

На правах рукописи

ПАНФИЛОВ  
Виталий Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ  
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЗДАНИЙ**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2009

Работа выполнена в на кафедре «Теплогазоснабжение и вентиляция»  
ФГОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет» (г. Красноярск)

Научный руководитель:  
доктор технических наук

**Липовка Юрий Львович**

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор  
кандидат технических наук

**Кулагин Владимир Алексеевич  
Иванов Игорь Александрович**

Ведущая организация:

**ГОУ ВПО Новосибирский  
государственный технический  
университет (г. Новосибирск)**

Защита состоится «18» марта 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, 26, ауд. Ж-115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института Сибирского федерального университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ПИ СФУ, Ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.099.07.

факс (3912) 43-06-92 (для кафедры ТЭС).

e-mail: [boiko@krgtu.ru](mailto:boiko@krgtu.ru)

Автореферат разослан «15» февраля 2009 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент

Бойко Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одним из направлений энергосбережения в системах централизованного теплоснабжения, является совершенствование схем автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) зданий и сооружений на базе современных энергосберегающих технологий. Исследование режимов работы таких ИТП, являющихся связующим звеном между потребителями теплоты и тепловыми сетями, обеспечивает принятие корректных, малозатратных и быстроокупаемых проектных и технологических решений, способствующих экономии тепловой и электрической энергии. Поэтому совершенствование методики выбора новых и повышение эффективности существующих индивидуальных тепловых пунктов является актуальной задачей, решение которой позволит повысить качество и надежность работы теплотехнологических систем зданий и системы теплоснабжения в целом.

**Объектом исследования** являются схемы подготовки теплоносителя, получаемого от источника теплоты, для использования в теплотехнологических системах зданий.

**Предмет исследования:** внешние и внутренние факторы, влияющие на режимы работы ИТП и определяющие их выбор.

**Цель работы** заключается в развитии и внедрении методики исследования автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов в практику проектирования для повышения эффективности работы теплотехнологических систем зданий.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи:**

- определить основные внешние и внутренние факторы, влияющие на выбор схем автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов;
- усовершенствовать методику расчета потокораспределения на ИТП и определить степень гидравлической устойчивости теплотехнологических систем зданий;
- создать экспериментальную установку и провести исследования влияния параметров теплоносителя на гидравлические и тепловые режимы теплотехнологических систем зданий при различных условиях эксплуатации оборудования ИТП;
- обобщить результаты расчета с данными экспериментальных и натурных замеров для обоснования рекомендаций по практическому использованию результатов для выбора малозатратных и быстроокупаемых технологических схем подготовки теплоносителя на автоматизированных тепловых пунктах.

**Научная новизна работы:**

1. Предложено в инженерных расчетах потокораспределения на ИТП, для учета дросселирования и эксплуатационного уменьшения внутренних диаметров труб, ввести диагональную матрицу в математическую модель для обобщенного метода контурных расходов и использовать совместно с обобщенным методом узловых давлений, что сокращает время расчетов в 2-2,5 раза.

2. Усовершенствована методика оценки влияния отбора теплоносителя из тепловой сети на гидравлический режим теплотехнологических систем зданий; по результатам экспериментальных исследований и натурных замеров впервые получены эмпирические зависимости, позволяющие оценивать влияние различных сочетаний основных первичных факторов на работу автоматизированного теплового пункта.

3. Разработаны критерии оценки и способы расчетного обоснования требований к аргументированному выбору в проектных и нештатных условиях технологических схем автоматизированных тепловых пунктов с учетом рельефа местности, особенностей теплотехнологических систем зданий и специфических требований к теплогидравлическим режимам тепловой сети.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработано специализированное алгоритмическое обеспечение, реализующее методику расчета регулируемого потокораспределения, которое способствует улучшению степени достоверности прогноза принятия схемы регулирования тепловых потоков при проектировании ИТП.

2. Разработана и внедрена лабораторная установка, позволяющая на основе выбора оптимальных условий эксплуатации, совершенствовать отдельные узлы автоматизированного индивидуального теплового пункта с учетом специфических свойств присоединенных теплотехнологических систем потребителей для повышения гидравлической устойчивости и эффективности системы теплоснабжения в целом.

3. Выявлены особенности возникновения нештатных ситуаций на ИТП при использовании различных регулирующих клапанов. Разработан алгоритм принятия технических решений ИТП в зависимости от характера отклонений режимов работы источника и гидравлического режима тепловой сети от требуемого режима для теплотехнологических систем зданий, способствующий повышению энергоэффективности теплоснабжения.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм расчета потокораспределения автоматизированного теплового пункта, реализующий, дополнительно к известным методам гидравлического расчета, учет гидравлических характеристик регулирующих клапанов.

2. Подтвержденная экспериментально методика оценки относительного расхода теплоты на отопление в зависимости от изменения внешних и внутренних факторов, удовлетворяющая требованиям достоверности результатов.

3. Аппроксимационные зависимости, позволяющие прогнозировать возникновение нештатных ситуаций в тепловых сетях при использовании неадекватных схем тепловых вводов. Технические решения, направленные на реализацию процесса доводки параметров теплоносителя перед подачей в теплотехнологические установки зданий, и рекомендации по организации режимов их работы для повышения эффективности энергетического использования.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием современных методов исследований в области анализа потокораспределения и подтверждается удовлетворительной сходимостью экспериментальных данных с теоретическими расчетами и данными других авторов, а также положительными результатами эксплуатации разработанных схем ИТП.

**Личный вклад автора.** Автор принимал участие в постановке задачи, разработке методик и проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов, формулировании основных выводов по результатам выполненных работ по теме диссертации.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований были представлены: на ежегодных научно-практических конференциях КПИ–КИСИ–КрасГАСА–СФУ в 1982-2008 гг., на V Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность: достижения и перспективы» г. Красноярск, 2004, VII, VIII, IX Всероссийских научно-практических конференциях «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» г. Красноярск, 2006–2008 гг., научно-практических семинарах в городах Красноярск, Томск.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 2 статьи в изданиях по перечню ВАК.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований получили внедрение при проектировании новых и реконструкции существующих центральных и индивидуальных тепловых пунктов в городах Красноярск, Нерюнгри, Томск. Разработана, смонтирована и внедрена в учебный процесс СФУ лабораторная установка «Исследование режимов работы автоматизированного теплового пункта».

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, научных выводов и рекомендаций, списка литературы из 155 наименований и содержит 153 страницы текста, включая 45 рисунков и 26 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, выделены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** обобщены основные принципиальные схемы автоматизированных тепловых пунктов, проанализированы наиболее известные методы расчета потокораспределения и область возможного их использования в практике проектирования теплоснабжения, обоснована необходимость учета функциональных особенностей потребителей и рельефа местности при проектировании систем подготовки теплоносителя на тепловых пунктах.

Наиболее распространена на сегодняшний день схема присоединения к квартальным тепловым сетям от ЦТП через элеватор, обеспечивающий постоянство коэффициента смешения при изменении температур подаваемой

воды, однако для этого необходимо иметь неизменные напор сетевой воды на вводе и гидравлическое сопротивление системы отопления. При этой схеме регулирование одноконтурных систем отопления при закрытии термостатов и проходе воды через замыкающие участки и двухконтурных систем, закрытие термостатов в которых приводит к сокращению расхода воды, циркулирующей в системе, не дает должного эффекта, т. к. расход сетевой воды, проходящей через сопло элеватора, остается неизменным, что приводит к росту температуры воды в подающем трубопроводе системы отопления, и как следствие, к увеличению нерегулируемого теплового потока от стояков.

Рассмотрены основные схемы индивидуальных тепловых пунктов с зависимым и независимым присоединением потребителей и основные способы регулирования отпуска теплоты.

Проанализированы методы гидравлического расчета: для наиболее простых тупиковых схем теплотехнологических комплексов, такие как метод «эквивалентных отверстий», предложенный Д. Мюргом, метод «перемещения единицы объема», предложенный П. Н. Каменевым, метод суммирования сопротивлений и проводимостей, впервые примененный Б. Л. Шифринсоном, графические и графоаналитические методы двух направлений: выполнение расчетов путем построения кривых в системе координат «напоры - расходы» по методу Л.А.Мелентьева; построение графиков давлений (пьезометрических графиков) в системе координат «длины участков - давления» и др. Иллюстративное значение в понимании гидравлических режимов для названных графических направлений актуально до настоящего времени, однако воспользоваться этими методами для расчета автоматизированных ИТП не представляется возможным.

Большое количество работ Н. Н. Абрамова, Л. Д. Бермана, В. Н. Братенкова, Б. И. Генкина, В. К. Дюскина, А. Г. Евдокимова, М. Л. Закса, О. Г. Ляхова, Д. В. Маслова, С. А. Чистовича и др. посвящено аналитическим методам расчета гидравлических режимов, область применения которых приемлема лишь для конкретных модификаций теплогидравлических цепей.

Определенные сложности в расчете поведения тепловых потоков в гидравлических цепях вызывает наличие отборов этих потоков непосредственно из цепи. Вопросам учета особенностей подобных расчетов посвящены работы Ф. П. Генкина, Я. А. Ковылянского, С. Ф. Копьева, Б. М. Красовского, И. С. Ланина, Л. А. Мелентьева, Ю. Л. Липовки.

Методы последовательных приближений сводятся к определению расходов по участкам и давлений во всех узлах с заданной невязкой при условии соблюдения двух сетевых законов и используют сочетание процесса Ньютона с последовательным уменьшением невязок линеаризованных уравнений, что приемлемо для расчета небольших цепей без применения компьютера.

Поконтурная увязка напоров Я. М. Алихашкина, А. Р. Юшкина, К. П. Вишневого, Н. М. Зингера, А. И. Миркиной, F. L. Duffy, L. N. Hoag, G. Weinberg и др. использовалась в качестве основной методики первых расчетов

потокораспределения на компьютере.

Использование традиционных методов предполагает, что характеристики гидравлических сопротивлений участков трубопроводов  $S_j$ , весовые нагрузки в узлах  $G_j$  и давления на выходных коллекторах источников  $P_i$  неизменны для данного конкретного расчета, однако для реальных схем ИТП эти методы могут не иметь решения с заданной точностью.

На основании обзора существующих методов расчета гидравлических режимов выявлены их преимущества и недостатки. Наиболее приемлемы для последующих исследований и оценки реальных схем ИТП представляются обобщенный метод контурных расходов (МКР) и обобщенный метод узловых давлений (МД), разработанные коллективом ученых под рук. В. Я. Хасилева и А. П. Меренкова.

В заключение первой главы сформулированы основные задачи исследований, проводимых в диссертационной работе.

Во **второй главе** рассмотрены элементы теории теплогидравлических цепей и применена к индивидуальным тепловым пунктам методика гидравлического расчета совокупности устройств и соединяющих их трубопроводов. Представлены результаты математического моделирования функциональных особенностей автоматизированных тепловых пунктов (ИТП) с различными топологическими свойствами, рассматриваемых как ориентированные математические графы произвольной пространственной конфигурации. Вычислительная схема учитывает особенности расчета трубопроводной сети ИТП с регулирующими клапанами и приемлема при формировании функциональных схем автоматизации конкретных схем тепловых пунктов.

Для анализа поведения потоков теплоносителя в гидравлической цепи тепловых пунктов использована комбинация обобщенного метода контурных расходов с обобщенным методом узловых давлений.

В математическую модель потокораспределения – исходную систему алгебраических уравнений для обобщенного метода контурных расходов

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \vec{G} &= \vec{G}_{nd} \\ \mathbf{B} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{G} \cdot \vec{G} &= \mathbf{B} \cdot \Delta \vec{P}_{pm} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{G}$  – матрицы, соответственно, соединений узлов и участков схемы, контуров, задвижек, характеристик гидравлического сопротивления, модулей расходов воды;  $\vec{G}$ ,  $\vec{G}_{nd}$ ,  $\Delta \vec{P}_{pm}$  векторы, соответственно, искомого потокораспределения, узловых расходов и насосных перепадов давлений, приводящую к решению системы линейных уравнений

$$2 \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{G}^{(N)} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \Delta G_x^{(N+1)} = -\Delta(\Delta P)_x^{(N)}, \quad (2)$$

которая решается относительно искомого приращений расходов на хордах  $\Delta G_x^{(N+1)}$  на каждом шаге вычислительного процесса последовательных

приближений, где  $N$  – порядковый номер приближения,  $^T$  – знак транспонирования. Введена диагональная матрица  $\mathbf{K}$ , учитывающая степень открытия запорной арматуры.

Решение системы (2) одним из методов линейной алгебры дает приращения расходов на хордах  $\Delta G_x^{(N+1)}$ , а по ним вычисляются поправки  $\Delta G_d^{(N+1)}$  к расходам на участках дерева. Это позволяет получить новое приближение для вектора расходов  $G^{(N+1)} = G^{(N)} + \Delta G^{(N+1)}$ .

Далее производится анализ сходимости вычислительного процесса  $|G^{(N+1)} - G^{(N)}| \leq \delta$ , где  $\delta$  – вектор допустимых погрешностей значений расходов, и по новому приближению  $G^{(N+1)}$  опять формируется и решается система уравнений (2) до достижения требуемой точности расчета.

Методика расчета потокораспределения на ИТП с использованием алгоритма МД позволяет перейти к анализу линейно независимых узлов.

На основе математической модели потокораспределения для МД

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \vec{G} &= \vec{G}_{nd} \\ \bar{\mathbf{A}}^T \cdot \vec{P} + \mathbf{S} \cdot \mathbf{G} \cdot \vec{G} &= \Delta \vec{P}_{pm} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $\vec{P}$  – вектор искомых узловых давлений, составляется и решается система линейных алгебраических уравнений для определения приращений к узловым давлениям  $\Delta \vec{P}_{nd.приращ.}$

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{S} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \bar{\mathbf{A}}^T \cdot \Delta \vec{P}_{nd.приращ.} = -2 \cdot \Delta \vec{G}_{nd.небал.}, \quad (4)$$

где  $\Delta \vec{G}_{nd.небал.}$  – вектор дисбалансов расходов  $G_j$  в узлах и производится поправка вектора  $\vec{P}$  искомых давлений в узлах  $\vec{P}^{(N+1)} = \vec{P}^{(N)} + \Delta \vec{P}_{nd.приращ.}$

Проектирование автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов предполагает выполнение гидравлических расчетов, в которых необходимо учесть наличие регулирующих клапанов и насосов, которые без дополнительных операций не могут быть выполнены напрямую методами МКР и МД, поскольку величины  $\vec{G}_{nd}$ ,  $\Delta \vec{P}_{pm}$ ,  $\mathbf{S}$  не постоянны, а являются функциями неизвестных расходов на участках  $G_i$  и давлений в узлах  $P_j$ .

Особенностью расчета ИТП с регулирующими клапанами по отношению к известной методике является совместное использование во внутреннем цикле методов гидравлического расчета МКР и МД для очередной увязки расходов и давлений с учетом введенной в МКР диагональной матрицы  $\mathbf{K}$ , позволяющей наряду с моделированием степени открытия арматуры, также моделировать и степень уменьшения внутреннего диаметра трубы. Внешний цикл – для пересчета регулируемых параметров по значениям расходов  $\vec{G}$  и давлений  $\vec{P}$ , полученных во внутреннем цикле.

Использование этого математического аппарата позволяет анализировать нерасчетные гидравлические режимы при эксплуатации ИТП. Принципиальная схема теплового пункта при этом заменяется эквивалентной теплогидравлической цепью – ориентированным графом, (рис. 1).

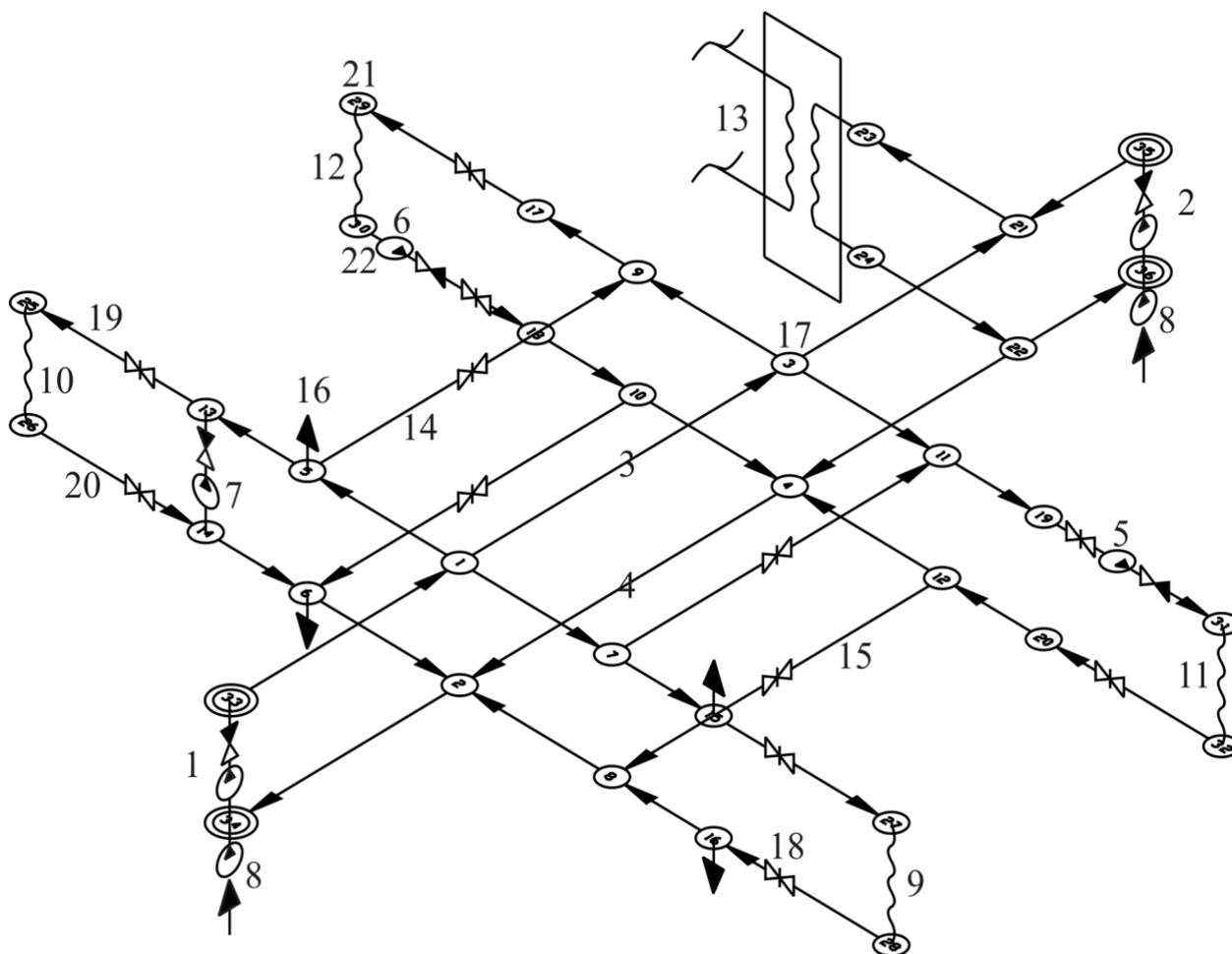


Рисунок 1 – Эквивалентная схема теплового пункта: 1, 2 – источники, 3, 4 – подающая и обратная линии; 5, 6, 7, 8 – насосы, соответственно, на подающей, обратной линиях, на перемычке и подпиточный; 9, 10, 11, 12, 13 – потребители теплоты, присоединенные соответственно, по зависимой прямоточной схеме (9), по зависимой насосной (10), с подкачивающим насосом на подающей (11) и обратной (12) линиях, по независимой схеме (13); 14, 15 – перемычки; 16 – отбор потока жидкости; 17 – разделители потоков; 18 – запорно–регулирующие устройства; 19, 20 – ответвления к потребителям; 21, 22 – места установки регулирующих клапанов.

Из условия равенства располагаемого перепада давлений величине потерь давления на рассматриваемом ИТП

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P_o + \Delta P'' , \quad (5)$$

где  $\Delta P'$ ,  $\Delta P''$  и  $\Delta P_o$  - потери давления, соответственно, в подающем и обратном трубопроводах ИТП и в теплотехнологической установке потребителя, находим

зависимость, определяющую относительное изменение потока рабочей жидкости через теплотехнологическую установку  $\bar{G}_o$  при разборе теплоносителя из теплогидравлической цепи ИТП  $\bar{G}_h$

$$\bar{G}_o = \sqrt{G_h^2 \left[ \beta \bar{S}' - (1-\beta) \bar{S}'' \right]^2 - \left[ \beta^2 \bar{S}' + (1-\beta)^2 \bar{S}'' \right]} + \Delta \bar{P} - \bar{G}_h \left[ \beta \bar{S}' - (1-\beta) \bar{S}'' \right], \quad (6)$$

где  $\bar{S}', \bar{S}''$  относительные характеристики гидравлических сопротивлений подающей и обратной линий ИТП;  $\beta$  - доля отбора рабочей жидкости из подающей линии;  $\Delta \bar{P}$  - отношение фактического перепада давлений на вводе в ИТП к его расчетному значению.

Совместное использование проверенных опытом методов и алгоритмов расчета, использованных и дополненных, дало возможность рассчитывать сложные пространственные схемы автоматизированных ИТП и получать требуемые результаты проектного и наладочного расчетов.

Обработка результатов расчетов позволяет прогнозировать поведение теплогидравлических систем. На рис. 2 представлены результаты расчета изменений расхода воды в теплотехнологической системе потребителя при водоразборе из подающего трубопровода.

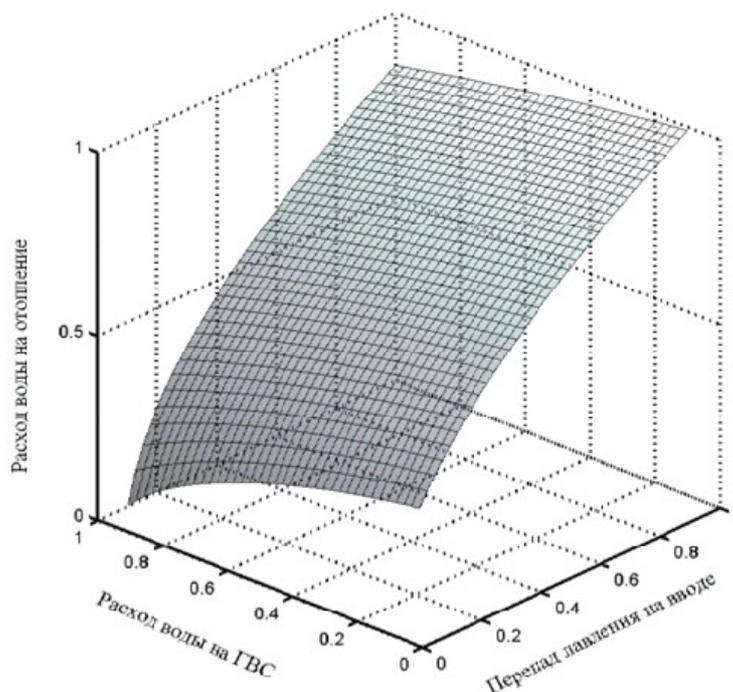


Рисунок 2 – Режим работы индивидуального теплового пункта при водоразборе из подающего трубопровода

На рис. 3 представлены результаты расчета изменений расхода воды в теплотехнологической системе потребителя при водоразборе из обратного

трубопровода.

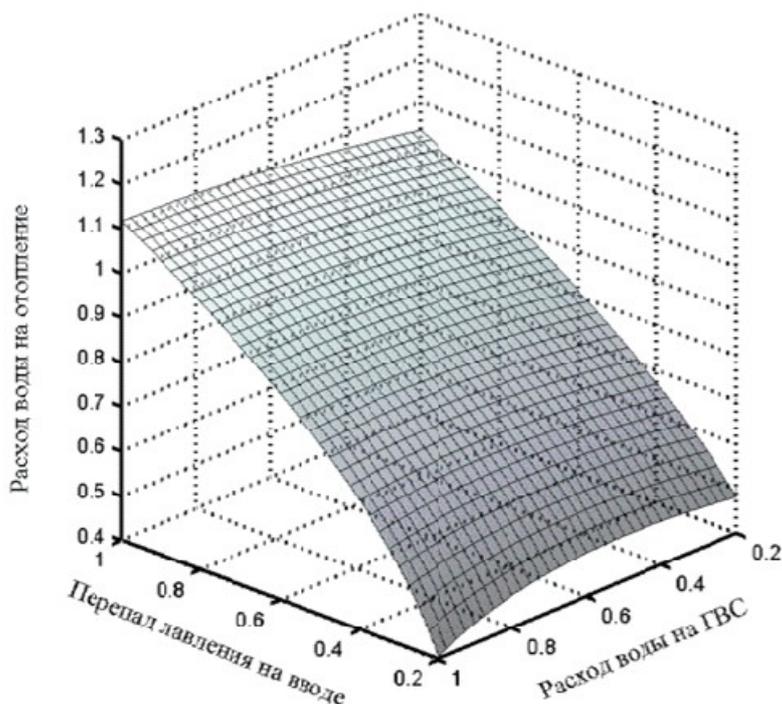


Рисунок 3 – Режим работы индивидуального теплового пункта при водоразборе из обратного трубопровода

Анализируя графики на рис. 2, 3, можно заключить, что при преимущественном отборе жидкости из обратной линии с возрастанием отборов из гидравлической цепи увеличивается расход жидкости через теплотехнологическую систему потребителя, при отборе из подающей линии происходит обратное явление.

**Третья глава** посвящена экспериментально–расчетному обоснованию принятой методики расчета потокораспределения с целью получения объективной информации о поведении потоков тепловой энергии на автоматизированных тепловых пунктах.

Задача выбора оптимальных условий эксплуатации при проведении анализа потокораспределения на тепловом пункте обусловлена тем, что фактическая теплоотдача в систему отопления определяется несколькими независимыми факторами. Для решения этой задачи выполнены экспериментально–расчетные исследования влияния этих факторов на тепловую мощность систем отопления, обслуживаемых ИТП.

Экспериментальные исследования проведены непосредственно на центральном тепловом пункте (ЦТП) ИГУРЭ СФУ в г. Красноярск и на экспериментально–лабораторной установке, специально смонтированной на этом же ЦТП, для обоснования основных выводов, полученных в работе.

Натурные замеры проведены для получения информации о фактических тепловых и гидравлических режимах работы ЦТП в реальных условиях, а

опыты по оптимальному плану на экспериментально–лабораторной установке выполнены с целью изучения влияния различных сочетаний основных первичных факторов на работу автоматизированного теплового пункта.

На рис. 4 представлен фрагмент экспериментальной установки. Для проведения исследований режимов работы ИТП были спроектированы и смонтированы две отдельные параллельные ветви от общего коллектора стенда, регулируемые, соответственно, проходным двухходовым клапаном VS2 с электроприводом AMV-20 и трехходовым смесительным клапаном HRE3 с электроприводом AMB162.



Рисунок 4 – Фрагмент экспериментальной установки ИТП

Измерения расходов воды производились портативным прибором PFM 3000 для измерения расхода, перепада давлений и температуры при настройке балансировочных клапанов в системах теплоснабжения (погрешность 0,15% от диапазона) и счетчиками горячей воды. Для подключения измерительных выходов балансировочного клапана к входу давления использованы соединительные трубки.

Методика исследования потокораспределения приемлема для постоянного давления на вводе ИТП при условии, что система не включает в себя гидравлических элементов с обратной связью (регуляторов перепада давлений на

стояках, термостатических клапанов) и включает 5 основных этапов: создание на компьютере проекта опыта с использованием пользовательского программного обеспечения PFM 3000; измерения, необходимые для расчета гидравлического баланса системы; расчет гидравлического баланса стенда; получение и анализ результатов расчета гидравлического баланса стенда; проверка расчета гидравлического баланса стенда.

После завершения первого опыта проводится перенастройка экспериментального стенда на следующее требуемое сочетание первичных независимых факторов и т. д.

Для исключения грубых и случайных ошибок измерение повторяется достаточно много раз, тогда точность ответа определяется только систематической ошибкой  $\beta_0$ . Выбор числа измерений  $n$  проведен так, чтобы ширина доверительного интервала  $t(p_0)$  составляла 75% от  $\beta_0$  для этого:

- производилось несколько измерений отдельной величины  $x_i$  (в качестве косвенно измеряемой величины выбран температурный перепад воды после теплообменника), причем условия эксперимента поддерживались, насколько возможно, неизменными при фиксированном расходе во вторичном контуре;
- вычислялся стандарт выборки  $S$  по несмещенной оценке дисперсии;
- осуществлялась проверка на нормальность распределения, для чего вычислялась асимметрия  $A$  и эксцесс  $E$  по несмещенным оценкам и собственные дисперсии этих величин, зависящие только от числа измерений и на основании критерия Стьюдента подбирали искомое  $n$ ; получили  $n=5$ .

Натурные замеры проведены в период с 12.10.2007 г. до 14.02.2008 г. в диапазоне наружных температур от +8 °С до -33 °С (табл. 1).

Таблица 1 – Фрагмент результатов замеров реальных режимов работы ЦТП

Дата замера	$t_{н}, \text{°C}$	Первичный контур				Вторичный контур				Контур ГВС			
		$P_{1,}$ бар	$P_{2,}$ бар	$\tau_1,$ °C	$\tau_2,$ °C	$P_{01,}$ бар	$P_{02,}$ бар	$\tau_{01,}$ °C	$\tau_{02,}$ °C	$P_{п,}$ бар	$P_{о,}$ бар	$t_{п,}$ °C	$t_{о,}$ °C
12.10.2007	+8	3,8	2,4	66	46	7,2	4	54	42	5,6	4,8	4	46
												6	
												7	
15.01.2008	-30	4,2	2,4	116	68	8	4	87	54	5,8	5,6	0	44

Пределы изменения давлений  $P_i$ , расходов  $G_i$  и температур теплоносителя: в первичном контуре (до теплообменника): в подающем трубопроводе  $P_1 = 2,8 - 4,6$  бар,  $G_1 = 54,3 - 58,9$  т/ч,  $\tau_1 = 65 - 118$  °С; в обратном трубопроводе  $P_2 = 1,8 - 3,4$  бар,  $G_2 = 41,8 - 45,7$  т/ч,  $\tau_2 = 43 - 82$  °С;

во вторичном контуре (после теплообменника): в подающем трубопроводе

$P_{01} = 6,8 - 9,0$  бар; в обратном трубопроводе  $P_{02} = 4,0 - 4,5$  бар. Диапазон изменения температур воды во вторичном контуре: в подающем трубопроводе от  $\tau_{01} = 52$  °С до  $\tau_{01} = 93$  °С; в обратном – от  $\tau_{02} = 40$  °С до  $\tau_{02} = 57$  °С.

Длительность переходного процесса при включении теплотехнологической вентиляционной системы для  $\tau_{01}$  составляет 15 мин при включении и 30 мин при выключении вентилятора. Переходный период для  $\tau_{02}$  делится на период резкого изменения (10 мин) и основной период (до 7 ч).

Несмотря на плавный характер изменения  $\tau_{02}$  можно выделить два периода остывания: первый – 2–2,5 ч, в течение которого происходит заметное изменение температуры – 2,2 °С/ч и второй – до момента выключения теплотехнологической вентиляционной системы – 0,25 °С/ч.

Чтобы выявить влияние каждого из основных первичных факторов (перепада температур воды во вторичном контуре теплового пункта, разности давлений воды в подающем и обратном трубопроводах первичного контура до теплообменника и разности давлений воды в подающем и обратном трубопроводах вторичного контура после теплообменника и т. д.) на расход теплоты в системе отопления требуется большое число опытов, сокращение которых стало возможно за счет систематического изменения всех влияющих факторов по методу рационального планирования экспериментов, где каждое сочетание влияющих факторов встречается только один раз, что позволяет получать гарантированное усреднение всех влияющих факторов кроме одного, по которому производится группировка данных для выявления его влияния.

Зависимость одной из искомых функций - теплового потока на теплотехнологическую установку  $Q_v$  от независимых первичных факторов (температуры  $\tau_1$  и расходов воды  $G_o$  и  $G_h$ ) представлена на рис. 5.

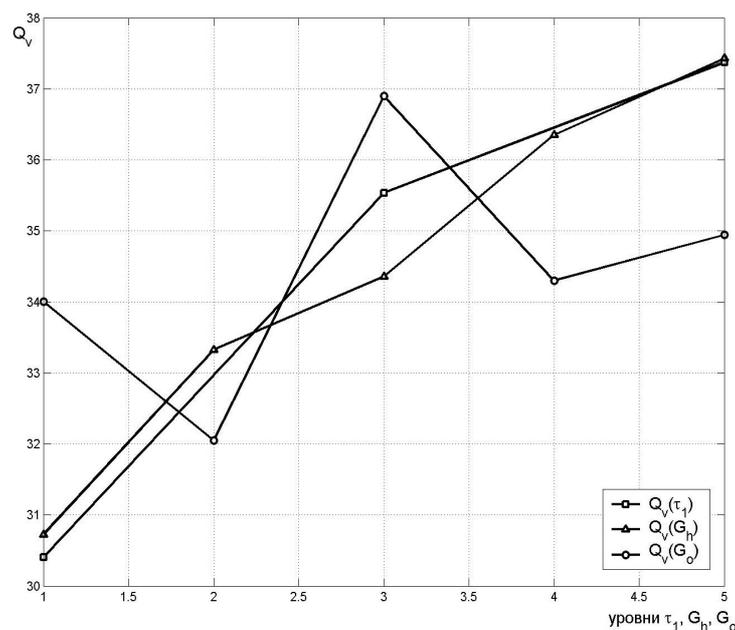


Рисунок 5 – График первых усреднений зависимостей функции  $Q_v$

Из графиков зависимостей результатов  $Q_v$  от каждого из факторов в

отдельности при средних значениях прочих факторов (рис. 5) определяется наиболее сильно влияющий фактор, а также слабое, либо неявно выраженное влияние других факторов.

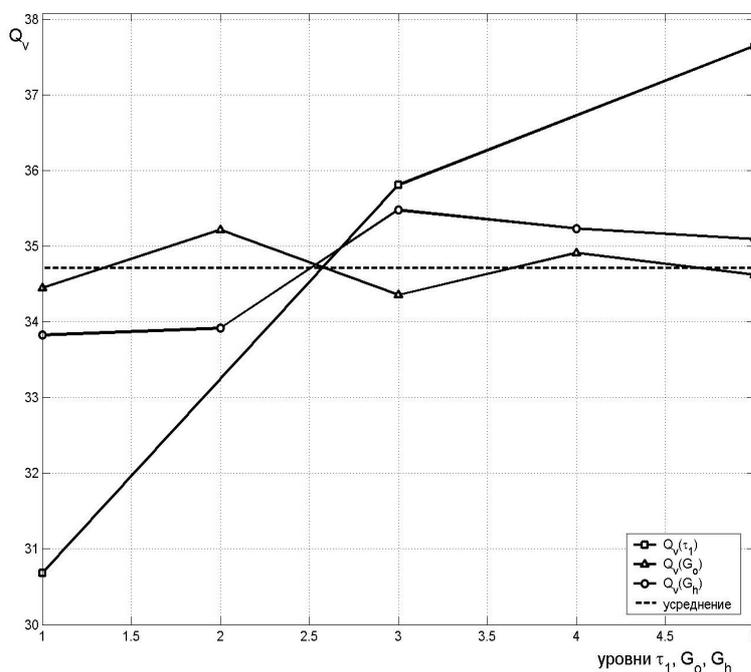


Рисунок 6 – График вторых усреднений зависимостей функции  $Q_v$

Графические зависимости последующих усреднений (рис. 6) позволяют нейтрализовать наиболее сильно влияющий фактор (график изменения зависимости от которого идет наиболее круто), к примеру, пунктиром показано третье усреднение наиболее сильно влияющего фактора температуры в подающей линии  $\tau_1$  – это уже прямая линия, т. е. ее влияние на результат полностью нейтрализовано.

Для получения зависимостей парной корреляции, характеризующих влияние отдельных первичных факторов на искомую функцию использована известная методика, которая заключается в том, что после группировки первичных данных замеров по наиболее сильному фактору и нахождения сглаживающей эмпирической формулы производится пересчет всех первичных данных по этой формуле на среднее значение первого фактора, это нейтрализует его действие, и производится вторичная группировка пересчитанных данных по второму фактору. При нейтрализации самого сильного фактора зависимость пересчитанных результатов от второго фактора выступает более ясно, и так аналогично поступают с оставшимися факторами.

Основываясь на формулах парной корреляции, и учитывая, что при выводе последних исходили из пересчета на средние, а не на единичные значения первичных факторов, получаем формулы множественной корреляции:

для одной из исследуемых функций – зависимости перепада температур воды во вторичном контуре  $\Delta\tau_B$  от температуры в подающей линии  $\tau_1$ , перепадов давлений в первичном  $\Delta P_{\Pi}$  и вторичном  $\Delta P_B$  контурах теплотехнологической системы в виде алгебраической суммы формул парной корреляции

$$\Delta\tau_B = 0,49\tau_1 + 2,1\Delta P_{\Pi} - 0,2\Delta P_B - 25,24; \quad (7)$$

для зависимости теплового потока на теплообменник одной из установок приточной вентиляции  $Q_v$  от расхода теплоносителя в теплотехнологической системе потребителя  $G_o$ , температуры воды в подающей линии  $\tau_1$  и величины узлового расхода теплоносителя из обратного трубопровода  $G_h^{обp}$

$$Q_v = 7,3 \cdot G_o + 2,3 \cdot \tau_1^{0,650} - 0,4 \cdot G_h^{обp} - 18,5; \quad (8)$$

для зависимости теплового потока на теплообменник той же установки приточной вентиляции  $Q_v$  от расхода теплоносителя в теплотехнологической системе потребителя  $G_o$ , температуры воды в подающей линии  $\tau_1$ , но при узловом разборе теплоносителя из подающего трубопровода  $G_h^{nod}$

$$Q_v = 4,9 \cdot G_o^{1,5} + 9,2 \cdot \tau_1^{0,269} - 33,8 \cdot (G_h^{nod})^{0,145} \quad (9)$$

и т. д. для других исследуемых функций.

Проведено сопоставление экспериментальных данных с расчетными. В качестве примера, результаты сравнения экспериментальных значений  $\Delta\tau_B$  при определенных сочетаниях уровней факторов с вычисленными по полученной формуле (7) значениями показывают, что среднее отклонение составляет 4,2%, подтверждая тем самым правильность выбранного вида формулы.

Таким образом, сократив объем экспериментов в десятки раз, можно получать формулы с вполне удовлетворительной точностью. Аналогично находятся зависимости для фактических расходов теплоносителя и теплоты, обосновывающие использование конкретной схемы автоматизированного теплового пункта, т. е. можно заключить, что экстраполяция результатов множественной корреляции по результатам натуральных замеров на отдельном индивидуальном тепловом пункте может быть применена при проектировании подобных автоматизированных вводов тепловых сетей.

**В четвертой главе** систематизированы критерии выбора схем автоматизированных тепловых пунктов применительно к функциональным особенностям теплотехнологических установок потребителей тепловой энергии, рельефа местности и специфических ограничений при конкретном подборе параметров рабочей жидкости (теплоносителя).

Несовершенство некоторых средств контроля параметров, используемых на ИТП, может приводить к искажению результатов работы гидравлических

регуляторов. Для уменьшения этого предлагается использовать методику оценки всех влияющих факторов на выбор принципиальной схемы ИТП и функциональной схемы её автоматизации, которая реализована в виде алгоритма.

Для нормальной работы теплотехнологических систем потребителей гидравлический режим тепловой сети на вводе в индивидуальный тепловой пункт должен удовлетворять следующим условиям (рис. 7):

- напор в обратном трубопроводе  $H_o$  должен превышать высоту  $H_{мс}$  местных теплотехнологических систем  $H_o > H_{мс}$ , а давление в этом трубопроводе  $P_o$  должно быть меньше допустимого  $P_{дон}$  по условиям механической прочности наиболее уязвимого элемента системы – нагревательных приборов  $P_o < P_{дон}$ ;

- напор в подающем трубопроводе  $H_n$ , за вычетом необходимого для работы теплотехнологической системы располагаемого напора  $\Delta H_p$ , должен обеспечить подачу теплоносителя в верхние точки системы  $H_n - \Delta H_p > H_{мс}$ ;

- располагаемый напор в тепловом пункте должен превышать напор, необходимый для преодоления гидравлического сопротивления разводящих сетей и местных систем  $\Delta H > \Delta H_p$ ;

- напор в тепловой сети при статическом режиме  $H_{см}$  должен обеспечивать заполнение местных теплотехнологических систем  $H_{см} > H_{мс}$ , но в то же время статическое давление  $P_{см}$  не должно превышать допустимого для нагревательных приборов  $P_{см} < P_{дон}$ .

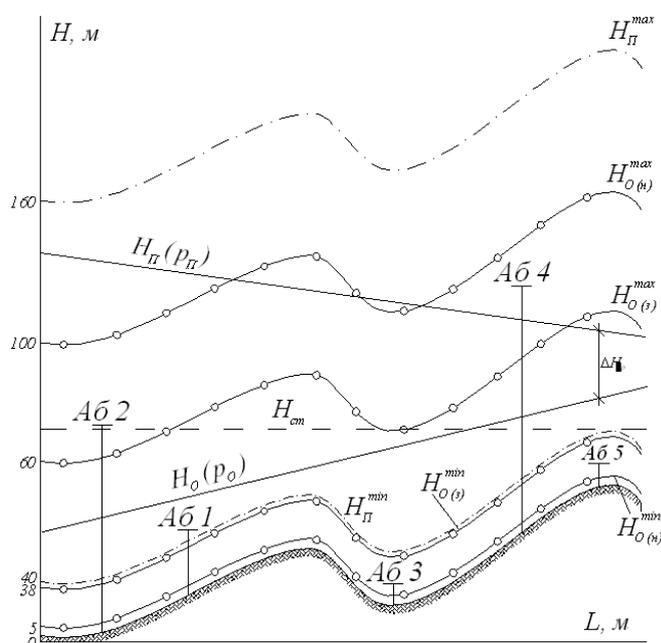


Рисунок 7 – Гидравлический режим ИТП и тепловой сети в целом

На рис. 7 этим условиям удовлетворяет лишь Аб. 1, в реальных же

условиях гидравлический режим тепловой сети в точке подключения ИТП, как правило, не всегда удовлетворяет требованиям стабильности. При этом в зависимости от характера отклонений гидравлического режима необходима определенная его коррекция:

– если  $H_o < H_{mc}$ , т. е. напор в обратном трубопроводе не обеспечивает залив местных теплотехнологических систем (Аб. 2), необходимо создать подпор, в противном случае  $P_o > P_{дон}$ , т. е. при давлении в обратном трубопроводе, превышающем допустимые пределы по условиям механической прочности нагревательных приборов (Аб. 3), следует снизить давление в обратном трубопроводе;

– если  $H_n - \Delta H_p < H_{mc}$ , т. е. напор в подающем трубопроводе не обеспечивает подачу воды к верхним точкам местных теплотехнологических систем (Аб. 4), необходима схема ИТП с повышением напора в подающем трубопроводе;

– если  $\Delta H < \Delta H_p$ , т. е. располагаемый напор в ИТП недостаточен для пропуска расчетного расхода воды по разводящим сетям и местным системам (Аб. 4), следует повысить располагаемый напор (подкачка на обратной или подающей линиях) или скорректировать схему ИТП с подмешивающим насосом;

– если  $H_{cm} < H_{mc}$ , т. е. напор в тепловой сети при статическом режиме не обеспечивает залива местных систем, что вызывает их опорожнение (Аб. 2) и при  $P_{ст} > P_{дон}$ , т. е. если давление в тепловой сети при статическом режиме превышает допустимое для нагревательных приборов, что может вызвать их разрушение (Аб. 3) необходима схема ИТП, гидравлически независимая от режима работы тепловой сети.

Все указанные отклонения гидравлического режима на индивидуальном тепловом пункте оказывают прямое, либо косвенное влияние на температурный режим отапливаемых помещений, расчет которого включает три взаимосвязанных этапа: расчет теплоустойчивости наружных ограждений; расчет теплоустойчивости помещений и определение периода времени, в течение которого осредненная температура отапливаемых помещений снизится до минимально допустимого значения. Таким образом, расчетом ожидаемых температур внутреннего воздуха осуществляется проверка корректности выбора схемы ИТП, учитывающей особенности инженерного оборудования зданий и рельефа местности.

В **пятой главе** определены показатели экономической эффективности автоматизированных тепловых пунктов и представлены материалы внедрения в практику их использования. Оценка экономической эффективности инвестиций в ИТП в соответствии с «Руководством по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия» проведена по следующим критериям: срок окупаемости инвестиций; чистый доход за счет экономии энергоресурсов за весь период эксплуатации энергосберегающих мероприятий; индекс доходности инвестиций (отношение полного дохода к величине

инвестиций, т. е. относительная отдача инвестиционного проекта на вложенные средства).

Расчетами экономической эффективности практического применения предложенных в работе способов повышения энергоэффективности тепловых пунктов теплотехнологических систем зданий показано, что переход на автоматизированные индивидуальные тепловые пункты, проектируемые с учетом специфики теплотехнологических систем отапливаемых зданий, рельефа местности и функциональных особенностей тепловых сетей малозатратен и быстроокупаем.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выявлены основные факторы, влияющие на работоспособность тепловых пунктов, недостатки и способы их устранения, что дало возможность разработать новые и усовершенствовать существующие схемы ИТП, позволяющие интенсифицировать процесс подготовки теплоносителя.

2. Анализ работы существующих тепловых пунктов показал, что при преимущественном отборе теплоносителя из обратной магистрали ( $\beta \leq 0,4$ ) с возрастанием нагрузки горячего водоснабжения увеличивается расход воды на отопление, при отборе из подающей трубы происходит обратное явление. Для условий г. Красноярск  $t_o = -40$  °С расчетный расход воды в системе отопления  $\bar{G}_0 = 1$ , имеет место при температуре наружного воздуха  $t_n \approx -8$  °С. При более низких температурах расход в системе увеличивается, а при более высоких уменьшается, причем при расчете  $\bar{G}_0$  необходимо учитывать изменение перепада давления на вводе в ИТП  $\Delta \bar{P}$  в зависимости от режима тепловой сети.

3. Усовершенствована методика оценки влияния неравномерности режимов работы тепловой сети на характер теплопотребления. Получены эмпирические зависимости для экстраполяции результатов экспериментальных исследований и натурных замеров применительно к реальным условиям технологий подготовки теплоносителя на тепловых пунктах на основе обобщения математического аппарата потокораспределения.

4. Разработаны критерии оценки и способы расчетного обоснования требований к организации режимов подготовки и эксплуатации тепловых пунктов с учетом рельефа местности, особенностей присоединенных к тепловой сети потребителей и специфических требований к теплогидравлическим режимам внутренних инженерных систем.

5. Разработаны практические рекомендации по выбору оптимальных схем тепловых пунктов, обеспечивающих стабильный режим тепловых сетей с целью повышения гидравлической устойчивости и надежности системы теплоснабжения в целом. Выявлены особенности возникновения нештатных ситуаций на ИТП при использовании различных регулирующих клапанов и предложена система обоснованных требований к организации процессов их выбора с учетом требуемых (проектных) заданий, а также режимов работы источников теплоснабжения.

### **Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

1. Филиппов, В. П. Опыт внедрения современных энергосберегающих технологий в системах теплоснабжения / В. П. Филиппов, **В. И. Панфилов** // Энергосбережение. 2001. № 6. С. 38–39.

2. Липовка, Ю. Л. Особенности расчета на прочность Г-образных участков бесканальной прокладки теплопроводов из труб ВЧШГ / Ю. Л. Липовка, **В. И. Панфилов** // Сб. статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность: достижения и перспективы». Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. С. 79–82.

3. Липовка, Ю. Л. О системном подходе к проблеме энергосбережения города / Ю. Л. Липовка, **В. И. Панфилов** // Сб. статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города». Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. С. 98-101.

4. Липовка, Ю. Л. О экономической целесообразности внедрения современных энергосберегающих технологий в системах теплоснабжения города Красноярска / Ю. Л. Липовка, О. П. Якубович, В. К. Витер, **В. И. Панфилов** // Материалы городской научно-практической конференции «Развитие инновационной деятельности в промышленности г. Красноярска». Красноярск: ИПЦ Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2007. С. 143-145.

5. **Панфилов, В. И.** Энергоэффективные способы управления тепловыми потоками зданий / **В. И. Панфилов**, Ю. Л. Липовка // Материалы VIII Межрегиональной научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города». Красноярск: ИПЦ Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2007. С. 245.

6. **Панфилов, В. И.** Оптимальные схемы присоединения потребителей к тепловым сетям / **В. И. Панфилов**, Ю. Л. Липовка, Е. А. Егоров // Сборник материалов 25 региональной научно-технической конференции «Проблемы строительства и архитектуры». Красноярск, ИПЦ СФУ, 2007. С. 178-182.

7. Липовка, Ю. Л. Экспериментальное изучение потокораспределения на автоматизированных тепловых пунктах / Ю. Л. Липовка, **В. И. Панфилов** // Энергосбережение и водоподготовка, 2008. № 2. С. 52–54.

8. 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.

9. Липовка, Ю. Л. Особенности функционального проектирования одно- и двухтрубных систем отопления / Ю. Л. Липовка, **В. И. Панфилов**, А. В. Тучин, А. Ю. Липовка, С. М. Плахотников // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города». Красноярск: МВДЦ Сибирь, 2008. С. 75–77.

10. Липовка, Ю. Л. Формализация проектирования автоматизированных вводов тепловых сетей в здания / Ю. Л. Липовка, **В. И. Панфилов**, С. М. Плахотников, А. Ю. Липовка, А. В. Тучин // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем

жизнеобеспечения города». Красноярск: МВДЦ Сибирь, 2008. С. 77–79.

11. 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: МВДЦ Сибирь, 2008. С. 79–82.

Панфилов Виталий Иванович

Повышение энергоэффективности тепловых пунктов теплотехнологических систем зданий

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Подписано в печать \_\_.02.2009 г. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИПК ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет"