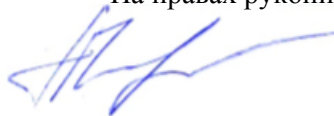


На правах рукописи



**Петрова Надежда Игоревна**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами  
(промышленность)»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Научный руководитель — Доктор технических наук, профессор  
**Пуговкин Алексей Викторович**

Официальные оппоненты: **Сырямкин Владимир Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Национальный исследовательский  
Томский государственный  
университет, заведующий кафедрой  
управления качеством  
**Шилин Александр Анатольевич**,  
доктор технических наук,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический  
университет, профессор кафедры  
электропривода и  
электрооборудования

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

Защита состоится 28 декабря 2017 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.268.02 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/7ccs5a8m> и в Научной библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Т.Н. Зайченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Актуальность диссертационной работы заключается в решении задач, характерных для любого предприятия промышленного производства – обеспечение и поддержание требуемого микроклимата помещений для производственных процессов и комфортных условий труда, а также снижение себестоимости выпускаемой продукции за счет экономии тепловой энергии, повышения энергетической эффективности здания.

Решение выше озвученных задач можно найти в применении непрерывного контроля теплового режима отдельных помещений и здания в целом на этапах ввода здания в эксплуатацию и самой эксплуатации. Это достигается путем измерения в реальных условиях температур объектов и обработки результатов с помощью предложенной математической модели, состоящей из нелинейных дифференциальных балансных уравнений для средних температур отопительного прибора, воздуха и ограждающих конструкций помещения. В отличие от известных технических решений, тепловые параметры (коэффициент теплоотдачи отопительного прибора и коэффициент теплопередачи через ограждающие конструкции) находятся оперативно из экспериментальных исследований в динамическом режиме.

Таким образом, вопросы построения и анализа автоматизированных систем контроля теплового режима в производственных помещениях представляют существенный интерес при проведении теоретических и экспериментальных исследований эффективности работы отопительных приборов и величины вклада вторичных источников тепла (например, промышленных станков и другого технологического оборудования), эффективности накопления и удержания тепла в помещении ограждающими конструкциями. Также в прикладном плане – при создании средств автоматизации и электронных устройств, которые могут измерять и контролировать тепловой режим помещения и потребляемую тепловую энергию и, с помощью систем обратной связи, управлять этими процессами с целью экономии тепловой энергии и создания комфортных условий

для производственной деятельности. Исследования в данной области изложены в работах отечественных и зарубежных ученых (в алфавитном порядке): Богословского В.Н., Бродач М.М., Васильева Г.П., Зоновой А.Д., Ливчака В.И., Медведева В.А., Низовцева М.И., Пуговкина А.В., Сасина В.И., Табунщикова Ю. А., Федюка Р.С., Цветкова Н.А., Черепанова В.Я., Щекина Р.В., Balajia N.C., Di Perna C., Francesco Calvino, Hua Xianzhe, Kuk-Se Kim, Maria La Gennusa, Monto Manib B.V., Principi P., Pukhkal V., Rocha P., Ruffini E., Sun-Kuk Noh, Sung-Ju Oh, Wan-Young Chung, Yoo-Kang Ji.

**Объектом исследования** являются помещения в производственных зданиях на стадии проектирования, эксплуатации, реконструкции.

**Предметом исследования** являются тепловой режим помещения, коэффициенты теплоотдачи отопительного прибора, коэффициенты теплопередачи через ограждающие конструкции, теплоемкости.

**Цель диссертационной работы** заключается в проведении исследований по автоматизации контроля теплового режима в производственных помещениях, разработке и исследовании алгоритмов нахождения тепловых параметров помещений.

В соответствии с поставленной целью предусмотрено решение следующих **задач**:

1. Определить недостатки известных технических решений и способов контроля теплового режима и учета потребляемой тепловой энергии в отдельном помещении, а также выявить пути решения существующих проблем.

2. Выполнить математическое и компьютерное моделирование теплового режима помещений на основе системы нелинейных дифференциальных балансных уравнений.

3. Разработать способ и алгоритм измерения эффективности отопительных приборов путем оперативного нахождения коэффициента теплоотдачи прибора в заданном температурном диапазоне непосредственно в условиях эксплуатации.

4. Разработать способ и алгоритм оценки эффективности накопления и удержания тепла в помещении путем измерения

коэффициентов теплопередачи через ограждающие конструкции и эффективной теплоемкости помещений.

5. Получить экспериментальные результаты для подтверждения адекватности разработанных способов путем решения задачи, обратной моделированию – по измеренным температурным зависимостям с помощью системы нелинейных дифференциальных уравнений вычислить параметры теплового режима помещения.

6. Спроектировать автоматизированную систему контроля теплового режима помещения с использованием предложенных алгоритмов.

7. Провести натурные исследования с помощью автоматизированной системы контроля теплового режима помещений.

#### **Методы исследования.**

Для достижения поставленной цели и связанных с ней задач в работе использовались методы решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, методы математического моделирования, численные методы анализа, корреляционный анализ.

#### **Научная новизна.**

1. Предложен динамический метод анализа системы теплоснабжения помещений, отличающийся от известных тем, что параметры математической модели, состоящей из нелинейных дифференциальных балансных уравнений, находятся из экспериментальных исследований путем решения обратной задачи, когда тепловой режим приводится в нестационарное состояние путем нагревания или охлаждения помещения. Это позволяет учесть индивидуальные особенности системы теплоснабжения помещения (тип и состояние источников тепла, состояние ограждающих конструкций, наличие в помещении мебели и других предметов, а также людей и энергетически активных приборов).

2. Предложен новый способ измерения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора, позволяющий определить эффективность отопительных приборов с учетом их индивидуальных особенностей и условий теплообмена, отличающийся от известных тем, что нахождение коэффициента

производится оперативно в реальных условиях эксплуатации отопительного прибора с высокой точностью (Способ измерения сопротивления теплоотдачи отопительного прибора : пат. 2566640 Рос. Федерация : МПК G01K 17/00 / заявители и патентообладатели Пуговкин А.В., Купреков С.В., Муслимова Н.И. № 2012134982/28; заявл. 15.08.12 ; опубл. 27.10.15, Бюл. № 30.).

3. Предложен способ нахождения коэффициента теплопередачи через ограждающие конструкции, который позволяет оценить величину утечки тепла через внешнее ограждение помещения в режиме реального времени, отличающийся от известных тем, что нахождение коэффициента производится непосредственно из эксперимента в условиях эксплуатации, согласно уравнению теплового баланса помещения.

4. Аппаратно-программный комплекс для непрерывного контроля теплового режима помещений, на основе предложенных в работе математической модели и способов отличается от известных тем, что позволяет одновременно, с использованием одних и тех же температурных датчиков, провести учет тепловой энергии и непрерывный инструментальный контроль системы теплоснабжения в реальном масштабе времени.

#### **Практическая значимость.**

1. Предложен способ измерения эффективности отопительных приборов (экспресс анализ).

2. Предложен способ измерения эффективности удержания тепловой энергии в помещении.

Использование в производственном процессе автоматизированной системы непрерывного контроля теплового режима помещений, на основе предложенных в работе математической модели и способов, позволяет:

- обеспечить быстроедействие и оперативность при измерении коэффициента теплоотдачи отопительного прибора в условиях эксплуатации;

- снизить стоимость и трудозатраты при внедрении и эксплуатации системы;

- обеспечить точность измерения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора, необходимую для применения в условиях эксплуатации (с отклонением не более 4%);

– оценить потери тепловой энергии, излучаемые через внешние ограждения;

– организовать учет вторичных источников тепла (например, промышленных станков и другого технологического оборудования);

– сопоставить проектные показатели зданий с фактическими при сдаче в эксплуатацию и оценить параметры ограждающих конструкций в процессе эксплуатации.

### **Внедрение результатов исследования.**

Результаты диссертационной работы используются в составе программного обеспечения «Системы мониторинга и учета тепла ООО «ЭТИС» и применяются в производственном помещении проливной установки, что подтверждается актом. Кроме того, результаты исследования внедрены в учебный процесс ТУСУРа на кафедре телекоммуникаций и основ радиотехники.

Результаты исследований вошли в отчеты по НИРиОКР по комплексному проекту, выполняемому совместно с ЗАО «ПКК Миландр» в рамках ПП РФ № 218 по теме: «Разработка гетерогенной автоматизированной системы мониторинга потребляемых энергоресурсов, программного обеспечения, а также разработка и реализация проектно-сметной документации на развертывание и проведение натуральных испытаний системы на объектах». Шифр «2014-218-05-1708-ТУСУР (х/д № 29/14).

### **Степень достоверности результатов.**

Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается строгостью используемых математических методов, обоснованностью принятых допущений, адекватностью используемой математической модели; основывается на результатах экспериментальных исследований отопительных приборов и теплового режима помещений, полученных в лабораторных условиях и в реальных условиях эксплуатации, их соответствии с результатами моделирования, а также, в частных случаях с экспериментальными результатами других авторов.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Применение динамических методов в сочетании с математической моделью, состоящей из нелинейных дифференциальных балансных уравнений, позволяет провести

анализ системы теплоснабжения помещения и синтез автоматизированной системы контроля теплового режима в производственном помещении.

*Соответствует пункту 10 паспорта специальности: Методы синтеза типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП.*

2. Динамический режим работы отопительных приборов позволяет с помощью балансных дифференциальных уравнений, путем обработки измеренных значений средних температур поверхности отопительного прибора и воздуха помещения, реализовать алгоритм и аппаратное обеспечение оперативного нахождения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора.

*Соответствует пункту 2 паспорта специальности: Автоматизация контроля и испытаний.*

3. Автоматизированная система позволяет сочетать непрерывный инструментальный контроль тепловых режимов отдельных помещений и здания в целом на этапах ввода здания в эксплуатацию и самой эксплуатации с измерением потребляемой тепловой энергии без дополнительных финансовых затрат, за счет использования одних и тех же температурных датчиков.

*Соответствует пункту 2 паспорта специальности: Автоматизация контроля и испытаний.*

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на одной Зарубежной, трех Международных и пяти Всероссийских научно - технических конференциях, среди которых: Conference of Environmental and Climate technologies «CONNECT 2015» (Рига, Латвия, 2015); IV Международная научно-практическая конференция «Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности» (Санкт-Петербург, 2013); II Всероссийская научная конференция с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий» (Новосибирск, 2015); Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2010–2013); Конференция молодых специалистов ОАО



«Связьтранснефть» и студентов ТУСУР на лучшую научно-техническую разработку (Томск, 2010).

#### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликовано 18 работ, из них 3 статьи в журналах из перечня ВАК; 2 статьи в журналах, рецензируемых Scopus; 1 монография, 2 патента на изобретение; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Личный вклад автора.**

Основные результаты диссертации получены лично автором или при непосредственном его участии. Автором лично определены задачи, решаемые в работе; собраны и обобщены в виде аналитического обзора библиографические сведения по теме диссертации; выполнено математическое и компьютерное моделирование теплового режима помещений; проведен сбор и анализ экспериментальных данных; осуществлено компьютерное оформление всего графического материала. Предложен и теоретически обоснован способ измерения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора, проанализированы основные характеристики устройства измерения коэффициента теплоотдачи (диапазон измерения температур, точность измерения, время измерения), выявлена возможность проведения измерений коэффициента теплоотдачи отопительного прибора в условиях эксплуатации. Разработаны способ и алгоритм оценки эффективности накопления и удержания тепла в помещении, проведен эксперимент в условиях эксплуатации. Исследования на экспериментальной установке проведены совместно с сотрудниками кафедры ТОР ТУСУР С.В. Купрековым, С.И. Абрамчуком и В.С. Степным. Автором совместно с научным руководителем, д.т.н., профессором А.В. Пуговкиным осуществлен выбор направления исследований и сформулирована цель работы.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список использованной литературы, содержащий 103 наименования. Общий объем диссертации составляет 172 страниц машинописного текста, включающий 44 рисунка и 10 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность, научная новизна исследований, определена цель работы и задачи исследования, дана общая характеристика работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор известных подходов математического описания тепловых режимов помещений и анализ основных требований, которые предъявляются к математическим моделям теплового режима помещений, предназначенным для использования в системах управления. Проведен анализ архитектуры программного комплекса автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ) крупных компаний, представленных на российском рынке. Приведено описание объекта управления и сформулированы особенности исследований тепловых режимов отдельных помещений здания.

Рассмотрены недостатки известных способов нахождения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора и коэффициента теплопередачи через ограждающие конструкции, лежащих в основе мониторинга теплового режима помещений.

Проведен обзор готовых решений – автоматизированных систем контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ), представленных на российском рынке. Обоснована необходимость применения автоматизированного контроля теплового режима производственных помещений совместно с учетом потребляемой тепловой энергии.

**Во второй главе** рассмотрена математическая модель отдельного помещения, состоящая из системы нелинейных дифференциальных балансных уравнений. В качестве зависимых переменных для составления баланса используется тепловая энергия того или иного объема:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = G_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_1) - G_{\text{орг}} \cdot (T_1 - T_2) - G_{\text{внеш}} \cdot (T_1 - T_{\text{внеш}}); \\ C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = G_{\text{орг}} \cdot (T_1 - T_2) - G_{\text{см}} \cdot (T_2 - T_{\text{см}}); \\ C_3 \cdot \frac{dT_3}{dt} = M \cdot \Delta T_{\text{ист}} - G_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_1), \end{cases} \quad (1)$$

где  $Q_1 = C_1 \cdot T_1$  – количество тепловой энергии воздушной массы, Дж;  $C_1$  – теплоемкость помещения;  $T_1$  – температура воздуха в помещении, °С;  $G_{\text{ист}}$  – коэффициент теплоотдачи отопительного прибора, Вт/°С;  $T_{\text{ист}} = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2}$  – средняя температура поверхности отопительного прибора, °С;  $T_{\text{вх}}$  и  $T_{\text{вых}}$  – температура теплоносителя подающего и обратного трубопровода соответственно, °С;  $G_{\text{орг}}$  – коэффициент теплопередачи во внутренние ограждения, Вт/°С;  $T_2$  – температура ограждения, °С;  $G_{\text{внеш}}$  – коэффициент теплопередачи через ограждающие конструкции, Вт/°С;  $T_{\text{внеш}}$  – температура внешней среды, °С;  $Q_2 = C_2 \cdot T_2$  – количество тепловой энергии ограждений помещения, Дж;  $C_2$  – теплоемкость внутренних ограждений;  $G_{\text{см}}$  – коэффициент теплопередачи из внутреннего ограждения в соседнее помещение, Вт/°С;  $T_{\text{см}}$  – температура воздуха смежного помещения, °С.  $Q_3 = C_3 \cdot T_{\text{ист}}$  – количество тепловой энергии отопительного прибора, Дж;  $C_3$  – теплоемкость отопительного прибора;  $M = c_3 \cdot m$  – расход теплоносителя, Вт/°С;  $c_3$  – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°С);  $m$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $\Delta T_{\text{ист}} = T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}$  – срабатываемый температурный напор теплоносителя, °С;  $t$  – текущее время, сек.

Коэффициенты, входящие в уравнения, являются функциями температур, носят интегральный характер и могут быть найдены экспериментальным путем.

Нелинейность уравнений обусловлена физическими свойствами конвективной и радиационной составляющих коэффициента теплоотдачи отопительного прибора.

Предложенная математическая модель (1) оперирует со средними значениями температур отопительного прибора и воздуха помещения. Модель не учитывает зависимости этих температур от пространственных координат. Это обосновывается тем, что уравнения оперируют со значениями энергий отопительного прибора и помещения, при этом достаточно знания только средних температур. Это утверждение согласуется с рекомендациями измерения средних температур НП «АВОК».

Также во второй главе проведено компьютерное моделирование следующих ситуаций: нагревание охлажденного воздуха помещения, влияние начальных условий на тепловой режим помещения, влияние изменения температуры теплового источника на температурный режим помещения, влияние смежных помещений на тепловой режим.

Для проверки математической модели был проведен эксперимент в лабораторном помещении кафедры ТОР ТУСУР. Проведено сравнение зависимостей температур воздуха помещения от времени, полученных экспериментально и путем моделирования. Средняя квадратическая погрешность результата измерений не превышает 1,8 %, что говорит о хорошем совпадении результатов моделирования и эксперимента.

Проведено исследование учета влияния воздушного массообмена на тепловой режим помещения (рис. 1) и учета дополнительных источников тепловой энергии с известной тепловой мощностью (рис. 2).

Применение источника с известной тепловой мощностью, позволяет рассчитывать переходные процессы и проводить калибровку теплового источника водонагревательного типа; найти эффективную теплоемкость данного помещения с учетом всех находящихся в нем предметов. Кроме того, учет вторичных источников тепла позволяет экономить тепловую энергию, потребляемую от традиционных приборов водяного отопления. Данные рассуждения будут справедливы для применения в производственных помещениях, с целью экономии ресурсов, обеспечения и поддержания требуемых производственных условий микроклимата.

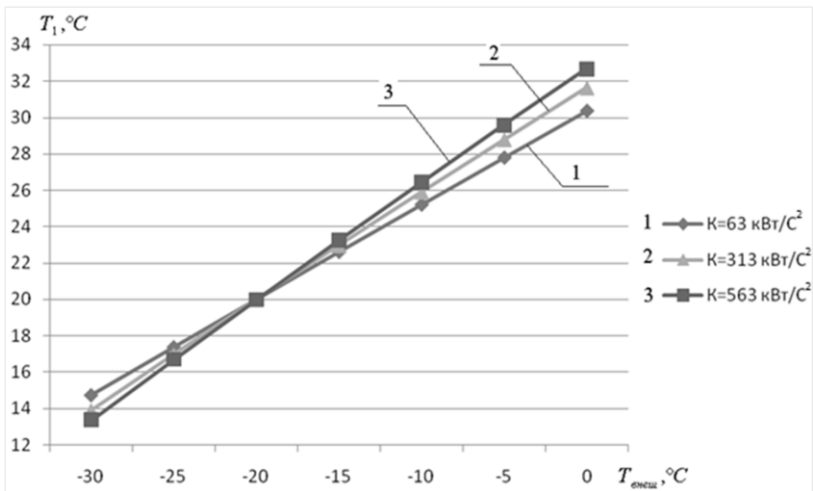


Рис. 1 – Зависимости  $T_1(T_{\text{внеш}})$  при разных значениях коэффициента скорости массообмена  $K$

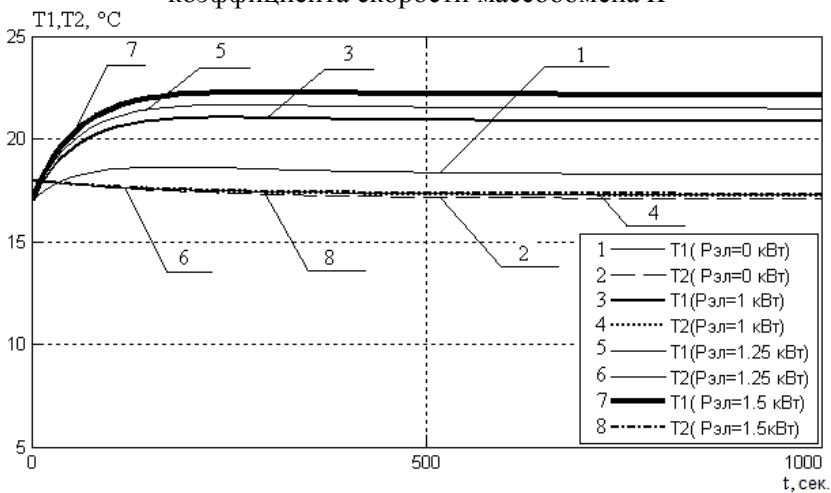


Рис. 2 – Семейство характеристик тепловых режимов помещения при постоянном излучении теплоносителя и учете влияния вторичных источников тепла

Предложен, теоретически и экспериментально обоснован способ измерения эффективности отопительных приборов путем оперативного нахождения коэффициента теплоотдачи прибора в динамическом режиме, при изменении тепловой мощности и температуры поверхности отопительного прибора согласно формуле:

$$G_{\text{ист}} = \frac{C_{\text{ист}} \cdot \frac{dT_{\text{ист}}}{dt}}{T_{\text{ист}}^{\kappa} - T_1^{\kappa}}. \quad (2)$$

В данном случае коэффициент теплоотдачи измеряется для каждого отопительного прибора с учетом его индивидуальных особенностей, в отличие от аналогов, когда коэффициент находится из справочной литературы или путем измерения в специализированных лабораториях. Алгоритм реализуется в условиях эксплуатации при прекращении подачи теплоносителя в стояке системы отопления ( $M = 0$ ).

Разработан способ оценки эффективности накопления и удержания тепла в помещении путем измерения коэффициентов теплопередачи через ограждающие конструкции и эффективной теплоемкости помещений.

$$G_{\text{внеш}} = \frac{G_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_1)}{(T_1 - T_{\text{внеш}})}. \quad (3)$$

Известное значение коэффициента теплопередачи через ограждающие конструкции позволяет оценить величину утечки тепла через внешнее ограждение помещения в режиме реального времени.

**В третьей главе** проведено экспериментальное исследование адекватности разработанных способов и алгоритмов на основе предложенной математической модели.

Для исследования эффективности теплоотдачи отопительных приборов был проведен ряд экспериментов, которые осуществлялись на испытательном стенде в лаборатории кафедры ТОР ТУСУР. Для нахождения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора экспериментально получены зависимости

остывания двух отопительных приборов: чугунного радиатора из четырех секций и алюминиевого радиатора из восьми секций (рис. 3). Также на рис. 3 приведены результаты вычисления коэффициента теплоотдачи  $G_{ист.}$ .

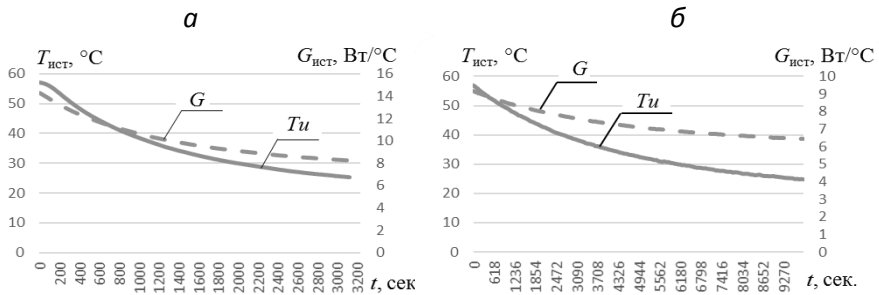


Рис. 3 — Результаты экспериментальных исследований

различных типов радиаторов: *а* — алюминиевого; *б* — чугунного

Основные результаты эксперимента по нахождению коэффициента теплоотдачи отопительного прибора сведены в табл.1.

Таблица 1 — Результаты измерения коэффициента теплоотдачи

Тип прибора	$C_{ист.}$ тепло- емкость, [Дж/°C]	$G_{ист.}$ , коэфф. теплоотдачи экспери- ментально измеренный, [Вт/°C]	$G_{ист.}$ , коэфф. теплоотдачи по действующей методике, [Вт/°C]
Чугунный радиатор, 4 секции	36054	6,5-9	8,3
Алюминиевый радиатор 8 секций	17700	8-14	14,6
Труба $\frac{3}{4}$ дюйма 3 м	6441	2,8	-

Коэффициент теплоотдачи в таблице приводится для температурного напора от 5°C до 37°C.

Как видно из табл. 1, коэффициенты теплоотдачи, вычисленные согласно предложенному способу по формуле 2, не являются постоянными величинами и изменяются в определенных

диапазонах. Значения коэффициентов теплоотдачи, вычисленные по действующей методике испытания отопительных приборов, входят в данные диапазоны с отклонением не более 4%.

Для исследования эффективности удержания тепла в помещении был проведен натурный эксперимент в помещении площадью 14 м<sup>2</sup>. С помощью температурных датчиков были измерены температуры воздуха в помещении, температуры внутренних ограждений, а также температуры отопительного прибора. Коэффициент теплоотдачи чугунного радиатора из шести секций найден согласно предложенному способу (рис. 4). Далее для нахождения коэффициента теплопередачи через внешние ограждения, были проведены дополнительные измерения в стационарном температурном режиме помещения, когда температура внешней среды не изменялась. Измерения проводились 24 часа. Результаты эксперимента сведены в табл. 3.

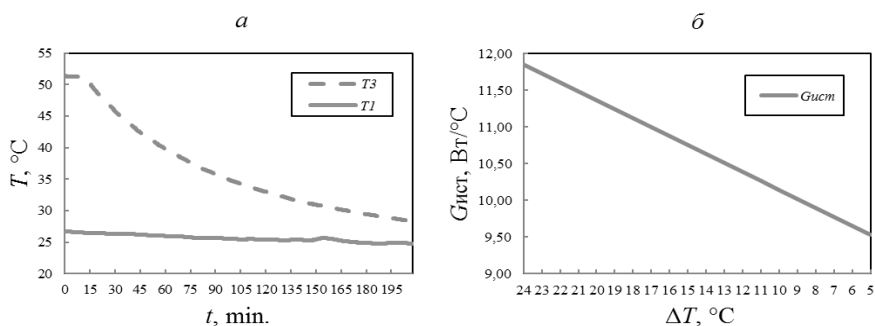


Рисунок 4 – Натурный эксперимент (а) Зависимости температур поверхности радиатора и воздуха от времени в режиме остывания; (б) Зависимость коэффициента теплоотдачи от разности температур радиатора и воздуха



Таблица 3 — Результаты экспериментального исследования эффективности удержания тепла в помещении

Исходные данные для расчета $G_{\text{внеш}}$	$T_{\text{внеш}} = -14,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{ист}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_1 = T_{\text{см}} = T_2 = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ $G_{\text{ист}} = 11,9\text{ Вт}/^{\circ}\text{C}$ , при $\Delta T = T_{\text{ист}} - T_1 = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$
<b>Величина <math>G_{\text{внеш}}</math></b>	7,1 Вт/ $^{\circ}\text{C}$
Тепловая мощность, отдаваемая отопительным прибором, $P_{\text{ист}}$	284,4 Вт

Предпринята попытка определения эффективной теплоемкости помещения  $C_1$  на основе системы нелинейных дифференциальных балансных уравнений. Для данной оценки был применен метод корреляционного анализа. Были проведены экспериментальные измерения суточного распределения температуры внешней среды и температуры воздуха помещения.

Произведена обработка двух натуральных экспериментов, проводимых в разное время и в разных помещениях. На основании полученных данных в пакете Matlab были найдены функции автокорреляции температуры внешней среды и функции взаимной корреляции температур воздуха помещения и внешней среды.

Для первого эксперимента величина запаздывания по времени температуры воздуха в помещении при изменении температуры внешней среды составила  $\tau = 4$  часа, для второго –  $\tau = 5$  часов 30 минут. Эффективная теплоемкость помещения с учетом всех находящихся в нем предметов составила:

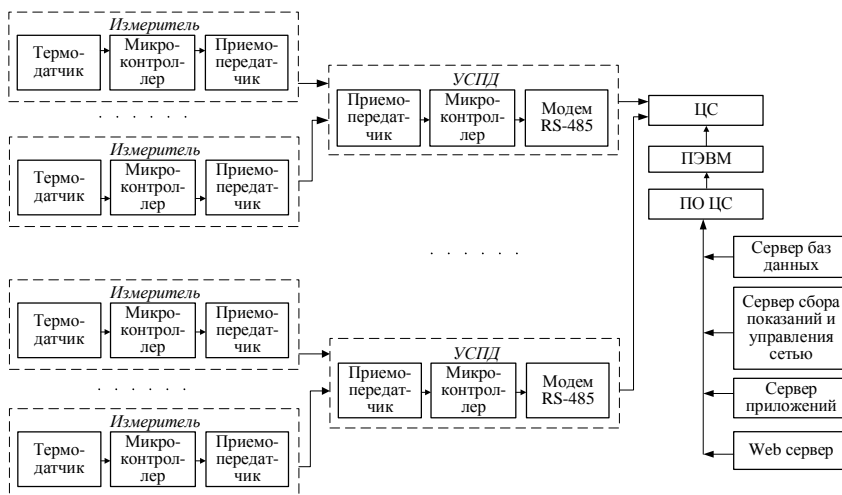
$$C_1 = G_{\text{внеш}} \cdot \tau_{\text{внеш}} = 7,1 \cdot 5,5 \cdot 3600 = 140,4 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}.$$

Рассмотрены схемы автоматического регулирования для отдельного помещения с применением спектрального подхода. Для этого были использованы рассмотренные ранее математические модели, с учетом регулировочных характеристик – зависимости температуры воздуха в помещении от расхода теплоносителя в отопительном приборе, от скорости теплового воздушного потока, от электрической мощности, отдаваемой электронагревателем.

Проведена оценка погрешностей измерения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора и коэффициента теплопередачи через ограждающие конструкции. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов показал хорошее совпадение.

**Четвертая глава** посвящена автоматизированной системе контроля теплового режима помещения. Разработана общая структура автоматизированной системы мониторинга, в состав которой входят следующие основные элементы (рис. 5):

- Измеритель (радиомодем, антенна, источник электропитания (аккумулятор или батарея), датчики температуры, микропроцессор);
- Устройство сбора и передачи данных (УСПД);
- Центральный сервер;
- Программно-методическое обеспечение, позволяющее осуществлять сбор, передачу и обработку данных с измерителей.



УСПД - устройство сбора и передачи данных; ЦС - центральный сервер

Рис. 5 – Структура автоматизированной системы контроля теплового режима

Обозначены основные технические характеристики узлов, входящих в состав системы. Приведено описание и обоснование

выбранных технических решений. По аппаратной части были выбраны следующие основные элементы радиомодема: микроконтроллер STM32L432; приемопередатчик CC1120; термодатчик DS18B20; микросхема CP2102; микросхема MAX3485; антенна.

Также в главе приведены расчет информационных характеристик сигналов и оценка времени обмена данными между УСПД и радиомодемом измерителя.

Приведено описание структуры программного обеспечения. Программное обеспечение автоматизированной системы контроля теплового режима представляет собой систему сбора, передачи, хранения и обработки данных и состоит из сервера сбора данных, сервера базы данных, сервера приложений, web-сервера, АРМ оператора, АРМ администратора, АРМ клиента, и может быть развернуто как на односерверной аппаратной платформе, так и на многосерверной.

Программное обеспечение автоматизированной системы контроля теплового режима в производственных помещениях реализуется на основе типовых блоков и может входить в состав автоматизированной системы коммерческого учета тепловой энергии (АСКУЭ), структура программного обеспечения которой приведена на рис. 6. Отличительной особенностью разрабатываемой системы является наличие программы для расчета коэффициента теплоотдачи отопительного прибора и коэффициента теплопередачи через внешние ограждения.

Приведены блок-схемы алгоритмов вычисления коэффициента теплоотдачи отопительного прибора и коэффициента теплопередачи через ограждающие конструкции, а также внешний вид диалогового окна программы для расчета коэффициентов.

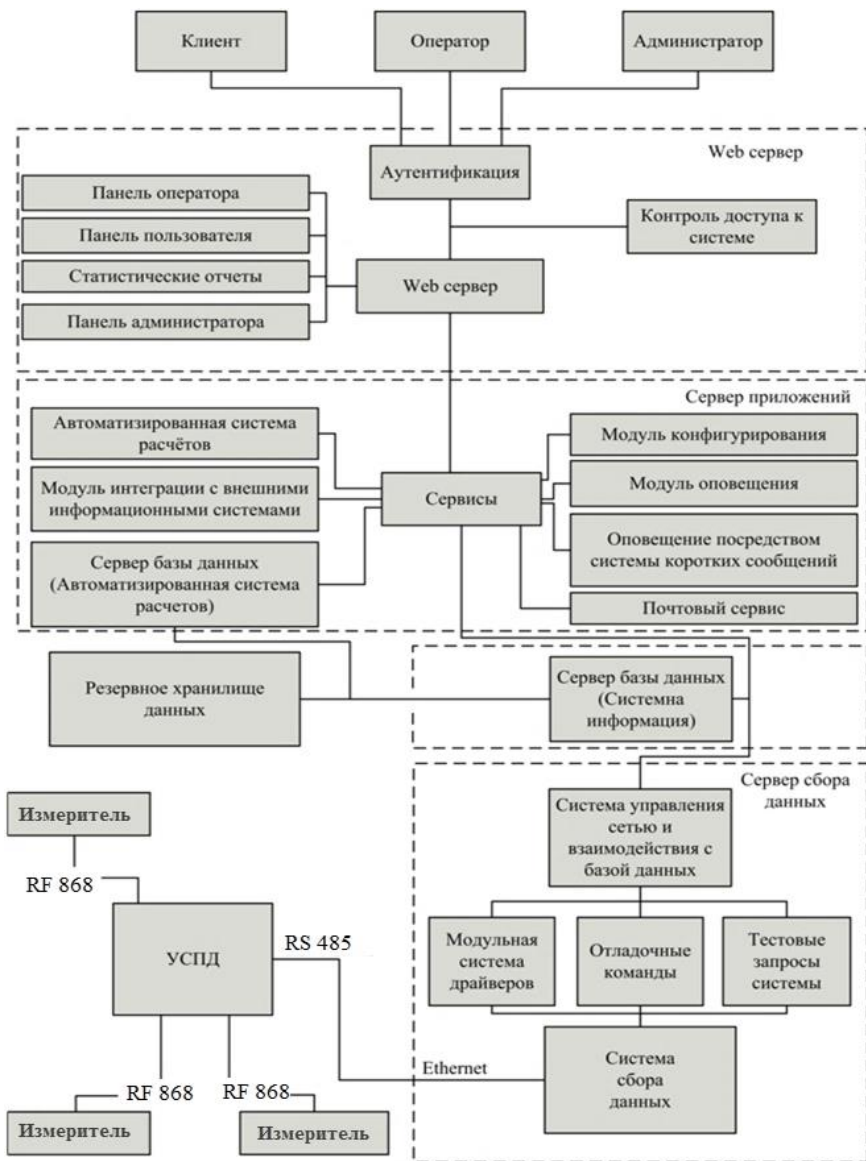


Рисунок 6 – Структура программного обеспечения автоматизированной системы контроля и учета тепловой энергии

Разработанная система экспериментально исследовалась в условиях эксплуатации в ряде смежных помещений, связанных одним отопительным стояком однотрубной системы, который содержал в себе шесть отопительных приборов (чугунные радиаторы МС-140), включенных последовательно с помощью стальных труб (3/4 дюйма). Помещения имели различные условия конвекции воздуха.

После обработки измеренных и фильтрованных температур были получены зависимости коэффициента теплоотдачи отопительного прибора от температурного напора. Часть результатов вычислений в компьютерной программе для контроля теплового режима помещений приведены на рис. 7 и 8.

Из графиков (рис. 7 и 8) видно, что у отопительных приборов одинакового типа, установленных в разных помещениях, значения коэффициентов теплоотдачи значительно разнятся. Оценка неопределённостей экспериментальных измерений коэффициентов теплоотдачи для исследуемых типов отопительных приборов приведена в третьей главе диссертационной работы.

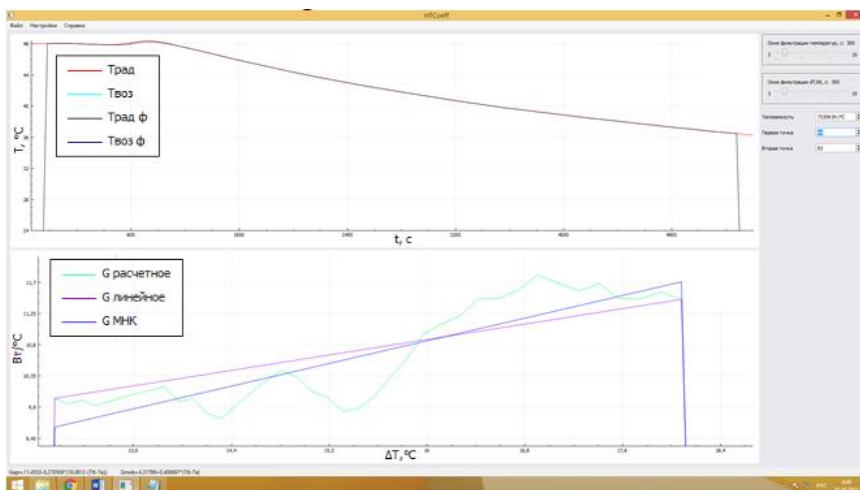


Рис. 7 – Результаты измерений (измеритель №1, 2 этаж)

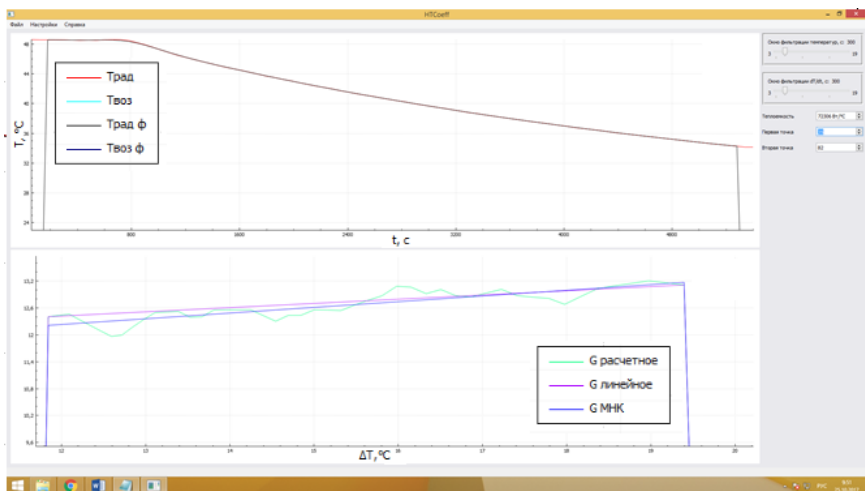


Рис. 7 – Результаты измерений (измеритель №4)

Задача натурного эксперимента – отладка и тестирование работы автоматизированной системы сбора, передачи и обработки данных. Таким образом, можно сделать вывод о том, что тестовые испытания в условиях эксплуатации в ряде смежных помещений доказали работоспособность системы при ее настройке и эксплуатации.

**В заключении** приводятся основные результаты работы в следующих выводах:

1. Проведен обзор известных технических решений задач контроля теплового режима и учета потребляемой тепловой энергии, на основании которого принято решение о разработке новых способов измерения эффективности отопительных приборов и оценки эффективности накопления и удержания тепла в производственном помещении.

2. Предложена математическая модель теплового режима помещения на основе системы нелинейных дифференциальных балансных уравнений.

3. Предложен, теоретически и экспериментально обоснован способ оперативного измерения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора в заданном температурном диапазоне непосредственно в условиях эксплуатации при использовании динамического режима работы отопительных приборов. Выявлена

возможность проведения измерений коэффициента теплоотдачи отопительного прибора в условиях эксплуатации.

4. Разработан способ оценки эффективности накопления и удержания тепла в помещении путем измерения эффективной теплоемкости помещений с применением корреляционного анализа и экспериментального нахождения коэффициента теплопередачи через внешние ограждения в условиях эксплуатации.

5. На основании предложенных способов разработаны алгоритмы измерения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора и коэффициента теплопередачи через ограждающие конструкции, которые были использованы при разработке программного обеспечения автоматизированной системы контроля теплового режима в производственном помещении.

6. Разработана структура автоматизированной системы. Приведены описание, обоснование и реализация выбранных технических решений системы и ее основных элементов. Приведены расчеты и результаты проведенных экспериментов, подтверждающие работоспособность и надежность разработанной системы.

7. Дальнейшее исследование предполагается проводить в решении задачи управления системой теплоснабжения зданий и помещений.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **В журналах, рекомендованных ВАК России**

1. Муслимова, Н.И. Динамический метод измерения эффективности отопительных приборов / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, В.А. Медведев, Н.И. Муслимова, В.С. Степной // Приборы. – 2014. – №7 (169). С. 10–14.
2. Муслимова, Н.И. Автоматизированная система поквартирного учета тепловой энергии / А.В. Пуговкин, Н.И. Муслимова, С.В. Купреков, Д.Н. Ушарова, А.В. Егоров // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2(24) часть 2. С. 232–237.
3. Муслимова, Н.И. Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, Д.В. Абушкин, И.А. Заречная, Н.И. Муслимова // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22) часть 1. С. 293–298.

### **В международной базе научного цитирования Scopus**

1. Petrova, N. Automation of Monitoring the Thermal Conditions in a Room / N. Petrova, A. Vershinin, S. Abramchuk, A. Pugovkin // Energy Procedia. – 2016. – № 95. – P. 358–365. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.022>.
2. Petrova, N. Dynamic method of the heating devices efficiency measurement / A. Mukashev, A. Pugovkin, S. Kuprekov, N. Petrova, S. Abramchuk // Energy Procedia. – 2017. – № 128. pp. 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.019>.

### **Монография**

1. Муслимова Н.И. Автоматизация мониторинга и управления теплоснабжением зданий и помещений : монография / А.В. Пуговкин, Н.И. Муслимова, С.В. Купреков. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013.–291 с.

### **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661035. Определение коэффициента теплоотдачи и тепловой мощности отопительного прибора / Пуговкин А.В., Мукашев А.М., Муслимова Н.И. – Заявка №2013618714. Дата



поступления 30 сентября 2013 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 ноября 2013 г.

### **Патенты**

1. Пат. 2 566 640 РФ, МПК G01K 17/00. Способ измерения сопротивления теплоотдачи отопительного прибора / Пуговкин А.В., Купреков С.В., Муслимова Н.И. (РФ). – № 2012134982/28; заявл. 15.08.2012; опубл. 27.10.2015.

2. Пат. 2 566 641 РФ, МПК G01K 17/08. Способ учета тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором / Пуговкин А.В., Купреков С.В., Муслимова Н.И. (РФ). – № 2013135623/28; заявл. 29.07.2013; опубл. 27.10.2015.

### **Публикации в других изданиях**

1. Петрова, Н.И. Аппаратно-программный комплекс учета потребляемой тепловой энергии / А.М. Мукашев, С.И. Абрамчук, А.В. Пуговкин, А.В. Бойченко, С.В. Купреков, Н.И. Петрова // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: Матер. науч. конф. с международным участием. –2017, С. 152–157.

2. Петрова, Н.И. Мониторинг теплового режима отдельных помещений / А.В. Пуговкин, Н.И. Петрова, С.В. Купреков, С.И. Абрамчук // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: Матер. науч. конф. с международным участием. –2015, С. 101–107.

3. Муслимова, Н.И. Динамический метод измерения эффективности нагревательных приборов / С.В. Купреков, А.В. Пуговкин, Н.И. Муслимова, В.С. Степной, С.И. Абрамчук // Материалы XVI Международной научно-практической конференции. Энергоресурсосбережение. Диагностика-2014, г. Дмитровград, 18-20 марта 2014. С. 173–176.

4. Муслимова, Н.И. Мониторинг теплового состояния помещения в динамическом режиме / А.В. Пуговкин, Н.И. Муслимова, С.В. Купреков // Современный научный вестник. – 2013. – № 50 (189), С. 29–37.

5. Муслимова, Н.И. Анализ перераспределения тепловой энергии при использовании квартирных регуляторов тепла / С.В. Купреков, Н.И. Муслимова // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции Энергосбережение в системах

тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности, г. Санкт-Петербург, 28–30 мая 2013 г. С. 222–228.

6. Муслимова, Н.И. Методы исследования информационных характеристик отопительных приборов / А.М. Мукашев, Н.И. Муслимова // Научная сессия ТУСУР–2013: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, – Томск: Издательство «В-Спектр», 2013 г. С.95–96.

7. Муслимова, Н.И. Модель автоматизированной системы поквартирного учета тепловой энергии / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, Н.И. Муслимова // Материалы XIV Международной научно-практической конференции. – Часть I. Вопросы энергоресурсосбережения, г. Дмитровград, 27-29 марта 2012 г. С.275–279.

8. Муслимова, Н.И. Аппаратно-программный комплекс по мониторингу и управлению теплоснабжением зданий и помещений / Н.И. Муслимова, И.А. Заречная, Д.Н. Ушарова, Д.Ю. Майков // Научная сессия ТУСУР–2011: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, – Томск: Издательство «В-Спектр», 2011. Ч. 3. С. 65–68.

9. Муслимова Н.И. Тепловая модель помещения для автоматизированной системы управления энергоснабжением / Н.И. Муслимова, И.А. Заречная // Научная сессия ТУСУР–2010: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, – Томск: Издательство «В-Спектр», 2010. Ч. 5. С. 281–283.