

*В печать
17.11.2016г.*

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2016

Работа выполнена на кафедре теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Олексюк Анатолий Алексеевич,
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»,
профессор кафедры теплотехники,
теплогазоснабжения и вентиляции

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент
Трубаев Павел Алексеевич,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В. Г. Шухова»,
профессор кафедры энергетики
теплотехнологии

кандидат технических наук, доцент
Гридин Сергей Васильевич,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», доцент
кафедры промышленная теплоэнергетика

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.»

Защита состоится «26» января 2017 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2, зал ученого совета. Тел. факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 01.005.01



Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 неуставившимся 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 применениемдробного 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).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы – 152 страницы, в том числе 111 страниц основного текста; содержит 16 страниц списка использованных источников; 15 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность проблемы, определены цели и задачи исследования, приведены научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведен анализ существующих схем абонентских подключений к тепловой сети. Рассмотрены существующие методики потокораспределения в системах централизованного теплоснабжения.

На сегодняшний день широко распространена схема присоединения абонентов к квартальным тепловым сетям от ЦТП с помощью элеваторного узла, обеспечивающего постоянство расхода при смещении теплоносителей для обеспечения необходимых параметров, что требует постоянного давления теплоносителя на вводе. При этой схеме также становится невозможным применение современной арматуры, регулирующей температуру в помещениях у потребителя за счет изменения протока теплоносителя через нагревательные приборы и, как следствие, это приводит к нестабильному расходу в обратном трубопроводе. Предложенный автором МТА (патент № 84172, опубл. 10.10.2013) позволяет обеспечить наиболее рациональное регулирование теплоносителя в зависимости от отопительного графика.

Рассмотрены существующие открытые и закрытые схемы горячего водоснабжения, способы регулирования параметров теплоносителя и способы подключения теплообменных аппаратов. Выявлено, что наиболее эффективными являются закрытые схемы горячего водоснабжения с параллельным подключением теплообменных аппаратов.

Проведен анализ математических моделей потокораспределения для систем централизованного теплоснабжения. На основании анализа выявлены наиболее подходящие методы исследований потокораспределения в схеме ИТП на базе МТА, одним из которых является обобщенный метод контурных расходов и обобщенный метод узловых давлений В. Я. Хасилева и А. П. Меренкова.

Второй раздел посвящен исследованию гидравлических контуров ИТП на базе МТА. Впервые проведено математическое моделирование работы автоматизированного ИТП на базе МТА, что позволило определить места установки регулирующей арматуры, обеспечивающей стабильную и надежную работу ИТП на базе МТА.

Кроме того, проанализированы гидравлические контуры двухтрубной внутриквартальной тепловой сети, работающей с ИТП на базе МТА, и выявлена неравномерность потребления теплоносителя в зависимости от температуры

наружного воздуха. Приведены результаты математического моделирования особенностей работы двухтрубной внутриквартальной тепловой сети централизованного теплоснабжения с предложенным ИТП на базе МТА.

Для анализа распределения потоков теплоносителя в гидравлической цепи ИТП на базе МТА была построена оргграф-схема (Рис. 1) и применен обобщенный метод контурных расходов.

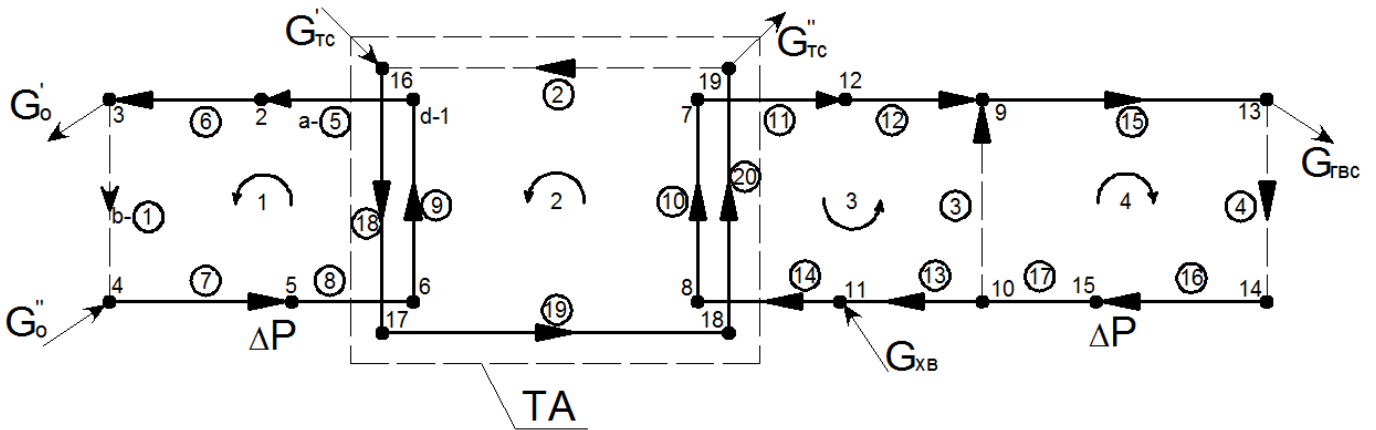


Рис. 1. Эквивалентная схема ИТП на базе МТА, оргграф-схема:

ТА – теплообменный аппарат;

ΔP – перепад давления, кПа;

G_o' – теплоноситель, подаваемый в систему отопления, $\text{м}^3/\text{с}$;

G_o'' – обратный теплоноситель из системы отопления, $\text{м}^3/\text{с}$;

$G_{хв}$ – подпитка из хозяйственного водопровода, $\text{м}^3/\text{с}$;

$G_{гвс}$ – расход горячей воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

$G_{тс}'$ – греющий теплоноситель из тепловой сети, $\text{м}^3/\text{с}$;

$G_{тс}''$ – обратный теплоноситель, уходящий в тепловую сеть, $\text{м}^3/\text{с}$;

i – хорда;

c – контур.

На схеме выделяется дерево, связывающее все ее $d - 19$ узлов, в результате все участки разбиваются на $a - 5 \dots 16$ участков дерева и $b - 1 \dots 4$ участка, не входящих в это дерево, называемые хордами.

В качестве исходной математической модели потокораспределения принята модель В. Я. Хасилева для открытых систем теплоснабжения

$$\mathbf{A}\vec{G} = \vec{G}_{yp}, \quad (1)$$

где \mathbf{A} – матрица соединений;

\vec{G} – вектор, характеризующий расход теплоносителя;

\vec{G}_{yp} – вектор, характеризующий искомый узловой расход теплоносителя.

Для определения степени открытия регулирующей арматуры в исходную математическую модель вводится матрица \mathbf{E} , которая учитывает степень открытия балансировочной и регулирующей арматуры. После введения матрицы она принимает вид

$$\mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{P} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{E} = \mathbf{B} \vec{H}, \quad (2)$$

где $\Delta \mathbf{P}$ – диагональная матрица характеристик гидравлического сопротивления всех участков ИТП от $(i = 1)$ до $(i = n)$;

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

\mathbf{B} – матрица совпадения мест обходов контуров;

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

$$\mathbf{M}^N \Delta g_x^{N+1} = -\Delta p_x^N, \quad (3)$$

где \mathbf{M} – симметричная матрица Максвелла;

N – порядковый номер приближения.

Исходя из матрицы \mathbf{A} и произведения матриц $\mathbf{B}, \mathbf{G}, \Delta \mathbf{P}$, получаем систему уравнений, решение которой позволяет определить коэффициенты уравнений (1,2) относительно G_1, G_2, \dots, G_{20}

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 \Delta p_1^2 + G_5 \Delta p_5^2 + G_6 \Delta p_6^2 + G_7 \Delta p_7^2 + G_8 \Delta p_8^2 + G_9 \Delta p_9^2 = -\Delta; \\ G_2 \Delta p_2^2 + G_{21} \Delta p_{21}^2 + G_{22} \Delta p_{22}^2 + G_{23} \Delta p_{23}^2 = 0; \\ G_3 \Delta p_3^2 - G_{10} \Delta p_{10}^2 - G_{11} \Delta p_{11}^2 - G_{12} \Delta p_{12}^2 - G_{13} \Delta p_{13}^2 - G_{14} \Delta p_{14}^2 = 0; \\ G_3 \Delta p_3^2 + G_4 \Delta p_4^2 + G_{15} \Delta p_{15}^2 + G_{16} \Delta p_{16}^2 + G_{17} \Delta p_{17}^2 = -\Delta. \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -G_5 + G_9 = 0; \\ G_5 - G_6 = 0; \\ -G_1 + G_6 = \vec{G}_3; \\ G_1 - G_7 = -\vec{G}_4; \\ G_7 - G_8 = 0; \\ G_8 - G_9 = 0; \\ G_{10} - G_{11} = 0; \\ -G_{11} + G_{12} = 0; \\ G_3 + G_{12} = -\vec{G}_9; \\ -G_3 - G_{13} + G_{17} = \vec{G}_{10}; \\ -G_{13} + G_{14} = \vec{G}_{11}; \\ -G_4 + G_{15} = \vec{G}_{12}; \\ G_4 - G_{16} = 0; \\ G_{16} - G_{17} = 0; \\ -G_2 - G_{21} = -\vec{G}_{15}; \\ G_{21} - G_{22} = 0; \\ G_{22} - G_{23} = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

В результате решения системы уравнений (4,5) получен расход теплоносителя в узлах ИТП на базе МТА.

Результаты теоретических исследований потокораспределения при максимальной тепловой нагрузке позволили получить зависимости, представленные на рис. 2.

Анализ зависимости (Рис. 2) показал, что рост сопротивления в контуре системы отопления при срабатывании регулирующей арматуры у потребителя тепловой энергии приводит к чрезмерному расходу теплоносителя, поэтому на обратных трубопроводах контура отопления и тепловой сети необходима установка клапана, регулирующего расход.

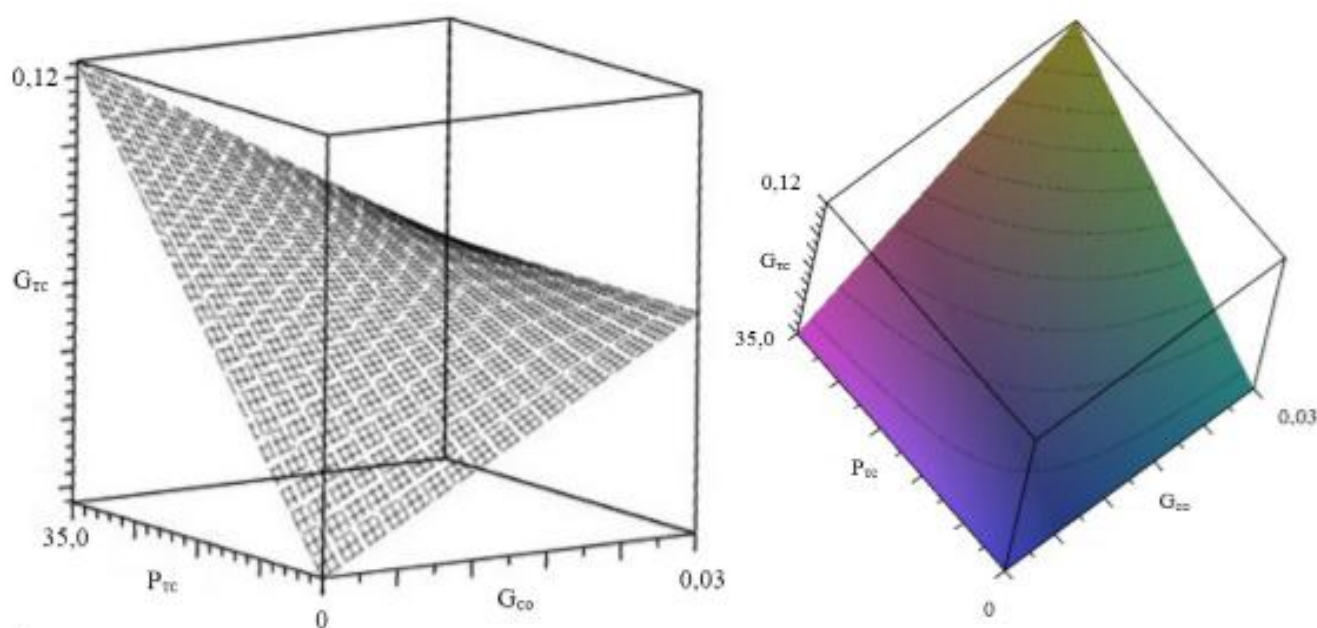


Рис. 2. Зависимость расходов теплоносителей тепловой сети и контура системы отопления от перепада давления в контуре системы отопления.

Анализ зависимости (Рис. 2) 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.

Для получения математической модели потокораспределения двухтрубной внутриквартальной тепловой сети, работающей с ИТП на базе МТА, построена оргграф-схема (Рис. 3).

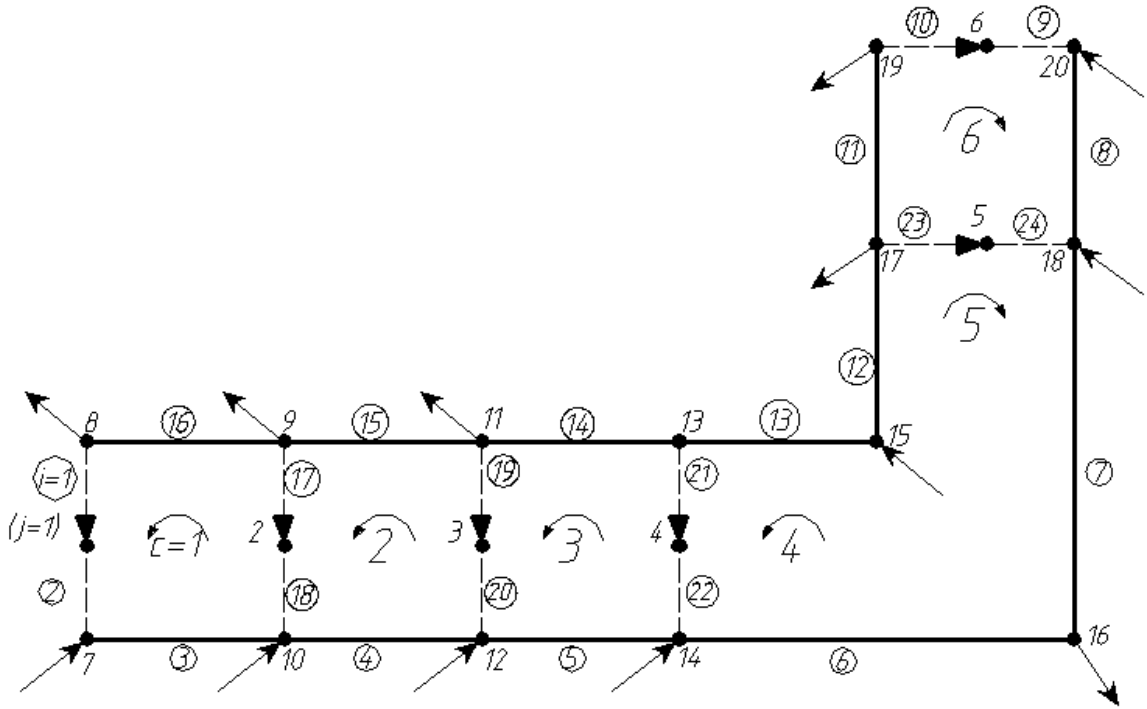


Рис. 3. Эквивалентная схема внутриквартирной тепловой сети, оргграф-схема.

Исходная математическая модель распределения теплоносителя имеет вид

$$\mathbf{D}\vec{G} = \vec{G}_{\text{ур}}. \quad (6)$$

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

$$\mathbf{C} \cdot \Delta \mathbf{P} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{K} = \mathbf{C}\vec{H}, \quad (7)$$

где \mathbf{D} – матрица соединений;

\mathbf{G} – диагональная матрица расходов;

\mathbf{C} – матрица совпадений мест обходов контуров;

$\Delta \mathbf{P}$ – диагональная матрица давлений;

\vec{H} – вектор перепадов давлений, создаваемых циркуляционными и смесительными насосами на участках ИТП.

$$\mathbf{M}^{(N)} \Delta G_x^{(N+1)} = -\Delta h_x^N. \quad (8)$$

Определив матрицы \mathbf{D} и $\mathbf{C}, \mathbf{G}, \Delta \mathbf{P}$, получаем систему уравнений, решением которой являются коэффициенты уравнений (6,7).

Решая аналогичные системы уравнений для двухтрубной внутриквартирной тепловой сети, работающей с ИТП на базе МТА, получаем необходимые для регулирования гидравлических и тепловых режимов значения расходов и давлений теплоносителя.

Использование данной математической модели позволяет анализировать возможные гидравлические режимы работы всех контуров рассматриваемой тепловой сети. Результаты расчета гидравлического режима работы натурной двухтрубной тепловой сети в Кировском районе г. Донецка представлены на рис. 4.

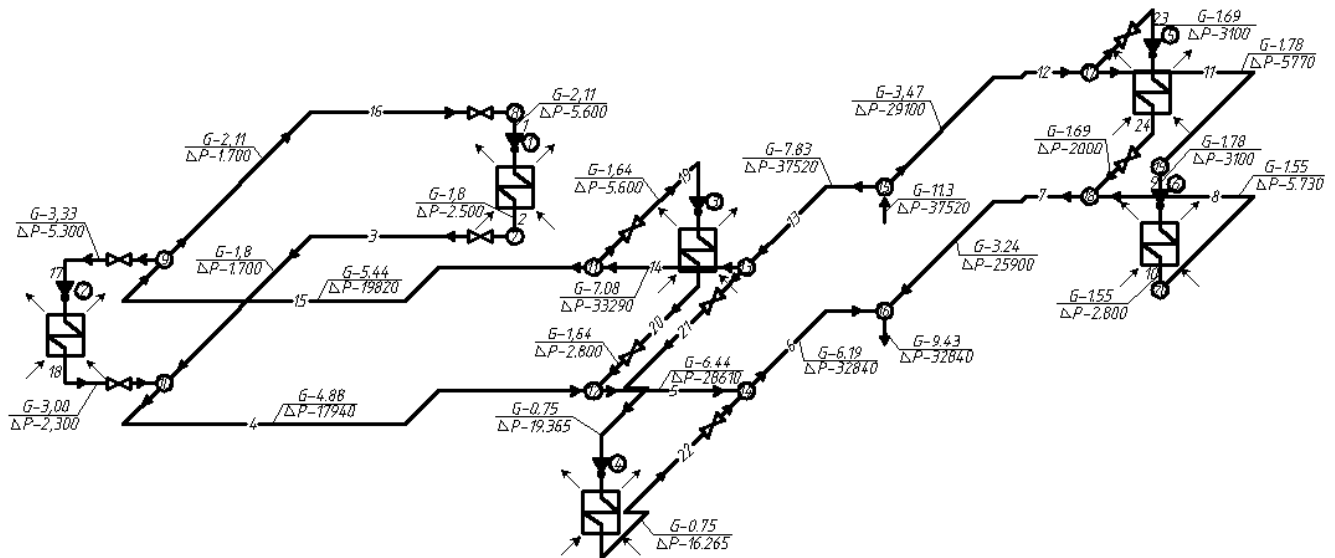


Рис. 4. Натурная двухтрубная система теплоснабжения с узловыми расходами и давлениями.

Использование данной методики расчета позволяет исследовать сложно 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 максимальных (зимний период) и минимальных (летний период) нагрузках, дает возможность подбирать оптимальные диаметры трубопроводов для этих режимов, а также определять необходимую степень открытия регулирующей арматуры в зависимости от тепловой нагрузки потребителя, что позволит получить существенную экономию тепловой энергии.

В третьем разделе в соответствии с теорией планирования эксперимента на основании проведенного анализа состояния проблемы потокораспределения выбран объект исследования, разработан план эксперимента, выделены влияющие факторы, изложен метод планирования и проведения эксперимента. Для проведения исследований в лаборатории кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (г. Макеевка) создана экспериментально-лабораторная установка ИТП с МТА (Рис. 5).

Принципиальная схема лабораторной установки для исследования тепловых характеристик тепловых потоков приведена на рис. 6.



Рис. 5. Экспериментально-лабораторная установка ИТП на базе МТА.

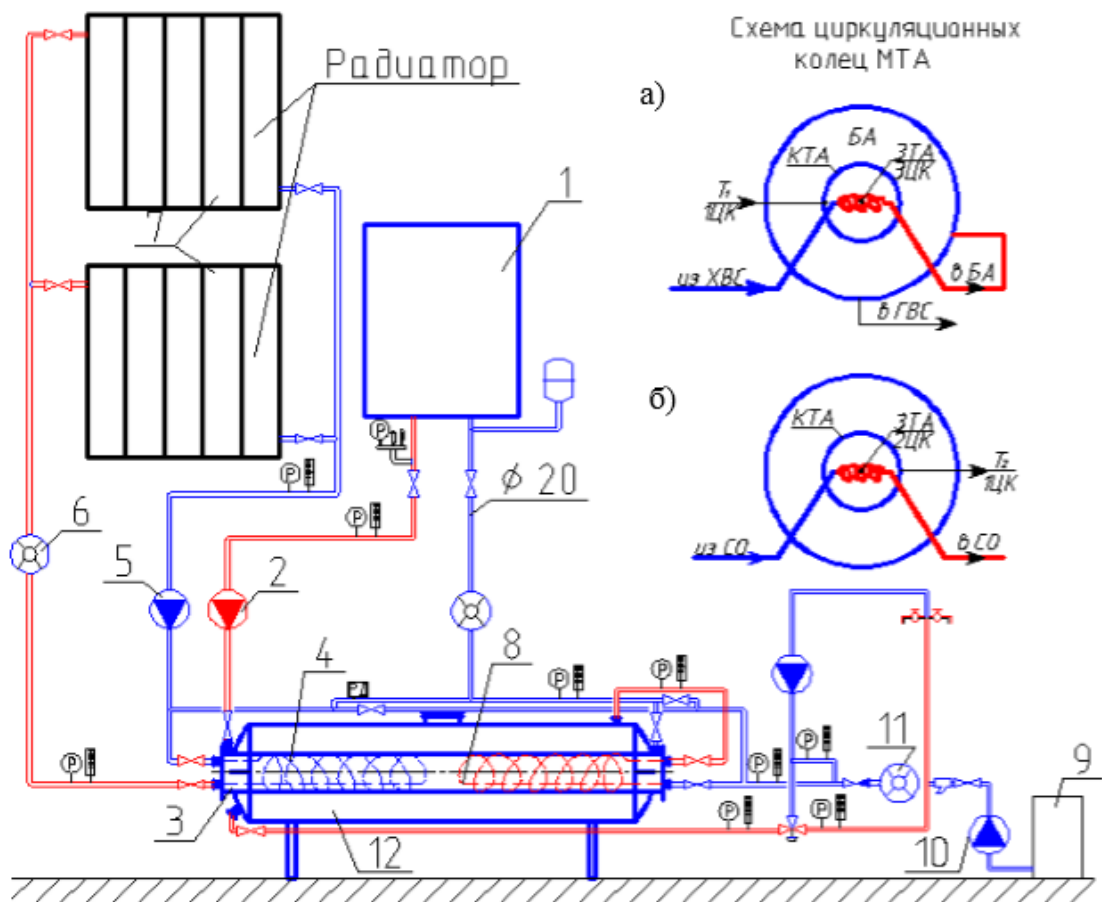


Рис. 6. Принципиальная схема лабораторной установки:

- а) схема циркуляционного контура системы горячего водоснабжения (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 мощностью 2 кВт 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.

В ходе исследований было выделено шесть показателей, влияющих на потокораспределение в ИТП с МТА: расходы теплоносителей в контуре тепловой сети, отопления и горячего водоснабжения, а также перепад давлений в контуре тепловой сети, отопления и в системе ГВС.

Перед разработкой плана эксперимента были определены уровни варьирования факторов и выбраны их кодированные значения (Табл. 1).

Таблица 1 - Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
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	0,01125	0,066	0,0085
x_3 – разница давления в контуре тепловой сети ΔP_{TC} , 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 ГВС $\Delta P_{ГВС}$, кПа	0,91	1,005	1,1	0,095
x_6 - температура наружного воздуха t_n , °С	-20	-5	+8	15

Для экспериментальных исследований объекта с шестью факторами с помощью полнофакторного плана проведено 64 опыта ($N=2^6$). Для упрощения расчетов предполагалось, что эффекты взаимодействия факторов в исследуемом объекте маловероятны и пренебрежительно малы, поэтому воспользовались ¼ репликой полнофакторного эксперимента, то есть дробным факторным экспериментом.

В качестве методов планирования эксперимента для получения зависимостей расходов и перепадов давлений теплоносителей в системе отопления, системе теплоснабжения и системе ГВС был использован дробный факторный эксперимент, поскольку в качестве условий было задано минимальное влияние факторов.

Обработка результатов эксперимента позволила построить графики зависимостей расходов и перепада давлений и сравнить экспериментальные данные с теоретическими (Рис. 7 – 12).

$$\hat{y}_{\text{мод}, G_{TC}} = -0,1781 + 17,56 \cdot G_{CO} + 0,0126 \cdot G_{ГВС} + 2,663 \cdot \Delta P_{TC} - 0,6738 \cdot G_{CO} \times \\ \times G_{ГВС} - 0,1022 \cdot G_{ГВС} \cdot \Delta P_{TC} - 159,5 \cdot G_{CO} \cdot \Delta P_{TC} + 6,122 \cdot G_{ГВС} \cdot G_{CO} \cdot \Delta P_{TC}. \quad (9)$$

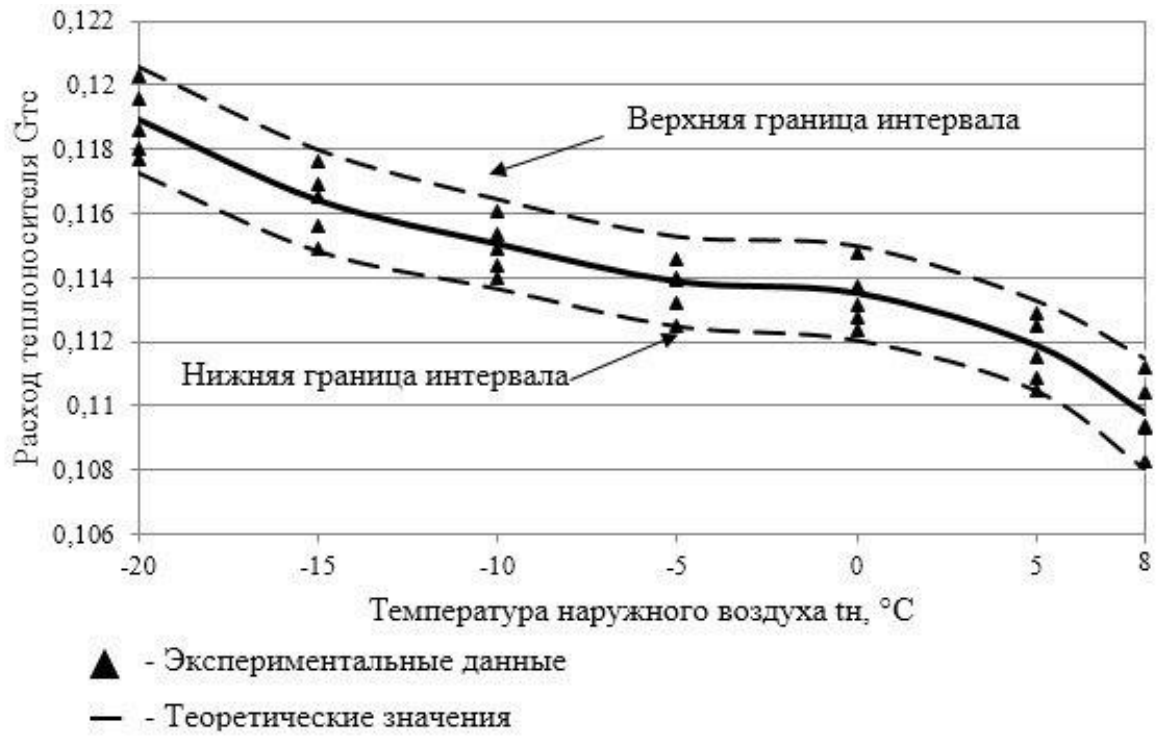


Рис. 7. Определение доверительных интервалов расхода теплоносителя для контура тепловой сети в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

$$\begin{aligned} \hat{y}_{\text{мод}, G_{\text{CO}}} = & -4,440 + 2,352 \cdot G_{\text{ТС}} + 0,170 \cdot \Delta P_{\text{ТС}} + 0,658 \cdot \Delta P_{\text{CO}} - 5,492 \cdot \Delta P_{\text{CO}} \cdot G_{\text{ТС}} - \\ & - 0,0237 \cdot \Delta P_{\text{CO}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}} - 0,0897 \cdot G_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}} + 0,2108 \cdot \Delta P_{\text{CO}} \cdot G_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}}. \end{aligned} \quad (10)$$

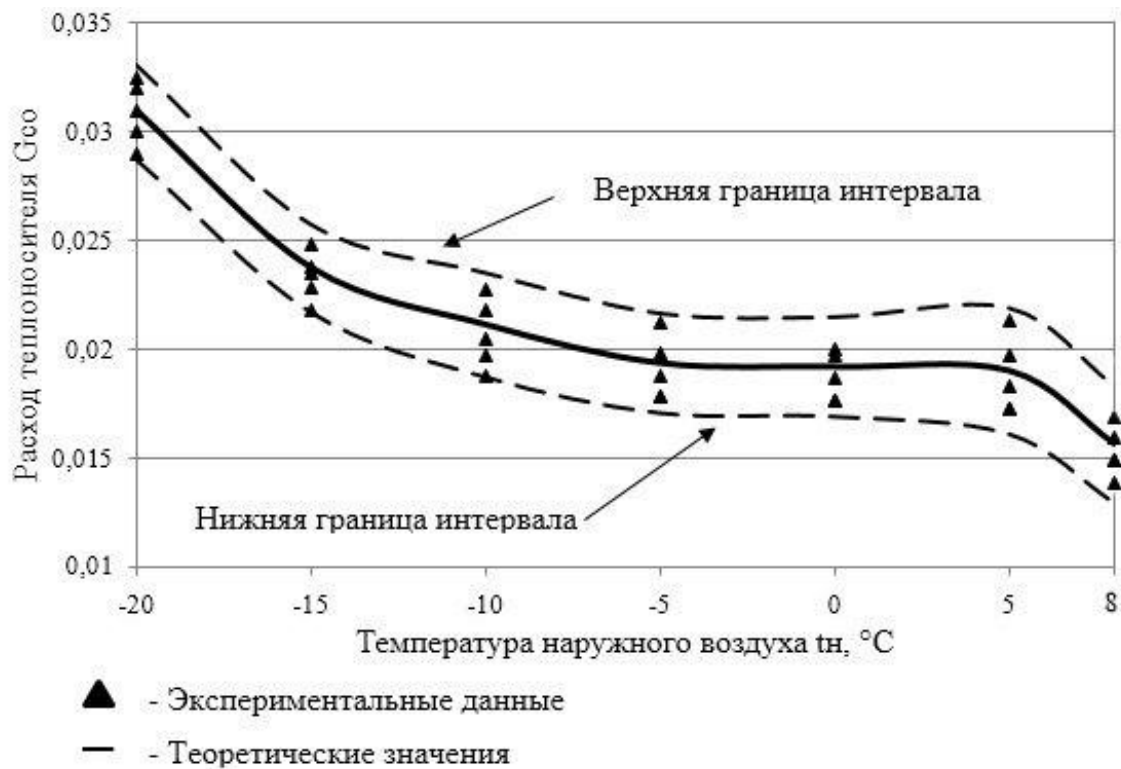


Рис. 8. Определение доверительных интервалов расхода теплоносителя для контура системы отопления в зависимости от изменений температуры наружного воздуха

$$\hat{Y}_{\text{мод}, G_{\text{ГВС}}} = 8,362 - 97,14 \cdot G_{\text{ТС}} + 0,1296 \cdot \Delta P_{\text{ТС}} - 10,78 \cdot \Delta P_{\text{ГВС}} + 116,2 \cdot G_{\text{ТС}} \times \\ \times \Delta P_{\text{ГВС}} + 0,0239 \cdot \Delta P_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ГВС}} + 0,0433 \cdot G_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}} - 1,259 \cdot \Delta P_{\text{ГВС}} \cdot G_{\text{ТС}} \cdot \Delta P_{\text{ТС}}. \quad (11)$$

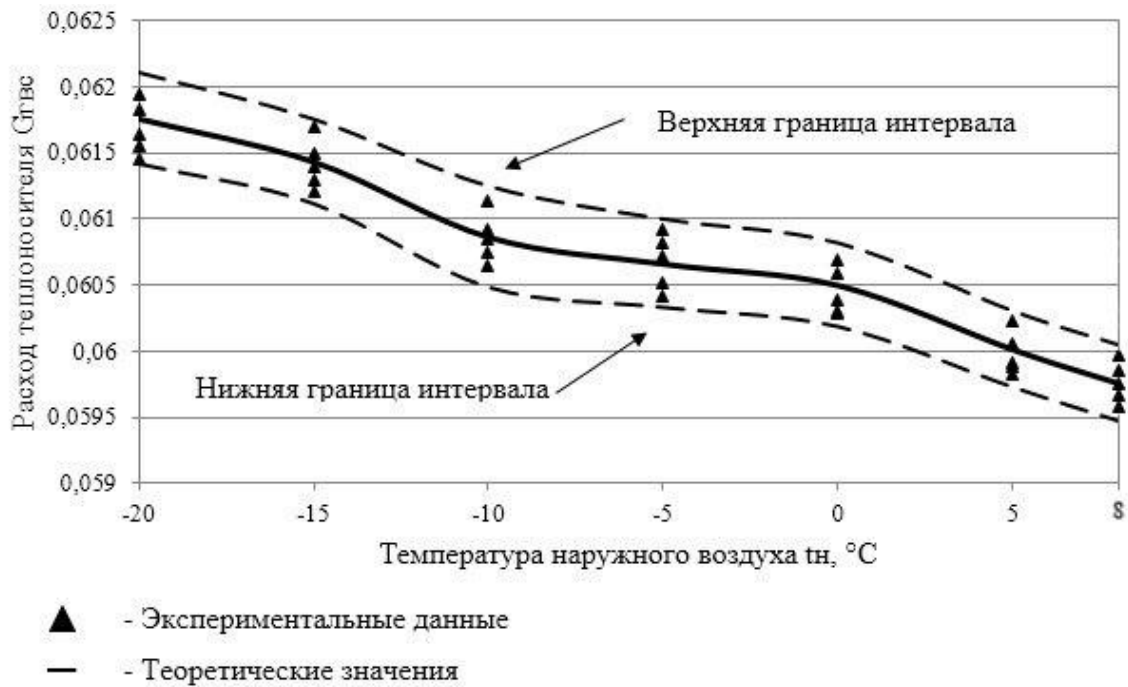


Рис. 9. Определение доверительных интервалов расхода теплоносителя для контура горячего водоснабжения в зависимости от изменений температуры наружного воздуха.

$$\hat{Y}_{\text{мод}, \Delta P_{\text{ТС}}} = -341,5 + 18219,4 \cdot G_{\text{CO}} + 3264,2 \cdot G_{\text{ТС}} - 161415,4 \cdot G_{\text{CO}} \cdot G_{\text{ТС}} - 52135,7 \times \\ \times G_{\text{ГВС}} \cdot G_{\text{ТС}} + 5865,3 \cdot G_{\text{ГВС}} - 308698,2 \cdot G_{\text{CO}} \cdot G_{\text{ГВС}} + 2743984,0 \times G_{\text{CO}} \cdot G_{\text{ГВС}} \cdot G_{\text{ТС}}. \quad (12)$$

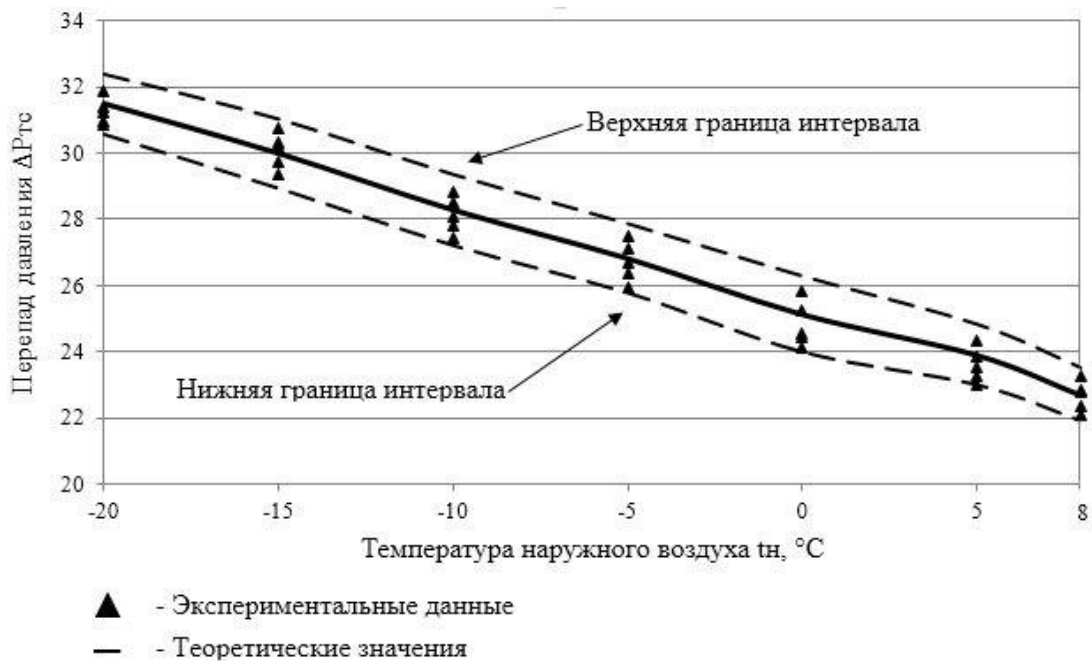


Рис. 10. Определение доверительных интервалов перепада давлений теплоносителя для контура тепловой сети в зависимости от изменений температуры наружного воздуха.

$$\hat{y}_{\text{мод}, \Delta P_{CO}} = -1,470 + 15,95 \cdot G_{TC} + 0,065 \cdot \Delta P_{TC} + 107,2 \cdot G_{CO} - 0,5387 \cdot G_{TC} \cdot \Delta P_{TC} - 997,0 \cdot G_{TC} \cdot G_{CO} - 4,305 \cdot \Delta P_{TC} \cdot G_{CO} + 38,26 \cdot G_{TC} \cdot \Delta P_{TC} \cdot G_{CO}. \quad (13)$$

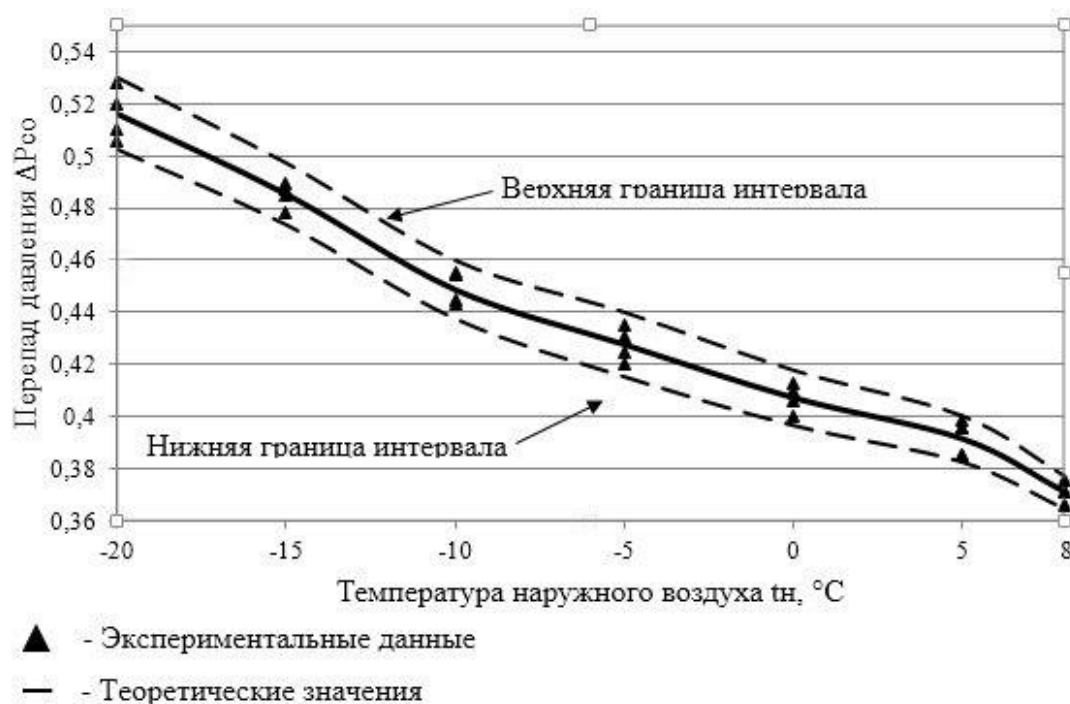


Рис. 11. Определение доверительных интервалов перепада давлений теплоносителя для контура системы отопления в зависимости от изменений температуры наружного воздуха.

$$\hat{y}_{\text{мод}, \Delta P_{ГВС}} = -5,303 + 56,22 \cdot G_{TC} + 0,2374 \cdot \Delta P_{TC} + 111,6 \cdot G_{ГВС} - 2,096 \cdot G_{TC} \times \Delta P_{TC} - 1004,0 \cdot G_{TC} \cdot G_{ГВС} - 4,335 \cdot \Delta P_{TC} \cdot G_{ГВС} + 38,53 \cdot G_{TC} \cdot \Delta P_{TC} \cdot G_{ГВС}. \quad (14)$$

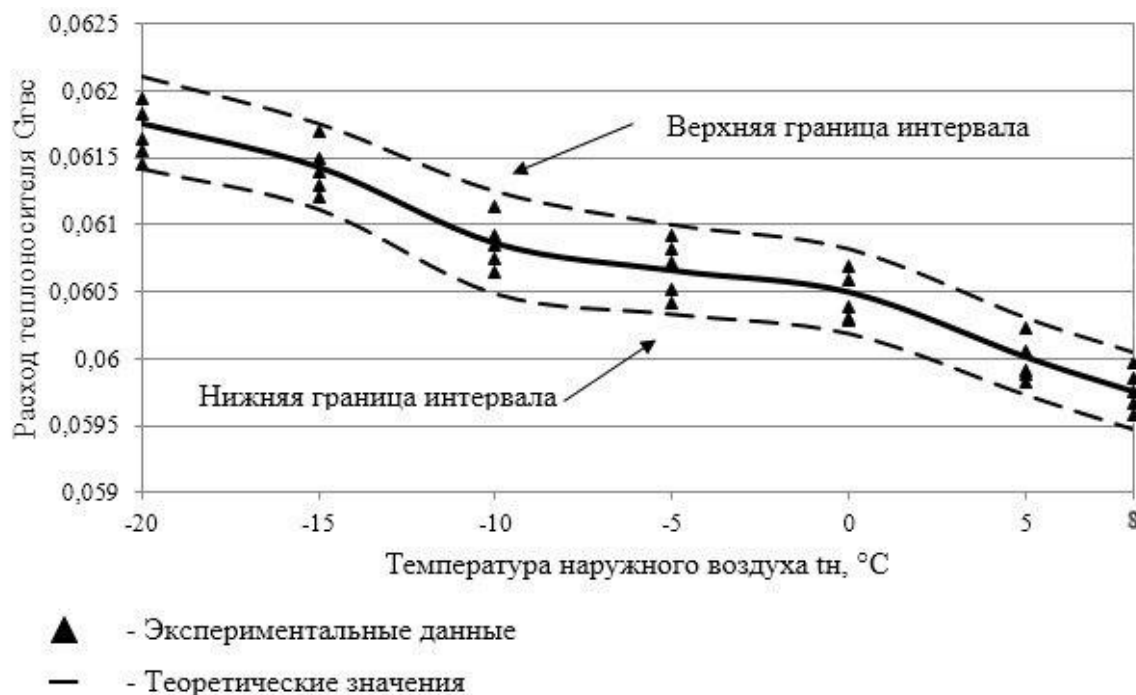


Рис. 12. Определение доверительных интервалов перепада давлений теплоносителя для контура горячего водоснабжения в зависимости от изменений температуры наружного воздуха.

Полученные уравнения регрессии были проверены на адекватность с помощью критерия Фишера и критерия Стьюдента. Адекватность полученных математических моделей подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований.

В результате проведенных экспериментальных исследований и анализа уравнений (9-14) можно сделать следующие выводы:

- для изменения расхода теплоносителя в контуре тепловой сети и контуре системы отопления необходимо предусматривать насосы с частотным регулированием, так как из-за регулирования параметров теплоносителя в помещениях потребителей за счет термостатической арматуры будет изменяться гидравлический режим;

- для эффективного использования теплоносителя в обратных трубопроводах контура тепловой сети и контура отопления необходима установка клапанов расхода в узлах d – 19 b – 6 (Рис. 1);

- в ходе экспериментальных исследований выявлена необходимость установки термосмесительного элемента в узле d – 9 во избежание попадания к потребителю горячей воды с температурой выше 60°C, так как в часы минимального водоразбора вода в баке-аккумуляторе перегревается.

В четвертом разделе диссертационной работы предложена методика расчета гидравлического режима подключения абонентов к ИТП с МТА, в которой учитывается неравномерность потребления теплоты при независимом подключении абонентских вводов.

Предложена методика конструктивного расчета многоконтурного теплообменного аппарата змеевикового типа. Разработана принципиальная схема автоматического регулирования работы ИТП на базе МТА, позволяющая усовершенствовать систему теплоснабжения здания с целью наиболее экономичного расходования тепловой энергии (Рис. 13) (патент № 58630, опубл. 26.04.2011).

Для оценки эффективности инвестиций при реконструкции внутриквартальной тепловой сети в Кировском районе г. Донецка были запроектированы десять ИТП на базе МТА в подвалах девятиэтажных домов и двадцать ИТП на базе МТА – в подвалах пятиэтажных домов.

Для девятиэтажной застройки при дисконтированном периоде окупаемости 15 лет и 1 месяц чистый дисконтированный доход составит 646,602 тыс. руб. В данном случае индекс рентабельности инвестиций составит 1,12, а внутренняя норма доходности – 9,92%.

Для пятиэтажной застройки при дисконтированном периоде окупаемости 18 лет и 1 месяц чистый дисконтированный доход составит 161,774 тыс. руб. В

данном случае индекс рентабельности инвестиций составит 1,03, а внутренняя норма доходности – 6,4%.

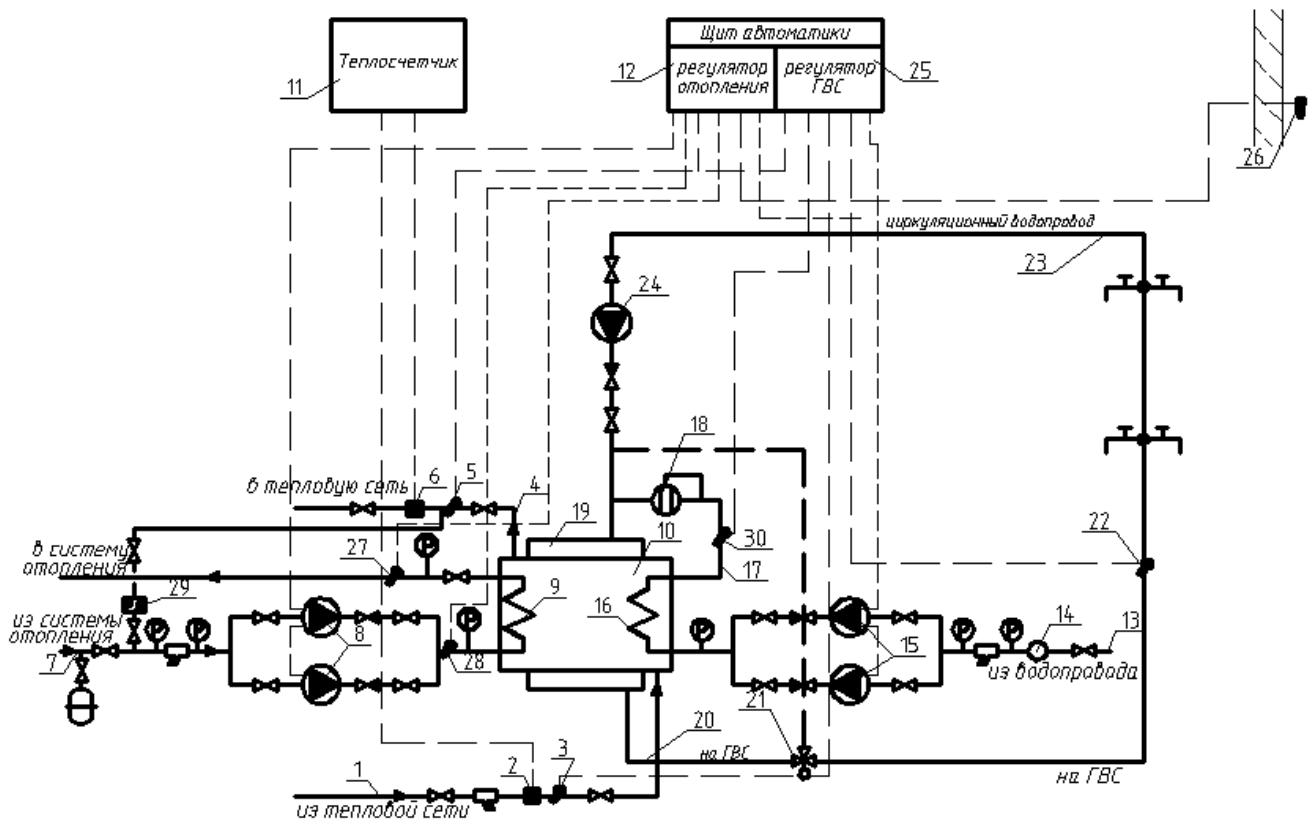


Рис. 13. Принципиальная схема автоматизации ИТП на базе МТА.

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.

ВЫВОДЫ

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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Олексюк, А. О. Оптимізація гідравлічних режимів роботи теплових мереж / А. О. Олексюк, **М. В. Долгов** [Текст] // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. – К. : КНУБА, 2009. - №14. – С. 108–115. (*Выполнен анализ существующих режимов отпуска теплоты*).

2. Олексюк, А. О. Гідравлічний режим теплової мережі за незалежною схемою приєднання з підігрівально-акумулявальною установкою / А. О. Олексюк, **М. В. Долгов** [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2012. - №2 (94). – С. 58-63. (*Разработана методика гидравлического режима подключения абонентов к тепловой сети по независимой схеме*).

3. Олексюк, А. А. Математическое моделирование тепломассообмена в трехконтурных теплообменниках с аккумулятором теплоты / А. А. Олексюк,

Н. В. Долгов [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2010. - №6 (86). – С. 123–130. *(Проведен анализ теплообменных процессов).*

4. Олексюк, А. А. Установки с независимым присоединением систем отопления и горячего водоснабжения через трехконтурные теплообменники и выбор их оптимальных параметров / А. А. Олексюк, Н. А. Максимова, **Н. В. Долгов**, А. А. Горделюк [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Современное промышленное и гражданское строительство». – 2011. - №1(7). – С. 43–50. *(Анализ проблемы зависимого подключения абонентов к тепловым сетям).*

5. Олексюк, А. О. Моделювання гідравлічних режимів роботи теплових мереж з багатоконтурними енергоресурсозберігаючими установками на індивідуальних теплових пунктах / А. О. Олексюк, **М. В. Долгов**, А. А. Горделюк [Текст] // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – 2011. - №2(13). – С. 185–190. *(Проведен анализ гидравлических режимов работы тепловых сетей).*

6. Олексюк, А. А. Оценка работы системы теплоснабжения от индивидуальных тепловых пунктов с подогревательно-аккумуляторными установками / А. А. Олексюк, И. Г. Шитикова, **Н. В. Долгов** [Текст] // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. - 2013. - №1(16). – С. 146–155. *(Формулировка проблемы работы систем теплоснабжения, постановка задач исследований, предложена схема ИТП).*

7. Олексюк, А. А. Саморегулирующие энергосберегающие системы теплоснабжения с подогревательно-аккумуляторными установками для независимых систем отопления и горячего водоснабжения ЖКХ городов Украины / А. А. Олексюк, **Н. В. Долгов** [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2011. - №5(91). – С. 87–92. *(Предложены методы регулирования подогревательно-аккумуляторной установки).*

8. **Долгов Н. В.** Автоматизация ИТП с многоконтурным теплообменником / Н. В. Долгов, А. А. Олексюк [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2014. - №3(107). – С. 20–24. *(Предложена схема с автоматическим регулированием отпуска теплоты в ИТП с МТА).*

9. **Долгов Н. В.** Исследование гидравлического и теплового режима трехконтурного теплообменного аппарата змеевикового типа / Н. В. Долгов [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2014. - №3 (107). – С. 68–72.

10. **Долгов Н. В.** Математическая модель потокораспределения в индивидуальном тепловом пункте с многоконтурным теплообменным аппаратом

(МТА) / Н. В. Долгов, А. А. Олексюк, В. М. Левин, О. В. Шайхед [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2014. - №5 (109). – С. 40–47. (*Разработана математическая модель потокораспределения в контурах ИТП с МТА*).

– публикации в зарубежных и, рецензируемых периодических научных изданиях:

11. Долгов Н. В. Экспериментальные исследования потокораспределения на ИТП с трехконтурным теплообменником / Н. В. Долгов, А. А. Олексюк, З. В. Удовиченко, Д. В. Выборнов [Текст] // Sciences of Europe. – 2016. - №5 (5). – Praha. - С. 77–84. (*Определены зависимости, описывающие потокораспределение в контурах ИТП с МТА*).

- патенты

12. Патент на полезную модель №84172 Украина, F24D 11/00. Триконтурный теплообмінник змієвикового типу з рівномірним відбором теплоносія для систем опалення та гарячого водопостачання [Текст] / А. А. Олексюк, Д. В. Выборнов, Н. В. Долгов; заявл. 22.04.2013; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19.

13. Патент на полезную модель №58630 Украина, F24D 11/02. Саморегулююча система опалення та гарячого водопостачання [Текст] / Н. В. Долгов, А. А. Олексюк; заявл. 14.06.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.

14. Патент на полезную модель №70731 Украина, F24D 11/00. Триконтурный теплообмінник змієвикового типу для систем опалення та гарячого водопостачання від альтернативного джерела теплоти [Текст] / А. А. Горделюк, А. А. Олексюк, С. А. Челапко, Н. В. Долгов; заявл. 28.11.2011. опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

– публикации в других изданиях:

15. Долгов Н. В. Оптимизация систем теплоснабжения от индивидуальных тепловых пунктов с трехконтурными теплообменниками / Н. В. Долгов // Сб. тезисов докладов III Междун. конф. «Науково-технічне та організаційно-економічне сприяння реформам у будівництві та ЖКГ», Макеевка. – 2012. – С. 125-128.

16. Олексюк А. А. Методика расчета трехконтурного теплообменника змеевикового типа для независимых систем ОВ и ГВ / А. А. Олексюк, Н. В. Долгов [Текст] // Строительство – как фактор формирования комфортной среды жизнедеятельности. Матер. IV Республиканской научно-практ. конф., г. Бендеры. – 2012. - С. 121–125.