

На правах рукописи



ЦЫГАНКОВА АННА ВИКТОРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО
РЕЖИМА РЕГУЛИРУЕМОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ**

Специальность: **05.14.04 –Промышленная теплоэнергетика**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Емельянов Рюрик Тимофеевич

Официальные оппоненты: Лебедев Виталий Матвеевич,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра теплоэнергетики, профессор

Рафальская Татьяна Анатольевна,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», кафедра теплоснабжения и вентиляции, доцент

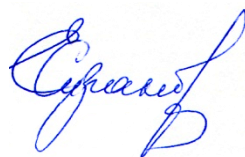
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск

Защита диссертации состоится «21» июня 2017г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д212.099.07 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте: <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «_____» мая 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшим фактором повышения энергетической эффективности теплоснабжения зданий, является качество работы гидротранспортных комплексов. Работа гидротранспортных комплексов (ГТК) систем теплоснабжения сопровождается различного рода переходными процессами, которые характеризуются значительными изменениями давления, расхода, гидравлической мощности, скорости движения жидкости и т.д. ГТК представляет собой сложную энергоемкую систему, включающую насосные агрегаты с различными схемами соединения, гидродинамическую сеть, характеризующуюся наличием противодействия, нелинейностей, обусловленных местными сопротивлениями (задвижками, вентилями, обратными клапанами, разветвлениями трубопровода и т.п.), различными свойствами перемещаемой среды.

При изменении режима работы, температуры или степени аэрации потока жидкости в гидросистеме возникают ударные волны, которые приводят к значительным перепадам давления, что неблагоприятно сказывается на работе технологического оборудования, приводит к разрывам сплошности потока, вибрациям, шуму, эрозийному разрушению материала, увеличению потерь напора, и, соответственно, росту затрачиваемой на транспортирование жидкости мощности. В связи с этим заслуживает внимания вопрос анализа переходных процессов в гидротранспортном комплексе и поиск путей снижения влияния динамических процессов на параметры гидросистемы.

Одним из способов снижения влияния динамических процессов на параметры гидросистемы служит стабилизация температурного режима системы трубопроводной системы. Это обеспечивает стабилизацию протекающих процессов в системе, устраняет перепады давлений и температуры теплоносителя на исполнительных механизмах регулирующей арматуры.

Для повышения энергоэффективности теплоснабжения зданий необходимо совершенствование системы управления современным технологическим комплексом путем выбора наиболее рациональных режимов, обеспечивающих требуемый тепловой баланс и стабилизацию температурного режима трубопроводной системы теплоснабжения.

Настоящая работа посвящена решению проблемы повышения энергетической эффективности системы теплоснабжения при комплексном управлении тепловыми режимами зданий.

Степень разработанности. Проблемам совершенствования систем теплоснабжения зданий посвящены работы авторов В.М. Лебедева, Ю.Л. Липовки, С.В. Побот, А.В. Либенко, А.В. Тихонова, М.Ю. Толстого, В.В. Пыр-

кова, А.Н. Потапенко, С.В. Кострикова, В.П. Кожевникова, М.И. Кулешова, А.В. Губарева, Р.Н. Хафизова, Н.А. Автушенко, Г.С. Ленецкого, А.И. Телегина, В.И. Панферова и др. Их работы в значительной мере способствовали повышению энергетической эффективности системы теплоснабжения зданий. Однако проведенный анализ существующих исследований выявил недостаточность теоретического описания и экспериментальных исследований рабочего процесса трубопроводной системы теплоснабжения зданий в переходных режимах работы.

Целью работы является повышение энергетической эффективности системы теплоснабжения зданий.

Для выполнения указанной цели сформулированы следующие задачи исследования:

1) разработать структурную схему стабилизации температурного режима регулируемой трубопроводной системы теплоснабжения зданий;

2) разработать математическую модель и выполнить моделирование процесса стабилизации температурного режима регулируемой трубопроводной системы теплоснабжения зданий с учетом переходных процессов;

3) получить, по результатам экспериментальных исследований на примере теплового пункта, регрессионные зависимости: скорости потока жидкости, амплитуды колебаний золотника балансировочного клапана, температуры теплоносителя при переходном режиме, перепада давления от скорости потока, теплового потока, электрической мощности насосов от скорости потока, позволяющие определять основные параметры регулируемой трубопроводной системы теплоснабжения;

4) определить эффективные режимы стабилизации температурного состояния гидравлической системы теплоснабжения на основе теоретических и экспериментальных исследований, обеспечивающие экономию тепловой энергии;

5) обосновать методику проектирования регулируемой трубопроводной системы, с учетом переходных процессов.

Научная новизна работы:

1) разработана новая структурная схема регулируемой трубопроводной системы теплоснабжения зданий, обеспечивающая стабилизацию температурного режима при переходных процессах, отличающаяся нелинейностью процесса и обеспечивающая рациональное соотношение настроечных параметров;

2) определены эффективные режимы стабилизации температурного состояния гидравлической системы теплоснабжения на основе теоретических и экспериментальных исследований;

3) получены зависимости температурного режима зданий от конструктивных и режимных параметров регулируемой трубопроводной системы теплоснабжения, примененные в методике проектирования регулируемой трубопроводной системы, с учетом переходных процессов.

Методология и методы исследований. В работе использованы методы теории термодинамики, теории управления, математической статистики, планирования эксперимента, компьютерного моделирования переходных процессов в регулируемых трубопроводных системах теплоснабжения с применением программного обеспечения MATLAB&Simulink.

Достоверность результатов диссертационной работы и выводов, полученных диссертантом, обоснована корректностью математической постановки задачи, корректным применением фундаментальных законов термодинамики, современной методологией технико-экономического анализа и современных численных методов, обеспечивающих заданную точность решения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Снижение уровня амплитуды колебаний золотника балансировочного клапана при циркуляции жидкости обеспечивается за счет рационального соотношения конструктивных параметров регулируемой трубопроводной системы и свойств теплоносителя при номинальных значениях перепада давления и скорости течения жидкости.

2. Стабилизация температурного режима регулируемой трубопроводной системы при переходных процессах достигается регулированием размера щели балансировочного клапана и положения золотника.

3. Равномерность распределения теплового потока нагревательного прибора, позволяющая улучшить качественно и количественно теплоснабжение зданий, определяется закономерностями изменения гидравлических характеристик теплоносителя в условиях переходных процессов и зависит от скорости потока жидкости, температуры теплоносителя, концентрации загрязнений в нагревательном приборе.

4. Развитие методики проектирования регулируемой трубопроводной системы с использованием рациональных соотношений геометрических размеров щели и положения золотника балансировочного клапана при переходных процессах позволяет обеспечить стабилизацию температурного режима.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что на базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены результаты стабилизации температурного режима трубопроводной системы. Созданы экспериментальные образцы регулируемой трубопроводной системы. Разработана методика расчета параметров регулируемой трубопроводной системы с учетом переходных процессов. Действующие об-

разцы регулируемой трубопроводной системы используются в учебном процессе как наглядное пособие по разделу курсов «Теплоснабжение» в Красноярском инженерно-строительном институте СФУ. Образцы успешно прошли испытания в ООО ФГПУ «ЖКХ» КНЦ СО РАН, что подтверждено актом внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского (2012г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых 12-16 марта (2012г. Братск); Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых. Инновации и актуальные проблемы техники и технологий (2013 г.Саратов); X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края (2014 г. Красноярск), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и наука: Проспект Свободный» ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (2015г., Красноярск); на научно-технических семинарах кафедры «Инженерные системы зданий и сооружений» ФГОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (2010-2016г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе: 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ и 5 статей в сборниках научных трудов и материалах конференций.

Личный вклад автора состоит в анализе источников литературы с целью получения сведений о существующих методах прогнозирования и регулирования температурного состояния трубопроводной системы теплоснабжения; в разработке математической модели теплопровода трубопроводной системы; в проведении математического моделирования по определению влияния параметров системы теплоснабжения на изменение гидравлических характеристик теплоносителя в условиях переходных процессов; в анализе экспериментальных данных и сопоставлении их с результатами моделирования; в разработке и проведении натурных экспериментов.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 132 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений на 11 страницах. Работа содержит: 88 рисунков, 1 таблицу. Список использованной литературы включает 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, а так же определены методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе выполнен анализ состояния энергоэффективности теплоснабжения зданий с регулируемой трубопроводной системой. Показано, что основной причиной снижения эффективности теплоснабжения зданий является нестабильность протекания динамических процессов: неравномерное распределение расхода жидкости по трубопроводам, недостаточный напор теплоносителя на входе и выходе из теплового пункта. Из-за недостаточной эффективности распределения теплового потока происходит неравномерный прогрев тепловых установок. Для успешного решения проблемы сбережения энергетических ресурсов необходимо совершенствование регулируемых трубопроводных систем теплоснабжения с учетом изменения скорости потока, температуры и давления в системе при проектировании.

Совершенствованию трубопроводной системы теплоснабжения зданий посвящены работы авторов: Ю.Л. Липовка, С.В. Побот, А.В. Либенко, А.В. Тихонов, Е.Ю. Толстой, В.В. Пырков, А.Н. Потапенко, С.В. Кострикова, В.П. Кожевникова, М.И. Кулешова, А.В. Губарева, Р. Н. Хафизова, Н. А. Автушенко, Г. С. Ленеvского, А.И. Телегина, В.И. Панферова и др. Для обеспечения стабилизации процесса теплоснабжения зданий служат средства запорно-регулирующей арматуры.

Основным недостатком такого регулирования является то, что оно не учитывает фактический тепловой баланс системы и реальные условия: скорость движения теплоносителя в переходных процессах, приращение температуры теплоносителя при прохождении через запорно-регулирующую арматуру. Поэтому система регулируемого трубопроводного теплоснабжения работает, как правило, не в оптимальном режиме. Эффективность теплоснабжения можно значительно увеличить, если осуществить оптимальное регулирование теплового потока. Для исследования процессов регулирования и управления теплоснабжением зданий при трубопроводной системе, а также влияния воздействующих факторов на гидравлическую и тепловую устойчивость, использованы методы математического моделирования в среде «MATLAB&Simulink».

В настоящей работе в основу повышения энергоэффективности теплоснабжения зданий трубопроводной системы заложено обеспечение стабили-

зации настроечных параметров системы. Поэтому анализ известного опыта теплоснабжения зданий в сопоставлении с общими требованиями показывает, что назрела необходимость решения проблемы стабилизации температурного режима трубопроводной системы с учетом переходных процессов.

Во второй главе рассмотрено влияние на гидравлическую и тепловую устойчивость системы теплоснабжения динамических параметров регулируемой трубопроводной системы и характеристик теплоносителя при переходных процессах. Гидравлическая схема регулируемой трубопроводной системы приведена на рисунке 1.

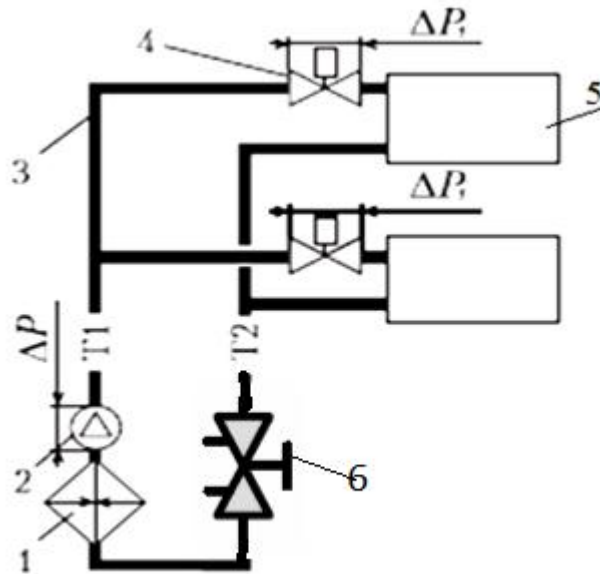


Рисунок 1 – Гидравлическая схема регулируемой трубопроводной системы:
1 – фильтр; 2 – насос; 3 – трубопровод; 4 – термостатический кран;
5 – нагревательный прибор; 6 – балансирующий клапан

Процесс течения потока жидкости внагревательный прибор через термостатический кран с учетом переходных процессов описывается уравнением

$$\mu_{dp} f_{dp} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} (P_{dp} - P_{вых}) - Q_{ym} = \frac{\pi \cdot d_T^2}{4} \cdot \frac{dx_T}{dt}, \quad (1)$$

где f_{dp} – площадь проходных сечений термостатического крана; μ_{dp} – коэффициенты расхода жидкости через термостатический кран; γ – удельный вес жидкости; g – ускорение свободного падения; P_{dp} – давление жидкости на входе термостатического крана; $P_{вых}$ – давление жидкости на выходе из термостатического крана; d_T – диаметр трубопровода; Q_{ym} – утечки жидкости.

В результате формирования структурной схемы в среде программы MATLAB&Simulink и моделирования работы регулируемой трубопроводной системы с учетом переходных процессов были получены графические результаты (рисунок 2, рисунок 3).

Переходный процесс течения потока в начальный период времени характеризуется турбулентностью течения. При перепаде давления на клапане 0,1 МПа скорость потока жидкости достигает 1,6 м/с. Длительность колебательного процесса составила 6 с. Скорость потока теплоносителя составила 0,4 м/с. Через 3,5 с процесс становится стационарным. Переходная характеристика вызвана скачком градиента скорости при турбулентном течении жидкости.

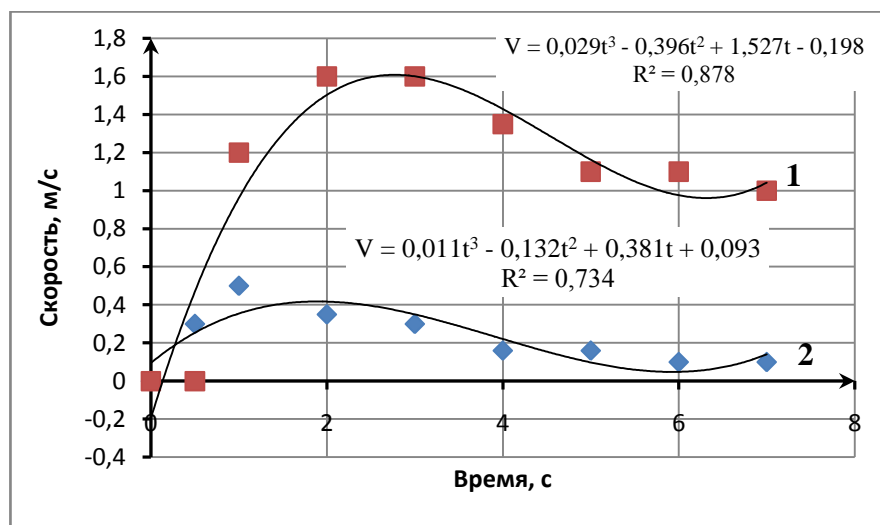


Рисунок 2 – Зависимости скорости потока жидкости от времени:
1 – при турбулентном течении жидкости; 2 – при ламинарном течении
жидкости

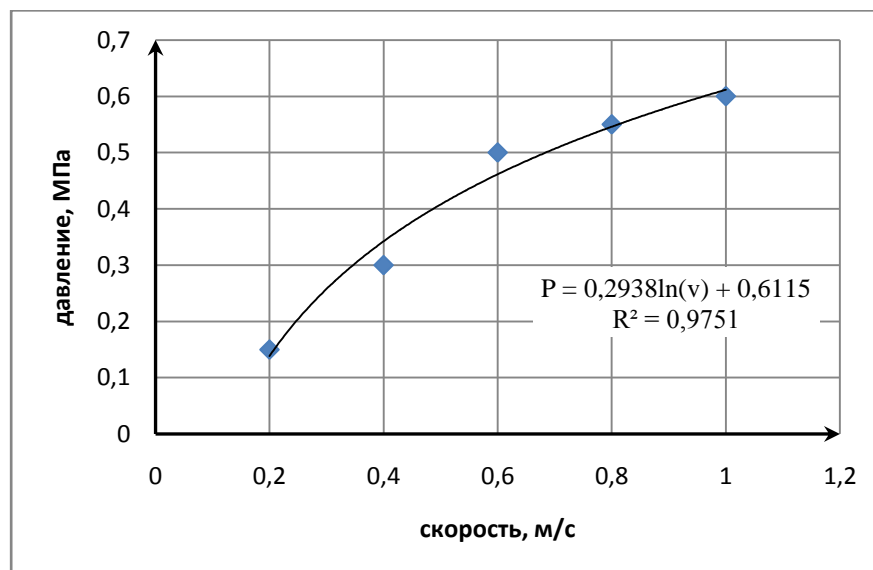


Рисунок 3 – Зависимость давления жидкости от скорости потока

На динамические свойства системы существенно влияет равновесие золотника балансировочного клапана. Результаты математического моделирования равновесия золотника балансировочного клапана приведены на рисунке 4. Колебательный процесс золотника балансировочного клапана протекает в течение 2 с. Максимальная величина амплитуды колебания золотника достигает 0,14 мм. Частота колебаний золотника составляет 2 Гц. Далее процесс становится стационарным. Амплитуда колебаний золотника $A = 12,9t^{-0,74}$

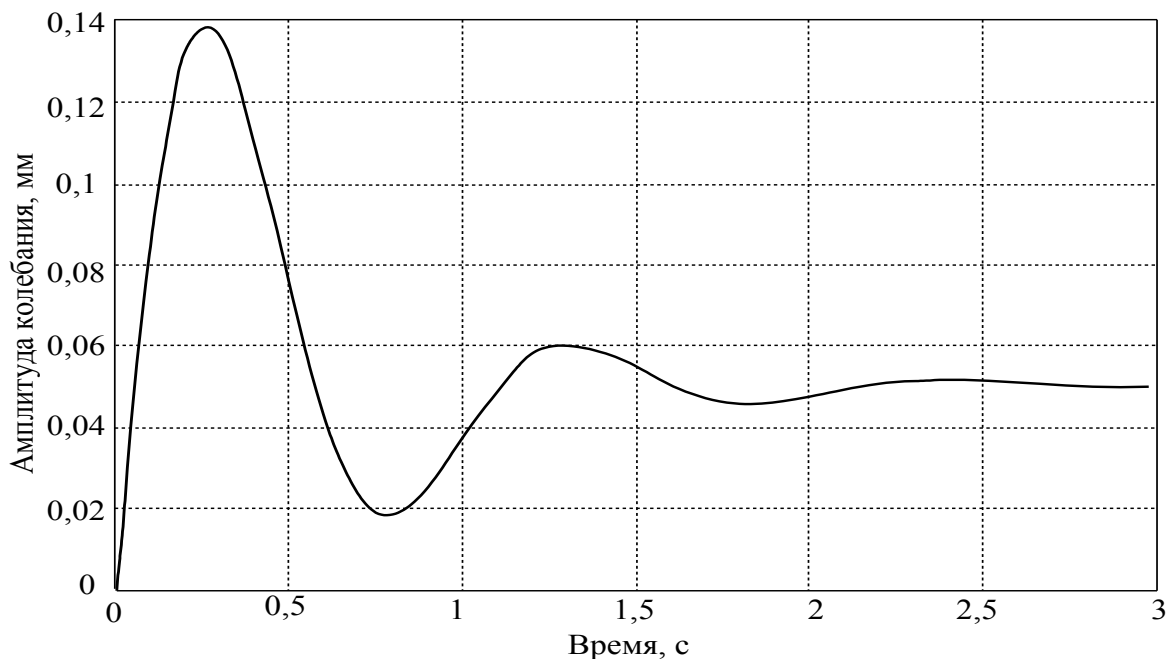


Рисунок 4 – Колебательный процесс золотника балансировочного клапана

В трубопроводах металлическая стенка разделяет воду, находящуюся с внутренней стороны, и воздух – с наружной. Действительная теплопередача пропорциональна тепловому потоку, приведенному к расчетным условиям

$$Q_{\text{пр.д.}} = Q_{\text{н.у.}} \cdot \varphi_{\text{к}}, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{к}}$ – комплексный коэффициент приведения $Q_{\text{н.у.}}$ к расчетным условиям, определяемый при водяном теплоносителе по формуле

$$\varphi_{\text{к}} = \left(\frac{\Delta t_{\text{ср}}}{70}\right)^{1+n} \cdot \left(\frac{G_{\text{пр}}}{360}\right)^p \cdot \beta \cdot \psi \cdot c, \quad (3)$$

где $G_{\text{пр}}$ – расход теплоносителя, кг/ч; β – коэффициент учета атмосферного давления в данной местности, принимается равный 1; ψ – коэффициент учета направления движения теплоносителя (воды) в приборе снизу-вверх; n, p, c –

экспериментальные числовые показатели, $n = 0,15$; $p = 0$; $c = 1$. Δt_{cp} – разность средней температуры воды t_{cp} в трубопроводе и температуры окружающего воздуха $t_{\text{в}}$, °С, определяется по формуле

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} - t_{\text{в}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{вх}}$ – температура воды на входе в прибор, °С; $t_{\text{вых}}$ – температура воды на выходе из прибора, °С; $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, °С.

На динамику переходных процессов влияют конструктивные и технологические параметры теплопередачи трубопровода системы теплоснабжения.

Тепловой баланс для элементарного кольца стенки трубопровода системы теплоснабжения описывается дифференциальным уравнением:

$$c_1 \gamma_{\Gamma} \frac{\pi d^2}{4} dx dT_{\Gamma} = \alpha_{12} \pi \cdot d \cdot dx (T_2 - T_1) dt \quad (5)$$

где x – текущая координата трубопровода; t – текущее время; d – внутренний диаметр трубопровода, м; c_1 – теплоемкость теплоносителя; γ_1 – плотность теплоносителя; α_{12} – коэффициент теплоотдачи; T_1 – температура теплоносителя; T_2 – температура внутренней стенки трубопровода.

Процесс теплопередачи описывается системой двух дифференциальных уравнений в частных производных с краевыми и начальными условиями.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1}{\partial t} + v \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{1}{T_{12}} (T_2 - T_1); \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{T_{21}} (T_1 - T_2) + k \cdot q; \\ T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = 0; T_1(0, t) = f_1(t); T_{21} \cdot k \cdot q(t) = \Psi_3(t). \end{array} \right. \quad (6)$$

Здесь $f_1(t)$, $f_3(t)$ и $\Psi_3(t)$ – произвольные функции времени; k – коэффициент теплового потока; q – удельный тепловой поток; T_{12} и T_{21} – постоянные времени, $T = \frac{D \cdot \rho \cdot c}{4\alpha}$.

На температуру T_1 влияет изменение скорости потока. Изменение температуры ΔT_1 запишется в виде уравнения

$$\frac{\partial \bar{T}_{10}(p, x)}{\partial x} \Big|_{p \rightarrow 0} = \frac{-\exp\left(-\frac{x}{v_0 \cdot T_1}\right)}{v_0 \cdot T_1} (f_{10} - f_{20}). \quad (7)$$

где f_{10}, f_{20} – функции изменения температуры.

На рисунке 5 приведена зависимость изменения температуры теплоносителя при скачкообразном изменении скорости потока

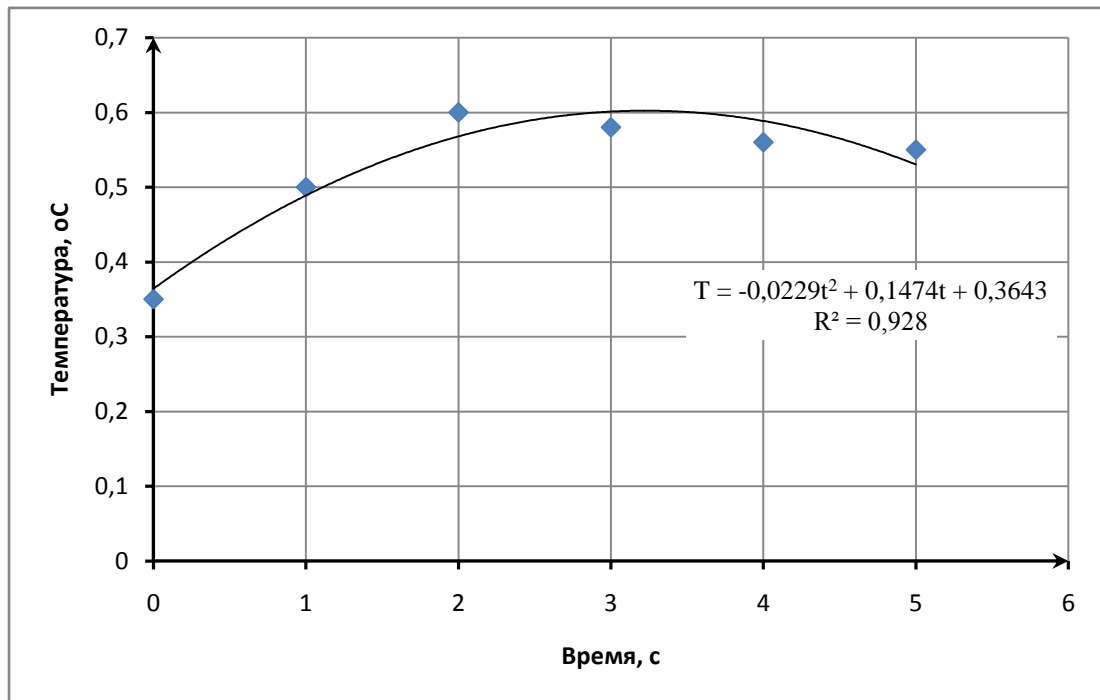


Рисунок 5 – Изменение температуры теплоносителя при скачкообразном изменении скорости потока

При скачкообразном изменении скорости потока температура теплоносителя повышается на $0,3^{\circ}\text{C}$ в течение 5 секунд. Это связано с турбулентностью потока жидкости, трением воды о внутреннюю поверхность труб и профилем рабочей поверхности регулировочного клапана.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований на лабораторном стенде, который содержит современные модели насосного оборудования и приборы управления, а также различную регулируемую и запорную арматуру, применяемые в современном инженерном обеспечении зданий.

Объектом исследований выбрана регулируемая трубопроводная система при независимом подключении циркуляционного насоса. На рисунке 6 приведена гидравлическая схема распределения тепловой энергии при различных режимах работы насосной установки с частотным регулированием.

Гидравлическая схема трубопроводной системы теплоснабжения выполнена из трех модулей (модуль двухтрубной системы №1, модуль однотрубной системы №2, модуль теплого пола №3) и насосного узла. Модули 1; 2; 3 подключены по независимой и параллельной схеме.

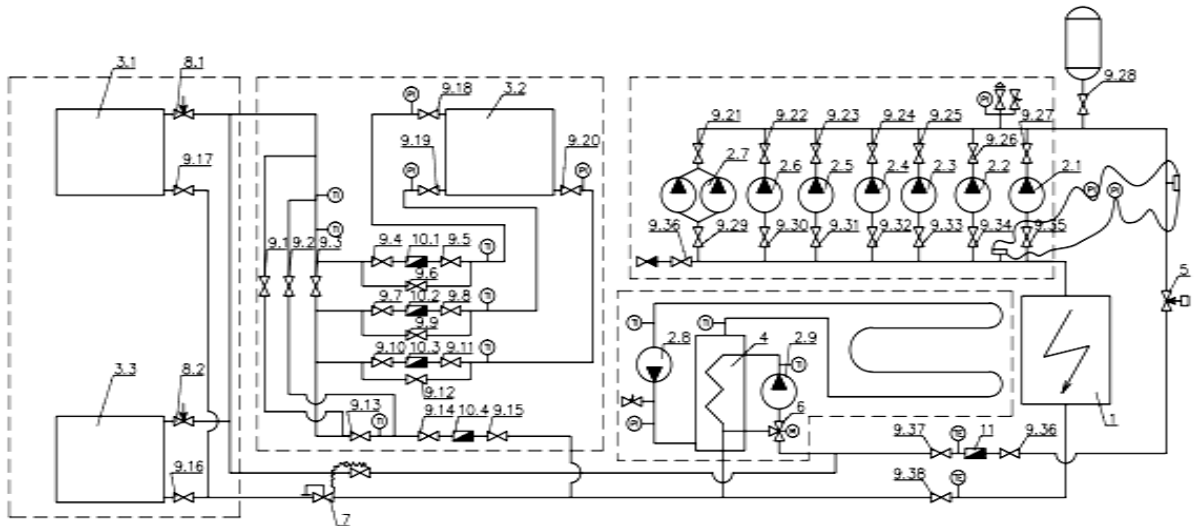


Рисунок 6 – Гидравлическая схема распределения тепловой энергии

При выполнении эксперимента определено изменение температуры теплоносителя в течении 5 мин при напоре $H = 5\text{ м}$. Зависимость изменения температур теплоносителя приведена на рисунке 7. Максимальный перепад температур составил от 2 до 5 °С (рисунок 7).

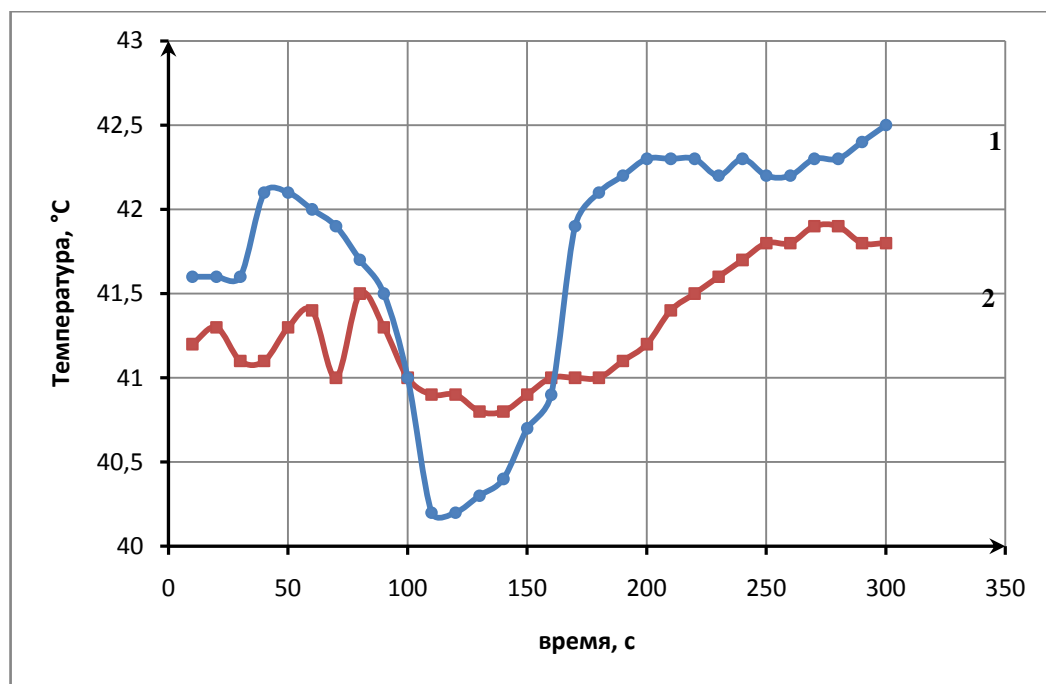


Рисунок 7 – Зависимость изменения температур теплоносителя: 1 – на входе к источнику потребления тепла; 2 – на выходе от источника потребления тепла

Зависимость перепада давления от расхода теплоносителя приведена на рисунке 8.

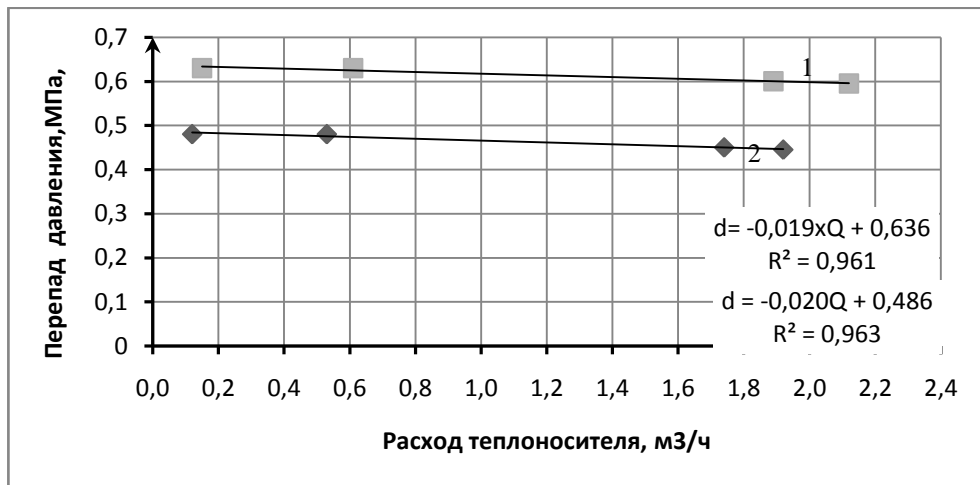


Рисунок 8 – Зависимость перепада давления от расхода теплоносителя:
1 – напор насоса 5м; 2 – напор насоса 6,5м

На основании полученных данных установлено, что при включении циркуляционного насоса на независимом контуре перепад давления 0,04 МПа и не зависит от напора в системе.

На рисунке 9 приведены результаты исследований распределения теплового потока при подключении трех модулей №1; №2; №3 в начале эксплуатации. В течение 3 мин работы нагревательного прибора тепловой поток возрастает линейно. Далее величина теплового потока стабилизируется.

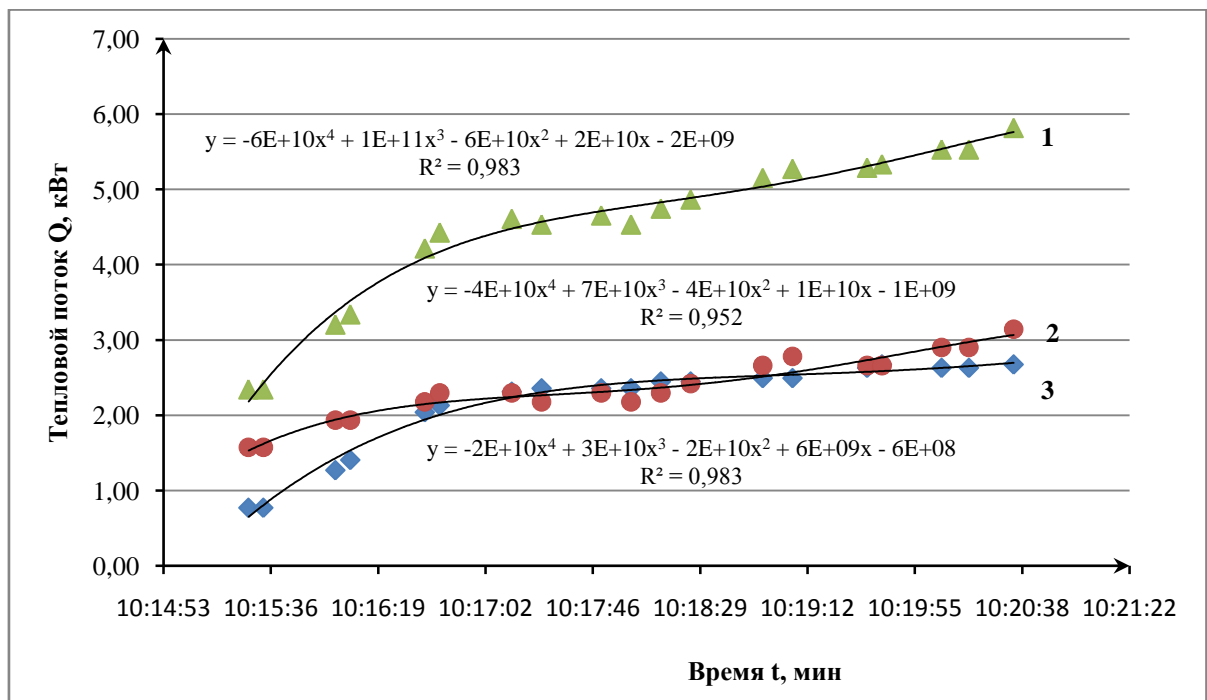


Рисунок 9 – Распределение теплового потока по модулям: 1– тепловой поток 1,0 кВт; 2 – тепловой поток 2,0 кВт; 3 – тепловой поток 3,0 кВт

Обобщенная мощность теплового потока составила 4,7кВт при распределении по модулям от 0,7 кВт до 2,0 кВт.

Изменение средней скорости теплоносителя приводит к изменению потерь давления в системе и, соответственно, к снижению энергоемкости зданий. Энергоемкость зданий существенно зависит от характеристик насосов. С возрастанием скорости увеличивается установленная электрическая мощность насосов (рисунок 10).

При увеличении средней скорости движения теплоносителя в системе базовая стоимость системы теплоснабжения, которая включает в себя стоимость сети трубопроводов и стоимость насосов, уменьшается. Изменение средней скорости теплоносителя приводит к изменению потерь давления в системе и, соответственно, к изменению характеристик насосов. С увеличением средней скорости движения теплоносителя в системе отопления увеличивается расход электроэнергии на перекачку среды, то есть при перекачке одного и того же расхода среды эксплуатационные затраты существенно меняются.

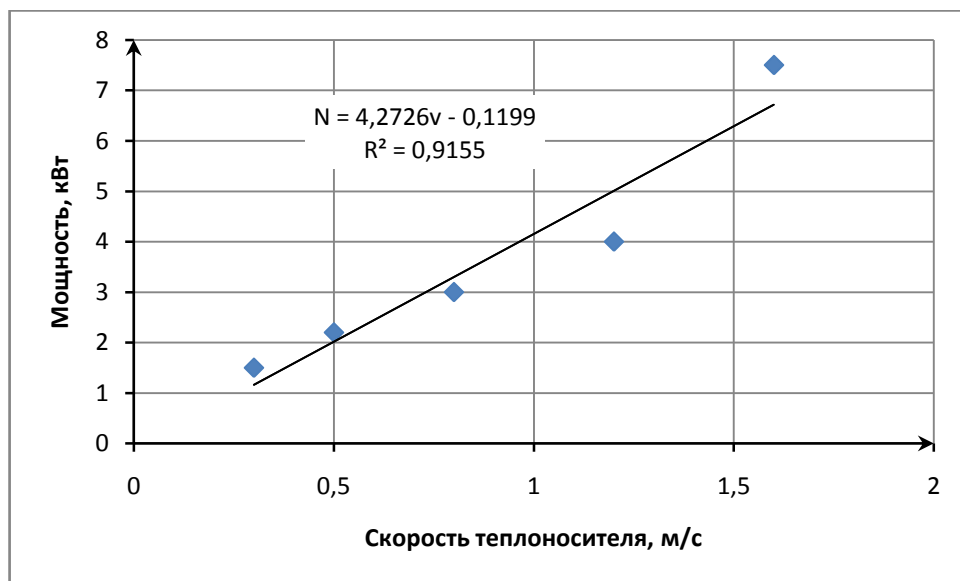


Рисунок 10 –Зависимость электрической мощности насосов от скорости теплоносителя

При скачкообразном открытии регулятора максимально возрастает теплоотдача теплообменного прибора. Это приводит к снижению теплового комфорта в помещении, увеличению вероятности шумообразования. Коэффициент теплопотерь близок к коэффициенту теплоотдачи к стенке трубы от воды. Экспериментально определено, что в пусковой период температура стенки трубопровода нестабильна и система гидравлически неустойчива.

В четвертой главе приведены результаты реализации исследований.

Для проектирования регулируемых трубопроводных систем теплоснабжения создан объектно-ориентированный продукт в среде «MATLAB&Simulink», состоящий из программы моделирования скорости потока жидкости от времени, амплитуды колебаний золотника балансировочного клапана, температуры теплоносителя при переходном режиме, перепада давления от расхода потока.

Для отработки настроечных коэффициентов регулируемой трубопроводной системы выполнен параметрический синтез регулятора гидравлической системы с учетом нелинейности системы. Для выполнения синтеза настроечных параметров разработана структурная схема, приведенная на рисунке 11.

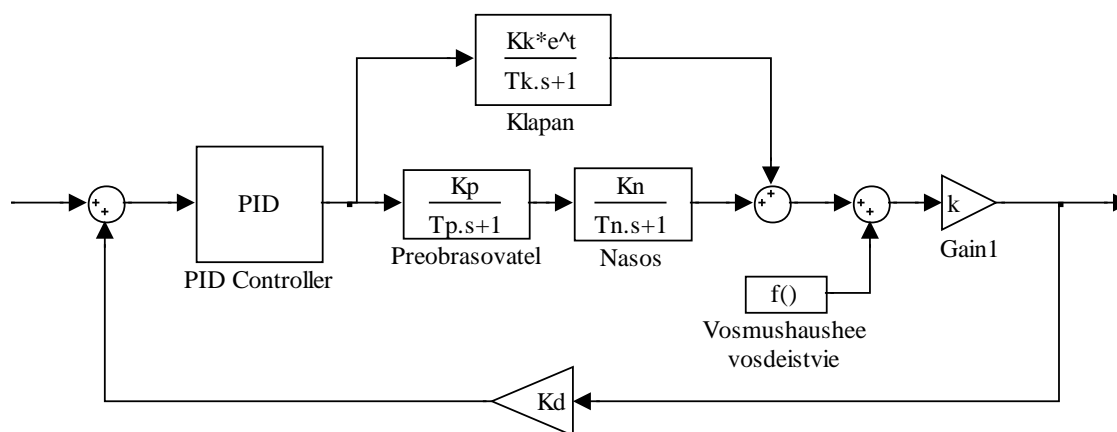


Рисунок 11 – Структурная схема синтеза настроечных параметров

На выходе регулятора вырабатывается выходной (управляющий) сигнал $u(t)$, действие которого направлено на уменьшение рассогласования текущего значения контролируемой величины от заданного.

Передаточная функция идеального ПИД-регулятора:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}, \quad (8)$$

где s – преобразователь Лапласа; K_p , K_i и K_d – коэффициенты, соответственно пропорциональности, интегрирования и дифференцирования.

Передаточные функции при нагрузке и разгрузке имеют одинаковую структуру, но различные постоянные времени. В связи с этим, используемый регулятор должен иметь различные коэффициенты настроек в зависимости от знака изменения регулируемого параметра (температуры теплоносителя,

давления в системе) и его производной, для того, чтобы обеспечить оптимальные характеристики переходного процесса (время и перерегулирование).

Передаточная функция объекта регулирования запишется в виде

$$W_{OP}(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau_{BO} \cdot p}}{T_{BO} \cdot p + 1}, \quad (9)$$

где k – коэффициент усиления объекта; τ – запаздывание на включение/отключение устройства; T_{BO} – постоянная времени; p – оператор.

Нарастание давления происходит на участках трубопровода с одновременным увеличением расхода жидкости. Данный процесс повторяется, обуславливая резкое изменение гидравлического сопротивления трубопровода, и сопровождается пульсационным характером изменения технологических и энергетических параметров НК. Амплитуда пульсаций напора на участке прилегающем к насосному агрегату больше, чем на участке, находящемся непосредственно за напорным участком трубопровода.

Результаты моделирования динамических характеристик разомкнутой системы показали существенную нелинейность дифференциальных уравнений объекта управления. Переходная характеристика системы имеет статический характер. В линейном варианте она управляема и с лучшим качеством переходного процесса, величина перерегулирования меньше 5%. Замкнутая система остается устойчивой с новым положением равновесия.

Настройка коэффициентов «PID Controller» осуществляется путем изменения коэффициентов в передаточной функции «Process». Нелинейность-типа «ограничение» при синтезированных параметрах ПИД-регулятора не оказывает существенного влияния на вид переходной характеристики.

Замкнутая система остается устойчивой с новым положением равновесия. Адекватность имитационной модели проверяли на реальном технологическом объекте – автоматизированном тепловом пункте. Проверка показала, что имитационная модель обладает удовлетворительной сходимостью результатов с лабораторными исследованиями.

Получены регрессионные модели, позволяющие определять основные параметры регулируемых трубопроводных систем теплоснабжения:

– скорость потока жидкости описывается зависимостью от времени t

$$V = 0,029t^3 + 1,527t - 0,198, \quad (10)$$

– амплитуда колебаний золотника балансировочного клапана описывается зависимостью

$$A = 12,9t^{-0,74}, \quad (11)$$

– температура теплоносителя при переходном режиме

$$T = 0,023t^2 + 0,147t + 0,364, \quad (12)$$

– перепад давления от расхода потока

$$\Delta P = 0,20Q + 0,486, \quad (13)$$

– тепловой поток

$$Q = 3 \cdot 10^8 t^3 - 4 \cdot 10^8 t^2 + 2 \cdot 10^8 t - 2 \cdot 10^7, \quad (14)$$

– электрическая мощность насосов от скорости потока

$$N = 4,272v - 0,119. \quad (15)$$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Разработана структурная схема стабилизации температурного режима регулируемой трубопроводной системы теплоснабжения зданий.

2) Разработана математическая модель процесса стабилизации температурного режима регулируемой трубопроводной системы теплоснабжения зданий с учетом переходных процессов.

3) Получены регрессионные зависимости: скорости потока жидкости, амплитуды колебаний золотника балансировочного клапана, температуры теплоносителя при переходном режиме, перепада давления от скорости потока, теплового потока, электрической мощности насосов от скорости потока, позволяющие определять основные параметры регулируемой трубопроводной системы теплоснабжения.

3) Определены эффективные режимы стабилизации температурного состояния гидравлической системы теплоснабжения на основе теоретических и экспериментальных исследований, обеспечивающие экономию тепловой энергии.

4) Разработана методика проектирования регулируемой трубопроводной системы, с учетом переходных процессов, позволяющая обосновать эффек-

тивные режимы стабилизации температурного состояния гидравлической системы теплоснабжения зданий.

5) Подтверждена адекватность теоретических результатов экспериментальными исследованиями, погрешность данных составила до 10%;

6) Результаты научной работы внедрены в ООО ФГПУ «ЖКХ КНЦ» СО РАН, что подтверждено актом внедрения. Использование регулируемых теплопередающих систем, по результатам имитационного моделирования, обеспечивает эффективность энергосбережения при теплоснабжении зданий на 6 % – 7 %.

7) Дальнейшая разработка темы планируется в части совершенствования технологического комплекса управления режимами тепловой системы зданий.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Исследование автоматической системы управления с пропорционально-интегрально-дифференцированным регулированием / А.В. Цыганкова, Р.Т. Емельянов, Е.С. Спиринов, К.В. Кириллов // Вестник КрасГАУ. №10. 2013. С.243-247.

2. Моделирование гидропривода в среде «Matlab-Simulink» / А.В. Цыганкова, Н.Ю. Клиндух, С.В. Шилкин // Вестник КрасГАУ. №11. 2013. С.243-249.

3. Термодинамический анализ трубопроводной системы отопления / А.В. Цыганкова, Р.Т. Емельянов, Ю.Л. Липовка // Вестник КрасГАУ. №11. 2014. С.182-186.

4. Потокораспределения трубопроводной системы отопления при независимом подключении циркуляционного насоса / А.В. Цыганкова, Р.Т. Емельянов, Ю.Л. Липовка, Н.А. Барабанщикова // Вестник КрасГАУ. №12. 2014. С.200-204.

Публикации в сборниках трудов конференций:

5. Цыганкова, А.В. Разработка управляющего модуля температурным состоянием рабочей жидкости / А.С. Амелюхин, А.В. Цыганкова // Молодежь и наука. Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск. 2010. С. 159-160.

6. Цыганкова, А.В. Автоматизация сбора регистрируемых параметров. / А.В. Цыганкова, С.В. Шилкин / Молодежь и наука. Материалы VIII научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых

ученых, посвященной 50-летию первого полета в космос. [Электронный ресурс], в 3т: материалы конф. Т.3 Красноярск: Сиб. федер. ун-т.- 2011. С. 222-224.

7. Цыганкова, А.В. Сокращение потерь тепловой энергии в тепловых сетях / Материалы Всероссийской с международным участием научно-технической конференции студентов, магистров, аспирантов, молодых ученых. 6-9 февр. 2014 г.; под ред. С.А. Белых. Братск 2014. С. 102-104.

8. Цыганкова, А.В. Моделирование процессов гидросистемы регулируемых трубопроводных систем/Перспектив-2015: материалы науч. конф., посвященной 70-летию Великой Победы (15–25 апреля 2015 г.) [Электронный ресурс] / отв. ред. Е. И. Костоглодова. Электрон. дан. Красноярск.: Сиб. федер. ун-т, 2015. –Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2015/index.html>.

9. Цыганкова, А.В. Стабилизация температурного режима образовательных учреждений: материалы III Всероссийской конференции. Формирование человеческого капитала ресурсами системы образования / А.В. Цыганкова А.М. Сташин. Красноярск, 2016. С. 149-151.

Подписано в печать г. Заказ №
Формат 60*90/16 Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
ИПК Сибирского Федерального Университета
660074, Красноярск, пр. Свободный, 82