытия начальных инвестиций за счет чистого денежного потока, генерируемого инвестиционным проектом. В предлагаемом инвестиционном проекте для девятиэтажной застройки время, требуемое для покрытия начальных инвестиций с учетом дисконтирования составляет 15 лет и 1 месяц. В расчетах была использована ставка дисконтирования равная 8% в год и имеющая следующую структуру: 2% - размер дохода, который предполагается получить по завершении реализации инвестиционного проекта, 4% - учет инфляционных процессов, 2% - компенсация за риск, который может возникнуть при реализации инвестиционного проекта.

Внутренняя норма рентабельности – это такое значение показателя дисконта, при котором приведенное значение потоков денежных средств за счет инвестиций равно первоначальной сумме инвестиций. Для данного инвестиционного проекта с девятиэтажной застройкой этот показатель составляет 9,92% и показывает (по сравнению с 8%) запас прочности проекта [123 – 131].

Основные финансовые показатели рассматриваемого проекта реконструкции для девятиэтажной застройки проиллюстрированы рисунками 4.4 – 4.5.

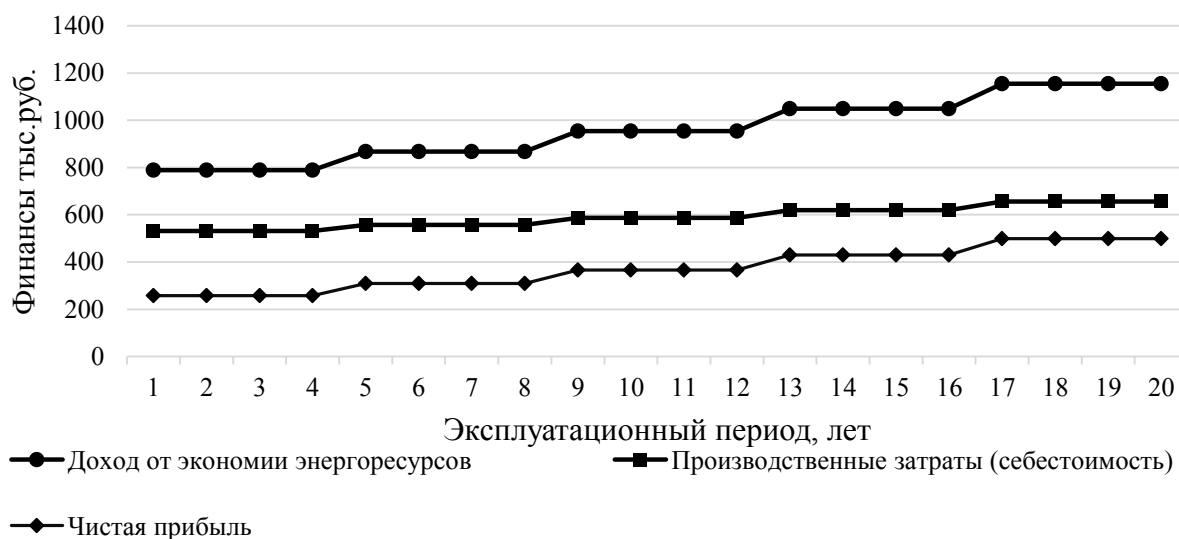


Рисунок 4.4 Основные финансовые показатели по девятиэтажной застройке

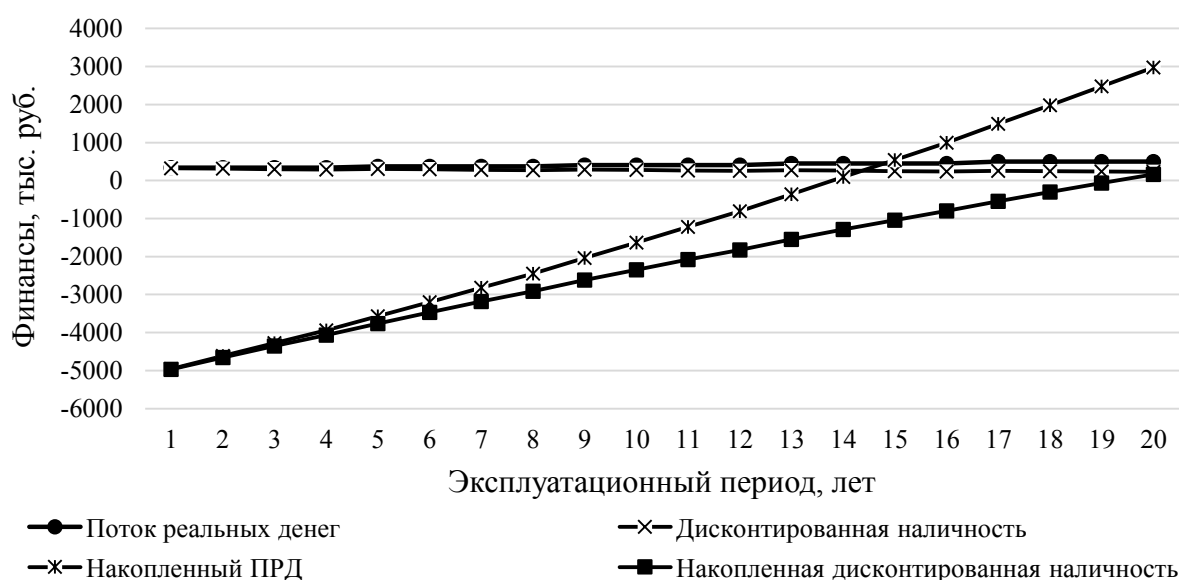


Рисунок 4.5 Движение денежных средств для проекта девятиэтажной застройки

Для реконструкции внутриквартальной тепловой сети с пятиэтажной застройкой с внедрением ИТП на базе МТА был разработан проект для двадцати зданий. ИТП устанавливается на два подъезда в подвальном помещении.

Основными параметрами для проектирования были приняты:

- тепловая нагрузка на отопление одного здания $Q = 130$ кВт;
- тепловая нагрузка на ГВС одного здания $Q = 165$ кВт.

Параметры теплоносителя тепловой сети:

- температура на входе в МТА $t_1 = 120^\circ\text{C}$;
- температура на выходе из МТА $t_2 = 70^\circ\text{C}$.

Параметры теплоносителя для системы отопления:

- температура на входе в теплообменный аппарат $t_1 = 85^\circ\text{C}$;
- температура на выходе из теплообменного аппарата $t_1 = 65^\circ\text{C}$.

Параметры теплоносителя для системы ГВС:

- температура на входе в теплообменный аппарат $t_1 = 5^\circ\text{C}$;
- температура на выходе из теплообменного аппарата $t_1 = 55^\circ\text{C}$.

Экономические характеристики инвестиционного проекта для пятиэтажной застройкой сведены в табл. 4.3

Таблица 4.3 Показатели рентабельности инвестиционного проекта для пятиэтажной застройки

Показатель	Единица измерения	Значение
Чистый дисконтированный доход	тыс. руб.	161,774
Индекс рентабельности инвестиций	-	1,03
Дисконтированный период окупаемости	лет	18,1
Внутренняя норма доходности	%	6,40

Чистый дисконтированный доход для инвестиционного проекта с пятиэтажной застройкой составляет 161,8 тыс.руб.

Индекс рентабельности инвестиций в предлагаемом инвестиционном проекте составляет 1,03 и показывает, что каждый вложенный рубль приносит 1,03 руб.

Дисконтированный период окупаемости для пятиэтажной застройки время, требуемое для покрытия начальных инвестиций с учетом дисконтирования составляет 18 лет и 1 месяц. В расчетах была использована ставка дисконтирования равная 4% в год и имеющая следующую структуру: 0% - размер дохода, который предполагается получить по завершении реализации инвестиционного проекта, 4% - учет инфляционных процессов, 0% - компенсация за риск, который может возникнуть при реализации инвестиционного проекта.

Внутренняя норма рентабельности составляет 6,4% и показывает (по сравнению с 4%) запас прочности проекта.

Основные финансовые показатели рассматриваемого проекта реконструкции для девятиэтажной застройки проиллюстрированы рисунками 4.6 - 4.7.

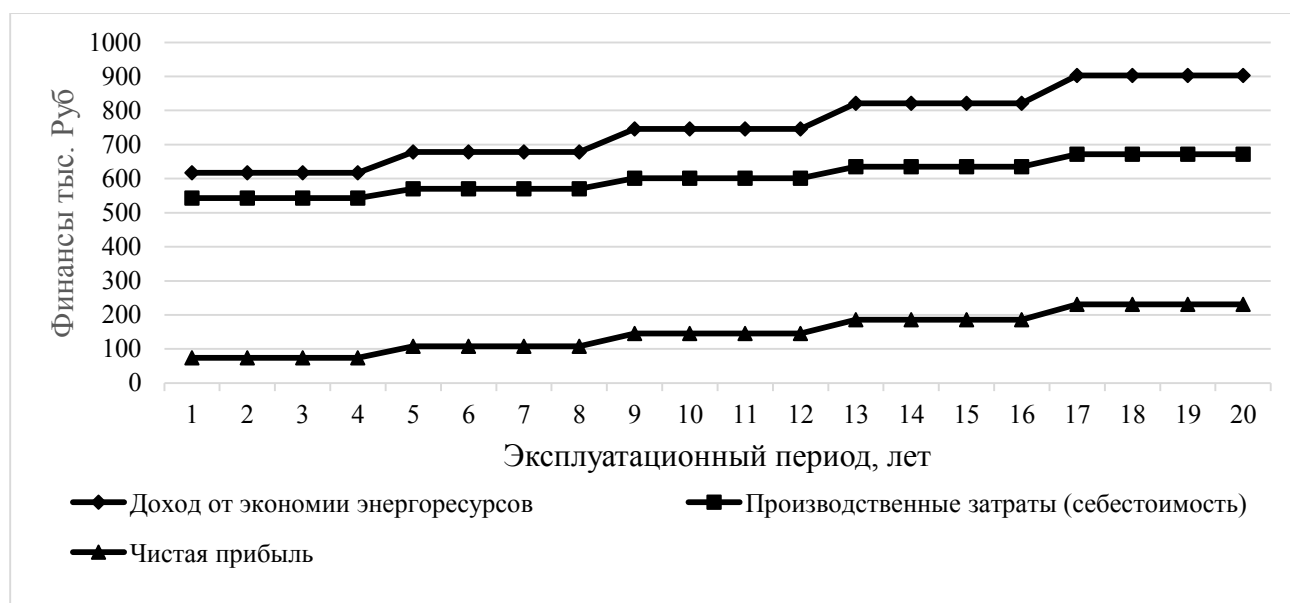


Рисунок 4.6 Основные финансовые показатели по девятиэтажной застройке

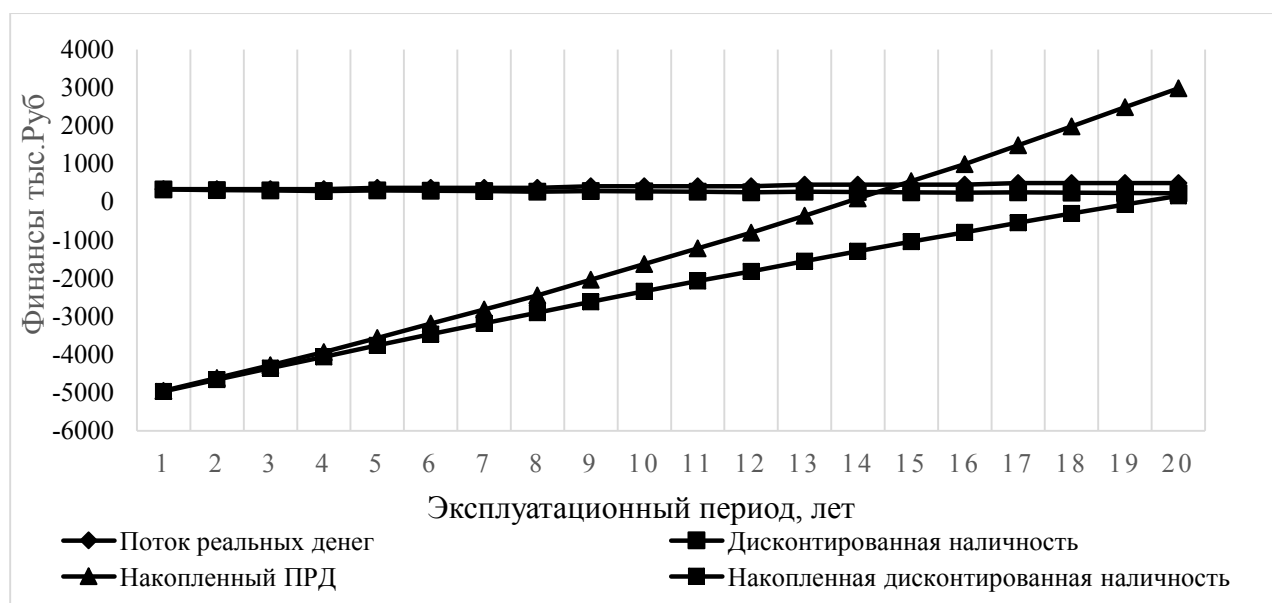


Рисунок 4.7 Движение денежных средств для проекта девятиэтажной застройки

4.5 Выводы по четвертому разделу

1. Разработана методика расчета гидравлического режима тепловой сети с независимой схемой присоединения абонентов к ИТП на базе МТА.
2. Предложена методика расчета МТА змеевикового типа, которая позволяет определять оптимальные размеры теплообменного аппарата и тепловые характеристики.
3. Разработана и внедрена принципиальная схема автоматизированного ИТА на базе МТА при реконструкции в Кировском районе г. Донецка (Приложение В).
4. Чистый дисконтированный доход от инвестиционного проекта при реконструкции внутриквартальной тепловой сети с использованием ИТП на базе МТА для девятиэтажной застройки составил 646,602 тыс. руб. при дисконтируемом периоде окупаемости 15 лет, что говорит о прибыльности и целесообразности внедрения в производстве.
5. Чистый дисконтированный доход от инвестиционного проекта при реконструкции внутриквартальной тепловой сети с использованием ИТП на базе МТА для пятиэтажной застройки составил 161,8 тыс. руб. при дисконтируемом периоде окупаемости 18 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена прикладная научно-техническая задача по повышению эффективности работы систем теплоснабжения с использованием ИТП на базе МТА.

1. Выполненные исследования существующих абонентских подключений к тепловым сетям и математических моделей потокораспределения в тепловых сетях показали целесообразность применения ИТП на базе МТА, так как современное оборудование автоматизации не позволяет поддерживать постоянный перепад давления в системе, что делает невозможным применение элеваторных узлов, которые получили широкое применение в странах СНГ.

2. Разработана математическая модель потокораспределения для ИТП с МТА для оценки влияния неравномерности потребления тепловой энергии. Получены теоретические зависимости для экстраполяции результатов экспериментальных исследований.

3. Усовершенствована математическая модель потокораспределения в двухтрубной внутриквартальной тепловой сети, которая позволяет прогнозировать перепад давления в контурах тепловой сети и отопления и соответственно компенсировать эти перепады за счет автоматического регулирования перепадов в ИТП с МТА.

4. Разработана и внедрена принципиальная схема потокораспределения в ИТП на базе МТА с независимым подключением абонентов при реконструкции внутриквартальной тепловой сети в Кировском районе г. Донецк. Экономическая эффективность от применения ИТП на базе МТА при реконструкции внутриквартальных тепловых сетей:

- для 9-ти этажной застройки при дисконтированном периоде окупаемости 15 лет и 1 месяц чистый дисконтированный доход составит 646,602 тыс. руб.;
- для 5-ти этажной застройки при дисконтированном периоде окупаемости 18 лет и 1 месяц чистый дисконтированный доход составит 161,774 тыс. руб.

5. Разработана принципиальная схема автоматического регулирования ИТП с МТА для независимой схемы подключения абонентов.

6. Предложен алгоритм экономической оценки эффективности ИТП на базе МТА для жилых зданий различной этажности:

- для девятиэтажной застройки индекс рентабельности составляет 1,12, а внутренняя норма доходности – 9,92%;
- для пятиэтажной застройки индекс рентабельности составляет 1,03, внутренняя норма доходности – 6,4%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики: учебное пособие / Л.А. Мелентьев. – М.: «Высшая школа», 1976. – 336 с.
2. Чистович С.А. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.К. Аверьянов, Ю.Я. Темпель, С.И. Быков. – Л.: Стройиздат, 1987. – 248 с.
3. Хрилев Л.С. Оптимизация систем теплофикации и централизованного теплоснабжения / Л.С. Хрилев, И.А. Смирнов; под ред. Е.Я. Соколова. – М.: Энергия, 1978. – 264 с.
4. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 360 с.
5. Андрияшев М.М. Техника расчета водопроводной сети / М.М. Андрияшев. – М.: Советское законодательство, 1932. – 62 с.
6. Булаев Е.Д. О показателе гидравлической устойчивости поточной теплоснабжающей системы / Е.Д. Булаев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1999. – № 1. – С. 85-87.
7. Блочные тепловые пункты Danfoss // АВОК. – 2005. – № 2. – С. 48-49.
8. Братенков В.Н. Многофакторное сравнение вариантов теплоснабжения / В.Н. Братенков, П.А. Хаванов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1990. – №9. – С. 16-18.
9. Генкин Б.И. Горячее водоснабжение городов по схеме непосредственного водоразбора из тепловых сетей / Б.И. Генкин // Электроснабжение и теплоснабжение городов. – 1964. С. 86-102.
10. Кузник И.В. Централизованное теплоснабжение. Проектируем эффективность: монография / И.В. Кузник. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 156 с.

11. Кузник И.В. Российское теплоснабжение. Учет и эксплуатация: эссе / И.В. Кузник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 190 с.
12. Манюк В.И. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.
13. Беляйкина И.В. Водяные тепловые сети: справочное пособие по проектированию / И.В. Беляйкина, В.П. Витальев, Н.К. Громов и др.; под ред. Н.К. Громова. – М.: Энергоиздат, 1988. – 376 с.
14. Пырков В.В. Особенности современных систем водяного отопления / В.В. Пырков. – К.: П ДП «Такі справи», 2003. – 176 с.
15. Petitjean R. Total hydronic balancing: a handbook for design and troubleshooting of hydronic HVAC systems / R. Petitjean. – Gothenburg: TA AB, 1994. – 530 p.
16. Варфоломеев Ю.М. Отопительные и тепловые сети: учебник / Ю.М. Варфоломеев, О.Я. Кокорин. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 480 с.
17. Пырков В.В. Современные тепловые пункты, автоматика и регулирование / В.В. Пырков. – К.: П ДП «Такі справи», 2007. – 252 с.
18. Тарадай А.М. Централизованное поквартальное отопление с регулированием и коммерческим учетом отпуска тепла / А.М. Тарадай, Л.Л. Покровский, А.Ф. Редько и др. // Вентиляция, отопление и теплоснабжение: научн. - тех. сб. – К.: КНУСА. – 2010. – № 14. – С. 36-42.
19. Федоров А.П. Выбор оптимальных величин режимных характеристик магистрального теплопровода / А.П. Федоров // Коммунальное хозяйство городов: респ. межвед. науч. – тех. сб. – К.: Техника. – 1999. – № 18. – С. 133-137.
20. Teekaram A. Variable flow water systems. Design, installation and commissioning guidance / A. Teekaram, A. Palmer. – BSRIA, 16/2002. – 81 p.

21. Тихомиров А.К. Теплоснабжение района города: учеб. пособие / А.К. Тихомиров. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006. – 135 с.
22. Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н.М. Зингер. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.
23. Захаренко С.Е. Справочник строителя тепловых сетей / С.Е. Захаренко, Ю.С. Захаренко, И.С. Никольский и др.; под ред. С.Е. Захаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 184 с.
24. Козин В.Е. Теплоснабжение: учебное пособие для студентов вузов / В.Е. Козин. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.
25. Мелекян З.А. Централизованное теплоснабжение гражданских и промышленных сооружений / З.А. Мелекян. – М.: Стройиздат, 1985. – 200 с.
26. Аксенов М.А. Тепловые сети / М.А. Аксенов. – М. – Л.: Издательство «Энергия», 1965. – 352 с.
27. Ширакс З.Э. Теплоснабжение: пер. с латыш. / З.Э. Ширакс. – М.: Энергия, 1979. – 256 с.
28. Ионин А.А. Теплоснабжение: учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.
29. Айзен М.А. Украина: энергосбережение в зданиях / М.А. Айзен, В.Ф. Гершкович, А.Ф. Горбатовский и др. – К.: Энергетический Центр Европейского Союза, 1995. – 274 с.
30. Nifenecker H. Accelerator driver subcritical reactors / H. Nifenecker, O. Meplan, S. David. – Taylor and Francis, 2003. – 206 p.
31. Олексюк А.А. Расчет и проектирование индивидуальных тепловых пунктов: монография / А.А. Олексюк // Научные труды ДГАСА. Вып. 98-3(5). – Макеевка, 1998. – 105 с.

32. Олексюк А.А. Определение области рационального использования различных систем теплоснабжения / А.А. Олексюк, А.Ф. Радько, А.А. Козлов. // Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции ПГАСА, г. Пенза. – 2003. – С. 36-39.

33. Олексюк А.А. Расчет и проектирование систем горячего водоснабжения от ИТП с подогревательно-аккумуляторными установками / А.А. Олексюк // Охрана окружающей среды: сборник научных трудов. – 1993. – С. 27-30.

34. Олексюк А.А. Выбор оборудования тепловых пунктов при реконструкции систем теплоснабжения / А.А. Олексюк // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность в строительстве: сборник научных трудов. – 1998. – № 98-2(10). – С.72-78.

35. Зингер Н.М. Техничко-экономическое сопоставление независимой и зависимой систем теплоснабжения / Н.М. Зингер // Теплоэнергетика. – 1973. – № 7. – С. 27-30.

36. Олексюк А.А. Экономичные теплоснабжающие системы в условиях дефицита теплоты и электроэнергии / А.А. Олексюк // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность в строительстве: сборник научных трудов. – 1999. – № 99-3 (17). – С.104-105.

37. Кулик В.И. Стабилизация режимов работы систем горячего водоснабжения при закрытом теплоснабжении / В.И. Кулик, А.А. Олексюк // Тезисы докладов Всесоюзного совещания "Совершенствование отопительно-вентиляционных систем и технологии их монтажа". – Л.: 1976. – С. 59-61.

38. Кулик В.И. Применение специальных установок для систем горячего водоснабжения заводов стройиндустрии / В.И. Кулик, А.А. Олексюк, И.Н. Засядько // Материалы НТС. Опыт внедрения многократной циркуляции

теплоносителя в установках для производства строительных изделий и повышения их качества. – К.: Будівельник, 1976. – С. 20-22.

39. Олексюк А.А. Трехконтурный теплообменник / А.А. Олексюк // «Городское хозяйство Украины». – К.: «Будівельник», 1978. – Вып. 1. – С. 13.

40. Олексюк А.А. Исследование нового типа теплообменника для систем теплоснабжения / А.А. Олексюк, А.С. Амберг, Т.В. Кот. - Рукопись: Макеевский инж.-строит. ин-т. – М.:Деп.в ВНИИИС. – Макеевка, № 2942, 1981. - 8с., ил., табл. – Лит.: 3 назв.

41. Вагин Г.Я. Повышение надежности систем энергоснабжения промышленных предприятий путем сооружения собственных мини-ТЭЦ / Г.Я. Вагин, Н.Н. Головкин, А.М. Мамонов // Промышленная электроэнергетика и электротехника. – 2006. – №4. – С. 47-53.

42. Состояние и перспективы тепло – электроснабжения агропромышленных предприятий. Отчет об информационных исследованиях ГНПП «Метэнергомаш». – Харьков, 2003. – 63 с.

43. Хаванов П.А., Барынин К.П. Особенности применения водногликолевых теплоносителей в автономных системах теплоснабжения / П.А. Хаванов, К.П. Барынин // АВОК. – 2003. – №7. – С. 66-68.

44. Тимошенко В.Е. Проведение энергосберегающих мероприятий на территории ЮВАО Москвы / В.Е. Тимошенко // Энергосбережение. – 2007. – № 8. – С. 22-23.

45. Терлецкая А.С. О выборе проектных решений присоединения систем теплоснабжения современных высотных жилых зданий повышенной этажности / А.С. Терлецкая // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – №3. – С.40-41.

46. Николаева А.А. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / А.А. Николаева. – М.: Стройиздат, 1965. – 359 с.

47. Загс М.Л. Расчет закрытой независимой системы теплоснабжения / М.Л. Загс // Теплоэнергетика. – 1973. – № 2. – С. 74-76.

48. Олексюк А.А. Выбор оптимальных параметров подогревательно-аккумуляторных установок для ИТП систем горячего водоснабжения / А.А. Олексюк, А.И. Павленко // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры, 1997. – №97-3(7). – С. 40-44.

49. Олексюк А.А. Комплексная оптимизация параметров водяных систем теплоснабжения / А.А. Олексюк // Коммунальное хозяйство городов: науч. техн. сборник. – К.: «Техника», 2000. – Вып. 25. – С. 189-196.

50. Бланкман В.Д. Автоматизация тепловых сетей и насосно-подогревательных установок ТЭЦ / В.Д. Бланкман, А.П. Сазонова. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 120 с.

51. Соболевский Г.Д. Предпосылки к созданию автоматизированных систем управления теплоснабжением городов / Г.Д. Соболевский, Б.В. Кунцевич, А.А. Олексюк // Материалы НТС. Повышение эффективности систем отопления и кондиционирования воздуха промышленных и жилых зданий. – К.: Будівельник, 1975. – С. 13-15.

52. Б.М. Аше. Способы и схемы присоединения систем отопления зданий абонентов к теплопроводам / Б.М. Аше // Сборник научных трудов I Всесоюзного съезда по теплофикации. – М.: 1931. – С. 238-247.

53. Сорокин А.В. Перестройка системы теплоснабжения. Так ли это просто / А. В. Сорокин // Инженерные системы. – 2004. – №1. – С. 10-14.

54. Сканави А.Н. О расчетной зимней температуре наружного воздуха для проектирования общеобменной вентиляции / А.Н. Сканави // АВОК. – 1967. – № 1. – С. 21-25.

55. Первовский Ю.А. Гидравлический расчет в тепловых сетях: мертвый подход или живая модель / Ю.А. Первовский, О.В. Анподистов // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 1 (41).

56. Будах В.Ф. Определение потерь в сетях коммунального теплоснабжения / В.Ф. Будах, А.Д. Кузнецова // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2010. – №13. – С. 84–91.

57. Некрасов А.С. Современное состояние теплоснабжение России / А.С. Некрасов, Ю.В. Синяк, С.А. Воронова, В.В. Семикашев // Проблемы прогнозирования. – 2011. – №1. – С. 30–43.

58. Басалаев А.А. Модель системы энергоэффективного теплоснабжения зданий / А.А. Басалаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2012. – №23. – С. 216–218.

59. Немировский И.А. Энергоэффективность систем теплоснабжения / И.А. Немировский // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – №18 (102). – С. 25-29.

60. Щекин Р.В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Кн. 1: Отопление и теплоснабжение / Р.В. Щекин и др. – 4-е изд., испр. и доп. – К.: Будівельник, 1976. – 416 с.

61. Hartman Т. Индустрия комфорта: возможности XXI века / Т. Hartman // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха и строительная теплофизика. – 2001. – №3. – С. 16-20.

62. Электронные регуляторы и электрические средства управления. Каталог RC.08.E3.50. – М.: ООО «Данфосс», 2009. – 115 с.

63. Бобух А.А. Повышение энергосбережения закрытого централизованного теплоснабжения города при реконструкции центрального и

модернизации индивидуального тепловых пунктов / А.А. Бобух, Д.А. Ковалев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – №13 (121). – С. 12-18.

64. Кунгс Я.А. Индивидуальный тепловой пункт (Концептуальный проект) / Я.А. Кунгс, Н.В. Цугленок, О.Н. Животов, Е.Ю. Таран // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – №11. – С. 196-199.

65. СП 41-101-95 Проектирование тепловых пунктов. – М.: ОАО «ЦПП», 1995. – 83 с.

66. Козлов В.В. Перспективы развития систем теплоснабжения коммунального хозяйства / В.В. Козлов, В.Ф. Палевин // Сервис в России и за рубежом. – 2013. – № 1. – С.110-122.

67. Жила В.А. Обоснование основных показателей при выборе оптимальной схемы теплоснабжения / В.А. Жила, Ю.Г. Маркевич // Полимер газ. – 2006. – №2 (40). – С. 38-40.

68. Семенов В.Г. Экспресс-анализ зависимости эффективности транспорта тепла от удаленности потребителей / В.Г. Семенов, Р.Н. Разоренов // Новости теплоснабжения. – 2006. – №6 (70). – С. 36-39.

69. Исаев С.Е. Теплообменные аппараты для коммунального хозяйства / С.Е. Исаев, О.Г. Сорокин, П.И. Бажан и др. // Новости теплоснабжения. – 2007. – №4 (80). – С. 50-54.

70. Пелевин Ф.В. Теплообменный кольцевой тракт с компланарными каналами / Ф.В. Пелевин // М.: Издательство МГТУ, 1994. – 16 с.

71. Карасев Н.И. Моделирование установившихся гидравлических режимов больших теплоснабжающих систем с дроссельным управлением / Н.И. Карасев, В.И. Фольгарт и др. // Электронное моделирование. – 1990. – №1. – С. 72-76.

72. Драйцер Г.А. О некоторых проблемах создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов / Г.А. Драйцер // Материалы V Минского международного форума по тепло- и массообмену. – Минск, 2004. – Т. 2. – С. 288–289.

73. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 277 с.

74. Сазонова С.А. Разработка модели анализа невозмущенного состояния системы теплоснабжения при неустановившемся потокораспределении / С.А. Сазонова // Моделирование систем и информационные технологии: межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж: Научная книга, 2006. – Вып. 3. Часть II. – С. 236-239.

75. Сазонова С.А. Разработка модели анализа невозмущенного состояния системы теплоснабжения при установившемся потокораспределении / С.А. Сазонова // Интеллектуализация управления в социальных и экономических системах: труды Всероссийской конференции. – Воронеж: ВГТУ, 2006. – С. 57-58.

76. Сазонова С.А. Разработка модели анализа невозмущенного состояния системы теплоснабжения при неизотермическом течении вязкой среды / С.А. Сазонова, А.Ф. Рогачев // Материалы отчетной научной конференции профессорско-преподавательского состава за 2005 – 2006 учебный год. – Воронеж: Воронежский институт высоких технологий, 2006. – С. 35-36.

77. Сазонова С.А. Разработка модели анализа потокораспределения возмущенного состояния системы теплоснабжения / С.А. Сазонова // Моделирование систем и информационные технологии: межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж: Научная книга, 2007. – Вып. 4. – С. 52-55.

78. Сазонова С.А. Результаты вычислительного эксперимента по апробации математических моделей анализа потокораспределения для систем

теплоснабжения / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2010. – №6. – С. 99-104.

79. Стрекалов А.В. Математические модели гидравлических систем для управления системами поддержания пластового давления / А.В. Стрекалов. – Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. – 661 с.

80. Rimmer P. A remarkable district heating system / P. Rimmer // New of DHDB. – 2003. – №2. – P. 51-55.

81. Gullev L. Introduction of incentive tariffs – a benefit for the anvironment / L. Gullev // New of DBDH. – 2005. – №1. – P. 12-14.

82. Bjork H. From Greenfield to a new district heating system / H. Bjork, E. Steen // New of DBDH. – 2005. – №1. – P. 18-21.

83. Седин А.В. К методу регулирования отпуска теплоты от ТЭЦ / А.В. Седин, П.Ю. Марченко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2008. – №1. – С. 48-54.

84. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков. – М.: Наука, 1985. – 278 с.

85. Меренков А.П. Гидравлические цепи с регулируемыми параметрами и их применение для описания и расчета многониточных нефтепроводов / А.П. Меренков, А.А. Морев, В.Я. Хасилев // Системы энергетики – тенденции развития и методы управления. – Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1980. – Т. 1. – С. 193–204.

86. Хасилев В.Я. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / В.Я. Хасилев, А.П. Меренков, Б.М. Каганович и др.; под ред. В.Я. Хасилева и А.П. Меренкова. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.

87. Ahuja R.K. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications / R.K. Ahuja, T.L. Magnati, J.B. Orlin. – Prentice Hall, New Jersey, 1993. – 863 p.

88. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – М. : Наука, 1970. – 664 с.

89. AWWA (American Water Works Association). Computer Modeling Of Water Distribution Systems. (Manual of water supply practices – M32, 2nd ed.) – American Water Works Association, Denver, Colorado, USA, 2005. – 159 p.

90. Beraldi P. Parallel algorithms for Solving the Convex Minimum Cost Flow Problem / P. Beraldi, F. Guerriero, R. Musmanno // Computational Optimization and Applications. – Kluwer Academic Publishers, 2001. – №18. – P. 175-190.

91. Bertsekas D.P. ε -relaxation and auction methods for separable convex cost network flow problems / D.P. Bertsekas, L.C Polymenakos, P. Tseng // Network Optimization, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer-Verlag, N.Y., 1998. – P. 103-126.

92. Bertsekas D.P. Network Optimization: Continuous and Discrete Models / D.P. Bertsekas. – Athena Scientific, Belmont, Massachusetts, 1998. – 608 p.

93. Birkhoff G. Nonlinear network problems / G. Birkhoff, J.B. Diaz // Quarterly of applied mathematics. – 1956. – Vol. 13, N4. – P. 431-443.

94. Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors / H. Cross // Urbana Illinois: Eng. Exp. Station of Univ. of Illinois. – 1936. – № 286. – 33 p.

95. Ford L.R. Flows in Networks / L.R. Ford, D.R. Fulkerson. – Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1962. – 276 p.

96. Потапенко А.Н. Математическое моделирование процессов отопления распределительного комплекса зданий при различных схемах теплопотребления / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, Е.А. Потапенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т13, №4 (4). – С. 998-1002.

97. Солдатенков А.С. Разработка и исследование математической модели управления автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом /

А.С. Солдатенков, А.П. Потапенко, С.Н. Глаголев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – №1. – С. 41-48.

98. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1965. – 422 с.

99. Меренков А.П. Дифференциация методов расчета гидравлических цепей / А.П. Меренков // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1973, №5. – С. 1237 – 1248.

100. Бажан П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.

101. Берман С.С. Расчет теплообменных аппаратов / С.С. Берман. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 240 с.

102. Гавра Г.Г. Тепловой и гидравлический расчет теплообменных аппаратов компрессорных установок: учебное пособие / Г.Г. Гавра, П.М. Михайлов, В.В. Рис. – Л.: ЛПИ, 1982. – 72 с.

103. Альтшуль А.Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах / А.Д. Альтшуль. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 256 с.

104. Тарасов Ф.И. Теория и расчет поточных теплообменников / Ф.И. Тарасов. – Л.: Издательство ЛГУ, 1975. – 99 с.

105. Юренев В.Н. Теплотехнический справочник / В.Н. Юренев, П.Д. Лебедев. – М.: Энергия, 1975. – 744 с.

106. Ключев А.С. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: справочное пособие / А.С. Ключев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.

107. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.

108. Спирин Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: конспект лекций / Н.А. Спирин, В.В. Лавров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. – 257 с.

109. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк; под ред. Н. П. Бусленко. – М.: Мир, 1972. – 382 с.

110. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: учебное пособие / В.Б. Шашков. – Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.

111. РД 50 – 453 – 83. Методические указания. Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета. – М. : Издательство стандартов, 1984. – с. 18.

112. Светозаров В. В. Элементарная обработка результатов измерений : учебное пособие / В. В. Светозаров. – М.: Изд – во МИФИ, 1983 – 52 с.

113. Аксенов Г.Е. Системы автоматизации и диспетчеризации / Г.Е. Аксенов // Проблемы энергосбережения. – 2001. – №2. – С.12-20.

114. Аксенов Г.Е. Системы автоматизации и диспетчеризации / Г.Е. Аксенов // Проблемы Энергосбережения. – 2001. – №3 – С.20-28.

115. Басин А.С. Общие и региональные проблемы надежности теплообеспечения населения в городах. Структура систем теплообеспечения /А.С.Басин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2002. – №11. – С.60-67.

116. Панферов С. В. Некоторые проблемы энергосбережения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий / С.В. Панферов, А.И. Телегин, В.И. Панферов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. – №22 (198). – С. 79-86.

117. Панферов С.В. Автоматическое управление систем отопления с элеваторным присоединением / С.В. Панферов, В.И. Панферов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – №1, т. 13. – С. 42-47.

118. Панферов С.В. Структурное-параметрический синтез адаптивной системы управления температурным режимом отапливаемых зданий: автореф. дис. работы канд. техн. наук: 05.13.06 / Панферов Сергей Владимирович. – Челябинск, 2011. – 20 с.

119. Чистович С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович. – М.: Стройиздат, 1975. – 159 с.

120. Грановский В.Л. Энергоэффективные системы отопления: тенденции, практика, проблемы / В.Л. Грабовский // АВОК – 2011. – №8. – С. 40-44.

121. Шелудько Л.П. Анализ возможности сокращения «перетопа» тепловых потребителей при «изломе» температурного графика теплосети / Л.П. Шелудько // Новости теплоснабжения. – 2004. – №05. – С. 41-44.

122. Драчнев В.П. Автоматизированная система централизованного управления работой тепловых пунктов / В.П. Драчнев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1982. – №11. – С. 14-17.

123. Идрисов А.Б. Стратегическое планирование и анализ эффективности инвестиций / А.Б. Идрисов, С.В. Картышев, А.В. Постников. – М. : Филинь, 1997. – 272 с.

124. Крылов Э.И. Анализ эффективности инвестиционной и инновационной деятельности предприятия / Э.И. Крылов, В.М. Власова, И.В. Журавкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 2003. – 608 с.

125. Ковалев В.В. Методы оценки инвестиционных проектов / В.В. Ковалев – М.: Финансы и статистика, 2000. – 144 с.
126. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов // В.В. Косов, В.Н. Лившиц, А.Г. Шахназаров. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Экономика, 2000. – 421 с.
127. Верещак В.С. Обоснование экологических инвестиций / В.С. Верещак // Бизнес-информ. – 1999. – № 9-10 – С. 116-118.
128. Стоян А.В. Экономический механизм стимулирования экологизации / А.В. Стоян // Бизнес-информ. – 1998. – № 3. – С. 7-8.
129. Захарченко Д.А. Оценка экологического эффекта на прединвестиционной стадии проекта / Д.А. Захарченко // Экономика: проблемы теории и практики: сборник научных трудов. – 2004. – № 191. – С. 737-743.
130. Пономаренко В.С. Реальне інвестування суб'єктів господарювання: учебное пособие / В.С. Пономаренко, Е.Н. Ястремская. – Х. : Изд-во ХДЕУ, 2000. – 168 с.
131. Захарченко Д.А. Методи оцінки соціальної значимості інвестиційного проекту металургійних підприємств: автореф. дис. канд. эк. наук : 08.00.04 / Захарченко Дмитрий Александрович. – Донецк, 2008. – 20 с.
132. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов / Е.Н. Львовский – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
133. СТО 17330282.27.060.003-2008 Тепловые пункты тепловых сетей. Условия создания. Нормы и требования. – М: РАО «ЕЭС России», 2008. – 68 с.
134. СП 41-101-95 Проектирование тепловых пунктов. – М.: Минстрой России, 1996. – 114 с.
135. Липовка Ю.Л. Математическое моделирование теплогидравлических цепей / Ю.Л. Липовка, В.И. Панфилов, А.Ю. Липовка, А.В. Тучин,

С.М. Плахотников // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города». – Красноярск: МВДД Сибирь, 2008. – С. 79-82.

136. Липовка, Ю.Л. Математическое моделирование потокораспределения на тепловых пунктах / Ю.Л. Липовка, В.И. Панфилов, А.Ю. Липовка, А.В. Тучин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2008. – № 3. – С. 65-67.

Приложение А. Теоретические значения потокораспределения в ИТП на базе МТА

Таблица – Теоретические исследования потокораспределения в ИТП на базе МТА

№ п/п	t _{нар} , °C	ΔP _{ТС} , кПа	G _{ТС} , м³/с	t' _{ТС} , °C	t'' _{ТС} , °C	ΔP _{СО} , кПа	G _{СО} , м³/с	t' _{СО} , °C	t'' _{СО} , °C	ΔP _{ГВС} , кПа	G _{ГВС} , м³/с	t' _{ГВС} , °C	t'' _{ГВС} , °C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	-20	29,1	0,113	80	48	0,49	0,027	65	55	0,99	0,058	55	5
2		32,3	0,118	81	47	0,51	0,027	66,5	56	1,02	0,062	54	5
3		28,9	0,118	79	43	0,5	0,027	68	57,5	1,01	0,065	55	5
4		29,6	0,120	81	47,5	0,48	0,027	69,5	58,5	0,96	0,060	55	5
5		31,5	0,113	79	45	0,51	0,027	68	55	1,02	0,063	54	5
6		29,4	0,118	81	43,5	0,49	0,027	66,5	53,5	0,98	0,060	55	5
7		29,1	0,121	79	47,5	0,52	0,027	65	53	1,04	0,056	57	5
8		30,7	0,119	81,5	44	0,5	0,026	63,5	51,5	1,00	0,065	55	5
1	-15	26,19	0,112	78,5	46,5	0,44	0,022	65	55	0,95	0,059	54	5
2		29,72	0,117	79,5	45,5	0,47	0,022	66	57	0,93	0,063	52	5
3		27,46	0,117	78	41,5	0,48	0,022	68	57,5	0,99	0,066	54	5
4		28,12	0,119	79,5	46	0,46	0,022	69,5	54	1,05	0,061	54	5
5		30,87	0,112	77,5	44	0,50	0,022	68	55	1,01	0,062	53	5
6		27,05	0,117	79,5	42	0,45	0,022	67	53,5	0,92	0,059	54	5
7		26,48	0,119	77,5	46	0,47	0,022	65	53	0,98	0,055	54	5
8		29,17	0,117	80	42,5	0,48	0,021	63,5	52	0,99	0,064	54	5
1	-10	24,88	0,110	79	47	0,42	0,018	68	58	1,01	0,058	55,5	5
2		27,34	0,115	81	47	0,43	0,019	69,5	59	0,92	0,062	54,5	5
3		26,63	0,115	79	43	0,46	0,019	68	57,5	1,05	0,065	55	5
4		26,71	0,117	81	47,5	0,43	0,019	66,5	55,5	1,01	0,060	57,5	5
5		30,56	0,110	79	45	0,49	0,019	65	52	0,95	0,058	56	5
6		25,70	0,115	81,5	44	0,43	0,019	63,5	50,5	0,96	0,060	54,5	5
7		23,97	0,118	78,5	47	0,43	0,019	65	53	0,99	0,056	52,5	5
8		26,54	0,116	79,5	42	0,43	0,018	66	54	1,06	0,065	55	5
1	-5	23,39	0,109	77,5	45,5	0,39	0,017	67,5	57,5	0,98	0,059	55	5
2		25,43	0,114	79	45	0,40	0,018	68	59	1,03	0,063	54	5
3		26,10	0,114	77	40,5	0,45	0,018	67,5	57	0,96	0,066	53,5	5
4		24,84	0,116	79	45,5	0,40	0,019	66,5	51	1,08	0,061	53	5
5		29,34	0,109	77	43,5	0,48	0,018	64,5	51,5	0,91	0,057	54,5	5
6		24,92	0,114	77,5	40	0,42	0,018	63	49,5	1,01	0,059	56	5
7		21,81	0,116	78,5	47	0,39	0,018	67,5	55,5	1,02	0,055	55	5
8		25,21	0,114	78,5	41	0,41	0,017	66	54,5	0,95	0,064	55,5	5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	21,28	0,107	74,5	42,5	0,36	0,016	66,5	56,5	0,98	0,053	58	5
2		24,41	0,112	76,5	42,5	0,39	0,017	65	54,5	0,99	0,062	56,5	5
3		24,27	0,112	74,5	38,5	0,42	0,018	63,5	53	0,91	0,065	55	5
4		23,35	0,114	77	43,5	0,38	0,018	62	51	1,08	0,060	53	5
5		29,05	0,107	74,5	40,5	0,47	0,019	63,5	50,5	1,10	0,058	55,5	5
6		24,18	0,112	75	37,5	0,40	0,018	64,5	51,5	1,05	0,060	55,5	5
7		21,37	0,115	73	41,5	0,38	0,018	66	54	0,98	0,056	54,5	5
8		24,20	0,113	74,5	37	0,39	0,018	66,5	54,5	0,91	0,065	54	5
1	5	20,86	0,106	67,5	35,5	0,35	0,017	66	56	0,94	0,054	53,5	5
2		23,43	0,111	70	36	0,37	0,016	65	56	1,05	0,063	55	5
3		23,79	0,111	67,5	31	0,41	0,017	63	52,5	0,92	0,066	56,5	5
4		22,42	0,113	68,5	35	0,36	0,018	61,5	46	0,93	0,061	55,5	5
5		28,17	0,106	69	35,5	0,46	0,018	66	53	1,04	0,057	56	5
6		22,24	0,111	69,5	32	0,37	0,016	64,5	51	0,90	0,059	58,5	5
7		20,52	0,113	65	33,5	0,37	0,018	65	53	1,05	0,055	57	5
8		22,99	0,111	67	29,5	0,37	0,017	63,5	52	1,00	0,064	55,5	5
1	8	19,81	0,104	68,5	36,5	0,33	0,016	57	47	0,99	0,053	53,5	5
2		22,96	0,109	67,5	33,5	0,36	0,011	55,5	45	0,94	0,062	56	5
3		22,60	0,109	68,5	32,5	0,39	0,012	57	46,5	0,95	0,065	56	5
4		21,30	0,111	69	35,5	0,35	0,013	58	47	0,99	0,060	50	5
5		26,77	0,104	69,5	35,5	0,43	0,013	59,5	46,5	1,08	0,058	49,5	5
6		21,13	0,109	65	27,5	0,35	0,011	60	47	1,01	0,065	49	5
7		20,31	0,112	67	35,5	0,36	0,013	59,5	47,5	1,02	0,056	50,5	5
8		21,84	0,110	67,5	30	0,36	0,012	58,5	46,5	1,00	0,065	52	5

Приложение Б. Экспериментальные исследования работы ИТП на базе МТА.

Таблица Б.1 Экспериментальные исследование перепада давлений в контуре тепловой сети

№ опыта	Параметры наружного воздуха, °С						
	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8
1	31,39694	27,3737	26,141	25,85481	24,20545	23,62188	22,81668
2	31,47875	27,97622	26,46469	25,79823	23,77147	22,04744	21,72768
3	31,25051	30,18074	26,64156	34,85379	24,28947	23,37667	20,09137
4	30,9462	29,35674	28,80841	27,12319	24,46078	23,51249	23,23949
5	32,52774	29,78824	26,09823	25,21488	24,06467	23,95539	30,75786
6	29,97935	27,85327	27,02334	25,10782	24,27045	23,54285	21,62835
7	30,55199	29,08315	26,66016	35,37093	38,67612	34,41748	20,87093
8	30,0748	26,97904	26,86638	24,95757	24,15954	23,32349	23,37327
9	41,97232	27,82997	35,0747	24,76199	23,85812	23,2283	21,64044
10	29,37098	35,35562	26,9801	24,88517	23,81469	22,92511	25,81241
11	31,37861	30,74912	28,06103	26,38895	25,24223	23,85945	22,85436
12	31,04487	35,02166	35,57911	25,25222	24,62823	22,98404	20,92748
13	27,96466	26,96536	26,65031	24,80091	23,79913	22,91723	20,97555
14	30,58352	37,55054	26,52321	25,10547	23,65522	22,19883	23,9423
15	30,7193	28,34355	25,97122	38,02463	23,93336	22,7528	20,56675
16	29,92007	27,04626	26,72511	24,94771	23,72163	22,07389	22,02895
17	31,25591	30,32314	28,51836	25,91504	24,56727	23,25048	22,07834
18	32,58424	27,32314	30,51836	24,91504	38,56727	34,75048	22,07834
19	31,59245	28,4852	26,65265	25,14121	24,01812	22,58979	22,87729
20	29,78713	28,70012	26,77354	25,62616	23,70041	22,77245	21,87877
21	30,85805	29,73489	27,80822	27,48617	24,12067	22,99135	22,76363
22	29,39685	27,02444	35,79557	25,57355	24,4194	23,78972	22,25151
23	35,43315	28,80914	26,93946	25,3299	23,80467	23,73508	22,14203
24	31,85557	30,19514	27,45214	26,71066	25,80467	24,31196	22,36799
25	30,09218	28,01994	26,23298	27,89768	24,21244	23,02983	21,12636
26	30,31646	30,07176	26,17391	25,26921	24,24315	23,36984	21,38431
27	40,01499	40,12639	39,33167	25,22128	24,60986	23,53201	21,80352
28	31,1129	28,96593	26,66127	25,51186	23,39068	22,2289	31,88477
29	29,50832	35,71503	26,58869	30,03472	23,71485	23,73587	20,91287
30	29,88256	28,92015	27,02383	25,69333	24,40454	22,42609	22,06229

Таблица Б.2 Расчет доверительного интервала для перепада давления контура тепловой сети

\bar{x}	31,49505	29,99559	28,29131	26,8258	25,13762	23,90837	22,69553
D_{cp}	8,440545	11,23856	11,84354	11,30172	13,6719	8,762324	6,775908
S^2	8,731598	11,6261	12,25193	11,69144	14,14335	9,064473	7,00956
S	2,954928	3,409707	3,500276	3,419275	3,760764	3,010726	2,647557
$\bar{x} - \varepsilon$	30,5833	28,94352	27,21129	25,77078	23,97723	22,97941	21,87863
$\bar{x} + \varepsilon$	31,49505	29,99559	28,29131	26,8258	25,13762	23,90837	22,69553

Таблица Б.3 Экспериментальные исследование расхода теплоносителя в контуре тепловой сети

№ опыта	Параметры наружного воздуха, °C						
	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,11659558	0,114631987	0,113378648	0,112320048	0,111755	0,110506	0,108328
2	0,119604539	0,115627071	0,114379735	0,113210815	0,112757	0,111507	0,108284
3	0,126599109	0,114627423	0,113380113	0,112287049	0,111764	0,110501	0,108358
4	0,116598797	0,11463454	0,113383794	0,112086775	0,121753	0,110501	0,138368
5	0,116604252	0,114632006	0,113386293	0,112371234	0,111756	0,110504	0,108436
6	0,116592019	0,114632829	0,113382503	0,122162072	0,111753	0,110505	0,108395
7	0,116597537	0,114637891	0,113377397	0,112189571	0,111761	0,110504	0,108387
8	0,116596677	0,114636699	0,123386946	0,112296262	0,111744	0,110511	0,1084
9	0,116601277	0,114623269	0,113386776	0,112206136	0,111757	0,1105	0,108449
10	0,126599573	0,134635928	0,113388244	0,112206816	0,111765	0,110518	0,108416
11	0,117695965	0,117633197	0,115373822	0,112501775	0,113762	0,110514	0,111218
12	0,116601664	0,114625936	0,1133816	0,112191904	0,111753	0,110509	0,108518
13	0,135468735	0,119535645	0,12564839	0,124589352	0,126596	0,125694	0,112598
14	0,116596119	0,114627969	0,113379427	0,112344194	0,111757	0,110514	0,108424
15	0,116602705	0,114631416	0,113386177	0,112400179	0,111754	0,110512	0,108306
16	0,11659381	0,114637687	0,11338653	0,112190512	0,11175	0,110511	0,108381
17	0,116598894	0,114627397	0,113391637	0,112406521	0,111752	0,110509	0,1084
18	0,116604425	0,114629179	0,113382232	0,112203729	0,11175	0,110499	0,108234
19	0,116600521	0,114631265	0,113374776	0,112102072	0,11176	0,110501	0,108504
20	0,118600881	0,114931086	0,113983779	0,113981702	0,114751	0,112505	0,110423
21	0,116601313	0,114637726	0,133383866	0,112313417	0,111754	0,110503	0,108458
22	0,1165946	0,11463764	0,113381132	0,132258863	0,111759	0,110518	0,108485
23	0,116598196	0,11463006	0,113381203	0,111916149	0,111774	0,110508	0,108414
24	0,116603848	0,114629015	0,113391499	0,112291129	0,131763	0,110504	0,108455
25	0,116603009	0,114634397	0,113376425	0,112228565	0,111764	0,110516	0,108414
26	0,116597242	0,114634058	0,113384488	0,112165042	0,111759	0,130499	0,108484
27	0,136602174	0,114635923	0,113382803	0,112219245	0,111756	0,110514	0,108309

1	2	3	4	5	6	7	8
28	0,118000037	0,116531458	0,11608307	0,114569554	0,11315	0,110902	0,109305
29	0,116600336	0,134642057	0,113385803	0,112225405	0,111757	0,110512	0,108539
30	0,120293391	0,116934131	0,114883135	0,113919833	0,112364	0,112908	0,109347

Таблица Б.4 Расчет доверительного интервала для расхода теплоносителя контура тепловой сети

\bar{x}	0,118934907	0,116412563	0,115051741	0,113878531	0,113518	0,111874	0,109768
D_{cp}	2,83576E-05	2,58099E-05	2,00645E-05	2,01284E-05	2,22E-05	2,02E-05	3,01E-05
S^2	2,93354E-05	2,66999E-05	2,07564E-05	2,08225E-05	2,3E-05	2,09E-05	3,12E-05
S	0,005416218	0,005167198	0,004555921	0,004563169	0,004791	0,004569	0,005582
$\bar{x} - \varepsilon$	0,117263731	0,114818222	0,11364601	0,112470563	0,11204	0,110464	0,108046
$\bar{x} + \varepsilon$	0,120606083	0,118006904	0,116457472	0,115286498	0,114997	0,113283	0,11149

Таблица Б.5 Экспериментальные исследование перепада давлений в контуре системы отопления

№ опыта	Параметры наружного воздуха, °С						
	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,509990845	0,4849046	0,4548865	0,4203736	0,4000472	0,3956193	0,3708524
2	0,49991936	0,4649954	0,435024	0,4103844	0,3902943	0,3755575	0,3610108
3	0,499794921	0,4650822	0,4345033	0,410029	0,3900143	0,4553255	0,391079
4	0,500108191	0,5648003	0,4346071	0,409825	0,3898792	0,3754181	0,3609432
5	0,49998200	0,5651433	0,5350733	0,4101627	0,4897220	0,3757469	0,3610219
6	0,499844027	0,4651946	0,4351786	0,5097361	0,3901869	0,3755089	0,3610073
7	0,599237847	0,4651979	0,4348735	0,4099287	0,3899308	0,3754853	0,3908912
8	0,506136348	0,478121	0,4547226	0,4350769	0,4099606	0,3957737	0,3659693
9	0,499715578	0,4648294	0,4346265	0,4102559	0,438996	0,3792188	0,3609174
10	0,500160022	0,4649966	0,4349674	0,4102714	0,4899819	0,3753885	0,3610157
11	0,500152087	0,4652923	0,4349492	0,4100851	0,3899821	0,3797234	0,3911385
12	0,527956424	0,4893	0,4429908	0,4248486	0,4059726	0,3985321	0,3712084
13	0,500319719	0,5649267	0,4348452	0,4104104	0,4900277	0,3757111	0,3608926
14	0,500169532	0,464748	0,4351962	0,5098834	0,3899671	0,3756585	0,361223
15	0,499906946	0,465021	0,4150574	0,4100832	0,3897805	0,3857659	0,3609434
16	0,500164953	0,4651123	0,4348308	0,4099432	0,3897527	0,4796732	0,3608651
17	0,520105314	0,4870159	0,4449572	0,4302037	0,4127563	0,3854855	0,375577
18	0,499922417	0,4653708	0,5352441	0,4097967	0,3900792	0,3758201	0,3610226
19	0,500069305	0,4651681	0,4350658	0,4099467	0,3901375	0,3755524	0,3911313

1	2	3	4	5	6	7	8
20	0,500193695	0,4653174	0,4347829	0,4099848	0,3900082	0,3755293	0,4610239
21	0,599971542	0,4651552	0,434772	0,4099644	0,3901631	0,3954841	0,3608996
22	0,699799493	0,4649322	0,5351231	0,5100569	0,3898698	0,3752743	0,3610189
23	0,499989011	0,4648192	0,4351064	0,410266	0,3900586	0,3756174	0,3611916
24	0,524568311	0,4958439	0,5358923	0,5625834	0,4832564	0,3989243	0,3985345
25	0,499844602	0,4649949	0,4250903	0,4100287	0,3899863	0,3756996	0,3609659
26	0,499847447	0,4644633	0,4350494	0,410048	0,3901135	0,3794489	0,3609818
27	0,500020146	0,5649722	0,4350658	0,4103091	0,3900325	0,4786205	0,3608128
28	0,499975884	0,4650066	0,4151516	0,4102415	0,3899973	0,3955665	0,3609757
29	0,499614662	0,5650643	0,4348412	0,4102353	0,3900005	0,3795423	0,3610218
30	0,499973821	0,4649002	0,4354165	0,4102345	0,3900517	0,3956186	0,3608355

Таблица Б.6 Расчет доверительного интервала для перепада давления контура тепловой сети

\bar{x}	0,516248482	0,4853563	0,4485964	0,4275066	0,4070336	0,3912097	0,3708991
D_{cp}	0,001854117	0,0013843	0,0012607	0,0015651	0,001159	0,0008216	0,000432
S^2	0,001918052	0,0014321	0,0013042	0,0016191	0,001199	0,0008499	0,0004469
S	0,043795569	0,0378428	0,0361131	0,040238	0,0346267	0,0291527	0,0211391
$\bar{x} - \varepsilon$	0,502735342	0,4736799	0,4374536	0,4150911	0,3963495	0,3822146	0,3643766
$\bar{x} + \varepsilon$	0,516248482	0,4853563	0,4485964	0,4275066	0,4070336	0,3912097	0,3708991

Таблица Б.7 Экспериментальные исследование расхода теплоносителя в контуре системы отопления

№ опыта	Параметры наружного воздуха, °С						
	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,025999937	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,012888
2	0,029999998	0,022825	0,02275	0,017809	0,017679	0,017289	0,013888
3	0,025999967	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,012888
4	0,026000089	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,01289
5	0,036000056	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,012886
6	0,029999942	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,012891
7	0,025999998	0,021825	0,01875	0,017809	0,01768	0,017289	0,012889
8	0,026000032	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017288	0,011886
9	0,026000007	0,051825	0,02875	0,017809	0,017679	0,017289	0,012886
10	0,029000021	0,023825	0,01975	0,018809	0,019679	0,018289	0,016888
11	0,035999995	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,012887

1	2	3	4	5	6	7	8
12	0,025999994	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,01289
13	0,035649853	0,021548	0,03025	0,017852	0,01775	0,01128	0,06059
14	0,025999944	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,012889
15	0,026000035	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,012888
16	0,035999999	0,041825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,014889
17	0,026000009	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,014888
18	0,026000012	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,014887
19	0,031999911	0,024825	0,02175	0,019809	0,018679	0,021289	0,01489
20	0,026000044	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,067288	0,014888
21	0,026000077	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,014887
22	0,025999967	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,014886
23	0,025999985	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,014886
24	0,055999957	0,021825	0,01875	0,057809	0,017679	0,01729	0,014887
25	0,032500027	0,023525	0,02045	0,021209	0,017679	0,017289	0,015888
26	0,030999939	0,021825	0,01875	0,017809	0,019979	0,019688	0,014888
27	0,035999925	0,021825	0,05875	0,017809	0,017679	0,017288	0,014887
28	0,045999966	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,014887
29	0,036000034	0,021825	0,01875	0,017809	0,057679	0,017289	0,014888
30	0,036000056	0,021825	0,01875	0,017809	0,017679	0,017289	0,014888

Таблица Б.8 Расчет доверительного интервала для расхода теплоносителя контура системы отопления

\bar{x}	0,030938323	0,023739	0,021123	0,019357	0,019191	0,019002	0,015645
D_{cp}	4,84742E-05	4,16E-05	5,84E-05	5,33E-05	5,32E-05	8,52E-05	7,35E-05
S^2	5,01458E-05	4,31E-05	6,04E-05	5,51E-05	5,5E-05	8,81E-05	7,6E-05
S	0,007081368	0,006562	0,007769	0,007423	0,007416	0,009388	0,008718
$\bar{x} - \varepsilon$	0,028753365	0,021714	0,018726	0,017067	0,016903	0,016105	0,012955
$\bar{x} + \varepsilon$	0,033123282	0,025764	0,023521	0,021647	0,02148	0,021899	0,018335

Таблица Б.9 Экспериментальное исследование перепада давлений в контуре системы горячего водоснабжения

№ опыта	Параметры наружного воздуха, °C						
	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,002408881	0,99632611	0,99236158	0,9885062	0,98728914	0,98285918	0,98057587
2	1,003998809	0,9902930	0,99025826	0,99101996	0,99412553	0,98819572	0,8502930
3	1,00300419	0,9955693	0,99198737	0,99223468	0,9950722	0,98901626	0,98105039

1	2	3	4	5	6	7	8
4	1,00300419	0,99588559	0,99111981	0,99092447	0,97315391	0,97824575	0,98302123
5	1,00300419	0,99709167	0,98979048	0,99146102	0,99346612	0,97607065	0,95233659
6	1,002601676	0,99608176	0,99120352	0,99070134	0,94393987	0,98736969	0,98129993
7	1,003523288	0,99397311	0,99196692	0,99124426	0,99338652	0,97855461	0,98256566
8	1,003461144	0,99496413	0,99155624	0,98086949	0,97586938	0,97545429	0,9711148
9	1,002171567	0,99780128	0,99094489	0,99225008	0,9946014	0,97688145	0,98344314
10	1,002463807	0,99575451	0,99194032	0,99155037	0,993557	0,97829125	0,953555
11	1,002663177	0,99623095	0,99130967	0,98237408	0,96542557	0,97752564	0,98237222
12	1,002013692	0,99537774	0,99144256	0,99193992	0,95555172	0,97683701	0,98151135
13	1,001902433	0,9953552	0,99436772	0,99162946	0,99361889	0,98749411	0,95221489
14	1,003261865	0,99454993	0,8902930	0,99171863	0,96200928	0,97677979	0,98297739
15	1,002367037	0,99309664	0,9902252	0,98396124	0,9862151	0,97736854	0,9813539
16	0,994242407	0,98972181	0,98771826	0,98534701	0,98359255	0,97753925	0,96852153
17	1,001862049	0,99550675	0,99456768	0,99229032	0,99291851	0,8602930	0,98257443
18	1,002991521	0,99632857	0,9907176	0,98090795	0,99374243	0,97743131	0,98078591
19	1,002991521	0,99457282	0,99029219	0,99106672	0,99368347	0,97647561	0,98241436
20	1,002354316	0,99871029	0,99108887	0,99050982	0,99307737	0,97805825	0,98241303
21	1,00251947	0,99651129	0,99292115	0,8802930	0,98517815	0,97761791	0,98350004
22	0,996465918	0,98871378	0,9842507	0,97899574	0,97856746	0,97279514	0,97510947
23	0,9012930	0,99472488	0,99288244	0,99154885	0,8702930	0,97721203	0,9837507
24	1,003441411	0,99426662	0,9938559	0,97148982	0,99462452	0,97871591	0,98253057
25	1,001676542	0,99658661	0,99109042	0,98117115	0,98347772	0,98670823	0,98190462
26	1,001836274	0,99653601	0,99464636	0,99036191	0,98278984	0,97911207	0,98367827
27	1,001793914	0,99566559	0,99296026	0,99119861	0,97936118	0,97752511	0,9522806
28	1,002722589	0,99598017	0,9925207	0,98997809	0,99426838	0,97719391	0,98353426
29	1,002844981	0,99622252	0,99472345	0,98002884	0,95391481	0,97560259	0,96153049
30	1,002695307	0,9953651	0,99272367	0,9908981	0,99515477	0,9758037	0,98077419

Таблица Б.10 Расчет доверительного интервала для перепада давления контура системы горячего водоснабжения

\bar{x}	0,998786039	0,99199212	0,98825757	0,98628237	0,9878714	0,97350093	0,97683293
D_{cp}	0,000342883	0,00030352	0,00034679	0,00041156	0,00051642	0,00045979	0,00058343
S^2	0,000354706	0,00031398	0,00035875	0,00042575	0,00053423	0,00047565	0,00060354
S	0,018833646	0,01771954	0,0189406	0,0206337	0,02311344	0,02180934	0,02456712
$\bar{x} - \varepsilon$	0,993437866	0,98634832	0,98181783	0,97738794	0,97426105	0,97162367	0,96604431
$\bar{x} + \varepsilon$	1,005060123	0,99728306	0,99350609	0,99012101	0,98852437	0,98508223	0,98120469

Таблица Б.11 Экспериментальные исследование расхода теплоносителя в контуре системы горячего водоснабжения

№ опыта	Параметры наружного воздуха, °C						
	-20	-15	-10	-5	0	5	8
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,0613394	0,061097698	0,062348662	0,062218523	0,0602884	0,059817	0,0595586
2	0,0613344	0,061099342	0,060345375	0,06021895	0,0602930	0,059824	0,0595585
3	0,0623345	0,061100588	0,060344133	0,060223338	0,0602918	0,059823	0,0595549
4	0,0613363	0,061109202	0,060342582	0,060218838	0,0602799	0,059815	0,0595650
5	0,0615462	0,061202054	0,060925843	0,060723555	0,0602953	0,060054	0,0595825
6	0,0613350	0,061302076	0,060339845	0,060226937	0,0602909	0,059827	0,0595567
7	0,0613420	0,061104479	0,060344486	0,06021546	0,0602918	0,059823	0,0595575
8	0,0613370	0,061105572	0,060345287	0,060216736	0,0602965	0,059825	0,0595583
9	0,0619426	0,061501397	0,060845517	0,060516691	0,0605915	0,05982	0,0598567
10	0,0613377	0,061102757	0,060350288	0,060217206	0,0602887	0,05982	0,0595632
11	0,0613410	0,065097614	0,06034714	0,062218409	0,0602954	0,059822	0,0595597
12	0,0663333	0,061097281	0,060348136	0,062223399	0,0602912	0,059824	0,0595547
13	0,0613318	0,061095711	0,060344547	0,06022179	0,0602924	0,059823	0,0595605
14	0,0613426	0,061099925	0,062346975	0,060222848	0,0602874	0,059821	0,0595613
15	0,0613408	0,065100024	0,060348299	0,065220179	0,0602918	0,059823	0,0645557
16	0,0643383	0,061102246	0,060345028	0,060220718	0,0602914	0,059822	0,0595607
17	0,0616338	0,061695135	0,060747732	0,060917254	0,0602915	0,059913	0,0599657
18	0,0618319	0,061396157	0,060643776	0,060421066	0,0603911	0,059884	0,0597586
19	0,0613370	0,061097542	0,060346961	0,060221417	0,0602855	0,05982	0,0595596
20	0,0613341	0,061103862	0,060347528	0,060222914	0,0602887	0,059824	0,0595589
21	0,0613306	0,061098088	0,060347324	0,060217664	0,0603030	0,059827	0,0595643
22	0,0613431	0,061095866	0,060345266	0,060223678	0,0602948	0,059821	0,0595580
23	0,0613283	0,061105629	0,060351226	0,0602231	0,06576565	0,059821	0,0595621
24	0,0613372	0,061097686	0,060345169	0,060216668	0,0602934	0,064816	0,0595592
25	0,0613363	0,061102063	0,06034606	0,060219295	0,0602938	0,059823	0,0595615
26	0,0633276	0,061096855	0,060343546	0,060227203	0,0602872	0,059828	0,0595611
27	0,0613302	0,061103213	0,064345233	0,060225559	0,0602880	0,059821	0,0595580
28	0,0613305	0,061094456	0,060345972	0,060212843	0,0602866	0,059813	0,0595591
29	0,0614541	0,061297648	0,061140382	0,060822305	0,0606926	0,060223	0,0596617
30	0,0613361	0,061321017	0,065347614	0,060220939	0,0602943	0,05982	0,0595592

Таблица Б.12 Расчет доверительного интервала для расхода теплоносителя контура системы отопления

\bar{x}	0,061760184	0,061434106	0,060865198	0,060663849	0,060500498	0,060015	0,05976043
D_{cp}	1,18327E-06	1,01292E-06	1,46223E-06	1,11463E-06	9,97147E-07	8,29E-07	8,29516E-07
S^2	1,22407E-06	1,04785E-06	1,51265E-06	1,15307E-06	1,03153E-06	8,58E-07	8,5812E-07
S	0,001106378	0,001023647	0,001229897	0,00107381	0,001015643	0,000926	0,000926347
$\bar{x} - \varepsilon$	0,06141881	0,06111826	0,060485713	0,060332525	0,060187121	0,059729	0,059474605
$\bar{x} + \varepsilon$	0,062101557	0,061749953	0,061244683	0,060995174	0,060813876	0,0603	0,060046255

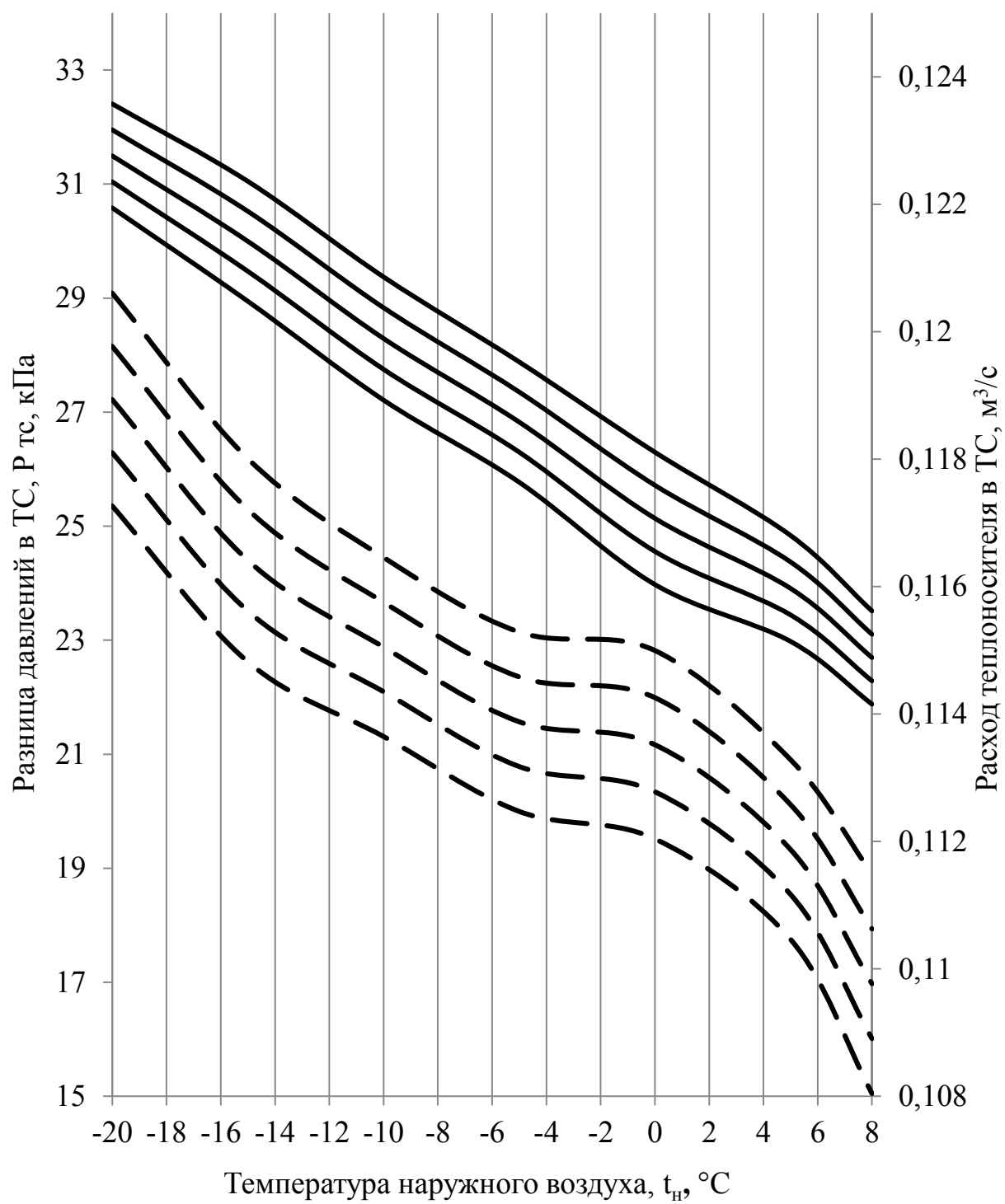


Рис. Б.1 Номограмма характеристик контура тепловой сети

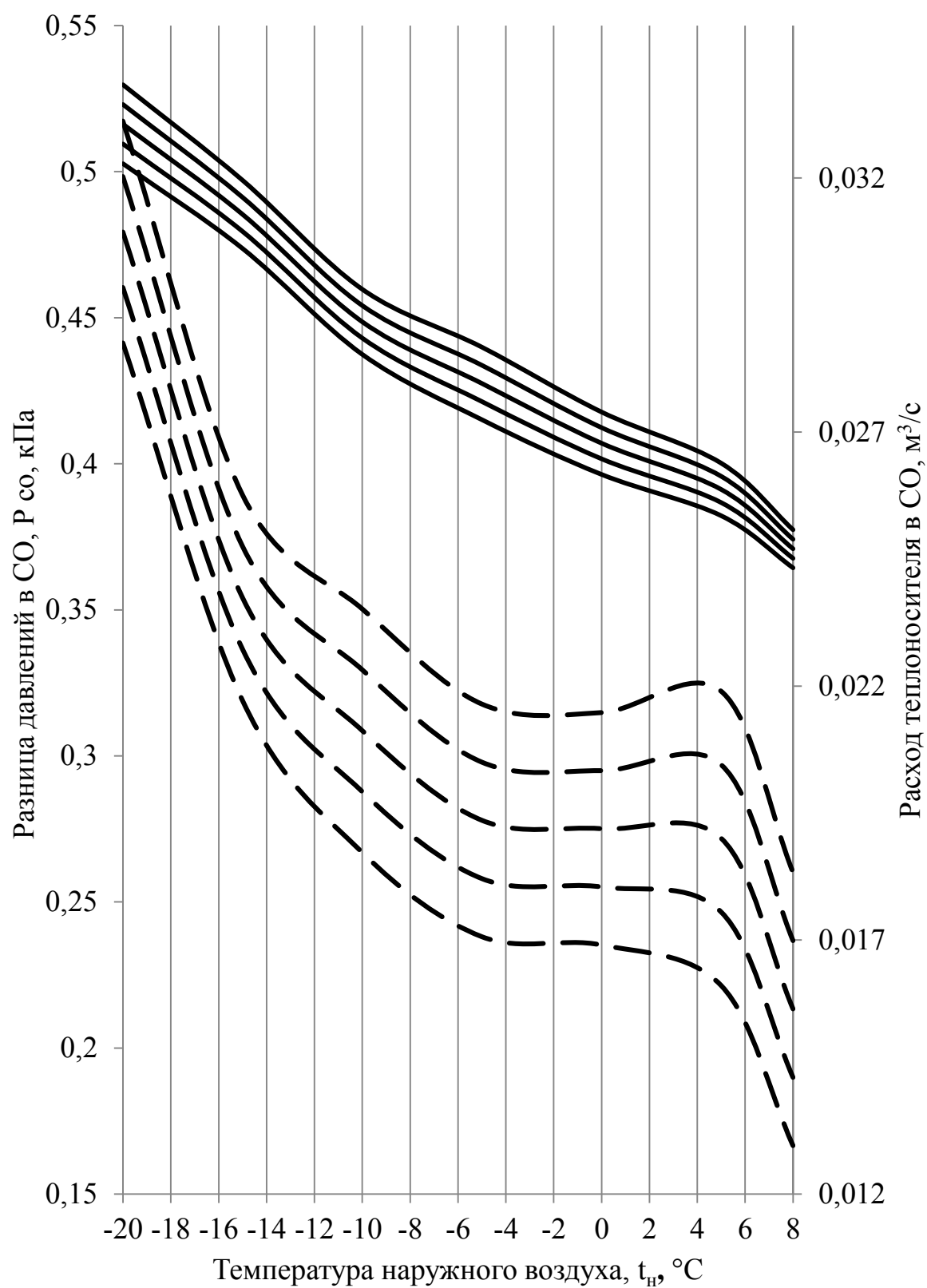


Рис. Б.2 Номограмма характеристик контура системы отопления

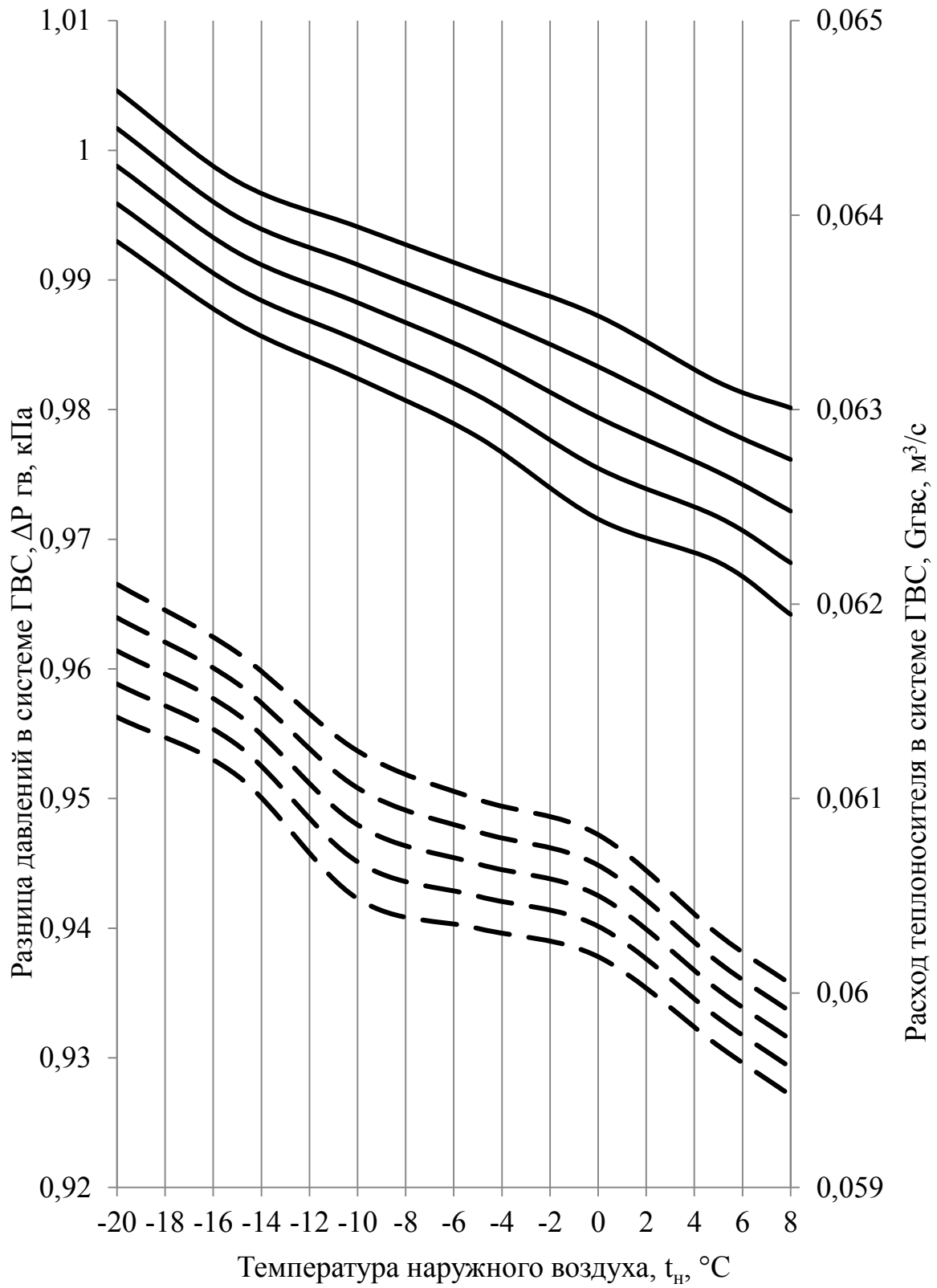


Рис. Б.3 Номограмма характеристик контура ГВС

Приложение В – Справка о внедрении в ГП «Донбасстеплоэнерго»



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ДОНБАССТЕПЛОЭНЕРГО» СТРУКТУРНОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВО «ДОНЕЦКГОРТЕПЛОСЕТЬ»

ул.Постышева, 68, г.Донецк, 83001, ДНР
Телефон-факс: (062) 305-46-33 E-mail:dgts@teplo.dn.ua

От 09.09.16 № 2364
На _____

Диссертационный совет Д 01.005.01
при ГОУ ВПО «Донбасская
национальная академия
строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Долгова Николая Викторовича на тему: «Многоконтурный теплообменный аппарат для независимой схемы индивидуального теплового пункта», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Результаты диссертационных исследований Долгова Н.В., в частности методика расчета многоконтурных теплообменных аппаратов, принципиальная схема индивидуального теплового пункта на базе многоконтурного теплообменного аппарата, а также методика прогнозирования распределения потоков теплоносителя и давления в труднорасчетных режимах работы тепловой сети были применены при реконструкции внутриквартальной тепловой сети в микрорайоне Кировского района г. Донецк.

Предложенная схема индивидуального теплового пункта на базе многоконтурного теплообменного аппарата позволила ежегодно экономить 150 т.у.т. Проведенные расчеты показывают эффективность предложенных решений в частности:

- чистый дисконтированный доход от внедрения – 10000 тыс. руб.;
- внутренняя норма рентабельности – 25% (при нормативной 18%).

Результаты внедрения методики расчета позволили сделать вывод о том, что материалы диссертационной работы Долгова Н.В. представляют научный и практический интерес, относятся к энергосберегающим мероприятиям и рекомендуются к внедрению на теплоснабжающих предприятиях Донбасса.

Главный инженер



И.Ф. Щетинин

Справка о результатах внедрения в учебный процесс и научно-исследовательскую работу ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Диссертационный совет Д 01.005.01
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
доктор технических наук, профессор
Н. М. Зайченко
« 15 » 2016 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
ассистента кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»
Долгова Николая Викторовича на тему **«Многоконтурный теплообменный
аппарат для независимой схемы индивидуального теплового пункта»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение в учебный процесс
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Результаты диссертационных исследований Долгова Николая Викторовича, а именно, математическая модель потокораспределения в индивидуальном тепловом пункте (ИТП) на базе многоконтурного теплообменного аппарата (МТА), а так же математическая модель потокораспределения в двухтрубной внутриквартальной тепловой сети, работающей с ИТП на базе МТА, внедрены в учебный процесс в качестве учебного материала в курсе дисциплин «Централизованное теплоснабжение», «Испытание и наладка систем теплоснабжения», «Надежность систем теплогазоснабжения и вентиляция и пути ее повышения», при разработке раздела дипломной магистерской работы студентами специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Начальник учебного отдела
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»,
канд. н. гос. упр., доцент



А. А. Сухина

Заведующий кафедрой
«Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»,
д.т.н., профессор



А. В. Лукьянов

Диссертационный совет Д 01.005.01
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
доктор технических наук, профессор
В. Ф. Муцанов
«13» сентября 2016 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
ассистента кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»
Долгова Николая Викторовича на тему «Многоконтурный теплообменный
аппарат для независимой схемы индивидуального теплового пункта»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение в научно-исследовательскую работу
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Одной из задач, поставленных в качестве условия для успешного развития
и реконструкции отрасли теплоснабжения Донбасса, является рациональное
использование топливно-энергетических ресурсов за счет эффективного узлового
распределения потоков теплоносителя и давления с помощью
автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) на базе
многоконтурного теплообменного аппарата (МТА).

При разработке кафедральной научно-исследовательской темы К 3-03-11
«Совершенствование систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и
кондиционирования воздуха с использованием современных технологий» были
использованы следующие положения диссертационной работы:

- методика расчета гидравлического режима тепловой сети при
подключении абонентов по независимой схеме с помощью ИТП на базе МТА;
- математическая модель потокораспределения для ИТП с МТА,
позволяющая оценить влияние неравномерности потребления тепловой энергии;
- математическая модель потокораспределения неравномерности
потребления теплоносителя из тепловой сети абонентскими вводами.

Начальник научно-исследовательской
части ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
к.т.н., доцент

В. Н. Завялов

Научный руководитель,
профессор кафедры «Теплотехника,
теплогазоснабжение и вентиляция»,
д.т.н., профессор

А.А. Олексюк