

Купреков Степан Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИНДИВИДУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ
КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ, ОТДАВАЕМОЙ
ОТОПИТЕЛЬНЫМ ПРИБОРОМ ПОМЕЩЕНИЮ**

Специальность:

05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

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

Томск - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

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

Официальные оппоненты **Цветков Николай Александрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение»

Федянин Виктор Яковлевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им.И.И. Ползунова», профессор кафедры «Электротехники и автоматизированного электропривода» энергетического факультета

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Защита состоится « 11 » декабря 2018г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028 г. Томск, ул. Савиных, дом 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан « » _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.т.н.



Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одной из приоритетных целей Энергетической стратегии России на период до 2030 г. наряду с экономией энергоресурсов является повышение качества жизни населения. При продолжительности отопительного периода в условиях Западной Сибири в среднем 7248 час/год и его интенсивности, достигающей 12800 °С*сутки, основная составляющая затрат по эксплуатации зданий и помещений приходится на отопление. В тоже время мероприятия, необходимые для обеспечения приемлемых климатических условий в жилых и прочих помещениях, плохо совместимы с экономией ресурсов, так как сами по себе требуют серьезных финансовых затрат. На этом фоне возрастает значение контроля количества потребляемой объектом тепловой энергии (далее т/э). Однако анализ информации энергоснабжающих организаций за последние 10 лет показывает, что попытки внедрения коллективного контроля экономии ресурсов в жилищно-коммунальном хозяйстве (далее ЖКХ) на весь дом в целом не дают планируемых результатов. Поэтому, чтобы достичь требуемых величин, в процесс экономии необходимо вовлечь конечного (индивидуального) потребителя, предоставив ему возможность количественной оценки результатов его регулирующих воздействий на систему отопления в квартире.

Актуальность темы исследования

Проблемой контроля количества т/э, потребляемой локальным помещением в многоквартирном доме, занимаются многие организации, такие как НПИ «АВОК», ООО «Энергетический сервис «Витерра», группа компаний «ИВК Саяны», НПО «ВЭСТ», ЗАО «Данфосс», и специалисты различных областей знаний: В.Н. Богословский, В.П. Вавилов, С.А. Карауш, В.Я. Федянин, В.Н. Карпов, А.Н. Колесников, И.В. Кузник, В.А. Медведев, М.И. Низовцев, Н.А. Цветков, С.В. Никитина, Ю.Н. Осипов, С.Н. Руденко, Т.И. Садовская, В.И. Сасин, В.А. Фафурин, Ю.А. Табунщиков и другие. Решение этой задачи автоматически снимет проблему экономии энергоресурсов в ЖКХ за счет вовлечения в процесс конечного потребителя, как наиболее заинтересованного в

необходимости проведения мероприятий по энергосбережению в принадлежащих ему помещениях.

Для реализации основных положений Энергетической стратегии России на период до 2030 г. правительством РФ принят ряд законодательных актов, в том числе устанавливающих уровень и степень оснащенности объектов средствами КИПа, перечень мероприятий по инструментальному контролю энергоэффективности вводимых в эксплуатацию зданий и сооружений. Методы, позволяющие корректно оценить энергоэффективность индивидуального помещения в течение отопительного сезона отсутствуют.

Оценка качества потребления тепловой энергии представляет особый интерес в зданиях старой застройки, доля которых, по различным оценкам, достигает 85% всего жилого фонда РФ. Разнообразие парка эксплуатируемых отопительных приборов (далее ОП) и особенности участков систем внутреннего отопления отремонтированных в разное время в таких домах, ставят под сомнение результаты применения современных технологий энергоаудита. В этой связи разработка и исследование индивидуальных средств контроля потребляемой тепловой энергии приобретает дополнительное значение. Сегодня энергоаудит носит эпизодический и локальный характер. Внедрение поквартирного учета открывает возможность для анализа тепловых потоков внутри здания от помещения к помещению, от одной группы квартир к другой в реальном масштабе времени. Наконец, не менее важным фактором становится получение результатов инструментального контроля непрерывно, в течение всего отопительного сезона, для качественного и количественного анализа работы системы отопления внутри отдельных помещений.

Таким образом, по сформулированной проблеме можно сделать обоснованный вывод о том, что исследования в данном направлении актуальны, а анализ возможности создания средства контроля локального теплоснабжения на основе температурного напора в системе ОП - помещение, представляет

интерес как фундаментальная, так и практически значимая, научно-техническая задача.

Цель диссертационной работы: разработка метода контроля теплопотребления по величине температурного напора от поверхности отопительного прибора в среду помещения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные **задачи:**

1. На базе системы нелинейных дифференциальных уравнений разработана математическая модель теплообмена ОП с помещением, положенная в основу создания устройства контроля теплового сопротивления отопительной системы (патент РФ №115472).

2. Предложен, разработан и исследован способ измерения коэффициента теплоотдачи ОП в реальных условиях эксплуатации путем проведения калибровки в режиме остывания (патент РФ № 2566640).

3. Предложен и разработан способ контроля количества тепловой энергии, отдаваемой конкретным ОП помещению, по величине температурного напора (патент РФ №2566641).

4. Разработана и внедрена опытная партия накладных приемных преобразователей для измерения температурного напора на базе цифровых датчиков температуры DS18B20, ADT7410.

5. Проведена опытная эксплуатация системы контроля эффективной составляющей подводимой тепловой энергии, созданной по предложенной методике.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе нелинейных дифференциальных балансных уравнений разработана математическая модель теплообмена ОП с внешней средой в нестационарных условиях, позволяющая контролировать количество тепловой энергии отдаваемой ОП внешней среде с погрешностью не хуже ~6% (патент РФ № 2566641 от 29.07.2013).

2. На базе уравнения Ньютона-Рихмана предложен, разработан и исследован метод контроля количества отдаваемой ОП тепловой энергии по температурному напору. Предложено решение обратной задачи теплообмена между ОП и внешней средой, что позволяет оценить эффективность теплоотдачи для отдельных эксплуатируемых ОП.

3. Предложен, разработан и доведен до опытной эксплуатации новый экспресс-метод оценки реальных характеристик тепловой эффективности ОП по месту его эксплуатации (патент РФ № 2566640 от 15.08.2012). Применение данного метода приводит к увеличению экономии до 40% по сравнению с классическим (общедомовым) и до 60% по сравнению с нормативным способом измерения/вычисления количества тепловой энергии.

Практическая ценность работы заключается в разработке конструктивных решений и практических рекомендаций по проектированию локальных систем учета т/э.

- Разработана и аттестована «Методика измерения тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором», зарегистрированная Федеральным агентством по техническому регулированию свидетельство № 01.00241-2013/32-237-2017, внесена в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений под номером ФР.1.32.2017.27992.
- Предложено и защищено устройство для измерения теплового сопротивления отопительной системы отдельного помещения (патент РФ п.м.№115472).
- По материалам диссертационной работы разработан алгоритм и программное обеспечение расчета количества тепловой энергии потребляемой локальным потребителем (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015610168).
- Произведена опытная эксплуатации системы контроля из приборов учета, изготовленных в соответствии с требованиями методик. Установлено 135 датчиков в экспериментальных корпусах, изготовленных силами сотрудников и студентов Кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского

государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТОР ТУСУРа). В качестве объектов для эксперимента в г. Томске были выбраны жилой пятиэтажный дом по улице Карташова, д.31 и подъезд жилого дома по ул. 19-й Гвардейской Дивизии, д.15/1

- Разработана, изготовлена и внедрена система контроля количества тепловой энергии на муниципальном предприятии ТГУ МП «Трамвайно-троллейбусное управление».
- Результаты диссертационной работы используются при подготовке магистров на кафедре ТОР РФ ТУСУРа и чтении лекций по дисциплинам «Учёт тепловой энергии» в Академии ЖКХ г. Томска».

Положения, выносимые на защиту

1. Метод контроля тепловой эффективности ОП в нестационарных режимах, на базе системы нелинейных дифференциальных уравнений и натурных экспериментов, проводимых непосредственно на месте эксплуатации прибора.
2. Результаты исследования ОП, как измерительного преобразователя, в составе автоматизированной системы контроля потребляемой помещением тепловой энергии.
3. Методика контроля локального теплоснабжения, в которой информативным параметром является температурный напор от ОП в окружающую среду.

Достоверность результатов обеспечивается использованием сертифицированного измерительного оборудования и корректным применением современных методов проведения экспериментальных исследований; сравнением экспериментальных результатов разработанного метода, с результатами измерений, выполненных другими методами; подтверждается результатами проверки разработанной математической модели на адекватность путем сопоставления полученных результатов классическим и разработанным методом. Все средства измерения на момент проведения эксперимента имели действующие

поверки и эксплуатировались в условиях, диапазонах и пределах измерений, установленных изготовителями.

Апробация результатов исследования

Основные научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в работе, прошли апробацию на следующих международных и всероссийских конференциях:

–XIV – XVI, XVIII Международная научно-практическая конференция «Энергоресурсосбережение. Диагностика», Димитровград, 2012-2017;

–II и III Всероссийская научная конференция с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий», Новосибирск, 2015-2017;

–XXXII конференции «Москва - энергоэффективный город», Москва, 2015;

–Conference of Environmental and Climate technologies «CONNECT 2015», Рига, Латвия, 2015;

–Научно-практическая Конференцию «Теплоснабжение и когенерация 2014», Москва, 2014;

–Симпозиум «Мир измерений и учета», Санкт-Петербург, 2013;

–II и IV Международная научно-практическая конференция «Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности», Санкт-Петербург, 2011 - 2013;

–XXIII Международная научно-практическая конференция «Коммерческий учет теплоносителей», Санкт-Петербург, 2005;

–Научно - технических семинарах и совещаниях Центра сервисного обслуживания и кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУР, Томск, 2006-2017.

Личный вклад автора

Автором лично определены задачи, решаемые в работе, собраны и обобщены в виде аналитического обзора библиографические сведения по теме диссертации; предложен метод контроля количества тепловой энергии, использующий

калибровку средства измерения непосредственно на месте эксплуатации ОП; разработана и аттестована методика измерений тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором.

Публикации

По тематике диссертационной работы опубликовано 17 научных работ, из них 1 монография, 3 статьи в изданиях, входящем в перечень ВАК и 1 статья в издании, цитируемом в базе данных Scopus. Получено 3 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами, списка литературы из 145 наименований, Приложения А «Методика измерения тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором». Объем диссертации 173 страниц, включая 39 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту, практическая и научная ценность работы.

В первой главе проведен анализ проблем в сфере контроля количества тепловой энергии, автоматизации процессов учета, создания АСКУТЭ, касающейся учета т/э в отдельном помещении. Описаны существующие научные подходы и технические решения. Проанализированы недостатки существующих технических решений и эксплуатируемых систем и приборов. При общем обилии работ о коммерческом учете и АСКУЭ, работ, посвященных проблемам контроля количества потребляемой тепловой энергии в отдельном помещении не много. Однако многочисленность предложений на рынке и фирм, предпринимающих шаги по созданию своих АСКУЭ, показывает интерес к развиваемой тематике. Сформулированы и систематизированы причины необходимости внедрения систем поквартирного контроля т/э. Приведены характеристики ближайших аналогов разрабатываемого оборудования и систем автоматизации учета потребления т/э. Показано, что:

1. Применение классических методов контроля потребляемой т/э при вертикальной разводке систем отопления не представляется возможным, как по экономическим (дороговизна), так и по организационно-техническим причинам (точность и диапазон измерения).

2. В условиях контроля количества т/э отдаваемой ОП на месте эксплуатации необходимо использовать беспроводные технологии, что требует, в свою очередь решения вопросов энергопотребления, сбора, обработки и передаче информации.

3. Для контроля количества т/э, отдаваемой отдельным ОП в большинстве случаев применяются условные физические величины.

4. Отсутствуют методики динамического измерения (оценки) коэффициента теплоотдачи ОП в реальных условиях эксплуатации.

Во второй главе приведено исследование возможностей математической модели разработанной на базе системы нелинейных дифференциальных уравнений теплообмена ОП с помещением. Математическое описание тепловых процессов в зданиях и помещениях, как правило, реализуется в стационарном режиме, когда тепловые потоки и параметры теплового контура постоянны, не зависят от времени. Вместе с тем эффективное энергосбережение требует динамического управления тепловыми процессами, чтобы можно было учитывать сезонное и суточное изменение температуры внешней среды и, соответственно, регулировать параметры тепловой системы. Предлагаемый подход исключает из рассмотрения некоторые особенности происходящих процессов, но общая картина передачи и преобразования т/э позволяет проследить все механизмы теплообмена от подведения ее к объекту до условий сохранения и диссипации в окружающее пространство. В качестве зависимых переменных для составления баланса используется т/э, подведенная к объекту и рассеянная в окружающей среде, система уравнений (1).

Коэффициенты, входящие в уравнения (1), носят интегральный характер и могут быть найдены экспериментальным путем. Первое уравнение системы (1) описывает поведение температуры воздуха в помещении. Второе уравнение в (1)

описывает поведение температуры системы ограждающих помещение стен. Третье уравнение записано для описания поведения температуры наружной поверхности ОП:

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = \frac{G_{уст}(T_{уст} - T_1)}{C_1} - \frac{G_k(T_1 - T_2)}{C_1} - \frac{G_{внеш}(T_1 - T_{внеш})}{C_1}; \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{G_k(T_1 - T_2)}{C_2} - \frac{G_{см}(T_2 - T_{см})}{C_2}; \\ \frac{dT_{уст}}{dt} = \frac{M \cdot \Delta T_{уст}}{C_3} - \frac{G_{уст}(T_{уст} - T_1)}{C_3}. \end{cases} \quad (1)$$

где $G_{уст}$, $G_{внеш}$, G_k , $G_{см}$ - соответственно интегральные коэффициенты теплоотдачи ОП (далее коэффициент), теплопередачи во внешнюю среду, теплопередачи во внутренние ограждения, теплопередачи из внутреннего ограждения в соседнее помещение, (Вт/°C), T_1 , T_2 , $T_{внеш}$, $T_{см}$ - соответственно температуры воздуха в помещении, контура, внешней среды, воздуха смежного помещения, (°C); $T_{уст} = 1/2(T_{вх} + T_{вых})$ - средняя температура поверхности ОП, (°C); $T_{вх}$ и $T_{вых}$ - температуры теплоносителя подающего и обратного трубопроводов, соответственно, (°C), C_1 , C_2 , C_3 - соответственно теплоемкости помещения, внутренних ограждений, ОП, $\Delta T_{уст} = T_{вх} - T_{вых}$ - срабатываемый температурный напор теплоносителя, (°C), $M = c_3 m$ - расход тепловой энергии, (Вт/°C); c_3 - удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°C); m - массовый расход теплоносителя, (кг/с);

В качестве первичной проверки адекватности модели было проведено моделирование в Mathcad с использованием рекомендаций Гост 30494-96 «Параметры микроклимата в помещении» и справочных значений параметров, учитывающих фактические теплотехнические характеристики наружных ограждений (приведенное сопротивление теплопередачи и воздухопроницания).

Инерционные свойства ОП характеризуются постоянной времени $\tau_{уст} = \frac{C_3}{G_{уст}}$.

Постоянная времени $\tau_{уст}$ много меньше постоянных времени для воздуха

помещений $\tau_{внеш} = \frac{C_1}{G_{внеш}}$ и для ограждений $\tau_k = \frac{C_2}{G_k}$. Поэтому уравнение для ОП можно решать независимо, полагая T_1 и T_2 постоянными.

Для вычисления коэффициента, в интегральном виде, предложено решение обратной задачи в искусственно создаваемой ситуации (2) когда,

$$\frac{dT_{уст}}{dt} + \frac{G_{уст}(T_{уст} - T_1)}{C_3} = 0 \quad (2)$$

В реальных условиях это достигается путем прекращения циркуляции через ОП.

Для различных коэффициентов $G_{уст}$ характер зависимостей подобен и при определенных соотношениях расхода и мощности они стремятся к насыщению (при дальнейшем увеличении расхода выходная мощность нагревательного прибора не увеличивается). Таким образом, предложенная зависимость показывает существование предела теплоотдачи ОП и дает возможность рассчитать наиболее эффективные режимы работы с точки зрения передачи энергии рисунок 1.

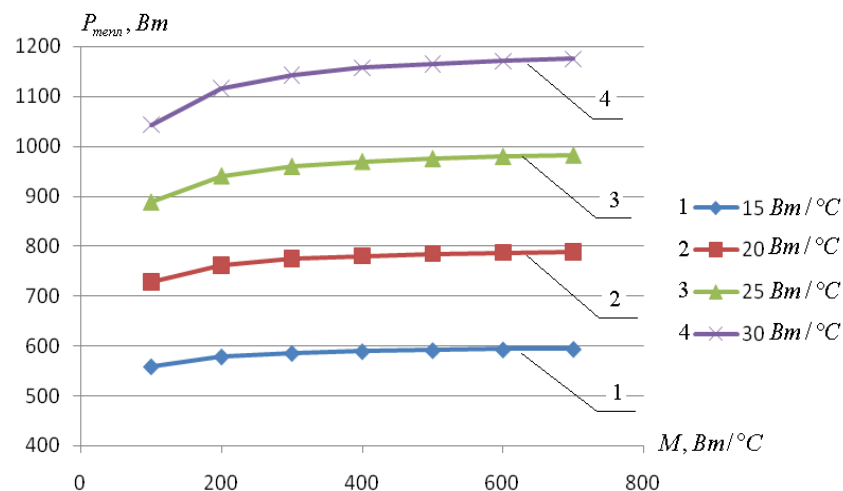


Рисунок 1 - Семейство регулировочных характеристик при различных значениях коэффициента теплоотдачи $G_{уст}$

Полученные результаты теоретических исследований и компьютерного моделирования хорошо согласуются с известными литературными данными.

В третьей главе Проанализированы погрешности измерений температуры и вычисления тепловой энергии. Расчет тепловой мощности, отдаваемой ОП, $P_{\text{тепл}}$ производится в соответствии с формулой Ньютона - Рихмана (3):

$$P_{\text{тепл}} = G_{\text{ист}}(T_{\text{ист}} - T_1) \quad (3)$$

где $P_{\text{тепл}}$ - тепловая мощность ОП (Вт), $G_{\text{ист}}$ - коэффициент теплоотдачи, (Вт/ °С), $T_{\text{ист}}$, T_1 - температуры поверхности ОП и средняя температура воздуха в помещении, (°С) соответственно.

Погрешность нахождения тепловой мощности определяется совокупностью погрешностей измерения температур T_1 и $T_{\text{ист}}$, а также погрешностью нахождения $G_{\text{ист}}$. В работе дан анализ степени влияния каждой из составляющих на результирующую погрешность, кроме того проведена статистическая оценка неопределенностей результатов измерений распределителями разного типа и измерителями т/э с калибровкой по предложенной методике (Таблица 1).

Таблица 1. Сравнение погрешностей измерителей тепловой энергии

Типы приборов	Относительные погрешности измерения в %				
	δ_G^1	δ_G^2	$\delta_{tв}$	$\delta_{tпов}$	δ_P
Однодатчиковые	12	9	10	17	48
Двухдатчиковые	12	9	2,5	17	40,5
С калибровкой	5	0	6		3,2 (взаимная компенсация погрешностей δ_G^1 , $\delta_{tпов}$, $\delta_{tв}$)

Здесь: δ_G^1 и δ_G^2 погрешности коэффициента теплоотдачи измерения (вычисления) характеристики отдельного ОП каждого из различных типов (чугунные, алюминиевые радиаторы, конвекторы и т.п.) и погрешностью за счет изменения коэффициента $G_{\text{ист}}$ в процессе эксплуатации ОП соответственно, $\delta_{tв}$ и $\delta_{tпов}$ погрешности измерения температур воздуха и поверхности ОП, δ_P результирующая погрешность вычисления тепловой мощности. Из приведенной таблицы можно видеть, что предлагаемый метод дает наиболее близкие к реальности результаты. В реальных условиях эксплуатации одной калибровки на всем диапазоне проводимых измерений, как правило, не достаточно, требуется

разбиение диапазона на участки и нахождение точек с максимальной плотностью распределения вероятности ΔT на каждом из них для проведения калибровки. Критерием выбора размеров промежутков на диапазоне измерений является динамика изменения значений коэффициента теплоотдачи с последовательным переходом от одного калибровочного участка диапазона к другому.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям теплообмена ОП в локальном помещении, описанию экспериментальных методов и установки. При практическом применении предлагаемый метод состоит в следующем: в нагретый ОП прекращается подача теплоносителя, прибор начинает остывать естественным путем, взаимодействуя с воздухом помещения и излучая тепловую энергию. В процессе остывания, через заданные промежутки времени, производится измерение температур поверхности и воздуха помещения, вычисляется температурный напор и скорость остывания, это позволяет из формулы (2) вычислить $G_{\text{ист}}$. При выравнивании температур поверхности ОП и воздуха помещения измерения (калибровка) прекращается, в ОП возобновляется подача теплоносителя, устройство переходит в режим измерения, используя вычисленную при калибровке зависимость коэффициента от температурного напора. Датчики при калибровке и производимых в дальнейшем измерениях одни и те же, калибровка производится на месте постоянной работы прибора, таким образом учитываются реальные условия эксплуатации.

В экспериментах использован **специально разработанный стенд**, схема которого приведена на рисунке 2.

На этом стенде проводили эксперименты по сличению результатов измерений разными методами, а основании чего была сделана количественная оценка погрешности измерений предлагаемого метода. Все эксперименты дублировали 3-5 раз при различных начальных условиях нагрева помещения и ОП, для трех различных скоростей теплоносителя и 8-ми разных степеней открытия регулирующей арматуры на ОП и 2 положениях на шунтирующем байпасе. Для

поиска оптимальной точки измерения температуры применяли тепловизионную съемку. Были исследованы чугунные радиаторы 4-х и 7-ми звеньев, конвектор,

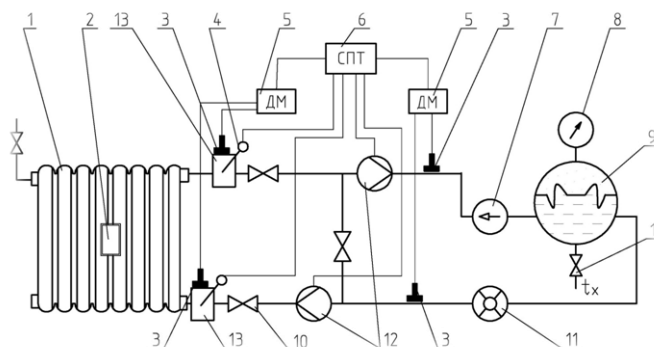


Рисунок 2- Схема экспериментального стенда

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1 - ОП; | 8 - манометр показывающий; |
| 2- измеритель $t/\text{э}$; | 9- электродогреватель (Термекс); |
| 3- датчик давления; | 10- вентиль; |
| 4 - датчик температуры; | 11 - водосчетчик крыльчаточный; |
| 5- дифманометр; | 12- расходомер электромагнитный; |
| 6-тепловычислитель; | 13-расширитель; |
| 7-циркулярный насос; | |

биметаллический радиатор 8-ми звеньев. В процессе экспериментов решали следующие задачи:

- оценка адекватности применения модели для данного типа ОП;
- выбор точек измерения характеристик радиатора;
- анализ влияния режимов работы ОП на характеристики радиатора и отдаваемую $t/\text{э}$;
- анализ влияния окружающих факторов на результаты измерения предлагаемым методом.

Для анализа влияния внешних, в частности, декоративных, факторов (штора, мебель) были проведены серии экспериментов с разными предметами и при разном положении ОП относительно пола, задней стены, подоконника. В ходе экспериментов были получены как общие результаты, так и характерные для одного типа ОП. Например, для чугунных радиаторов получены самые малые (до ~1%) расхождения результатов измерений предлагаемым методом с другими методами. Определено место крепления датчика для измерения характерной

температуры прибора, которое расположено в геометрическом центре прибора рисунок 3.

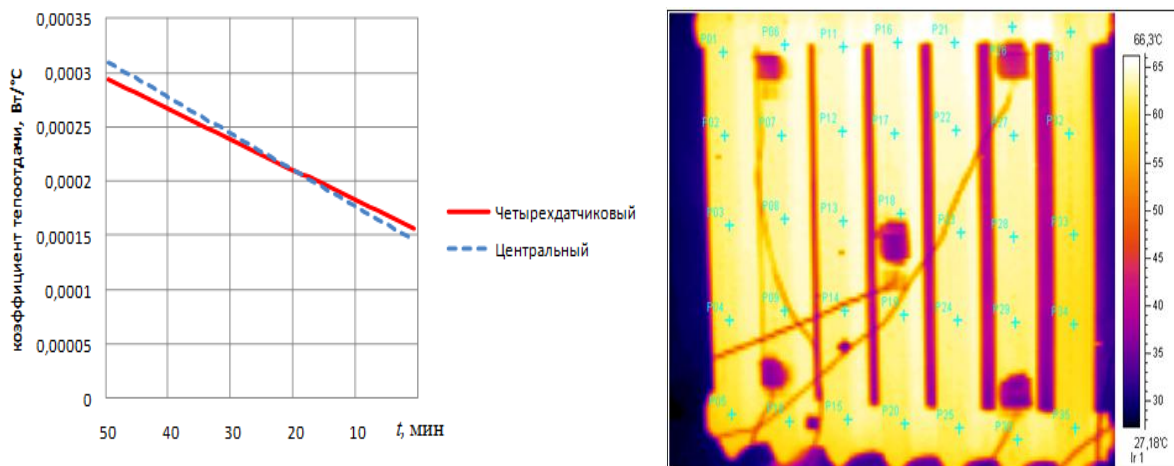


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени и схема расположения датчиков на термограмме

Для алюминиевых радиаторов погрешность измерений выше: (1,5-6,1)%, а характерная точка располагается на фронтальной плоскости пластины в точке, перпендикулярной проекции геометрического центра. У конвектора погрешность еще выше (2,5-17)%, и компромиссным способом крепления датчика является центр поворотного изгиба трубы, где меняется направление потока теплоносителя Рисунок 4.

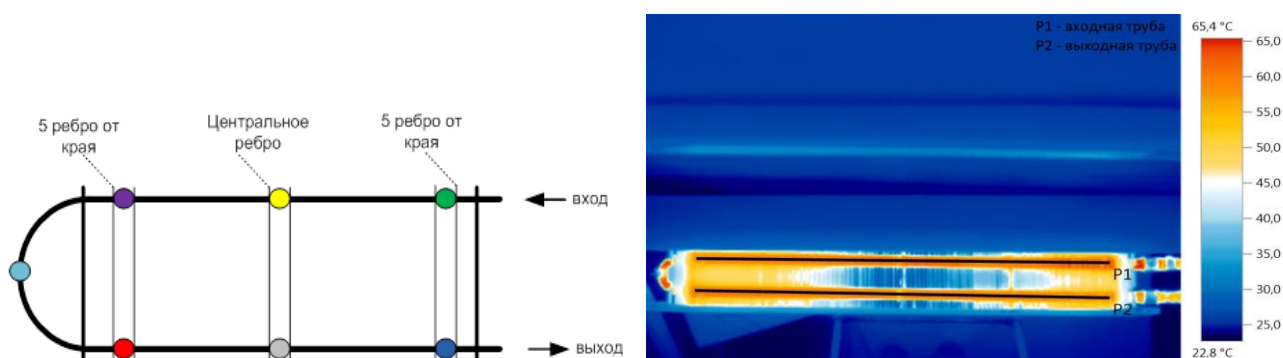


Рисунок 4 - Расположение датчиков и термограмма конвектора сверху

Следует отметить, что эксперименты по конвектору продолжаются, а полученное расхождение обусловлено смещением средней точки температуры поверхности конвектора и методом учета тепловых потерь. Эти расхождения

могут быть вызваны некорректным использованием общей теплоемкости при расчете зависимости коэффициента теплоотдачи по остыванию. Общие выводы для всех исследованных типов ОП:

1. Рабочие измерения должны проводиться при тех же условиях, что и калибровка.
2. Необходимо обеспечить возможность свободной циркуляции воздушных потоков через корпус с термодатчиком.

Для лучшего понимания процессов нестационарного теплопереноса в помещении многоквартирного дома была проведена серия натурных экспериментов. Полученные результаты позволили проанализировать происходящие тепловые процессы в реальных условиях эксплуатации и понять особенности взаимодействия ОП с помещением, в котором он установлен. Учитывая, что многие тепловые процессы обладают значительной тепловой инерцией, для проведения исследований был взят длительный период времени, позволяющий в динамике изучить изменения теплового состояний помещения и ОП.

Объектом, на котором проводили тестовые испытания первого варианта АСКУТЭ, был 5-ти этажный двух подъездный жилой дом по адресу г. Томск, ул. Карташова, д. 31. Исследования проводились с октября 2015 по декабрь 2015 г.

При установке системы на 130 ОП в 36 квартирах была применена проводная схема создания сети передачи данных от прибора к шлюзу и далее к серверу. Полученные результаты, позволившие подтвердить высокую чувствительность метода: удалось зафиксировать корреляцию между временем открытия форточки при проветривании и увеличением расхода т/э на отопление данного помещения. Следует отметить, что удалось установить приборы на 95% ОП (34 квартиры из 36), тем самым подтвердив высокую заинтересованность жителей в индивидуальном контроле использования т/э. Однако, несмотря на активность собственников, применение проводной схемы себя не оправдало. Из-за проблем с проводами и контактами ввести систему в эксплуатацию не удалось.

Другим объектом, на котором производились тестовые испытания, был

первый подъезд жилого дома по адресу г. Томск ул. 19-ой Гвардейской дивизии, д. 15/1. Испытания проводили в два этапа (с февраля по май 2016 г. и с декабря 2016 по февраль 2017 гг.) на одном стояке однотрубной системы, проходящем через 3 квартиры и 3 этажа подъезда, на котором располагалось 7 чугунных радиаторов МС-140, включенных последовательно с помощью стальных труб диаметром 3/4 дюйма. Четыре прибора размещались в комнатах жилых квартир, 3 в подъезде дома. При этом 4 прибора находились на прямом трубопроводе и 3 - на обратном. В результате были получены зависимости коэффициента теплоотдачи ОП от температурного напора, приведенные на Рисунке 5:

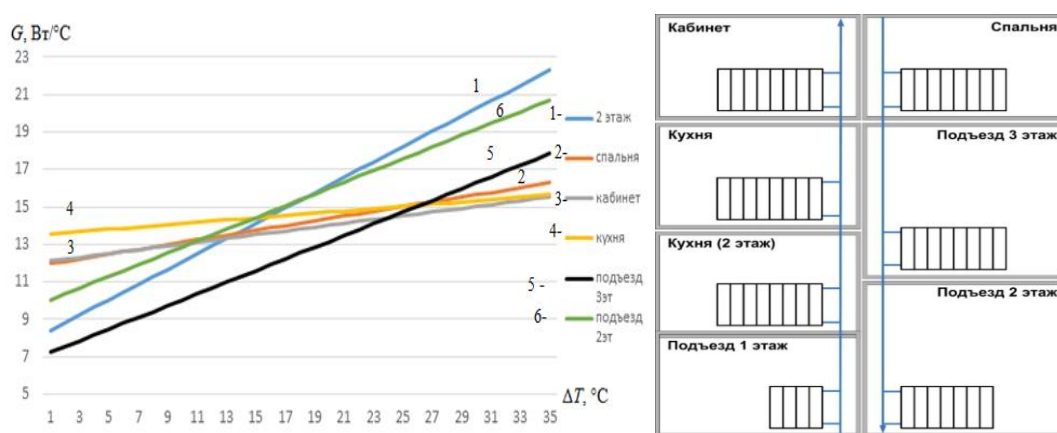


Рисунок 5 - Графики зависимости коэффициента теплоотдачи ОП от температурного напора и схема расположения ОП

Видно, что у ОП одного типа, установленных в разных помещениях, значения коэффициентов теплоотдачи значительно разнятся. При этом зависимости для радиаторов в кабинете, кухне и спальне - близки друг к другу. Полученные результаты объясняются разными условиями эксплуатации ОП.

По результатам тестового эксперимента за четверо суток (96 часов) с 25.1.17-28.01.17, для одной из квартир были произведены оценочные расчеты для сравнения различных подходов к начислению за потребленную т/э. Сравнивали затраты на отопление по трем методам:

По нормативу 1 м^2 - 68,99 руб.

$68,99 \cdot 122 = 8416,78$ руб. За 3 комнаты $8416,78 \cdot 0,46 = 3871,72$ за месяц.

За 1 день - 124,89 руб. За 4 дня - **499,57 руб.**

По общедомовому теплосчетчику.

Потребление дома: 59,15 Гкал. 1277 руб/Гкал. 1 м² 43,15 руб/ мес.

Норматив на долю квартиры по 3 радиаторам $56,31 * 43,15 = 2429,77$ руб

За 1 день - 78,38 руб. За 4 дня - **313.52 руб.**

По предлагаемой методике.

По 3 радиаторам в квартире - 164979 Вт*ч. Стоимость 1 Гкал - 1277 руб.

1 кВт = 0,0008598 Гкал/час

Отдача по 3 радиаторам за 4 суток $164,9 * 0,0008598 = 0,14178$ Гкал

$0,14178 * 1277 =$ **181,05 руб.**

Таким образом, применение предлагаемой методики и реализованной на ее принципах АСКУТЭ может серьезно сказаться на экономических показателях и позволяет точнее учитывать объем потребленной т/э конечному потребителю. Разница с нормативным расчетом составила ~60%, по общедомовому прибору ~40%. При применении предлагаемого метода экономия данной квартиры была бы более 2 000 руб. в месяц.

Стоимость установки АСКУТЭ на один ОП, составляет 2 600 на один прибор. Следовательно, собственник квартиры потратит на установку системы $7 * 2 600$ руб. = 18 200 рублей. При средней экономии 2 000 руб./ месяц. Межповерочный интервал конкурентных средств измерения равен их заявленному сроку эксплуатации и составляет в среднем 10 лет. Таким образом, АСКУТЭ на базе предложенной методики при должном регулировании элементов системы отопления помещений способно принести ~100 тысяч рублей прибыли собственнику данной квартиры.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Внедрение разработанных в данной работе методов контроля позволит изменить существующую принципиальную схему контроля теплоснабжения помещения, т.е. перейти с системообразующего объектного контроля потребляемой тепловой энергии на контроль потребляемой тепловой энергии отдельными помещениями. Это способно привести к скачкообразному

увеличению экономии тепловых ресурсов за счет вовлечения в процесс экономии конечного пользователя. Получаемые результаты позволят сравнивать эффективность как непосредственно теплоизоляционных материалов между собой, так и технологий тепловой защиты в целом во всех диапазонах условий (температура, влажность, время и т.п.) эксплуатации объектов защиты.

1. Математическая модель теплообмена отдельного помещения в многоквартирном жилом доме, представляющая собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, позволяет в частных (практически значимых) случаях получить в аналитическом виде переходные процессы нагрева/охлаждения объекта с учетом состояния теплового контура, динамических возможностей ОП, температуры наружного воздуха и воздухообмена рассматриваемого помещения.

2. Исследование возможностей математической модели при изменяющихся тепловых напорах позволило установить диапазоны постоянных времени объекта для случаев возмущающих и управляющих воздействий. При этом показано, что уравнения теплового баланса ОП можно решать независимо от остальных уравнений.

3. Решение обратной задачи позволяет рассматривать как линейные, так и нелинейные зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора.

4. Интерактивный характер предлагаемой методики позволяет использовать ее для исследования перетоков т/э при параллельном (последовательном) обогреве нескольких помещений и в зависимости от способа разводки и расположения ОП. Применение математической модели для анализа способа подключения ОП к системам теплоснабжения позволило установить характер и степень влияния в случае вертикальной однотрубной разводки и байпасных схем подключения ОП.

5. Аппаратная реализация прототипа измерителя т/э представляет собой два температурных датчика, которые измеряют температуры ОП и воздуха помещений, радиомодем для беспроводной передачи информации на устройство

сбора и передачи данных (УСПД), канал связи УСПД с центральным сервером и соответствующее ПО. Перечисленный набор элементов позволяет реализовать малогабаритную недорогую автоматизированную систему контроля количества потребляемой тепловой энергии.

6. Применяемый метод калибровки позволяет существенно уменьшить погрешность вычисления тепловой мощности за счет того, что на этапах калибровки и измерения применяют одни и те же датчики. Дополнительно позволяет снизить погрешность при вычислении т/э статистическая обработка результатов измерения за длительный период.

7. Реализован способ контроля количества потребляемой т/э, в том числе в динамических режимах работы ОП, с учетом его индивидуальных особенностей (размещение в помещении, наличие мебели и подоконников, окраска, и др.). Проведено его экспериментальное подтверждение.

8. Получены значения коэффициента в рабочем диапазоне температур различных многосекционных ОП. Показано, что погрешность вычисления т/э по предлагаемой методике для основных типов ОП составляет 1,5-6,1%.

9. Достоинством предлагаемой методики является измерение в реальных физических величинах с учетом индивидуальных характеристик ОП. Проведенные тестовые испытания дают обнадеживающий результат, подтверждающий эффективность алгоритма и необходимость внедрения АСКУТЭ в ЖКХ. Применение метода выгодно конечному пользователю и представляет собой значительную величину (100 тыс. руб.) для одного потребителя.

Дальнейшее исследование предполагается проводить в следующих направлениях:

– моделирование и экспериментальное исследование тепловых процессов для других типов ОП (биметаллические радиаторы и конвекторы) с детальными исследованиями конвективной и радиационной составляющих теплообмена;

- разработка методов и алгоритмов обработки данных, для повышения точности вычислений;
- разработка принципиальной схемы и конструкции электронного блока с низким энергопотреблением и длительным сроком службы в автономном режиме (работа от внутреннего источника питания);

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК России

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

В международной базе научного цитирования Scopus

4. Stepan Kuprekov, Alisher Mukashev, Alexey Pugovkin, Nadezhda Petrova, Stanislav Abramchuk. Dynamic method of the heating devices efficiency measurement // Energy Procedia. - 2017. - № 128. pp. 86-91.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.019>.

Монография

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

Патенты

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

2. Пат. 2 566 640 РФ, МПК G01K 17/00. Способ измерения сопротивления теплоотдачи отопительного прибора / Купреков С.В., Пуговкин А.В., Муслимова Н.И. (РФ). - № 2012134982/28; заявл. 15.08.2012; опубл. 20.02.2014.

3. П.м. 115472 РФ, МПК G01K17/00. Устройство для измерения теплового сопротивления отопительной системы отдельного помещения / / С.В. Купреков, А.В. Пуговкин (РФ). - № 2011117371/28; заявка 04.05.2011 опубл. 27.04.2012.

Публикации в других изданиях

1. Купреков С.В. Методика измерения тепловой энергии, отдаваемой отопительным приборам, МДК 4 - 01.16. / С.В. Купреков, А.В. Пуговкин, В.С. Купреков, В.А. Медведев, С.И. Абрамчук // Материалы XVIII МНПК. 23-25 мая 2017г. / Под ред. А.В. Тигина - Димитровград: Мир Печати, 2017. - с. 170-180.

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

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

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

5. Купреков С.В., Муслимова Н.И. Анализ перераспределения тепловой энергии при использовании квартирных регуляторов тепла // 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. Купреков С.В., Пуговкин А.В., Муслимова Н.И. Мониторинг теплового состояния помещения в динамическом режиме // Современный научный вестник. - 2013. - № 50 (189), С. 29-37.

7. Купреков С.В., Пуговкин А.В., Муслимова Н.И. Модель автоматизированной системы поквартирного учета тепловой энергии // Материалы XIV Международной научно-практической конференции. -Часть I. Вопросы энергоресурсосбережения, г. Димитровград, 27-29 марта 2012 г. С.275-283.

8. Купреков С.В. Динамическая модель системы теплоснабжения помещений / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, Д.Н. Ушарова // Энергосбережение в системах тепло и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности: 2-я МНПК, Санкт-Петербург: Политехника-сервис, 2011. - с. 17-25.

9. Купреков С.В. К вопросу о сведении баланса отпускаемой и потребляемой тепловой энергии на примере г.Томска / С.В. Купреков // Коммерческий учёт энергоносителей: Труды XXIII МНПК 23-25 мая 2006 г. / Под ред. А.Г. Лупея. - СПб: Борей-Арт, 2006 - с. 104-108.