

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

На правах рукописи

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, профессор,
Пуговкин А.В.

Томск - 2018

Содержание

Список условных сокращений	5
Введение	6
1 Анализ современного состояния средств измерения и автоматизации процессов контроля количества тепловой энергии потребляемой локальными объектами	17
1.1 Обзор способов и средств измерения тепловой энергии потребляемой отдельным помещением	17
1.1.1 Исследования и разработки	17
1.1.2 Анализ результатов интеллектуальной деятельности	19
1.1.3 Анализ характеристик распределителей тепловой энергии ведущих производителей	25
1.2 Обзор состояния вопроса в области автоматизированных систем контроля количества потребляемой т/э зданиями и помещениями	28
1.3 Особенности контроля количества тепловой энергии потребляемой индивидуальными потребителями при центральном теплоснабжении	29
1.4 Требования к устройству индивидуального контроля количества потребляемой тепловой энергии	34
Выводы к главе 1	39
2 Теоретическое исследование и моделирование теплообмена локального потребителя тепловой энергии	40
2.1 Способы контроля количества потребляемой тепловой энергии индивидуальных потребителей при центральном теплоснабжении	40
2.2 Математические модели теплообмена отдельного помещения	47
2.2.1 Метод балансных дифференциальных уравнений	49
2.2.2 Уравнение для отопительного прибора	58
2.2.3 Математическая модель системы теплоснабжения	62
2.2.4 Параллельное включение тепловых источников	67
Выводы к главе 2	69

3 Оценка погрешностей измерения тепловой энергии	71
3.1 Оценка погрешностей вычисления тепловой энергии устройствами с разным количеством датчиков температуры	71
Выводы к главе 3	82
4 Экспериментальные исследования и тестовые испытания методов и устройств контроля количества тепловой энергии отдаваемой отопительным прибором в локальном помещении	83
4.1 Объекты исследования	83
4.2. Экспериментальный исследовательский стенд	86
4.3 Экспериментальная система «сбора-передачи» показаний	90
4.4 Методика проведения эксперимента	91
4.4.1 Анализ адекватности определения интегрального коэффициента теплоотдачи ОП. Критерий Фишера	94
4.5 Результаты экспериментальных исследований	98
4.5.1 Экспериментальное исследование эффективности чугунных радиаторов	98
4.5.2 Экспериментальное исследование эффективности алюминиевого радиатора	107
4.5.3 Экспериментальное исследование эффективности конвектора ...	111
4.6 Испытания методики на жилом доме находящемся в эксплуатации ..	121
4.7 Экономический эффект от применения предлагаемой методики	122
Выводы к главе 4	124
Заключение и выводы	126
Список литературы	129
Приложение А Методика измерения тепловой энергии отдаваемой отопительным прибором	147
1 Назначение и область применения	149
2 Основные термины и определения	149

3 Требования к показателям точности (погрешности) измерений тепловой энергии.....	151
4 Требования к средствам измерений, вспомогательным устройствам	152
5 Метод измерений.....	153
5.1 Математическая модель	153
5.2 Измерения температур	157
5.3 Определение коэффициента теплоотдачи отопительного прибора (калибровка).....	158
5.4 Определение количества тепловой энергии, расходуемой отопительным прибором.....	160
6 Требования безопасности, охраны окружающей среды	161
7 Требования к квалификации операторов	162
8 Требования к условиям измерений	162
9 Подготовка к выполнению измерений	163
10 Порядок выполнения измерений	163
11 Обработка результатов измерений при калибровке	165
12 Оформление результатов измерений	166
13 Контроль точности (погрешности) результатов измерений	166
14 Литература	167
Акт внедрения	173

Список условных сокращений

АСКУТЭ	– Автоматическая система коммерческого учета тепловой энергии
АСКУЭ	– Автоматическая система коммерческого учета энергии
АСУ	– Автоматизированная система управления
АЦП	– Аналого-цифровой преобразователь
ЖКХ	– Жилищно-коммунальное хозяйство
КПД	– Коэффициент полезного действия
ОП	– Отопительный прибор
ПО	– Программное обеспечение
РВ	– Регулирующее (управляющее) воздействие
СИ	– Средство измерения
т/э	– Тепловая энергия
УСПД	– Устройство сбора-передачи данных

Введение

Энергетическая стратегия России, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р на период до 2030 года, определяет курс на максимально эффективное использование энергетических ресурсов и повышение качества жизни населения [59]. Без организации контроля ресурсов невозможно представить себе эффективное их использование. Если говорить о таком ресурсе как тепловая энергия (т/э), то современный подход к контролю количества потребленной т/э в 95% случаев ограничивается отдельным строением (объектом, цехом, зданием). При этом 50% потребления производимого тепла идет на обеспечение комфортных условий для жизнедеятельности человека (коммунальное хозяйство, обогрев офисных и производственных помещений) [67]. Таким образом, существует социальное и экономическое противоречие между способами коммерческого контроля количества и формами эффективного использования энергетических ресурсов [7, 21, 49], когда контроль количества тепла в жилищно-коммунальном секторе экономики носит коллективный характер, а усилия по экономии ресурсов возлагаются на индивидуальных пользователей (владельцев недвижимости, квартир, офисов). Возникает необходимость организации контроля в отдельно взятом помещении. Реализуемые сегодня способы решения данной проблемы малоэффективны и основываются на перераспределении начисления за потребленное тепло по показаниям предустановленных приборов – распределителей т/э [74]. Однако, методы измерения т/э, предлагаемые подобными устройствами, отражают физические процессы в искаженном виде [56, 54]. Так, например, измерения потребленной т/э производятся в условных единицах; температура воздуха в любом помещении принимается равной 20 °С; для вычислений используются коэффициенты теплоотдачи, теплопередачи, теплопроводности и т.п., полученные в лаборатории для конкретного образца данного типа ОП, тем самым уравнивая условия эксплуатации в изначально разных помещениях.

В результате говорить об индивидуальном контроле потребления ресурса преждевременно, по факту происходит усреднено обобщенный, коллективный учет. Нарушается процесс детализации потребления ресурсов, отсутствует возможность корректного разделения потребностей разных технологических помещений.

Разработки и эксперименты, являющиеся основанием данной диссертационной работы, позволяют говорить о новом шаге в области контроля количества потребляемой т/э в отдельно взятом помещении практически любого назначения (жилое, производственное, офисное). В настоящей работе рассматривается метод динамического измерения т/э, предложена математическая модель на базе дифференциальных балансных уравнений.

Учитывая географическое расположение страны, снижение доли затрат на энергоносители в совокупном доходе семьи до (8–10)% является серьезной технической проблемой. При продолжительности отопительного периода в условиях Западной Сибири около 7248 час/год и его интенсивности, достигающей 12800 °K*сутки, основная составляющая затрат приходится на отопление [67]. По различным оценкам их доля в семейном бюджете достигает (30–50)% [69]. Однако для обеспечения и поддержания требуемых климатических условий необходимо выполнение целого ряда мероприятий (технологических процессов) [28, 31] которые плохо совместимы с экономией энергоресурсов. Таким образом, существуют не только политически предпосылки для научных изысканий в описываемой области, но и утилитарные интересы большей части урбанистического населения.

Анализ проблемы показывает, что ее решение может быть проведено по двум направлениям: разработка средств измерения потребляемой т/э для отдельного помещения и разработка и проведение мероприятий по улучшению теплового контура объекта. Несмотря на скрытый антагонизм,

подходы не исключают друг друга, и исторической ретроспективе чередуются во времени [20].

В первом случае проблемой учета т/э, потребляемой локальными потребителями в многоквартирном доме, занимаются многие организации, такие как НП «АВОК», ООО «Энергетический сервис «Витерра», группа компаний «ИВК Саяны», НПО «ВЭСТ», ЗАО «Данфосс», предприятие «Теплообмен», и специалисты различных областей знаний. Среди них и В.А. Медведев, В.Н. Карпов, М.И. Низовцев, В.Я. Черепанов, В.И. Сасин, Ю.Н. Осипов, В.П. Вавилов, И.В. Кузник, А.Н. Колесников, Т.И. Садовская, С.В. Никитина, С.Н. Руденко, В.А. Фафурин, и многие другие. Решение данной задачи автоматически снимет проблему экономии энергоресурсов за счет вовлечения в процесс конечного потребителя.

По второму направлению в развитии основных положений ФЦП «Энергосбережение России» правительством РФ принят ряд законодательных актов по паспортизации производственных объектов, общественного жилого фонда, административных зданий федеральной и муниципальной принадлежности [76, 78, 95]. А также о необходимости проведения энергетического аудита, уровню и степени оснащенности средствами КИП, комплексу материалов по инструментальному контролю всех видов вводимых в эксплуатацию зданий [78].

Повышение требований, предъявляемых к строительным конструкциям зданий и микроклимату внутри помещений [39, 52, 59, 111, 126], а так же разработка рациональных методов их реализации остается одной из важных проблем строительной теплотехники. Основы этого направления заложены еще советскими учеными в XX веке. Исследованием процессов тепломассопереноса, оптимизации режимов теплоснабжения отдельных помещений в разные годы занимались такие видные ученые, как А.В. Дьяков, Ю.А. Табунщиков, Васильев Г.П., В.Н. Богословский, В.И. Ильинский, Г.В. Кузнецов, Н.А. Цветков, С.А. Карауш, Б.А. Семенов и многие другие, вклад которых в науку трудно переоценить.

На этапе становления коммерческого учета т/э ее распределение между локальными потребителями производилось пропорционально занимаемой площади [16]. Что сопряжено с большими погрешностями [18, 22].

Корректный подход к экономии т/э не осуществим без автоматизации процессов теплоснабжения [108]. Автоматизация подразумевает наличие датчиков температуры, каналов передачи данных, устройств сбора данных и сервера обработки полученных результатов измерения. Дальнейшее развитие системы предполагает включение каналов обратной связи, необходимых для управления теплопотреблением [57, 58], но, чтобы автоматизировать процессы регулирования, необходимо сначала измерить потребления энергии в действующих физических величинах [134]. Поскольку в реальных условиях работы системы количество точек учета велико, данная задача попадает в класс автоматизированных систем, связанных с обработкой большого массива данных, т.е. в так называемую область технологических решений «Big Data» [79].

Существующие сегодня технические решения завязаны на субъективную оценку пользователя (тепло, холодно) и не применимы в технологии производства [106]. При создании технологических карт, динамической оценке теплового состояния среды помещений используются обобщенные методы [110, 112, 113]. Фактическое усреднение результатов измерения не всегда отражает актуальную ситуацию во всех зонах помещения [136, 137]. Это опять же ведет к излишнему укрупнению, условной нормализации температурных условий, нарушает детализацию технологических процессов. Автоматика получает неверные исходные данные для регулирования [137].

Предлагаемый в работе подход может в дальнейшем быть распространен на технологию оценки срока работы оборудования. Так, на производствах с использованием станков и стационарного оборудования с движущимися механическими элементами (роторами электродвигателей, редукторами, быстровращающимися элементами) после проведения

необходимых исследований возможно размещение в характерных точках датчиков, позволяющих снимать температурный напор в окружающую среду. Это позволит, во-первых, определить реальные потребности всего помещения в дополнительном отоплении в разные периоды производственного цикла и принесет экономию ресурсов на вентиляцию и отопление при сохранении заданных (комфортных, производственных) условий. Во-вторых, при анализе и сравнении накопленной в процессе работы устройства информации позволит указать нарастание изменений отдаваемой в окружающую среду теплоты. Что является косвенным признаком близкой поломки оборудования и может сигнализировать о неполадках. Это серьезно сократит количество аварийных ситуаций, увеличит сроки безаварийной работы, уменьшит время простоя и ремонта оборудования, позволит внести изменения в плановость обслуживания и производить его не по установленному средне-нормативному сроку эксплуатации, а по фактической оценке износа трущихся частей.

Решение сформированных задач выполнимо только при условии вовлечения в процесс экономии конечного индивидуального потребителя. Измерения фактического потребления каждым ОП. Это особенно важно для мелкого и среднего бизнеса. При среднем объеме отпуска т/э, достигающей 1410 млн Гкал/год, доля энергии, приходящейся на общественный сектор составляет около (41–49)% [139]. Это неограниченное поле деятельности для внедрения ресурсосберегающих технологий. Однако реализация принципа: «Берем столько тепловой энергии, сколько нужно, а не столько, сколько хотят продать ее производители», выдвинутому автором работы [53], неизбежно сталкивается с необходимостью количественной оценки потребления т/э.

В этой связи разработка и исследование индивидуальных средств учета измерения, интегрируемых в эксплуатируемые коммерческие системы учета тепла всего объекта (здания, сооружения), на сегодняшний день является актуальной задачей [77, 130, 103]. В настоящей работе поднят вопрос о

степени влияния смежных помещений, элементов систем отопления, конвективных и радиационных потоков на тепловой режим в отдельно взятом помещении многоэтажного здания. В рассматриваемой ситуации работа приобретает особую актуальность в связи с возможностью интегральной оценки состояния тепловых контуров помещений, особенно в зданиях старой застройки [73]. При этом результаты внедрение ресурсосберегающих технологий и проведенных мероприятий в таких зданиях можно оценить с достаточной инженерной точностью [100]. Как показывают эксперименты, для ряда случаев, точность измерения и скорость расчетов соответствует существующим требованиям, предъявляемым к коммерческим расчетам [54].

Разработанная в настоящей работе математическая модель на этапе тестирования предполагает обследование помещений на знакопеременных направлениях тепловых потоков в реальных условиях эксплуатации. Предложенный в работе метод тестирования состояния системы отопления содержит элементы технической новизны и является одним из основных условий достоверности результатов измерения. Полученные результаты исследования математической модели с учетом управляющих (внутренних) и возмущающих (внешних) воздействий, как со стороны потребителя, так и со стороны источника, с целью создания оптимальных климатических условий в помещении, доведены до практического применения, которое позволяет конкретному потребителю оценить степень его влияния на температурный режим в помещении.

Исходя из вышесказанного, расчет теплопотребления локальным помещением в условиях нестационарного теплопереноса через ограждающие конструкции является на текущий момент актуальной задачей при проведении энергосберегающих мероприятий и технологий.

В работе ставились следующие задачи:

- 1) разработать математическую модель теплообмена ОП в многоэтажном жилом доме с окружающей средой в нестационарных условиях;
- 2) разработать и провести экспериментальную проверку способа измерения коэффициента теплоотдачи ОП с учетом их индивидуальных особенностей в реальных условиях эксплуатации;
- 3) разработать метод вычисления тепловой мощности и т/э, ОП с учетом его индивидуальных особенностей в реальных условиях эксплуатации;
- 4) разработать методику измерений теплоотдачи ОП по коэффициенту теплоотдачи ОП;
- 5) обосновать выбор предлагаемых для применения технологий и способов передачи и обработки сигнала;
- 6) разработать алгоритм сбора и обработки показаний, структуру программного обеспечения автоматизированной системы сбора данных для контроля количества т/э на базе разработанной методики измерений теплоотдачи ОП.

Объектом исследования выступает ОП (радиатор, конвектор), как источник привносимой т/э в отапливаемое помещение являющееся частью здания, которое состоит из совокупности локальных помещений с разными условиями эксплуатации. Предметом исследования является системы АСКУТЭ локальных помещений и зданий в целом.

В работе использованы численные, экспериментальные и статистические методы математического и физического моделирования, а также экспериментальный измерительный комплекс, содержащий разные радио- и электро- средства измерения и системы коммерческого учёта т/э.

Достоверность результатов обеспечивается использованием сертифицированного измерительного оборудования и корректным применением современных методов проведения экспериментальных исследований; сравнением экспериментальных результатов

разрабатываемого метода, с результатами измерений произведенных другими методами; подтверждается результатами проверки разработанной математической модели на адекватность сопоставлением полученных результатов с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов.

Научная новизна

1. На основе нелинейных дифференциальных балансных уравнений разработана математическая модель теплообмена ОП с помещением в нестационарных условиях, позволяющая контролировать количество т/э отдаваемой ОП помещению 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 т/э по температурному напору. Предложено решение обратной задачи теплообмена ОП - помещение, что позволяет получить значение коэффициента теплоотдачи для каждого эксплуатируемого ОП индивидуально.

3. Предложен, разработан и доведен до опытной эксплуатации новый экспресс-метод оценки реальных теплофизических характеристик 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 (общедомовом) и до 60% по сравнению с нормативным способом измерения/вычисления количества т/э.

Практическая ценность работы заключается в том, что

– 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 т/э 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;

- разработана, изготовлена и внедрена система контроля количества т/э на муниципальном предприятии ТГУ МП «Трамвайно-троллейбусного управления»;

- 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.

Предлагаемый метод на практике не требует больших экономических затрат оставаясь единственным на сегодня предложением реализующим учет индивидуальных особенностей ОП.

Описываемый метод позволяет реализовать непрерывный, неразрушающий, инструментальный контроль теплотехнического оборудования на протяжении всего отопительного сезона.

Метод получил экспериментальное подтверждение. Для проверки результатов вычислений, по предлагаемой методике, была собрана экспериментальная установка, позволяющая реализовать несколько способов контроля количества т/э. Таким образом, одновременно с предлагаемым в диссертации методом измерения производились еще двумя методами через измерения вложенной электрической мощности и классическим методом с помощью теплосчетчика. Все средства измерения на момент проведения эксперимента были с действующей поверкой, эксплуатировались в

разрешенных паспортами диапазонах измерений и в пределах заявленных условий эксплуатации.

Для уменьшения ошибки результатов измерения проводилась статистическая обработка. Эксперименты производились многократно. Тестировались разные образцы отопительных устройств (радиаторы масляные и водяные, конвекторы, комбинированные ОП). Применялись статистические методы обработки результатов измерения такие как: метод скользящего статистического окна, квадратичное усреднение, метод сглаживания и выравнивания математических рядов.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод измерения коэффициента теплоотдачи 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 т/э.

3. Методика контроля локального теплопотребления, в которой информативным параметром является температурный напор от ОП в окружающую среду.

По тематике диссертационной работы опубликовано 8 научных работ из них три статьи в изданиях, входящем в перечень ВАК и 1 статья в издании, цитируемом в базе данных Scopus. Получено 3 патента на изобретения. Основные результаты диссертационной работы представлены на II Международной научно-практической конференции «Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности», 2011 г. Санкт-Петербург; в Докладах ТУСУРа «Информационные технологии», 2010 г. 2(22). – 2011 г. 2 (24) г. Томск и на XIV Международном научно-практическом конгрессе «Вопросы энергосбережения», 2012 г. Димитроград.

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.

В первой главе проведен обзор современного состояния теоретических исследований, патентных и технических решений контроля количества т/э в отдельном помещении, автоматических систем коммерческого контроля количества т/э, применяемого для него оборудования. Сформулированы требования к контролю количества т/э потребителем в отдельном помещении. Вторая глава посвящена описанию математической модели тепловых процессов в отдельном помещении и моделированию протекающих процессов на базе этой модели. В третьей главе проанализированы погрешности исследованного метода по сравнению с другими применяемыми сегодня. Четвертая глава посвящена описанию экспериментальной базы, условий и способов проведения экспериментов, проведенному анализу полученных результатов.

Апробация результатов исследования: произведена опытная эксплуатация системы приборов контроля, изготовленных в соответствии с требованиями, налагаемыми предлагаемой в диссертации моделью. Было установлено 135 датчиков в экспериментальных корпусах, изготовленных силами сотрудников и студентов кафедры ТОР ТУСУРа. В качестве объектов для эксперимента в г. Томске были выбраны жилой пятиэтажный дом по улице Карташова 31 и подъезд № 1 жилого дома по ул. Гвардейской дв. 15/1.

Эксперименты проводились совместно с сотрудниками кафедры ТОР ТУСУРа. Диссертант выражает благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Пуговкину А.В. и коллегам Абушкину Д.В., Петровой Н.И., Степному В.С., Мукашеву А.М., Абрамчук С.И.

1 Анализ современного состояния средств измерения и автоматизации процессов контроля количества тепловой энергии потребляемой локальными объектами

1.1 Обзор способов и средств измерения тепловой энергии потребляемой отдельным помещением

1.1.1 Исследования и разработки

Вопросы теплоснабжения помещения хорошо исследованы в рамках обеспечения заданных параметров комфортности для жилых и офисных помещений [6, 46, 48, 121, 122, 129], а также в рамках технологических требований на влажность и температуру производственных помещений [14, 15, 36, 124]. В связи с исследованиями и разработками в области теплоснабжения зданий и отдельных помещений необходимо обратить внимание на следующие результаты:

– во-первых, математическое моделирование тепловых процессов, проведенное в работах Ю.А. Табунщикова и др. [121, 122]. В этих работах дан обстоятельный анализ тепловых процессов в помещениях с учетом радиационной способности источников, конвекционных процессов массо- и теплообмена, теплопроводности и теплоемкости материалов и других физических свойств. Для систем контроля количества потребляемой т/э полученные алгоритмы являются достаточно сложными так как связаны с большим объемом вычислений при технической реализации;

– во-вторых, глубокое исследование, как метода измерения, так и связанных с ним проблем распределения и начисления за потребленную т/э, проделанные в работе [46]. Авторы работы предлагают новый метод измерения радиаторных коэффициентов, усреднения полученных экспериментальных значений, позволяющий свести баланс потребления т/э по дому. В целом данная работа является ярким примером использования распределителей т/э и описывает их преимущества и недостатки;

– в-третьих, интересной представляется работа [129]. В модели использован учет влияния внешних и внутренних возмущающих факторов, а также теплоаккумулирующая способность здания, являющаяся одной из главных характеристик, воздействующих на процесс регулирования. Особенности климата, ветровой нагрузки, энергия солнечных лучей и тепlopоступления от внутренних источников учтены в математической модели за счет введения некоторой условной температуры наружного воздуха. По мнению автора, эта характеристика носит случайный характер и рассматривается им в дальнейшем, как вероятностная величина. Такой подход не соответствует реальным физическим процессам и делает невозможным применение модели для контроля количества т/э;

– в-четвертых, одним из наиболее распространенных методов определения расхода теплоты на отопление зданий является расчетный метод, учитывающий теплотехнические характеристики наружных ограждений (приведенное сопротивление теплопередаче и воздухопроницанию) и нормируемые значения воздухообмена и других показателей, влияющих на тепlopотери и тепlopоступления [62]. Этот метод не учитывает индивидуальные особенности теплового режима отдельных помещений, кроме того получаемый результат не опирается на данные инструментальных средств измерения потребления т/э;

– наконец, следует отметить статью [48], в которой автор анализирует внедренные на сегодняшний день инструментальные методы контроля количества т/э, потребляемой квартирой в многоквартирном жилом доме, указывая на необходимость проведения исследований и сравнения этих способов.

Проведенный анализ теоретических отечественных разработок в области контроля количества т/э [18, 46, 49, 59, 64], в отдельном помещении, показывает, что исследования являются немногочисленными, но при этом носят глубокий теоретический характер (Ю.А. Табунщиков, Д.Ю. Хромец, Ю.А. Матросов, С.А. Чистович, М.И. Низовцев, В.Я. Черепанов) и

опираются на многолетние наблюдения за погодой, анализ теплоизолирующих материалов и энергосберегающих технологий (В.Г. Семенов, В.И. Шарапов). Однако далее теоретических изысканий и патентов на изобретения они не продвинулись и широкого практического распространения не получили. Работ, посвященных измерениям с целью контроля и автоматизации процесса теплоснабжения отдельного помещения не много, что указывает на новизну, своевременность и практическую необходимость настоящей работы.

1.1.2 Анализ результатов интеллектуальной деятельности

Прямых методов измерения т/э на сегодняшний день не существует, хотя реестр средств измерения включает приборы, в описании к которым утверждается, что они измеряют т/э. Однако следует помнить, что такие приборы производят измерения косвенным методом, через вычисления. Тепловая энергия рассчитывается по формулам взаимосвязи между некоторыми основными физическими величинами. А вот физические величины, входящие в формулы, измеряются напрямую (расход теплоносителя и разница температур, тепловой поток и время, и т.п.). Поэтому существует довольно много возможных вариантов вычисления т/э, отдаваемой ОП, в той или иной мере базирующихся на следующих ниже патентах и технических решениях.

В работе [124] предложен способ определения коэффициента теплоотдачи, при котором измеряют величину теплового потока датчиком теплового потока, а температуру поверхности, обтекаемую средой, и температуру среды – термодатчиками. В качестве основного закона теплоотдачи в работе [124] принимается закон Ньютона – Рихмана (1.1), согласно которому тепловой поток, передаваемый в условиях конвективного теплообмена, пропорционален площади теплоотдающей поверхности и

разности температур между поверхностью и омывающей ее средой. В таком случае коэффициент теплоотдачи определяют с помощью соотношения:

$$Q = k \cdot F \cdot (T_n - T_{cp}), \quad (1.1)$$

где Q – тепловой поток; k – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности; T_n – температура поверхности; T_{cp} – температура среды.

Недостатком такого способа является его невысокая точность, определяемая конкретными условиями применения.

Известно устройство учета расхода т/э ОП [86], содержащее блок вычисления коэффициента теплоотдачи, вычисляемого по линейной зависимости от разности температур поверхности ОП и воздуха в помещении. Данный метод и реализуемое на его основе устройство основывается на том, что среднее значение коэффициента теплоотдачи заранее известно либо из справочных данных, либо из лабораторных измерений. В реальности эта величина имеет разброс ~15–20% от образца к образцу. Следовательно, данная система не может в полной мере учитывать индивидуальные особенности ОП и на практике при измерении потребляемой т/э имеет существенные погрешности.

Другой способ определения расхода тепла локальными потребителями (квартирами), входящими в многоквартирный дом, предложенный в работе [87], включает определение теплоснабжения объединенной системы потребителей тепла с помощью теплосчетчика за конкретное время теплоотдачи теплоисточником, измерение разности температур на поверхности теплоисточника локального потребителя тепла и охлаждающей среды. Затем определяют средний коэффициент теплоотдачи по объединенной системе потребителей в зависимости от расхода т/э, площади поверхности ОП и средней разности температур всего дома. По формуле Ньютона – Рихмана (1.1) определяют средний коэффициент теплоотдачи всего дома. С помощью этого коэффициента рассчитывают расход тепла локальным потребителем за конкретное время теплоотдачи теплоисточником.

Недостаток данного способа заключается в том, что средний коэффициент теплоотдачи по объединенной системе потребителей тепла подразумевает наличие у каждого потребителя ОП одного типа, отличающихся лишь количеством секций, что зачастую не соответствует действительности. Таким образом, отсутствует учет индивидуальных особенностей ОП, и происходит резкое увеличение погрешности измерений. Кроме того, при измерениях отдельные ОП могут быть включены не на полную мощность, что вносит дополнительные неточности. Недостатками также являются:

- низкая точность вычисления расхода по каждой квартире за счет неправильного использования формулы Ньютона – Рихмана (1.1), которая предполагает, что входящие в нее параметры применяются только от одного теплоисточника, а затем полученные расходы от каждого теплоисточника можно складывать, но не наоборот, как предлагает автор патента [87];

- невозможность применения данного способа, если одна или несколько квартир многоквартирного дома откажется установить квартирный прибор определения разности температур и термодатчики на ОП и в комнатах.

Известным способом контроля количества расхода т/э ОП является метод [88], который включает непрерывное измерение температур ОП и отапливаемого помещения за определенный временной интервал. В нем по разности мгновенных значений указанных температур непрерывно определяют мгновенные значения термоЭДС. Эти значения затем преобразуют в мгновенные значения тока записи интегратора дискретного действия. Мгновенные значения тока записи преобразуют в количество электричества за временной интервал. Величину количества электричества считывают постоянным током считывания интегратора дискретного действия. По значению времени считывания, току считывания, с учетом коэффициента теплопередачи и площади ОП определяют расход т/э.

Недостатком этого способа является то, что при определении расхода т/э ОП используется коэффициент теплопередачи (теплоотдачи) α , выбранный

из заранее определенных по известным из литературы методикам для соответствующих температурных условий. Определенный таким образом коэффициент теплопередачи не учитывает индивидуальные особенности ОП (изменения при длительной эксплуатации, состояние засоренности, краска на поверхности и т.п.). В свою очередь, это приводит увеличению погрешности измерений. Другим источником неточности измерения является систематическая погрешность измерения температур ОП и воздуха. Неточность измерения теплоотдачи ОП в отдельных случаях может достигать 30–40%.

Еще одним способом определения расхода т/э, предложенным для потребителя с вертикальной и другими видами разводки [89], является метод, согласно которому требуется установить диапазон разности температур работы ОП. Эмпирически определяют соответствующий каждому диапазону температур коэффициент расхода тепла. С промежутком 0,2–1,0 ч. поочередно по всем ОП определяют разность температур между поверхностью ОП и окружающей средой. После чего, определяют расход т/э каждого ОП.

Этот способ не может учитывать индивидуальные особенности каждого теплового прибора и изменение его характеристик в процессе эксплуатации. В связи с этим фактическое значение коэффициента теплоотдачи для каждого отдельного прибора будет иметь большой разброс по отношению к выбранному табличному значению коэффициента теплоотдачи, выраженному через нелинейную функциональную зависимость от разности температур работы ОП. Из практики эксплуатации тепловых приборов известно, что этот разброс достаточно высок ~15-20%. Применяемые для расчетов физическая формула и таблица определения коэффициента расхода тепла получены заявителем [89] эмпирическим путем, что требует неоднократного повторения экспериментов в процессе длительной эксплуатации и на практике не может быть реализовано повсеместно.

Известен способ [71, 40] определения значений радиаторных коэффициентов для чугунных радиаторов. Радиатор устанавливают на стенд. После чего, производят измерение температур теплоносителя на входе и выходе из радиатора, времени работы и количества тепла, которое отдает теплоноситель в ОП с помощью теплосчетчика, измерение температуры поверхности радиатора и температуры воздуха около радиатора с помощью регистратора расхода тепла. Находят среднюю температуру поверхности радиатора с помощью медь-константановой термопары используя балансовое уравнение:

$$Q / S = K \cdot \Sigma,$$

где Q – количество тепла, отданное радиатором; S – площадь поверхности радиатора; Σ – показания регистратора; K – коэффициент, который определялся из эксперимента, его удобно представить в виде $K = k \cdot k_n$, где k – радиаторный коэффициент; k_n – номинальный условный коэффициент теплопередачи ОП.

Этот способ базируется на экспериментальных исследованиях в лабораторных условиях, не учитывает индивидуальных особенностей каждого ОП и изменение его характеристик в процессе эксплуатации. Применение в измерениях теплосчетчика требует врезки в трубопровод и вносит значительные погрешности.

Авторы работы [90] предлагают устройство контроля количества расхода т/э ОП и ОП, которое содержит термодатчики, соединенные с устройством вычисления. При этом один из термодатчиков служит для измерения температуры ОП и установлен на его поверхности, а другой служит для измерения температуры воздуха, окружающего ОП, и установлен вне ОП. Предлагаемое устройство дополнительно содержит термоизолированный от ОП термоанемометрический датчик скорости потока нагретого воздуха, отводящего тепло от поверхности нагревательного элемента ОП, расположенного под его кожухом. Выход термоанемометрического датчика соединен с входом вычислителя,

определяющего расход $t/\text{э}$, потраченной на обогрев помещения по отградуированной шкале.

Недостатком данного технического решения является необходимость градуировки ОП на стенде в условиях обогреваемого помещения для получения коэффициента скорости потока воздуха, используемого при вычислении расхода $t/\text{э}$ от ОП. Сложный процесс градуировки в лабораторных условиях приводит к понижению точности вычисления расхода $t/\text{э}$ непосредственно у потребителя. Использование большого количества термодатчиков приводит к удорожанию устройства.

Способ определения расхода тепла локальными потребителями предлагаемый [91] в однотрубной системе теплоснабжения включает следующие операции:

- определение расхода тепла объединенной системой потребителей тепла за конкретное время на основе определения теплопотребления каждого из стояков в однотрубных системах теплоснабжения многоэтажных жилых домов с вертикальной разводкой;
- определение разности интегральных значений удельных энтальпий на входе и выходе помещения локального потребителя тепла (квартиры) по каждому стояку, проходящему через помещение;
- определение долей потребленной $t/\text{э}$ в помещениях локального потребителя в пределах одного стояка;
- расчет теплопотребления радиаторов в помещениях локальных потребителей, подключенных к каждому стояку;
- расчет тепла, отпущенного квартире локального потребителя в целом.

Основным недостатком этого способа является низкая точность, которая определяется тем, что перепад температуры на входе и выходе ОП составляет $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как погрешность температурных датчиков находится в пределах $0,2\text{--}0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того метод требует врезки расходомера на каждый стояк.

Известен способ определения доли потребления т/э отдельным потребителем при отоплении многоквартирного дома с двухтрубной системой отопления [92, 93]. В данном методе измеряется расход т/э на каждом стояке, а доля этой энергии, потребленная отдельным тепловым прибором вычисляется пропорционально разности средних температур в подающем трубопроводе и воздуха помещения. При этом не учитываются значения коэффициентов теплоотдачи отдельных приборов. Так как значения этих коэффициентов могут существенно отличаться, то погрешность нахождения доли потребленной т/э может быть значительной (до 30%).

Таким образом, на основе рассмотренных выше технических решений и патентов можно с уверенностью сказать, на сегодняшний день существующие методы, приборы и устройства не учитывают индивидуальные особенности тепловых приборов и не удовлетворяют требованиям по точности измерения т/э, поэтому не получили широкого распространения на практике.

1.1.3 Анализ характеристик распределителей тепловой энергии ведущих производителей

Существуют технические решения проблемы контроля количества т/э, отдаваемой ОП, разработанные зарубежными авторами [64, 73, 120]. В России эти приборы получили название – распределители т/э. Распределители т/э (ISTA Доприно, Danfoss, Techem) выпускаются серийно и широко применяются для контроля количества потребления т/э отдельными помещениями у нас в стране и за рубежом. Однако их разработки имеют ряд существенных недостатков [56, 100]. В существующих распределителях сопротивление тепловой системы находится на основании предварительно установленных расчетным методом коэффициентов, полученных до ввода в эксплуатацию, общих для каждого типа ОП, и только для ОП без учета потерь на разводке. Это обстоятельство не позволяет учесть

индивидуальные особенности системы теплоснабжения помещения и снижает точность результатов измерения в процессе эксплуатации [32]. Отсутствие индивидуальности резко снижает заинтересованность конечных пользователей в работе установленных систем учета на базе таких приборов. Своему распространению они обязаны, прежде всего, требованиям действующих нормативных законодательных актов. При введении в строй вновь или после капитального ремонта объект, подключенный к системе центрального отопления, не может быть принят в эксплуатацию при отсутствии распределителей на каждом ОП [78].

Этот метод контроля количества отдаваемой ОП т/э объединяет способ коммерческого расчета и техническое решение. Распределитель представляет собой устройство, выполненное в одном корпусе с датчиком(-ами) температуры, микроконтроллером, устройством питания (батарейкой), системой вывода информации (индикатор, модем). Закрепляется непосредственно на самом ОП. Обычно съём температуры осуществляется через адаптер-крепление, устанавливаемый на стенку ОП, к которому прикрепляется корпус распределителя. Крепление осуществляется способом, препятствующим демонтажу устройства без повреждения.

К сожалению, на сегодняшний день, ни одно из предложенных распределителей не отвечает полностью требованиям, выдвинутым к современным приборам. Если принята объективная ценовая политика, то предлагаемый сервис излишне затруднен (как в случае с ISTA Доприно, Techem), если проработан сервис, то высока цена оборудования (Danfoss).

Устройства зарубежного производства, измеряют количество потребляемой т/э ОП в условных единицах, а для расчетов используется отношение энергии, рассчитанной для конкретного помещения к энергии, потребляемой всем зданием. Поэтому эти приборы называются распределителями т/э или пропорционаторами. Как было уже сказано выше, описываемые приборы не учитывают индивидуальные особенности тепловых источников, а также их тепловое сопротивление и тепло, которое излучается

подводящими трубами. В приводимой ниже таблице 1.1 приведены данные не только иностранных распределителей, но и характеристики наиболее успешного отечественного аналога иностранных приборов.

Таблица 1.1 – Сравнение конкурентных преимуществ

Характеристики	Распределители тепловой энергии			
	ISTA Доприно	Danfoss INDIV-3, INDIV AMR	Techem, FHKV (data III, vario S)	ЗАО «ИБК- САЯНЫ», INDIVID – 11;21
Производитель	Германия	Дания	Германия	Россия
Срок службы, лет	10+1	10 лет + 15 мес	10	10+1
Периодичность отправки данных	от 2 до 5 дней (ежедневные показания)	6 часов (4 раза в сутки)	Снятие показаний и передача данных ежедневно и по запросу	раз в 4 часа
Питание	Литиевая батарея 3В (10 лет + резерв)	Литиевая батарея 3В (10 лет + резерв)	Литиевая батарея 3В (10 лет + резерв)	Литиевая батарея (10 лет + резерв)
Считывание данных. Диспетчеризация системы	Автоматический радиосбор данных	Визуально с помощью дисплея, либо беспроводная передача данных	Беспроводная радиосистема автоматического сбора и передачи информации	беспроводное считывание, с помощью адаптера с sim-картой
Цена за установку распределителя с радиосистемой в среднем (в 2-комнатной квартире) «под ключ» в ценах 2015 года	6000 р. (1121 р. – распределитель, 12500 р. – радиоконцентратор для сбора данных)	8000–12000 р. (включая компоненты системы передачи)	7200 р. (Стоимость установки одного прибора от 2000 руб. + компоненты радиосистемы)	9300 р. (1600 р. – измеритель тепловой энергии, 4500 р. – адаптер для передачи данных)
Адрес	www.ista-rus.ru	www.danfoss-rus.ru	www.techemenergy.ru	www.sayany.ru

1.2 Обзор состояния вопроса в области автоматизированных систем контроля количества потребляемой т/э зданиями и помещениями

Контроль количества т/э в отдельном помещении невозможен без автоматизации процессов сбора информации. Системы автоматизированного учета (АСУ), которая включает обеспечивающие и функциональные подсистемы [17, 133]. В нашем случае в обеспечивающую подсистему входит совокупность датчиков температуры и радиоканал, а в функциональную подсистему – система сбора и обработки информации и система управления ОП [24, 82, 83].

В последнее время все большее внимание специалистов по технологическому и коммерческому учету теплоты уделяется вопросам сбора и передачи результатов измерений с контрольно-измерительных приборов, установленных на объектах теплоэнергетики [1, 13, 44]. Их дальнейшей обработки с целью визуализации в наглядной форме (графики, таблицы), подготовки отчетов в теплоснабжающие организации, выявления нештатных ситуаций и обеспечения надежных и энергосберегающих режимов эксплуатации объектов теплоснабжения и т.д.

Следует отметить существование систем сбора–передачи показаний с разной степенью автоматизации и аналитики, предлагаемых на сегменте рынка контроля количества т/э производителями общедомовых приборов учета. Однако такие системы, разработанные ЗАО «Теплоком», ЗАО «Взлет», ЗАО «ИВК-Саяны», и др. ориентированы на продукцию фирм изготовителей и не поддерживают устройств других производителей. В настоящее время предпринимаются попытки создания гетерогенных систем, позволяющих объединить процессы сбора и анализа показаний узлов учета разных ресурсов на базе приборов разных производителей, например совместная разработка ЗАО «Миландр», ТУСУРа и ТГАСУ.

На сегодняшний день хорошо проработаны АСУ для коммерческого учета электрической энергии [2, 4, 80, 138, 144, 119, 143, 145]. Существует

много технических решений, ориентированных на производителей и крупных потребителей электрической энергии. Некоторые решения снабжены помимо системы сбора-передачи показаний программным обеспечением для анализа аварийных ситуаций [2, 11], динамики потребления и распределения электрической энергии [12, 98]. Гораздо меньше предложений на рынке АСКУЭ, учитывающих особенности потребительских требований в сфере ЖКХ [138]. И совсем немного предложений АСКУЭ ориентированных на сбор и обработку показаний сразу для нескольких ресурсов [33, 34, 140, 141]. Такие решения чаще всего пользуются протоколами и стандартами передачи данных, такими как OPC [141], технологиях Windows [140], TCP/IP [9, 33, 34], MODBUS-решений в системах регулирования реального времени [9], а в системах автоматизации промышленного производства можно для примера привести технологию CAN [84]. Однако не все широко используемые сегодня технологии подходят для АСКУЭ так, например, Технология Bluetooth [127], не отвечает требованиям по цене – качеству. Это позволяет сделать вывод о технологической готовности рынка к ассимиляции устройств индивидуального контроля количества т/э в АСУ.

1.3 Особенности контроля количества тепловой энергии потребляемой индивидуальными потребителями при центральном теплоснабжении

Концепция энергосбережения России подразумевает внедрение энергоэффективных технологий и организационно-практических мероприятий на всех уровнях управления, распределения т/э от производителя до конечного потребителя. Наиболее сложным будет уровень конечного потребителя. Во-первых, окончательное решение о применении той или иной технологии и вообще о необходимости каких-либо действий будет принимать собственник помещения. Во-вторых, имеющиеся сейчас на

рынке предложения не обладают в достаточной мере индивидуальным подходом, а обращены в сторону коллективных методов экономии ресурсов. В-третьих, предлагаемые методы несут много условностей, не позволяющих эксплуатацию в отдельно взятом помещении. Кроме этого организация индивидуального контроля при центральном отоплении помимо проблем сведения тепловых и материальных балансов на уровне многоквартирного жилого дома, офисного здания или здания смешанного типа, создает дополнительные трудности при взаиморасчётах между генерирующими и реализующими т/э компаниями [68]. Но внедрение новых технологий всегда вызывает необходимость разрушения устоявшихся стереотипов и традиций. Сложившиеся и отработанные десятками лет отношения пересматриваются под потребительским углом зрения, когда во главу вопроса ставится теплоснабжение не дома (объекта), подключенного к системе центрального теплоснабжения, а квартиры (офиса), расположенной в этом доме. На сегодня, уже принят ряд законов [76, 78, 95], направленных не только на энергосбережение, но и на повышение энергоэффективности, особенно в области ЖКХ.

Основные направления исследований в этой области, проводимые под эгидой СО РАН, ЗАО «ПромСервис», НПФ «Теплоком», НПО «Промрибор», ЗАО «Взлет», ЗАО «ИВК Саяны» а также результаты работ и мероприятий отражены в материалах МНПК последних 10 лет. Анализ полученных рекомендаций и решений конференций показывает, что одним из приоритетных направлений исследований в этой области является ресурсосбережение конечного индивидуального потребителя. Обязательным условием такого подхода является оснащение потребителя совершенными устройствами регулирования и не менее совершенными средствами контроля количества потребляемых энергоресурсов.

Рассмотрим помещение в многоэтажном доме (офис, квартиру, цех), как объект регулирования, с температурой воздуха в помещении t в качестве регулируемого параметра. Допустим, что подключение дома к тепловым

сетям произведено с использованием классического узла управления с нерегулируемым элеватором; схема развозки стояков – вертикальная, однотрубная. Выбранные условия – наиболее распространенная ситуация для России.

Регулирующее (управляющее) воздействие (РВ) на ОП в любой системе теплоснабжения может быть представлено как три взаимосвязанных процесса, а именно:

$$1. Q = f(\psi),$$

$$2. \Theta = f(Q),$$

$$3. t_B = f_2(\Theta),$$

здесь Q , Θ – объемный расход теплоносителя и количество т/э, а ψ , t_B – регулирующее воздействие и температура воздуха в помещении, соответственно.

Поскольку регулирующее воздействие не может рассматриваться изолированно от общей системы отопления, к которой подключен ОП, оценка реакции системы представляет интерес с точки зрения общего объема теплоснабжения объекта во всем диапазоне РВ, поэтому примем $\psi = 0 - 100\%$.

Другим словами, устанавливается диапазон регулирования эффективной составляющей т/э, в пределах которого обеспечивается достаточная температурная комфортность в помещении, находящемся в окружении смежных помещений. Очевидно, что исключение теплоносителя из зоны охлаждения и перераспределение потоков теплоносителя приводят к уменьшению теплоснабжения объекта, и как следствие, повышению температуры теплоносителя, возвращаемого в стояк. А значит, к экономии т/э в целом. Но при массовом использовании индивидуальных средств регулирования и постоянном гидравлическом режиме тепловых сетей этот процесс неизбежно приведет к увеличению температуры, возвращаемой в магистраль, т.е. понижению КПД источника т/э.

Таким образом, удовлетворение индивидуальных условий комфортности или экономия т/э могут приводить к ухудшению качества срабатывания последней и даже влиять на показатели работы источника. В ранних работах Табунщикова, В.Л Ливчака, С.А Карауша, А.С Вербицкого, Н.К Громова [56, 121, 122] тщательно исследованы объемы промышленного и гражданского теплоснабжения, даны рекомендации по оптимизации внутренних и наружных тепловых контуров зданий и сооружений, исследован теплообмен подвальных помещений. Известны работы [104], в которых регулирующее воздействие на каждый ОП предлагается ограничить уровнем 18–20 %, чтобы избежать искусственной организации перетоков тепла и отбора т/э через межквартирные перегородки. Решением является подключение дополнительных нагрузок (например, новое строительство), либо уменьшение потребления т/э и связанное с ним уменьшение затрат на энергоносители, что, устанавливает свои границы РВ, связанные с когенерационным характером производимой т/э.

В данной работе произведена количественная оценка изменения эффективной составляющей т/э ($\Theta_{эфф}$) вследствие ее перераспределения между стояками и ОП, вплоть до отключения последнего.

Анализ гидродинамической обстановки в схеме теплоснабжения проведен на примере мостового подключения ОП к стояку с регулирующим органом на входе или выходе радиатора. Это показано на рисунке 1.1.

Рассмотрение однетрубной системы подвода обосновано широкой распространенностью последней. Так, например, в домах старой застройки применение однетрубной системы подвода достигает (72–85%) [114].

Другой, не менее значимой, особенностью индивидуального контроля является сложность обоснования метрологических возможностей метода измерения, сложность сведения баланса подведенной и потребленной т/э [64, 123].

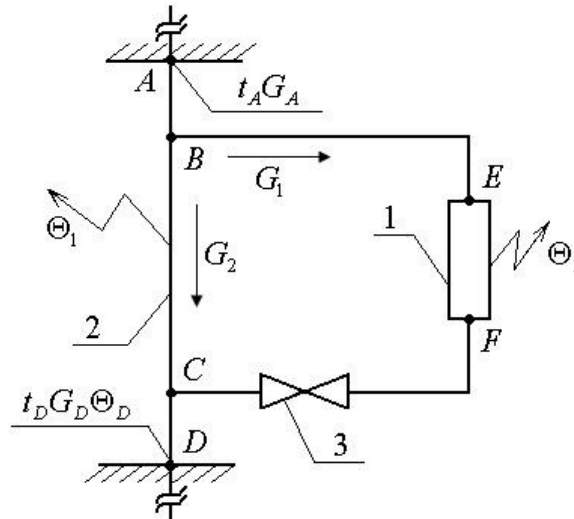


Рисунок 1.1 – Схема перераспределения теплоносителя и т/э [100]:

1 – ОП; 2 – стояк отопления; 3 – регулирующий орган;

A, B, C, D, E, F – характерные точки системы отопления;

G , t , Θ – массовый расход, температура и т/э соответственно

Индивидуальный контроль количества т/э в домах с горизонтальной (лучевой) разводкой или виртуальных теплосчетчиков с распределенными по квартирам термометрами и расходомерами на стояках при вертикальной разводке не ставит особых вопросов при разработке методик измерений [116, 128]. Совершенно иная ситуация складывается при попытках построить методику измерений с применением устройств без измерения расхода теплоносителя.

Помимо коррекции результатов измерений потерями т/э на участках подвода необходимо как-то учесть долю конкретного потребителя в общедомовом потреблении, а именно обогреве, коридоров, подъездов, чердаков, технических этажей, подвалов. Необходимо также учесть расположение самой квартиры в доме. Этот так называемый полуадминистративный подход позволяет решить перечисленные задачи, но для конкретного объекта и при известном (измеренном) объеме потребления т/э. Основная слабость такого подхода в том, что его в целом нельзя назвать

измерением. Такую методику нельзя аттестовать в соответствии с ГОСТ 8563 «Методика (методы) измерений» [35] или отразить, как метод измерения в руководстве по эксплуатации. Автор работы [64] предлагает 100% оснащение распределителями всех квартир, такое же решение было отражено в одном из вариантов законодательных актов [95].

1.4 Требования к устройству индивидуального контроля количества потребляемой тепловой энергии

Анализ средств и методов контроля количества т/э, приведенный в [109, 112], а также Правилах [116] показывает, что круг интересов индивидуального потребителя при контроле количества т/э серьезно ограничен как организационными, так и нормативными требованиями. С позиций «Правил учета т/э № 954» [97], 80% квартир старой застройки (постсоветских «Хрущевок») можно рассматривать, как неудовлетворяющие требованиям для внедрения учета, так как суммарная тепловая нагрузка одной квартиры существенно ниже 0,1 (Гкал/час). Учитывая, что рассматриваемые квартиры находятся в многоэтажных жилых домах, выделить их, как самостоятельные объекты теплоснабжения, не представляется возможным. Принятые новые Правила коммерческого учета т/э, теплоносителя (Постановление Правительства РФ от 18 ноября 2013 г. № 1034) [96] разделили сферы общедомового учета т/э и услуги отопления и ГВС, предоставляемую конечному пользователю. Вопросы контроля и учета т/э и теплоносителя для объекта регламентируются «Правилами коммерческого учета т/э, теплоносителя» [96]; а способы начисления и регламент потребления услуги конечным пользователем «Правилами предоставления коммунальных услуг гражданам» [95].

Согласно [95]: «распределитель» – это средство измерения, используемое для определения приходящейся на жилое или нежилое помещение, в котором установлен распределитель, относительной доли в

общедомовой плате за т/э, количество которой определено с использованием показаний коллективного (общедомового) прибора учета т/э. При этом использование показаний распределителя для расчетов возможно только при 100% оборудовании этими приборами помещений многоквартирного жилого дома. Такое абсолютное арифметическое требование на практике выполнимо только в исключительных случаях. Даже при новом строительстве, при введении в строй объекта, единовременный запуск всех устройств невозможен по причине неравномерного по времени заселения (продажи/покупки) жилых помещений. Как следствие, система не может быть принята в эксплуатацию и предустановленные распределители теряют свой смысл. Следует отметить, что в некоторых случаях, когда речь идет об управляющих компаниях, совмещающих роль застройщиков-заказчиков строительства, предложенная в правилах схема работает, например Управляющая компания ООО «ЖК - Гусарская баллада», г. Москва.

В настоящее время, в соответствии с [95] распределение этой энергии производится пропорционально площади квартир с учетом потерь на участках сетей в пределах балансовой принадлежности. Очевидно, что затраты т/э на отопление квартиры даже в одном здании могут значительно различаться, поскольку теплотери в угловой квартире на последнем этаже на 35–40 % превышают аналогичные в квартире, расположенной в центральной части здания [56].

С другой стороны, в большом числе зданий до 30–35 % от их общего числа, потребление тепла выше нормативного [111, 117]. При этом любые действия потребителя по экономии т/э в своей квартире нивелируются на фоне теплоснабжения всего дома. В сложившейся ситуации экономия фактического потребления т/э в квартирах таких зданий возможна только тогда, когда у потребителя есть реальные элементы регулирования, без нарушения гидравлического режима теплоснабжения здания.

Таким образом, существующие методы распределения т/э не отражают действительной картины потребления и не стимулирует потребителя к более

экономному использованию т/э, поскольку он скрыт (растворен) в общей массе пользователей, а элемент его заинтересованности исключен из рассмотрения применяемой системой распределения [46].

Как уже отмечалось, классические методы измерения т/э в квартирах с вертикальной разводкой, когда через квартиру проходят несколько стояков отопления, дороги и чрезвычайно трудоемки. По различным оценкам [68] доля таких домов достигает 80–90 %, а организация контроля количества потребляемой т/э сопряжена с реконструкцией всей системы отопления. Как справедливо указывается в [68], для наиболее распространенной в стране однотрубной вертикальной системы водяного отопления, возможности индивидуального регулирования не могут быть полностью реализованы в связи с их высокой аккумулирующей способностью. Поскольку эти системы ориентированы на поддержание постоянного расхода теплоносителя, который задается располагаемым перепадом давления на вводе в здание и гидравлическими характеристиками сетей.

Совершенно иная ситуация складывается при горизонтальной (лучевой) разводке систем отопления, когда на каждом уровне (этаже) строения потребитель на свое усмотрение может задать требуемую функцию расхода теплоносителя, даже в пределах определенной зоны в квартире (офисе). Именно поэтому основной акцент индивидуального контроля в сложившейся ситуации делается на косвенные методы оценки теплопотребления по температурному напору в рассматриваемом помещении. В этом случае расход теплоносителя исключен из числа измеряемых параметров. Очевидно, что достоверность результатов измерения, тогда будет определяться соблюдением всей совокупности требований к установке измерительных преобразователей температуры, обеспечением единообразия условий их применения и используемым математическим аппаратом.

Особый интерес к рассматриваемому методу измерения заключается в том, что он не зависит от способов подвода теплоносителя к ОП, его типа, качества и места установки. Как показывают результаты исследований [38],

температура в характерных точках может быть использована не только для определения величины теплового потока, оценки состояния ОП и теплового контура помещений, но и возможных перетоков т/э в пределах отапливаемого помещения. С математической точки зрения на поверхности ОП всегда найдется такая характерная точка, измеряемая температура в которой будет соответствовать средней температуре поверхности всего ОП. Измерения, производимые в характерной точке, снимают необходимость вычисления площади поверхности ОП для определения величины т/э отдаваемой этим прибором.

Патентная проработка состояния вопроса с глубиной поиска 10–15 лет показала наличие серьезных разработок, как за рубежом, так и у нас в стране [86–89], основанных на использовании скрытой теплоты парообразования эффектов сублимации, а также применении закона Ньютона – Рихмана (1.1) или критериальных зависимостей радиационно-конвективного теплообмена ОП с окружающей средой. Некоторые из них [3, 72, 132] доведены до промышленного или опытно-промышленного производства, но все эти подходы без исключения обладают рядом недостатков [126, 131], главным из которых является невозможность индивидуального подхода к каждому помещению и/или ОП. Фактически от усреднения показаний общедомового прибора по площади происходит переход к усреднению по показаниям предустановленных распределителей-индикаторов. Упускаются из вида такие важные моменты как перераспределение тепловых потоков в помещении при работе/не работе бытовой техники, положении относительно штор и подоконников, изменения засоренности внутреннего пространства и поверхностей ОП со временем и т.п. При реальной эксплуатации систем контроля количества т/э в отдельно взятых помещениях без учета этих нюансов не обойтись. Если при усреднении по коллективу и времени относительно всего дома при действующих «сильно усредняющих» методиках расчета такими данными можно пренебречь, то при работе с одним помещением такого допустить нельзя.

Как метко сказал И.В. Кузник [53] распределители измеряют отданную ОП т/э в «попугаях», а уже потом через пропорцию с результатами общедомового прибора появляются понятные физические значения. Законы психологии на рассматриваемом уровне играют определяющую роль. Любое непонимание в процессе коммерческой процедуры влечет недоверие к стоимости покупки. Чем меньше поэтапных шагов в процедуре расчета потребленной т/э, тем большее значение принимает участие конечного пользователя в результатах.

Все, без исключения, рассмотренные методы ориентированы на работу системы отопления в стационарном режиме, и переходные процессы опускают за их кратковременностью с точки зрения процесса эксплуатации. Однако, в условиях регулирования, с целью достижения баланса между комфортными условиями и экономией ресурса сразу в нескольких взаимосвязанных одной системой отопления помещениях стационарный режим вообще может не установиться [60]. В этих условиях требуется техническое решение, дающее достоверные показания в любых режимах работы системы теплоснабжения.

Стоит отметить обеспокоенность, высказанную авторами работ [46, 48], что оснащение помещений одного дома ОП разных типов не позволит применить большинство методов контроля и распределения корректно. Независимость способа измерения от типа соседнего прибора отопления безусловное требование к контролю количества т/э потребляемым отдельно взятым помещением.

Рассматриваемые методики выполнения измерений не учитывают постоянную составляющую т/э, привносимую в помещение стояками отопления, как фактор, ощутимо влияющий на величину РВ [51]. Особенно при параллельной работе нескольких тепловыделяющих элементов. В связи с этим, гидродинамические процессы, возникающие при перераспределении потоков, изменения их структуры и режимов течения непосредственно перед

ОП, а также степень их влияния на условия теплообмена с окружающей средой, представляют существенный интерес.

Таким образом, актуальность проблемы и экономическая целесообразность ее решения предопределили массу разработок направленных на совершенствование известных и детальное исследование предлагаемых решений [86–89, 40, 90–93].

Выводы к главе 1

1. Решение задачи универсального подхода к контролю и оценка индивидуального теплопотребления в многоквартирном жилом доме является актуальным и продиктовано необходимостью выполнения закона № 261-ФЗ [78].

2. Существующая законодательная база ориентирована на устаревшие технологии серьезно сдерживает возможность вовлечения индивидуального потребителя в процесс ресурсосбережения, поскольку рекомендуемые методики распределения т/э производят распределение пропорционально занимаемой площади и не отражают действительной картины теплопотребления отдельно взятого помещения. Конкретный потребитель не заинтересован в экономии тепловых ресурсов, а существующая нормативная база целесообразность и оценку его участия в этом процессе не мотивирует.

3. Измерения т/э, отдаваемой отдельным ОП, в большинстве случаев производится в условных физических величинах.

4. Отсутствуют методики оперативной оценки эффективности ОП. Эта задача может быть решена при помощи динамических методов измерения коэффициента теплоотдачи ОП, когда он находится в неравновесном состоянии.

2 Теоретическое исследование и моделирование теплообмена локального потребителя тепловой энергии

2.1 Способы контроля количества потребляемой тепловой энергии индивидуальных потребителей при центральном теплоснабжении

Проблема рационального потребления и распределения т/э системами отопления, как показано выше, чрезвычайно актуальна. При климатических условиях России системы отопления жилых и общественных зданий являются наиболее энергоемкими из инженерных систем [99].

Для того чтобы добиться экономии теплопотребления на уровне конечного пользователя, необходимо грамотно и оперативно вести контроль количества т/э, потребляемой помещением.

Методы поквартирного (офисного) контроля количества т/э по способам измерений можно разделить на прямые и косвенные.

Классическим примером прямого метода измерения, с рядом допущений, является контроль количества т/э с помощью теплосчетчика. Теплосчетчик включает в себя тепловычислитель – главный компонент счетчика; два датчика температуры – обычно это термометры сопротивления; первичный преобразователь – расходомер. Тепловычислитель ведет все расчеты по расходу тепла и часто снабжен дополнительными выходами для вывода сигнала с целью его дальнейшей передачи, например, на центральный учетный пункт. Датчики врезаются в подающую и обратную трубы и определяют разницу температур на входе и выходе отопительного контура. Первичный преобразователь измеряет расход теплоносителя. Иногда для контроля утечки/потребления теплоносителя на обратный трубопровод устанавливается дополнительный первичный преобразователь. У бытовых теплосчетчиков (диаметр которых от 15 до 25 мм) тепловычислитель и первичный преобразователь, как правило, выполняются в общем корпусе рисунок 2.1 [3].

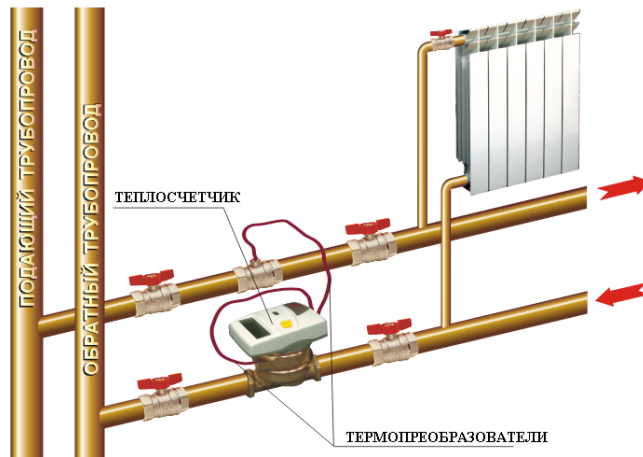


Рисунок 2.1 – Монтаж теплосчетчика в обратный трубопровод [3]

Отпущенная или потребленная т/э, Гкал (ГДж), определяется по любой из формул [63]:

$$Q = \left[\sum_0^n m_1 (h_1 - h_{xe}) - \sum_0^n m_2 (h_2 - h_{xe}) \right] 10^{-3},$$

$$Q = \left[\sum_0^n m_1 h_1 - \sum_0^n m_2 h_2 - \sum_0^n (m_1 - m_2) h_{xe} \right] 10^{-3},$$

$$Q = \left[\sum_0^n m_1 (h_1 - h_2) + \sum_0^n (m_1 - m_2) (h_2 - h_{xe}) \right] 10^{-3},$$

$$Q = \left[\sum_0^n m_2 (h_1 - h_2) + \sum_0^n (m_1 - m_2) (h_1 - h_{xe}) \right] 10^{-3},$$

где m_1 и m_2 – массовый расход теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, (т/ч); h_1 , h_2 и h_{xb} – энтальпия (удельное теплосодержание) теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, а также исходной холодной воды, поступающей на источник тепла для подпитки тепловой сети, (ккал/кг, кДж/кг); n – продолжительность расчетного периода, (ч), или

$$Q = \left[\sum_0^n V_1 K_t (t_1 - t_{xe}) - \sum_0^n V_2 K_t (t_2 - t_{xe}) \right] 10^{-3},$$

$$Q = \left[\sum_0^n V_1 K_t t_1 - \sum_0^n V_2 K_t t_2 - \sum_0^n (V_1 - V_2) h_{xe} \right] 10^{-3},$$

$$Q = \left[\sum_0^n V_1 K_t (t_1 - t_2) + \sum_0^n (V_1 - V_2) (t_2 - t_{хв}) \right] 10^{-3},$$

$$Q = \left[\sum_0^n V_2 K_t (t_1 - t_2) + \sum_0^n (V_1 - V_2) (t_1 - t_{хв}) \right] 10^{-3},$$

где V_1 и V_2 – объемный расход теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, ($\text{м}^3/\text{ч}$); K_t – тепловой коэффициент по международной рекомендации изложенной в [120] ($\text{Гкал}/^\circ\text{См}^3$, $\text{ГДж}/^\circ\text{См}^3$); t_1 , t_2 и $t_{хв}$ – температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, а также исходной холодной воды, используемой для подпитки тепловой сети на источнике теплоснабжения ($^\circ\text{С}$).

Пересчет объемного расхода теплоносителя ($\text{м}^3/\text{ч}$) в массовый ($\text{т}/\text{ч}$) производится по формуле:

$$m = V\rho \cdot 10^{-3},$$

где V – объемный расход теплоносителя; ($\text{м}^3/\text{ч}$); ρ – плотность теплоносителя при его измеренных температуре и давлении, ($\text{кг}/\text{ч}$).

Значения плотности и энтальпии воды определяются на основе измерений ее температуры и давления при помощи таблиц ГСССД «Плотность, энтальпия и вязкость воды» [62]. При определении значений плотности и энтальпии горячей воды (теплоносителя) в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети при температуре в диапазоне от 30 до 150 $^\circ\text{С}$ зависимость плотности и энтальпии воды от давления не учитывается, т.к. эта зависимость незначительна и ею можно пренебречь [55]. Однако в случае определения значений плотности и энтальпии холодной воды, используемой для подготовки подпиточной воды на источнике теплоснабжения, при температуре от 0 до 30 $^\circ\text{С}$ давление воды необходимо учитывать в силу того, что в этом диапазоне зависимость энтальпии воды существенна с точки зрения требований, предъявляемых к погрешностям измерений количеств отпускаемой и потребляемой т/э и теплоносителя. По этой причине на источнике теплоснабжения, кроме

температуры, фиксируются также и значения давления исходной холодной воды.

Рассмотрим варианты установки теплосчетчиков в квартирах (офисах). По способу разводки системы отопления здания делят на два типа: горизонтальная и вертикальная. При горизонтальной разводке в здании есть общие стояки, которые пронизывают дом сверху вниз – все этажи через общий холл. Стояки парные: по одной трубе подается нагретый теплоноситель (обычно это вода), в другую поступает остывший. Соответственно в каждую квартиру (офис) от этих стояков идут две горизонтальных трубы, по одной из которых теплоноситель поступает в отапливаемое помещение, а по другой – возвращается, отдав часть т/э. Для контроля количества потребленной т/э в месте ввода в квартиру (офис) на подающую трубу может быть установлен теплосчетчик. Таких домов немного, главным образом это элитное жилье, жилье бизнес -категории, современные бизнес центры. Сейчас их доля в существующем жилом фонде не превышает 5–10 % [68], по бизнес центрам такой статистики нет.

Остальной жилой фонд, расположенный в многоквартирных домах – это здания с вертикальной разводкой системы отопления. В них стояки пронизывают непосредственно квартиры (офисы). В каждом помещении непосредственно к стояку подключен ОП. Причем для организации контроля количества потребляемой т/э в этом случае уже неважно двухтрубная система отопления или однотрубная. Важно, что нельзя в одной точке замерять весь объем потребляемого квартирой (офисом) тепла. Для этого при классической технологии учета, которая требует измерения количества прошедшего через отопительную систему теплоносителя, теплосчетчик придется ставить на каждый ОП, а затем складывать показания всех по отдельной расчетной методике.

Недостатки прямого (классического) метода в поквартирном контроле количества т/э весьма существенны:

– **Цена.** В большинстве домов с вертикальной разводкой системы теплоснабжения разные помещения запитаны от разных стояков, значит, необходимо ставить теплосчетчик на каждый ОП. Минимальная стоимость установки теплосчетчика составляет порядка 10–12 тыс. рублей [107].

– **Расчет общедомовых нужд (ОДН).** Даже если дом новый, а система двухтрубная (горизонтальная разводка) и при этом стоит один счетчик, остается вопрос о доле того тепла, которое расходуется в помещениях общего пользования (подъезде, на чердаке, в подвале, техническом этаже) и при доставке тепла от границы балансовой принадлежности теплотрассы до домового распределительного узла.

– **Мера справедливости.** Квартиры, расположенные с северной стороны дома, требуют большей энергии для создания комфортных условий проживания и служат температурным щитом для южных квартир. Стало быть, брать с «северян» больше, чем с «южан», несправедливо. Хотя этот момент никак не отражается в современном законодательстве, по принципу: не нравится квартира – живите в другой. Для восстановления справедливости стоило бы привязать стоимость 1 м² жилья к его месту расположения в здании и тем самым учитывать будущие расходы на его содержание (оплату коммунальных услуг). В настоящее время такой дифференциации стоимости 1 м² от будущих коммунальных затрат при его эксплуатации не производится.

– **Увеличение гидравлического сопротивления в трубопроводе.** Например, при установке расходомеров на каждом ОП в пятиэтажном доме теплоноситель, значительно снизив скорость потока на пути следования по стояку, к последнему этажу подойдет холодным, не говоря уже о высотных зданиях. Проблема может быть решена увеличением затрат на установку и обслуживания насосного оборудования. Но при условии существования более корректных решений контролирования количества т/э в отдельном помещении такой подход лишается смысла.

– **Технические ограничения.** Погрешность и разрешение (диапазон шкалы) пары термодатчиков, использующихся в теплосчетчиках, не достаточна, чтобы с приемлемой точностью измерить перепад температуры на одном-единственном ОП. Оговоренный в «Правила учета т/э, теплоносителя» [96] минимальный тепловой перепад между температурами теплоносителя подачи и обратки $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а перепад между входом и выходом семи-секционного радиатора отопления типа M140 может составлять доли градуса [65].

– **Сервисное обслуживание.** Теплосчетчик технически сложный прибор с сезонным циклом работы, поэтому его работу нужно периодически контролировать, минимум 2 раза в год, если не было поломок. Когда число счетчиков равно числу ОП и они заперты внутри квартир, специалистам обслуживающей организации делать это возможно только теоретически, на практике в многоквартирных домах такое не возможно.

Таким образом, теоретически возможная установка классических приборов учета тепла становится практически неосуществимой и бессмысленной.

Ключ к решению проблемы был найден в начале XX века датским инженером Одином Клориусом. Он предложил заменить непосредственное измерение потребляемого тепла измерением количества тепла, отдаваемого поверхностью каждого радиатора – косвенный метод измерения [73]. В результате таких измерений для каждого помещения мы получаем некую величину в условных единицах, пропорциональную фактическому потреблению тепла в данном помещении. При этом общая сумма затрат на тепло должна быть зафиксирована с помощью общедомового теплосчетчика. Затем вся сумма затрат на тепло, потребленное объектом, распределяется между собственниками пропорционально условным единицам потребления в их помещениях.

В качестве технического решения для регистрации теплоотдачи радиатора Клориус предложил так называемый радиаторный распределитель

тепла (или пропорционатор). Первый распределитель был испарительного типа – его действие основывалось на простом принципе испарения жидкости при нагревании. Испарительные распределители широко используются и в настоящее время для двухтрубных систем отопления. По внешнему виду они напоминают термометр. В них вставляется сменная ампула с подцвеченной слабоиспаряющейся жидкостью, закрепляемая на шкале, и показателем потребления тепла в комнате является количество испарившейся жидкости. Раз в год производится замер и перерасчет за полученное / использованное тепло. В промежутке между замерами расчеты за потребленное тепло производятся по арифметически усредненным показаниям прошлого периода. В настоящее время в России такой способ оплаты за тепло носит название «1/12» (одной двенадцатой).

В 1980-е годы были изобретены электронные распределители затрат на отопление [73]. В них встроены датчики температуры радиатора и наружного воздуха, а также небольшое счетное устройство. Они отличаются от испарительных более высокой точностью и предоставляют возможность автоматического снятия показаний, но стоят дороже. Пропорционатор монтируется прямо на поверхность радиатора рисунок 2.2.



Рисунок 2.2 – Установка пропорционатора (распределителя)
на поверхности ОП [125]

Стоимость пропорционатора на порядок меньше стоимости теплосчетчика, поэтому установка его на каждый ОП в квартире представляется вполне реальной. Но основной недостаток такого метода контроля количества в том, что его невозможно осуществить в отдельно взятой квартире. Эта система может быть установлена только на весь дом [95].

2.2 Математические модели теплообмена отдельного помещения

При математическом описании тепловых режимов зданий в целом и отдельных помещений можно выделить следующие основные направления моделирования [99]:

1. **Модель теплового режима отдельного помещения**, в которой учитываются: зависимость температуры воздуха внутри помещения, температуры ограждений (стен, перекрытий), от температуры источника, температуры внешней среды и температуры смежных помещений.

2. **Модель теплового источника**, при которой учитывается состояние теплового источника, когда его параметры и температура меняются под воздействием внешних условий. Модель источника т/э может быть объединена с моделью помещения, если температура источника постоянна.

3. **Модель системы тепловых источников**. Это тепловая модель стояка, когда на одной магистрали последовательно, параллельно или в более сложной комбинации располагается несколько источников, и нельзя пренебрегать влиянием одного источника на другие. Поведение этих источников будет влиять на тепловые режимы каждого помещения.

4. **Задача распределения т/э по зданию** - модель теплового узла и подсоединенных к нему домовых магистралей и стояков.

Математическому описанию тепловых режимов посвящено большое количество работ известных авторов [121, 122, 129]. Рассмотрим основные подходы.

1. Математическое моделирование тепловых процессов. Это сложная модель, которая основана на решении уравнений теплопроводности, например, для отдельного помещения, когда учитываются граничные условия на стенах, конвекционные потоки внутри помещения. В работах [121, 122] дан обстоятельный анализ тепловых процессов в помещениях с учетом радиационной способности источников, конвекционных процессов массо- и теплообмена, теплопроводности и теплоемкости материалов и других физических и технологических свойств. Следует отметить, что этот подход достаточно строгий, но его трудно применить к решению практических задач, когда нужно организовать контроль количества т/э.

2. Математические модели, в которых оперируют средними температурами. Этот подход описан в [61, 129], но он недостаточно развит с точки зрения применимости на практике для контроля количества т/э. В работе [129] при анализе теплового режима помещения используется одно дифференциальное уравнение для воздуха помещения, остальные параметры находятся в стационарном режиме. Это обстоятельство существенно ограничивает полноту анализа.

3. Анализ тепловых режимов зданий и помещений, основанный на применении стационарных уравнений, когда не учитывается развитие процессов во времени. Вся современная нормативная документация, как правило, основана на таком подходе. Он обладает рядом недостатков, а именно, не позволяет учитывать динамические процессы такие, как изменение температуры внешней среды, параметров помещения, например включение/выключение ОП, открывание/закрывание форточек и окон [44, 62, 115, 117].

Существующие математические модели подлежат развитию и уточнению. Например, при теплоснабжении отдельного помещения необходимо учитывать вентиляцию. Таким образом, система уравнений должна быть дополнена еще одним уравнением для температуры воздуха в помещении, где происходит естественный или искусственный воздухообмен.

Также необходимо учитывать экономические аспекты. При этом система известных уравнений может быть дополнена уравнениями для прибыли /расходов, которые возникают при внедрении новых методов регулирования тепловых режимов. Необходимо учитывать затраты на внедрение автоматизированных систем.

Таким образом, не существует приемлемых технических решений для контроля количества т/э поставляемой в отдельно взятое помещение. Первым шагом для решения этой проблемы будет разработка корректной математической модели, отвечающий изложенным требованиям, а именно, простоты технической реализации, точности результатов измерений т/э, учитывающей индивидуальное состояние объекта исследования.

2.2.1 Метод балансных дифференциальных уравнений

Предлагаемая оригинальная модель, основана на нелинейных балансных дифференциальных уравнениях, адаптирована для простоты технической реализации в условиях отопления отдельного помещения, получения достаточной точности результатов измерений т/э и учитывающая индивидуальные особенности участка системы отопления. Математическая модель теплового и воздушного режимов здания – система уравнений, описывающая состояние и изменение во времени параметров, характеризующих тепловой и воздушный режимы помещений в здании (температура воздуха и поверхностей, потоки инфильтрующегося и эксфильтрующегося воздуха) [99].

Модель формируется из нелинейных уравнений баланса тепловых потоков на поверхностях, в объеме воздуха помещения и нелинейных уравнений баланса потоков воздуха в нем. Локальные системы уравнений для отдельных помещений, объединенные в общую систему, составляют математическую модель теплового и воздушного режимов здания в целом.

Связь между помещениями осуществляется в основном за счет переноса потоков воздуха.

Такой подход потребует обработки большого количества однотипных вычислений, поэтому целесообразно обработку результатов измерений передать ЭВМ. При этом необходимо учитывать, что математические модели, предназначенные для использования в вычислительном комплексе АСКУЭ, имеют определенную специфику: обеспечение быстродействия при ее реализации, что может быть достигнуто относительной простотой модели. В то же время математическая модель должна обладать достаточной точностью, обеспечивающей адекватность результатов вычислений.

Для удовлетворения этих требований предлагается упростить математическую модель введением в нее ряда характеристик измеренных в натурных условиях:

- коэффициента теплопередачи ограждений;
- теплообмена;
- мощности внутренних источников теплоты;
- геометрических размеров;
- характеристик воздухопроницаемости;
- расхода приточного и вытяжного воздуха и др.

Подстановка измеренных величин в предлагаемую математическую модель позволяет получить частные случаи для каждого помещения в упрощенном виде, гарантирующем достаточную точность численного моделирования [44].

Математическое описание тепловых процессов в зданиях и помещениях, как правило, реализуется для стационарного режима [122]. При этом используются справочные значения параметров тепловых процессов, например, теплоемкость стен и перекрытий, теплоотдача ОП, характер температуры внешней среды и др. [117].

Вместе с тем эффективное энергосбережение требует динамического управления тепловыми процессами с тем, чтобы можно было учитывать

сезонное и суточное изменение температуры внешней среды, сказывающееся на объемах теплопотребления, и соответственно, регулировать параметры тепловой системы [25]. Таким образом, математическое описание тепловых процессов требует применения дифференциальных уравнений. Основой при составлении уравнений послужил закон Ньютона – Рихмана (1.1), в нем мощность теплового потока зависит от произведения теплового напора и коэффициента теплоотдачи, который в общем случае может зависеть от температуры, что определяет нелинейность получаемых уравнений.

Итак, рассмотрим математическую модель отдельного помещения. Предположим, что оно содержит внутренние стены и перекрытия, составляющие внутреннее ограждение, внешнюю стену с окном, тепловой источник, а также имеет смежные помещения. Прирост т/э происходит за счет ОП, тогда как ее убыль – за счет поглощения стен, передачу в смежные помещения (коридор), излучения во внешнюю среду через окно и внешнюю стену. Кроме того, учтем перенос воздушных масс за счет вентиляции, щелей в окнах и дверях.

Данный 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 уравнения баланса будем использовать т/э, подведенную к объекту и рассеянную в окружающую среду. Запишем уравнение изменения т/э воздушной массы Q_1 , заключенной в комнате объемом V_1 :

$$dQ_1/dt = G_{\text{ист}}(T_{\text{ист}} - T_1) - G_K(T_1 - T_2) - G_{\text{внеш}}(T_1 - T_{\text{внеш}}), \quad (2.1)$$

где $G_{\text{ист}}$ – коэффициент теплоотдачи ОП, (Вт/°С); $G_{\text{внеш}}$ – коэффициент теплопередачи во внешнюю среду, (Вт/°С); G_K – коэффициент теплопередачи во внутренние ограждения, (Вт/°С); T_1 – температура воздуха в помещении, (°С); T_2 – температура контура, (°С); $T_{\text{внеш}}$ – температура внешней среды,

(°C); $T_{\text{ист}} = 1/2(T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}})$ – средняя температура поверхности ОП, (°C); $T_{\text{вх}}$ и $T_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя подающего и обратного трубопровода, соответственно (°C).

Аналогичное уравнение запишем для системы контура, в которую входят стены, перекрытия и смежные помещения. Учтем, что температура смежных помещений не совпадает с температурой ограждений рассматриваемого помещения:

$$dQ_2/dt = G_k(T_1 - T_2) - G_{\text{см}}(T_1 - T_{\text{см}}), \quad (2.2)$$

где $G_{\text{см}}$ – коэффициент теплопередачи из внутреннего ограждения в соседнее помещение, (Вт/°C); $T_{\text{см}}$ – температура воздуха смежного помещения (°C).

Введем соотношения

$$Q_1 = C_1 T_1, \quad (2.3)$$

$$Q_2 = C_2 T_2, \quad (2.4)$$

где C_1 – теплоемкость помещения; C_2 – теплоемкость внутренних ограждений. С учетом соотношений (2.3) и (2.4) получим систему уравнений, описывающую поведение температур:

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = \frac{G_{\text{ист}}(T_{\text{ист}} - T_1)}{C_1} - \frac{G_k(T_1 - T_2)}{C_1} - \frac{G_{\text{внеш}}(T_1 - T_{\text{внеш}})}{C_1}, \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{G_k(T_1 - T_2)}{C_2} - \frac{G_{\text{см}}(T_2 - T_{\text{см}})}{C_2}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Такой вид уравнений более предпочтителен как с точки зрения моделирования температурного режима в исследуемом процессе, так и интерпретации результатов эксперимента.

Следует учесть, что эти уравнения (2.5) должны быть дополнены начальными условиями: температурой воздуха и ограждений в начальный момент времени. В данном случае температуры внешней среды и ОП являются параметрами.

Здесь следует заметить, что коэффициенты, входящие в уравнения (2.5), носят интегральный характер и могут быть найдены экспериментальным путем.

Для проверки адекватности математической модели и исследования тепловых процессов в помещении было проведено моделирование с использованием справочных значений параметров, учитывающих фактические теплотехнические характеристики наружных ограждений (приведенное сопротивление теплопередачи и воздухопроницания) [117]. Для понимания особенностей математической модели ниже приводятся следующие оценочные рассуждения.

Прежде всего, промоделируем ситуацию нагревания охлажденного воздуха помещения. Представим, что воздух и стены охлаждались за счет притока холодного воздуха из внешней среды (открытая створка окна). При этом вследствие инерционности внутренних ограждений охлаждение стен должно быть меньше, чем охлаждение воздуха. Затем система помещения приводится в естественное состояние, и происходит нагревание объема воздуха и стен за счет отопительных источников. Были выбраны следующие значения параметров:

$$\begin{aligned}\frac{G_{\text{ист}}}{C_1} &= 5,15 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}; & \frac{G_{\text{внеш}}}{C_1} &= 2,78 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}; \\ \frac{G_{\text{к}}}{C_1} &= 0,56 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}; & \frac{G_{\text{см}}}{C_1} &= 0,49 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}\end{aligned}$$

Уравнения (2.5) были дополнены начальными условиями: средняя температура воздуха в начальный момент времени равна 8 °С, температура внутреннего ограждения 12 °С. Также были заданы температуры: теплового источника 45 °С, внешней среды 17 °С, смежных помещений 17 °С. Температурные зависимости, полученные в результате моделирования, приведены на рисунке 2.3.

Из рисунка 2.3. видно, что начальные температуры стен и воздуха различны, причем температура воздуха помещения меньше температуры ограждений. Зависимости носят нелинейный характер с фазой быстрого нарастания температуры воздуха и более медленного нарастания температуры ограждений. Обе зависимости приходят к стационарному

режиму спустя некоторое время. Это время переходного процесса само по себе является очень важной характеристикой, поскольку позволяет учесть инерционность нагрева или остывания помещения. Выбранные диапазоны температур для наиболее яркой демонстрации такие, что ограждение не успевает остывать в процессе нагрева помещения ОП.

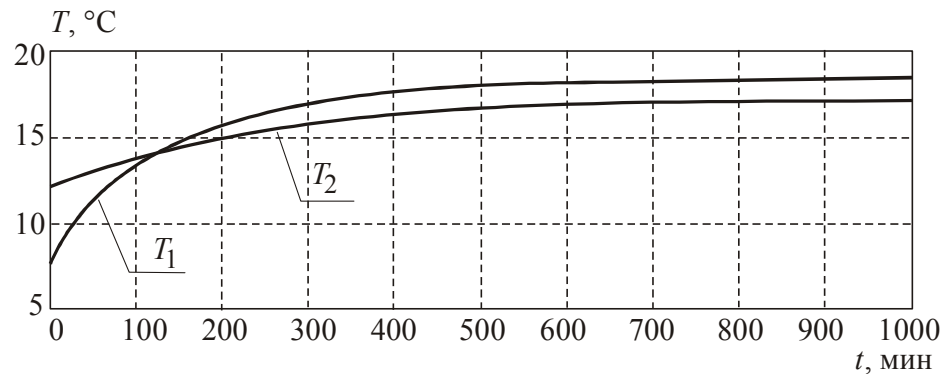


Рисунок 2.3 – Зависимости температур воздуха T_1 и ограждений помещения T_2 от времени

Проведем исследование влияния начальных условий на тепловой режим помещения.

Примем начальные температуры воздуха и ограждения равными друг другу. Далее изменялось значение начальных температур, тогда как остальные параметры не изменялись с течением времени. В результате температура помещения увеличивалась: происходило нагревание. Полученные кривые для разных значений начальных температур приведены на рисунке 2.4.

На рисунке 2.4 можно наблюдать поведение кривых зависимости температуры воздуха помещения и ограждения. Эти зависимости имеют нелинейный характер: происходит быстрое нарастание температуры воздуха и более медленное нарастание температуры ограждения.

Обе зависимости приближаются к стационарному режиму спустя некоторое время. Можно сделать вывод, что изменение начальных условий не влияет на значение максимальной температуры нагрева воздуха и

ограждения. Тем не менее, значения максимальной температуры воздуха и ограждения помещения различны. Для воздуха эта температура составляет 18,4 °С, а для ограждения – 17 °С. Такое различие можно объяснить тем, что при моделировании температура смежных помещений была задана равной 17 °С, что не дает температуре внутренних ограждений подняться выше данного значения за счет отдачи тепла смежным ограждениям.

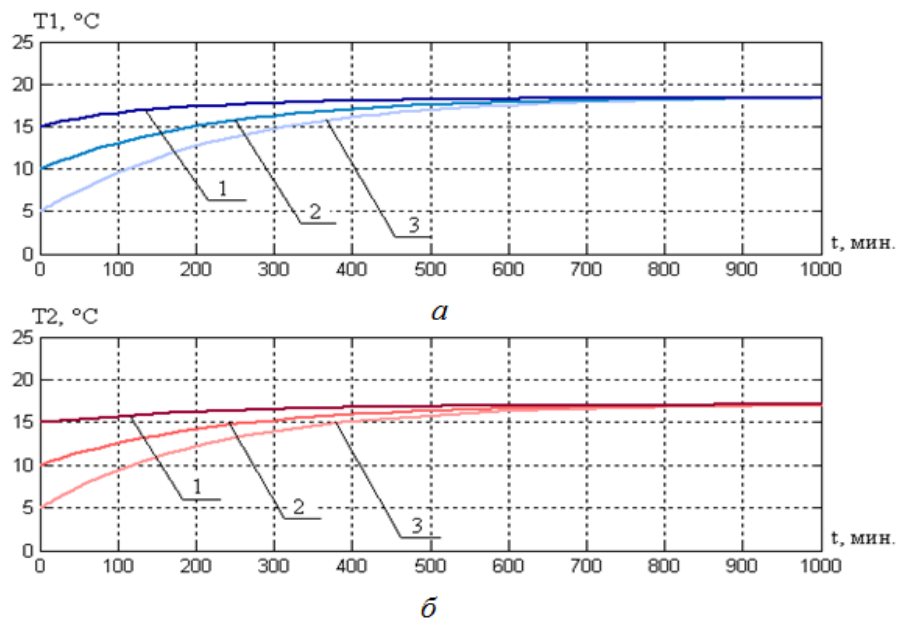


Рисунок 2.4 – Зависимости температуры воздуха (а) и температуры ограждения (б) от времени при изменении начальных условий:

$$1 - T_{\text{нач}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}; 2 - T_{\text{нач}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}; 3 - T_{\text{нач}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Проанализируем влияние изменения температуры ОП на температурный режим помещения. Примем начальные температуры стен и воздуха различными. Предположим, что температура воздуха помещения меньше температуры ограждения. Значение температуры ОП изменялось от 20 до 75 °С, при этом остальные параметры оставались постоянными. Полученные модельные зависимости приведены на рисунке 2.5.

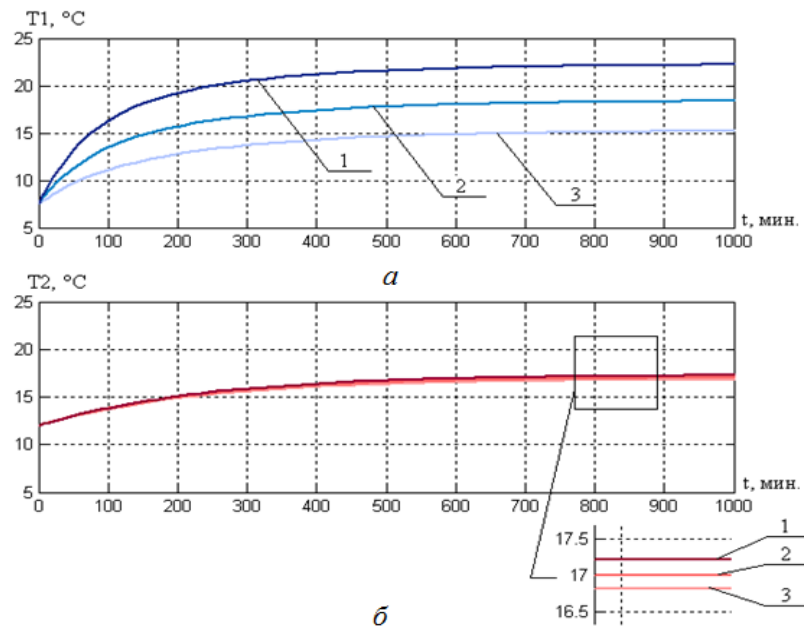


Рисунок 2.5 – Зависимости температуры воздуха (а) и температуры ограждений помещения (б) от времени при температуре ОП:

$$1 - T_{\text{ист}} = 75 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad 2 - T_{\text{ист}} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad 3 - T_{\text{ист}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Видно, что температура воздуха помещения стремится к стационарному режиму через некоторый период времени. Проведенное моделирование позволило установить максимальные температуры нагрева воздуха и ограждений помещения при различных температурах теплового источника. Наиболее приближенным к реальным условиям является случай, когда температура ОП 45 °C, а воздух прогревается до 18,4 °C. Как видно из графика на рисунке 2.5,б, температура внутренних ограждений помещения практически не изменяется при увеличении температуры ОП. Это можно объяснить высокой тепловой инерционностью ограждений. Способность к нагреванию стен и воздуха в помещении существенно различается, поэтому воздух нагревается быстрее. Кроме того, следует учитывать влияние смежных помещений на внутренние ограждения.

Исследуем влияние смежных помещений на тепловой режим анализируемого помещения. Теоретически, если температура воздуха в помещении меньше температуры ограждения, то внутренние ограждения помещения должны отдавать т/э в воздух. Тогда сначала будет происходить

процесс остывания ограждений и рост температуры воздуха, что мы и наблюдаем на рисунке 2.6.

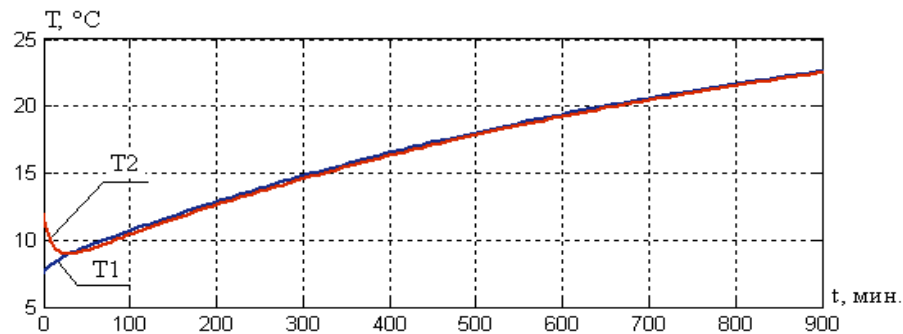


Рисунок 2.6 – Зависимость температуры воздуха T_1 и температуры ограждений помещения T_2 от времени без учета влияния смежных помещений

Если соседние помещения имеют температуру ограждений выше, чем в моделируемом помещении, то за счет отдачи тепла смежными ограждениями растет температура внутренних ограждений и воздуха в помещении. Заметим, что рост температур в таком случае оказывается более стремительным и происходит за счет дополнительного притока тепла. Результаты моделирования ситуации с учетом влияния смежных помещений представлены на рисунке 2.7.

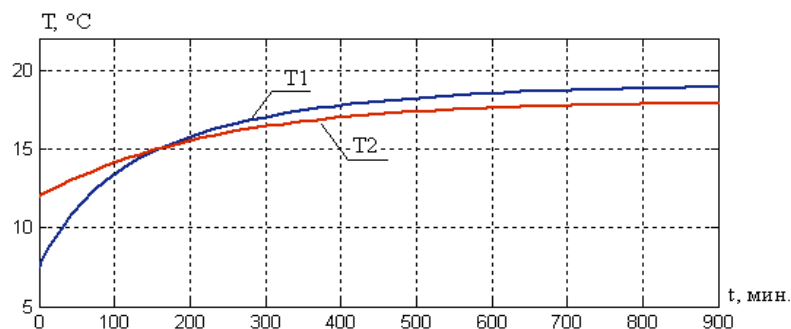


Рисунок 2.7 – Зависимости температуры воздуха T_1 и температуры ограждений помещения T_2 от времени с учетом влияния смежных помещений

Полученные модельные зависимости и представленные на рисунках 2.4–2.7 хорошо коррелируют с результатами, получаемыми на практике.

Таким образом, проведенное выше моделирование тепловых процессов в отдельном помещении позволяет сделать следующие выводы и заключения.

1. Математическая модель на основе нелинейных дифференциальных балансных уравнений (2.5) достаточно полно описывает поведение тепловых процессов в отдельных помещениях и отражает реальную ситуацию. При необходимости модель может быть обобщена на здания и сооружения.

2. Анализ зависимостей, полученных путем моделирования (рисунки 2.3–2.7), доказывает адекватность математической модели, так как поведение температурных зависимостей не противоречит законам физики и теплотехники.

3. Моделирование позволяет найти основные характеристики тепловых режимов помещения, а именно, стационарное состояние температуры воздуха помещения, стен и перекрытий, и описать процессы нагрева и остывания объекта при изменении параметров системы.

4. Предлагаемая математическая модель может служить основой для создания алгоритма и программного обеспечения АСКУТЭ как отдельных помещений, так и целых зданий и сооружений.

2.2.2 Уравнение для отопительного прибора

В предыдущем подразделе 2.2.1 при моделировании использовались справочные значения тепловых параметров, что не позволяет учесть индивидуальные особенности системы теплоснабжения помещения. Определение тепловых параметров из экспериментальных исследований позволит учитывать тип и состояние источников тепла, внешнего и внутреннего ограждения, наличие в помещении мебели и других предметов, а также людей и тепловыделяющих приборов.

Тепловой режим помещения обеспечивается активными ОП, температура которых в предыдущих рассуждениях (2.2.1) была задана

постоянной. В действительности мы имеем дело с динамическими процессами, когда температура ОП меняется в процессе эксплуатации.

Рассмотрим уравнение теплового баланса для теплового источника

$$\frac{dQ_{\text{ист}}}{dt} = M \Delta T_{\text{ист}} - G_{\text{ист}} (T_{\text{ист}} - T_1), \quad (2.6)$$

где $Q_{\text{ист}}$ – количество т/э ОП, (Дж); $M = c_3 m$ – расход т/э, (Вт/°C); c_3 – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°C); m – массовый расход теплоносителя, (кг/с); $\Delta T_{\text{ист}} = T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}$ – температурный напор теплоносителя (°C); $T_{\text{ист}} = 1/2(T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}})$ – средняя температура поверхности ОП, (°C); $T_{\text{вх}}$ и $T_{\text{вых}}$ – температуры теплоносителя подающего и обратного трубопровода (°C).

В первом приближении будем считать, что температура теплоносителя и температура поверхности ОП пропорциональны друг другу с поправочным коэффициентом $C_{\text{ист}}$:

$$Q_{\text{ист}} = T_{\text{ист}} G_{\text{ист}}$$

где $C_{\text{ист}} = c_3 \rho_3 V_3 + c_{\text{Me}} \rho_{\text{Me}} V_{\text{Me}}$, теплоемкость ОП; ρ_3 – плотность теплоносителя, (кг/м³); V_3 – объем теплоносителя, (м³); c_{Me} – удельная теплоемкость металла ОП, Дж/(кг·°C); m_{Me} – масса металла ОП (кг).

В уравнении (2.6) прирост т/э происходит за счет подачи теплоносителя, а расход ее – за счет теплоотдачи в воздушную среду.

Для проверки модели рассмотрим режим остывания ОП. В этом случае прекращается подача теплоносителя и $M = 0$ в начальный момент времени $t = 0$.

Результаты моделирования приведены на рисунке 2.8, где параметром является величина теплоемкости ОП $C_{\text{ист}}$.

Анализ полученных результатов приводит к очевидным выводам: уменьшение температуры происходит по экспоненциальному закону, причем постоянная времени экспоненты (скорость затухания) зависит от теплоемкости ОП.

В реальной ситуации возможны случаи включения/выключения ОП и его регулировки. Следовательно, температура ОП будет функцией времени. Поэтому систему уравнений (2.5), описывающих тепловой режим отдельного помещения, нужно дополнить уравнением (2.6).

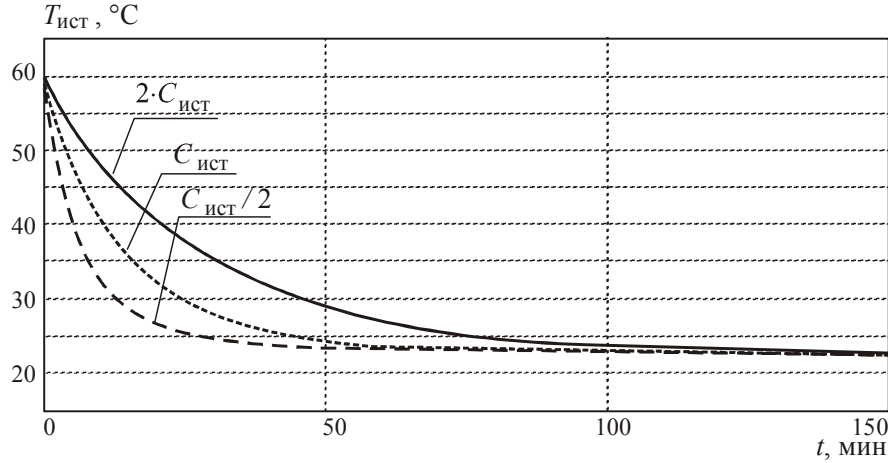


Рисунок 2.8 – Остывание ОП в зависимости от его теплоемкости

Таким образом, получим систему уравнений, описывающую тепловой режим помещения с учетом изменения температуры ОП:

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = \frac{G_{ист}(T_{ист} - T_1)}{C_1} - \frac{G_k(T_1 - T_2)}{C_1} - \frac{G_{внеш}(T_1 - T_{внеш})}{C_1}; \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{G_k(T_1 - T_2)}{C_2} - \frac{G_{см}(T_2 - T_{см})}{C_2}; \\ \frac{dT_{ист}}{dt} = \frac{M \cdot \Delta T_{ист}}{C_3} - \frac{G_{ист}(T_{ист} - T_1)}{C_3}. \end{cases} \quad (2.7)$$

Эти уравнения должны быть дополнены начальными условиями, например, температурой воздуха, ограждающих конструкций и ОП в начальный момент времени.

Отличие системы (2.7) от ранее рассмотренных уравнений (2.5) заключается в том, что она содержит третье уравнение, которое описывает динамику поведения теплового источника и учитывает его инерционные свойства, скорость подачи теплоносителя и другие параметры. Данную систему уравнений можно применить для расчета теплового режима системы помещений, как в стационарном, так и в динамическом режиме.

Система уравнений (2.7) устанавливает взаимосвязь коэффициентов теплопередачи во всей цепочке подведения, преобразования и рассеяния т/э, а именно: теплоноситель – ОП – воздух – ограждения. Реальная оценка каждого из этих соотношений в конкретных условиях работы позволяет определить влияние различных параметров на процесс теплообмена.

При решении системы уравнений (2.7) можно сделать некоторые приближения.

1. Инерционные свойства ОП характеризуются постоянной времени $\tau_{\text{ист}} = \frac{C_{\text{ист}}}{G_{\text{ист}}}$. Постоянная времени $\tau_{\text{ист}}$ много меньше постоянных времени для воздуха помещений $\tau_{\text{внеш}} = \frac{C_1}{G_{\text{внеш}}}$ и для ограждений $\tau_k = \frac{C_2}{G_k}$. Поэтому уравнение для ОП можно решать независимо, полагая T_1 и T_2 постоянными.

2. Уравнения для воздуха и ограждений можно решать совместно без учета третьего уравнения, если температура ОП поддерживается постоянной

Теплоемкость ОП в помещении C_3 можно изменить, если поставить ОП из другого материала. К сожалению, игнорировать такую возможность при большом числе ОП в системе отопления одного объекта нельзя, поэтому рассмотрим случай остывания источника тепла при изменении его теплоемкости $C_{\text{ист}}$ (рисунок 2.8). Результаты моделирования представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Остывание ОП и воздуха в помещении

Соотношение теплоемкости воздуха C_1	Время остывания ОП, мин	Время остывания воздуха, мин
$C_{\text{ист}}(C_1/2)$	35	1300
$C_{\text{ист}}(C_1)$	50	1400
$C_{\text{ист}}(2C_1)$	85	1500

Теплоемкость воздуха можно изменить, если внести в помещение мебель и другие предметы, и, таким образом, определить время остывания воздуха при изменении теплоемкости C_1 (рисунок 2.9).

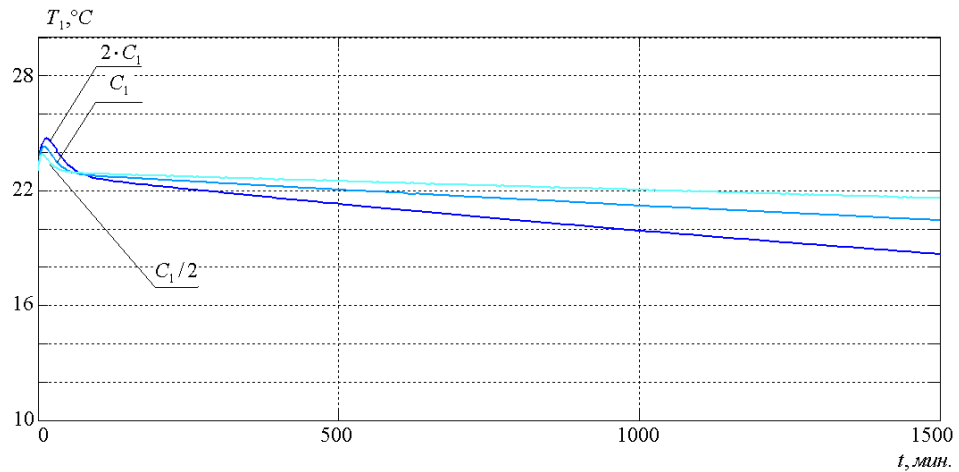


Рисунок 2.9 – Изменение температуры воздуха в помещении при его остывании в зависимости от теплоемкости C_1

Результаты моделирования показывают, что время τ остывания/нагрева ОП находится в пределах от 30 до 90 мин. Время нагрева/остывания воздуха зависит от объема помещения и в нашем случае составляло от 1000 до 1500 мин. Время нагрева/ остывания внутренних ограждений составляет порядка 2000–3000 мин.

2.2.3 Математическая модель системы теплоснабжения

Математическую модель теплоснабжения отдельного помещения можно обобщить на систему помещений. Рассмотрим случай, когда система теплоснабжения последовательно проходит через ряд комнат. Такая ситуация чаще всего встречается при вертикальной разводке системы теплоснабжения, однако она имеет место и в системах с горизонтальной разводкой.

Уравнение теплового баланса для i -го теплового источника в отдельном i -м помещении записывается в соответствии с третьим уравнением в системе (2.7).

Если имеется m помещений, то получим систему из m уравнений. В общем случае эта система уравнений является связанной, если температура воздуха T_1^i зависит от температур воздуха смежных помещений T_1^{i-1} , T_1^{i+1}

вследствие теплопередачи из одного помещения в другое через систему внутренних ограждений и коридоров. Данная система уравнений достаточно громоздкая, и ее решение вызывает определенные трудности.

Система уравнений может быть существенно упрощена, если считать, что все помещения изолированы друг от друга с точки зрения обмена т/э. В этом случае система уравнений превращается в цепочную систему, когда можно все уравнения решать последовательно, начиная с уравнения, которое описывает тепловой режим помещения, примыкающего к входной магистрали.

Пусть стояк примыкает к входной магистрали, тогда температура магистрали известна: $T_{\text{вх.изв}} = T_0$.

Найдем температуру $T_{\text{вых}}^i$, решая цепочную систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{dQ_{\text{ист}}^1}{dt} = M^1 (T_0 - T_{\text{вых}}^1) - G_{\text{ист}}^1 (T_{\text{ист}}^1 - T_{\text{воз}}^1); \\ \frac{dQ_{\text{ист}}^2}{dt} = M^2 (T_{\text{вых}}^1 - T_{\text{вых}}^2) - G_{\text{ист}}^2 (T_{\text{ист}}^2 - T_{\text{воз}}^2); \\ \dots \end{cases} \quad (2.8)$$

В этом случае можно решать уравнения (2.8) последовательно, начиная с первого. Чтобы описать тепловой режим помещения в целом, уравнения для теплового источника (2.8) нужно дополнить известными уравнениями для воздуха и ограждений помещения (2.7) [61]:

$$\begin{cases} \frac{dT_1^i}{dt} = \frac{G_{\text{ист}}^i (T_{\text{ист.ср}}^i - T_1^i)}{C_1^i} - \frac{C_k^i (T_1^i - T_2^i)}{C_1^i} - \frac{G_{\text{внеш}}^i (T_1^i - T_{\text{внеш}}^i)}{C_1^i}; \\ \frac{dT_2^i}{dt} = \frac{C_k^i (T_1^i - T_2^i)}{C_2^i} - \frac{C_{\text{см}}^i (T_2^i - T_{\text{см}}^i)}{C_2^i}; \\ \frac{dT_{\text{ист}}^i}{dt} = \frac{M^i (T_{\text{вх}}^i - T_{\text{вых}}^i)}{C_3^i} - \frac{G_{\text{ист}}^i (T_{\text{ист.ср}}^i - T_1^i)}{C_3^i}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Для каждого i -го помещения имеется система из трех уравнений (2.9), где неизвестными являются $T_{\text{вых}}^i$, T_1^i , T_2^i . Систему (2.9) необходимо дополнить начальными условиями для температур $T_{\text{вых}}^i$, T_1^i , T_2^i .

Рассмотрим стационарный режим при следующих допущениях:

- 1) $\frac{dT}{dt} = 0$;
- 2) все смежные помещения имеют одинаковую температуру $T_1^i = T_2^i$;
- 3) $G_{\text{ист}} = \text{const}$, $G_{\text{внеш}} = \text{const}$.

В этом случае система уравнений (2.9) приводится к виду

$$\begin{cases} G_{\text{ист}}^i (T_{\text{ист.ср}}^i - T_1^i) = G_{\text{внеш}}^i (T_1^i - T_{\text{внеш}}^i); \\ M^i (T_{\text{вх}}^i - T_{\text{вых}}^i) = G_{\text{ист}}^i (T_{\text{ист.ср}}^i - T_1^i). \end{cases} \quad (2.10)$$

Физическая сущность уравнений (2.10) заключается в следующем: в стационарном режиме тепловая мощность, отдаваемая источником, идет на нагревание воздуха, а избыточная часть т/э воздуха полностью передается во внешнюю среду.

Полученные уравнения можно применить для расчета системы теплоснабжения. Будем считать, что заданы температуры внешней среды: $T_{\text{внеш.мин}}$, $T_{\text{внеш.ср.д}}$, $T_{\text{внеш.мак}}$. Задана комфортная температура воздуха $T_{\text{комф}}$. При известном коэффициенте $G_{\text{внеш}}^i$ и известной температуре $T_{\text{вх}}^i$ с учетом формулы (2.10) найдем недостающие величины: коэффициент теплоотдачи i -го ОП $G_{\text{ист}}^i$, температуру поверхности обратного трубопровода $T_{\text{вых}}^i$ и мощность, отдаваемую i ОП, $P_{\text{тепл}}^i$. Следует учесть, что температура обратного трубопровода i ОП будет равна температуре подающего трубопровода $(i+1)$ ОП, т.е. $T_{\text{вых}}^i = T_{\text{вх}}^{i+1}$. Максимальная мощность, которая расходуется в системе при самых неблагоприятных условиях (при самых низких температурах внешней среды):

$$P_{\text{тепл.мак}} = G_{\text{внеш}} (T_{\text{в.комф}} - T_{\text{внеш.мин}}). \quad (2.11)$$

Зная отдаваемую тепловую мощность, температуру ОП $T_{\text{вх}} = T_0$ и температуру воздуха в помещении, с учетом формулы (2.11) можно вычислить коэффициент теплоотдачи ОП. Для этого необходимо определить

температуру поверхности обратного трубопровода $T_{\text{ВЫХ}}$, задавая максимальное значение M :

$$\begin{aligned} P_{\text{тепл.мах}} &= G_{\text{внеш}} (T_{\text{в.комф}} - T_{\text{внеш.мин}}) = \\ &= G_{\text{ист}} \left(\frac{T_{\text{ВХ}} + T_{\text{ВЫХ}}}{2} - T_{\text{в.комф}} \right) = M (T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВЫХ}}). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Используя равенство $G_{\text{ист}} \left(\frac{T_{\text{ВХ}} + T_{\text{ВЫХ}}}{2} - T_{\text{в.комф}} \right) = M (T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВЫХ}})$, найдем

$$T_{\text{ВЫХ}} = \frac{G_{\text{ист}} T_{\text{ВОЗ}} - T_{\text{ВХ}} \left(\frac{G_{\text{ист}}}{2} - M \right)}{\frac{G_{\text{ист}}}{2} + M}. \quad (2.13)$$

Теперь можно определить коэффициент теплоотдачи, т.е. способность ОП отдавать тепло, и тепловую мощность:

$$G_{\text{ист}} = P_{\text{тепл.мах}} \left(\frac{2T_{\text{ВХ}} - \frac{P_{\text{тепл.мах}}}{M}}{2} - T_{\text{в.комф}} \right)^{-1}; \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{тепл}} &= M \left[T_{\text{ВХ}} - \frac{G_{\text{ист}} T_{\text{ВОЗ}} - T_{\text{ВХ}} \left(\frac{G_{\text{ист}}}{2} - M \right)}{\frac{G_{\text{ист}}}{2} + M} \right] = \\ &= \frac{2MG_{\text{ист}} (T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВОЗ}})}{G_{\text{ист}} + 2M}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Уравнение (2.15) может служить регулировочной характеристикой, так как выражает зависимость $P_{\text{тепл}}$ от расхода теплоносителя M . Семейство регулировочных характеристик при различных значениях коэффициента теплоотдачи $G_{\text{ист}}$ приведено на рисунке 2.10.

Для различных коэффициентов $G_{\text{ист}}$ 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 нами формула показывает существование предела теплоотдачи у ОП и дает возможность рассчитать наиболее эффективные режимы работы с точки зрения передачи энергии. Описанный эффект наблюдает любой пользователь

ОП при регулировке теплоподдачи в помещении вентилем, установленным на ОП: фактическая регулировка температуры ОП начинается при практически закрытом вентиле, т.е. в точке перелома представленных на рисунке характеристик.

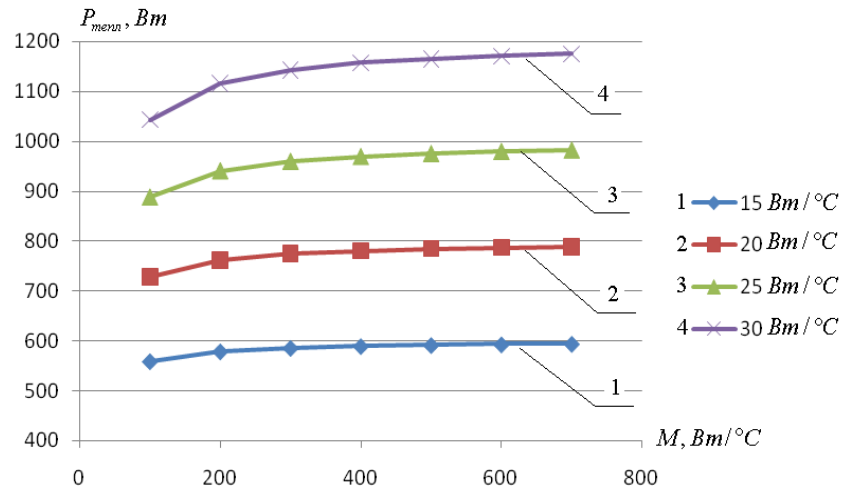


Рисунок 2.10 – Семейство регулировочных характеристик при различных значениях коэффициента теплоотдачи $G_{ист}$

Далее по принципу цепочной системы вычисляем значения коэффициента теплоотдачи для каждого ОП при максимальной нагрузке, соответствующей минимальной температуре внешней среды.

Определив коэффициенты теплоотдачи ОП по предельной (максимальной) нагрузке, можно рассчитать систему режимов для регулировки, когда температура внешней среды будет выше минимальной. Рассмотрим два случая регулировки:

- 1) все ОП включены последовательно, шунты (мосты) отсутствуют;
- 2) регулировка с использованием мостов.

В первом случае изменяется $T_{внеш}$, например, $T_{внеш} = T_{внеш.сред}$. Тогда тепловая мощность, отдаваемая во внешнюю среду, уменьшится и составит

$$P_{тепл.сред} = G_{внеш} (T_{в.комф} - T_{внеш.сред}).$$

Следовательно, ОП должен уменьшить теплоотдачу. Поскольку значение $G_{ист}$ уже выбрано, то теплоотдача может уменьшиться только за

счет температуры $T_{\text{ист}}$, которая при известной величине $P_{\text{тепл.сред}}$ будет определяться выражением

$$T_{\text{ист}} = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2} = \frac{P_{\text{тепл.сред}}}{G_{\text{ист}}} + T_{\text{в.комф}}.$$

При известной температуре $T_{\text{ист}}$ и заданной температуре $T_{\text{вх}}$ находим $T_{\text{вых}}$ из уравнения $T_{\text{ист}} = (T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}})/2$.

Определив значение $T_{\text{вых}}$, можем найти требуемый расход теплоносителя:

$$M = \frac{P_{\text{тепл}}}{T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}}.$$

Недостатком такого способа регулировки является необходимость изменения давления в стояке, в результате чего может возникнуть разбалансировка стояков.

2.2.4 Параллельное включение тепловых источников

Наряду с последовательным включением тепловых источников, которое было рассмотрено выше, часто в системах теплоснабжения используется параллельное включение двух источников. Наиболее распространенный случай – когда имеется магистраль (стояк), и к ней подключается не только сам ОП, но и шунт или мост, который включен параллельно этому ОП. Шунт служит для того, чтобы обеспечивать постоянное давление в магистрали при регулировке подачи теплоносителя в ОП. При математическом описании такого включения будем изначально пользоваться стационарным режимом и уравнением для теплового источника, полученным в подразделе 2.2.3.

Рассмотрим два источника, через которые проходит какое-то количество теплоносителя в единицу времени с расходом M_1 и M_2 соответственно (рисунок 2.11).

Кроме того, у этих источников, расположенных на параллельных ветках, различные коэффициенты теплоотдачи $G_{\text{ист1}}$ и $G_{\text{ист2}}$. Поскольку имеем

параллельное включение, то температура на входе у обоих источников одинакова, т.е. $T_{вх}$ будет одна и та же. Точно так же при смешении теплоносителей из параллельных веток с разными выходными температурами $T_{вых1}$ и $T_{вых2}$ температура на выходе будет общей - $T_{вых}$. При этом будем считать, что температура на входе задается, а температура на выходе неизвестна.

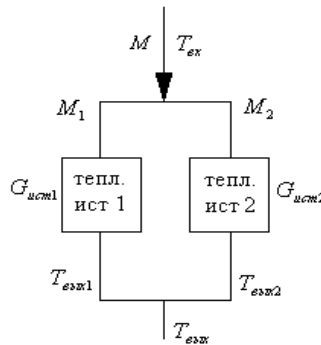


Рисунок 2.11 – Схема параллельного включения тепловых источников

Кроме того, полагаем, что нам известен общий расход теплоносителя $M = M_1 + M_2$, расходы M_1 и M_2 мы тоже знаем. Также зададим суммарную тепловую мощность, отдаваемую тепловыми источниками: $P_{тепл} = P_{тепл1} + P_{тепл2}$.

Неизвестными величинами являются $T_{вых1}$ и $T_{вых2}$. Для их нахождения воспользуемся результатами предыдущего подраздела 2.2.3

Суммарную выходную мощность находим следующим образом:

$$P_{тепл} = G_{внеш} (T_{в.комф} - T_{внеш}).$$

Полученное значение подставим в формулу $P_{тепл} = M(T_{вх} - T_{вых})$, записывая выражения для каждой ветки.

Второе уравнение получим из условия, что при смешении тепловых потоков с разными температурами $T_{вых}$ выполняется условие $MT_{вых} = M_1T_{вых1} + M_2T_{вых2}$.

Таким образом, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} P_{тепл} = P_{тепл1} + P_{тепл2} = M_1(T_{вх} - T_{вых1}) + M_2(T_{вх} - T_{вых2}); \\ MT_{вых} = M_1T_{вых1} + M_2T_{вых2}. \end{cases}$$

Полученную систему решаем относительно $T_{\text{вых1}}$ и $T_{\text{вых2}}$.

Рассмотрим частный случай, когда один из тепловых источников представляет собой шунт. Тогда можно сделать приближение $G_{\text{ист2}} \ll G_{\text{ист1}}$. То есть тепловая мощность в помещении отдается только одним источником ($P_{\text{тепл2}} \approx 0$), а роль шунта сводится к регулировке расхода: $M_2 \neq 0$, $T_{\text{вых2}} = T_{\text{вх}}$.

Общий расход теплоносителя в системе не меняется, но перераспределяется.

Таким образом, получим систему из трех алгебраических уравнений, в которых неизвестными будут температуры на выходе и расходы M_1 и M_2 . В качестве третьего уравнения можно использовать соотношение, в котором положим $M = M_1 + M_2$, при этом расход M считается заданным:

$$P_{\text{тепл1}} = \frac{2M_1 G_{\text{ист1}} (T_{\text{вх}} - T_{\text{в}})}{G_{\text{ист1}} + 2M_1}. \quad (2.16)$$

Регулировочная характеристика имеет нелинейный характер согласно формуле (2.16).

В нашем случае важно, что математическая модель позволяет учитывать потребляемую т/э, как отдельным помещением, так и взаимосвязанными группами помещений в условиях регулирования и других динамических изменениях условий эксплуатации ОП.

Выводы к главе 2

1. Разработана математическая модель теплообмена отдельного помещения в многоквартирном жилом доме, представляющая собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, которая 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 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. Интерактивный характер математической модели позволяет использовать ее для анализа перетоков т/э при параллельном (последовательном) обогреве нескольких помещений и в зависимости от способа разводки и расположения ОП. Исследование на основе математической модели позволило установить характер и степень влияния способа подключения ОП к системам теплоснабжения для случая вертикальной однотрубной разводки и мостиковых схем подключения.

4. Полученные результаты теоретических исследований и компьютерного моделирования хорошо согласуются с известными литературными данными [71, 121, 122, 129].

3 Оценка погрешностей измерения тепловой энергии

3.1 Оценка погрешностей вычисления тепловой энергии устройствами с разным количеством датчиков температуры

Важной характеристикой АСКУТЭ, определяющей ее пригодность в качестве коммерческой, является погрешность производимых измерений и вычислений т/э. Вопросы точности вычислений рассматриваются в методике измерения т/э, отдаваемой ОП (Приложение А). Рассмотрим вопросы, связанные с точностью определения тепловой мощности, т/э, отдаваемой ОП. Вычисление тепловой мощности, отдаваемой ОП, $P_{\text{тепл}}$ производится в соответствии с законом Ньютона – Рихмана (1.1), представленном в виде:

$$P_{\text{тепл}} = G_{\text{ист}}(T_{\text{ист}} - T_1) \quad (3.1)$$

где $G_{\text{ист}}$ – коэффициент теплоотдачи, (Вт/ °С); $T_{\text{ист}}$ – температура поверхности ОП (°С); T_1 – температура воздуха (°С). Погрешность нахождения тепловой мощности определяется погрешностями измерения температур T_1 и $T_{\text{ист}}$, а также погрешностью нахождения $G_{\text{ист}}$. Рассмотрим ряд частных случаев.

Погрешности измерения можно разделить на систематические и случайные [75]. Случайная погрешность может возникать из-за несовершенства датчика, физического влияния на него, падения напряжения в сети электропитания, неправильного обращения со средством измерения, ошибок при записи результатов. К систематическим погрешностям относятся отличие температуры внешней поверхности радиатора от температуры теплоносителя, отличие измеряемой температуры внешней поверхности радиатора в точке измерения от среднего значения, несоответствие показаний термодатчика температуре внешней поверхности радиатора за счет плохого теплового контакта. Эти расхождения могут составлять единицы градусов.

Поскольку измерения температуры проводятся за достаточно длительное время, а постоянная времени применяемых термодатчиков составляет доли и единицы миллисекунд, влияние случайной погрешности за счет усреднения будет существенно уменьшаться. Дополнительное усреднение можно получить, применяя процедуры сглаживания (фильтрации) [65, 75]. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать влияние только систематических погрешностей. Рассмотрим следующие случаи:

– коэффициент теплоотдачи $G_{\text{ист}}$ находится из справочников и/или из результатов измерений в специализированных лабораториях – распределители классические;

– коэффициент теплоотдачи $G_{\text{ист}}$ находится в условиях эксплуатации – измерители т/э с калибровкой.

Погрешность нахождения $G_{\text{ист}}$ в этих случаях будет различной.

Чаще всего при вертикальной разводке системы теплоснабжения в помещениях используют распределители стоимости потребленной теплоты от комнатных ОП. Проведем статистическую оценку неопределенностей результатов измерений теплоотдачи ОП распределителями разного типа и измерителями т/э с калибровкой. Для количественной оценки относительных погрешностей измерений будем опираться на уравнение (3.1).

Погрешность измерения теплоотдачи ОП будем находить, как сумму погрешностей определения отдельных величин, входящих в выражение (3.1):

$$\delta_P = \delta_G + \delta_{t_{\text{пов}}} + \delta_{t_{\text{в}}},$$

где δ – относительная погрешность измерения.

Величину относительной погрешности определяем по выражению [26, 27]:

$$\delta_x [\%] = \frac{\Delta X}{X_{\text{ист}}} 100 \%, \quad (3.2)$$

где ΔX – абсолютная погрешность; $X_{\text{ист}}$ – истинное значение.

Погрешность нахождения коэффициента теплоотдачи в свою очередь определяется погрешностью измерения (вычисления) характеристики отдельного ОП каждого из различных типов (чугунные, алюминиевые радиаторы, конвекторы и т.п.) δ_G^1 и погрешностью за счет изменения коэффициента $G_{\text{ист}}$ в процессе эксплуатации ОП δ_G^2 .

Погрешность измерения температуры поверхности ОП также можно разделить на две составляющие: погрешность температурного датчика $\delta_{\text{тнов}}^1$, технологическая погрешность (за счет температурного контакта и несоответствия температуры в точке измерения и средней температуры ОП) $\delta_{\text{тнов}}^2$.

Оценку сравнительных погрешностей будем проводить при условиях [120]:

- средняя температура теплоносителя в ОП от 40 до 60 °С;
- нормируемая температура воздуха – (20 ± 2) °С (температура воздуха, измеренная в комнате со стабильным климатом на высоте 0,75 м от пола и на расстоянии 1,5 м от поверхности ОП).

В настоящее время находят применение распределители стоимости потребляемой т/э следующих типов.

1. Одноточковый, когда с помощью одного датчика измеряется температура поверхности ОП в какой-либо точке, принимаемая за среднюю. При этом температура воздуха помещения не измеряется и по умолчанию принимается равной 20 °С.

Оценим составляющие погрешности в этом случае. Коэффициент теплоотдачи отдельного ОП найдем из формулы (3.1) обратным пересчетом:

$$G_{\text{ист}} = \frac{P_{\text{тепл}}}{T_{\text{ист}} - T_1}.$$

Тепловая мощность находится пропорционально рассчитываемой т/э на основе измерений температур и расхода по подающему трубопроводу с помощью теплосчетчика.

При погрешности измерения температуры в лабораторных условиях в $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, наименьшем значении разницы температур подающего и обратного трубопроводов ($T_{\text{вх}}$ и $T_{\text{вых}}$), равном $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, и погрешности расходомера 2% [102] с учетом выражения (3.2) получим:

$$\delta_G^1 = \frac{100(0,1+0,1)}{2} + 2 = 12\%.$$

Погрешность, возникающую при длительной эксплуатации ОП, можно оценить следующим образом. Падение отдаваемой тепловой мощности за год составляет порядка 3% [120]. При трехлетней эксплуатации ОП погрешность за счет ухудшения его свойств составит

$$\delta_G^2 = 3 \cdot 3 = 9\%.$$

Оценим погрешность измерения температуры воздуха. Поскольку температура воздуха не измеряется, то максимальная абсолютная погрешность будет составлять $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как нормируемую температуру воздуха приняли равной $(20 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда относительная погрешность

$$\delta_{tв} = \frac{2}{20} \cdot 100 = 10\%.$$

Оценим погрешность измерения температуры поверхности ОП. Для этого примем максимальную абсолютную погрешность соизмеримой с дискретной точностью датчика температуры, которая составляет $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [142], тогда при условии, что температура поверхности ОП изменяется в среднем от 40 до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная погрешность будет

$$\delta_{tнов}^1 = \frac{0,5 \cdot 100}{(40 + 60)/2} = 1\%.$$

Оценим технологическую погрешность:

– за счет термического контакта. Согласно [120] коэффициент K_C , учитывающий термический контакт между теплоносителем в ОП и датчиками температуры, должен использоваться в том случае, когда он дает более чем 3% разницу измерений в пределах одной расчетной единицы.

Следовательно, погрешность за счет термического контакта составит около 3 %.

– за счет несоответствия температуры в точке измерения и средней температуры ОП. На основании проведенных измерений в [70] было получено, что температура в рекомендуемой зоне установки регистратора на радиатор t_y превышает среднюю температуру поверхности радиатора t_{cp} и величина отклонения $t_y - t_{cp}$ зависит от расхода воды через радиатор. При температуре теплоносителя 50 °С величина отклонения $t_y - t_{cp}$ составляла 6,5 °С. Таким образом, погрешность $\delta_t = \frac{6,5}{50} \cdot 100 = 13\%$.

Следовательно, относительная технологическая погрешность

$$\delta_{tnos}^2 = 3 + 13 = 16\%.$$

Суммарная максимальная погрешность измерения теплоотдачи ОП будет составлять:

$$\delta_p = 12 + 9 + 10 + 1 + 16 = 48 \%.$$

Заметим, что в [120] предусматривается введение поправочных коэффициентов, назначение которых снизить погрешность вычисления тепловой мощности. По этому поводу можно сказать, что в наших оценках погрешность за счет применения ОП разных типов не учитывалась. Что касается поправочного коэффициента по температуре K_T , считаем, что его применение неправомерно, поскольку в реальных условиях эксплуатации температура поверхности ОП будет изменяться непредсказуемым образом как от прибора к прибору, так и для одного прибора в течение суток.

Из выше изложенного следует, что применение одnodатчиковых распределителей сопряжено с низкой точностью измерений.

2. Двухдатчиковый тип отличается от распределителей с одним датчиком тем, что он измеряет среднюю температуру воздуха помещения. Поэтому при оценке максимальной погрешности все выкладки остаются прежними, за исключением погрешности измерения температуры воздуха,

которая составит (при погрешности измерения датчика температуры $0,5^{\circ}\text{C}$ [142])

$$\delta_{t\epsilon} = \frac{0,5}{20} \cdot 100 = 2,5\%.$$

Суммарная максимальная погрешность измерения теплоотдачи ОП будет

$$\delta_p = 12 + 9 + 2,5 + 1 + 16 = 40,5 \, \%.$$

Итак, в двухдатчиковых распределителях погрешность измерения теплоотдачи ОП меньше, чем в однодатчиковых, но она по-прежнему остается достаточно высокой. Выводы, касающиеся высоких погрешностей при измерениях теплоотдачи разными типами радиаторных распределителей, подтверждаются экспериментальными результатами, полученными в [56, 70].

3. Измерители тепловой энергии. В этих приборах [41, 42, 85], в отличие от двух предшествующих, коэффициент теплоотдачи ОП измеряется с помощью тех же температурных датчиков непосредственно в условиях эксплуатации ОП, что приводит к существенному снижению погрешности δ_p . Такой режим измерения предполагает учет индивидуальных особенностей ОП. Погрешность δ_G^2 , возникающую при длительной эксплуатации ОП, можно уменьшить за счет проведения калибровки минимум 1 раз в год (например, при запуске систем отопления). Существенным достоинством предложенного метода является взаимная компенсация погрешностей δ_G^1 , $\delta_{t_{\text{пов}}}$, $\delta_{t_{\text{в}}}$. При этом за счет калибровки погрешность вычисления коэффициента теплоотдачи δ_G^1 составляет 5 %. Рассмотрим подробнее влияние систематической погрешности на точность измерения т/э при использовании измерителей т/э с методом калибровки.

Случай 1 (случай рассматривается для сравнения двух методов – с использованием калибровки и без нее). Коэффициент теплоотдачи $G_{\text{ист}}$ находится из справочника.

Тепловая мощность, отдаваемая ОП, находится по формуле

$$P_{\text{тепл}} = G_{\text{ист}} (T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}) = G_{\text{ист}} (T_{\text{ист}}^0 + \Delta T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}), \quad (3.3)$$

где $T_{\text{ист}}^0$ – истинная температура; $\Delta T_{\text{ист}}$ – систематическая погрешность.

Преобразуем выражение (3.9) следующим образом:

$$G_{\text{ист}} (T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}) \left(1 + \frac{\Delta T_{\text{ист}}}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}} \right) = G_{\text{ист}} (T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}) (1 + \alpha_1), \quad (3.4)$$

где $\alpha_1 = \frac{\Delta T_{\text{ист}}}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}}$ – систематическая погрешность ($\alpha_1 \ll 1$).

Будем полагать, что измерения производятся в некотором интервале температур от $T_{\text{н}}$ до $T_{\text{в}}$ и погрешность $\Delta T_{\text{ист}}$ линейно зависит от текущих измерений температуры радиатора:

$$\Delta T_{\text{ист}} = k T_{\text{ист}}^0, \quad (3.5)$$

где k – коэффициент пропорциональности, который может составлять несколько процентов от $T_{\text{ист}}^0$ ($k = 1-10\%$).

Оценим погрешность измерения т/э $\Delta P_{\text{тепл}}$, которая определяется членом $\frac{k T_{\text{ист}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}}$. Рассмотрим наихудший случай, когда $k = 0,1$.

Пусть $T_{\text{н}} = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{в}} = 80\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{возд}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$. При данных условиях погрешность измерения тепловой мощности $\frac{\Delta P_{\text{тепл}}}{P_{\text{тепл}}}$ будет меняться от 13 до 30 %.

Нетрудно заметить, что погрешность достаточно высокая. Разумеется, при $k < 0,1$ погрешность уменьшается. Построим зависимость $\delta P_{\text{тепл}}(T_{\text{ист}})$ без калибровки (Рисунок 3.4, кривая 1). Выражение для т/э имеет вид

$$Q_{\text{тепл}} = \sum_{i=1}^N P_{i\text{тепл}} \cdot \Delta t.$$

Погрешность измерения т/э $\Delta Q_{\text{тепл}}$ можно снизить, применяя статистическое усреднение. Наш процесс измерения можно считать случайным, случайной величиной является $T_{\text{ист}}(T_{\text{ист}}^0)$. Среднее значение ошибки получим, усредняя ее по множеству измерений:

$$\frac{\Delta Q_{\text{тепл}}}{Q_{\text{тепл}}} = \sum_i W_i(T_i) \cdot \delta Q(T_i), \quad (3.6)$$

где $W_i(T_i)$ – функция распределения плотности вероятностей, δ_Q – относительная систематическая погрешность измерения. Найдем среднее значение $\Delta Q_{\text{тепл}}$ для равномерного распределения плотности вероятностей. Возьмем выборку температуры 30, 40, 50, 60, 70, 80 °C, тогда $W_i(T_i) = 1/6$, а $\frac{\Delta Q_{\text{тепл}}}{Q_{\text{тепл}}} = 18,16 \%$.

Как видим, средняя ошибка также достаточно велика. Она может уменьшиться, если плотность вероятностей будет неравномерная.

Случай 2. Используется калибровка. Тогда

$$\begin{aligned} P_{\text{тепл}} &= C_{\text{ист}} \frac{dT_{\text{ист}}}{dt} \frac{T_{\text{ист}}^0 + \Delta T - T_{\text{возд}}}{T_{\text{ист кал}}^0 + \Delta T_{\text{кал}} - T_{\text{возд}}} = \\ &= C_{\text{ист}} \frac{dT_{\text{ист}}}{dt} \frac{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}}{T_{\text{ист кал}}^0 - T_{\text{возд}}} \frac{1 + \frac{\Delta T}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}}}{1 + \frac{\Delta T_{\text{кал}}}{T_{\text{ист кал}}^0 - T_{\text{возд}}}} = \\ &= C_{\text{ист}} \frac{dT_{\text{ист}}}{dt} \frac{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}}{T_{\text{ист кал}}^0 - T_{\text{возд}}} \frac{1 + \alpha_1}{1 + \alpha_2}, \end{aligned}$$

где $\alpha_2 = \frac{\Delta T_{\text{кал}}}{T_{\text{ист кал}}^0 - T_{\text{возд}}}$ – систематическая погрешность ($\alpha_2 \ll 1$). Дробь $\frac{1 + \alpha_1}{1 + \alpha_2}$ разложим в ряд Тейлора:

$$\frac{1 + \alpha_1}{1 + \alpha_2} \approx 1 + \alpha_1 - \alpha_2$$

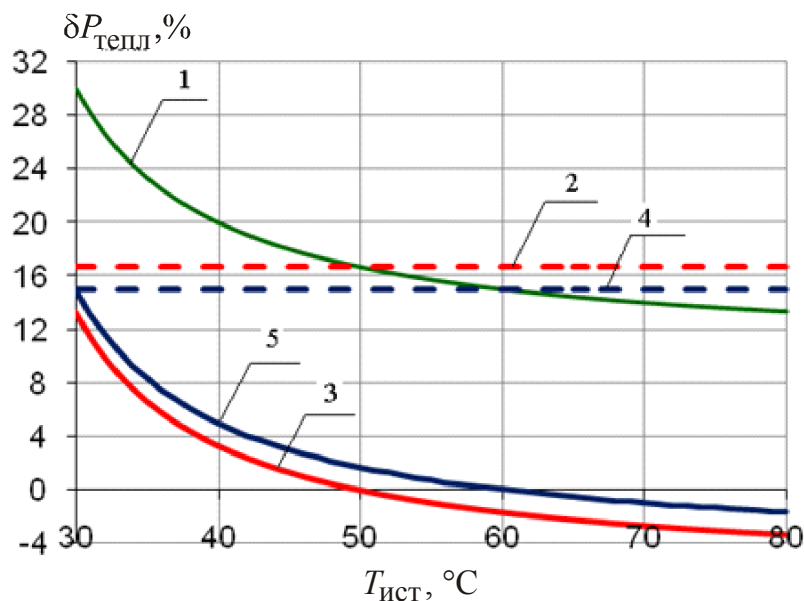
Погрешность измерений будет определяться членом

$$\Delta P_{\text{тепл}} = \alpha_1 - \alpha_2 = k \left(\frac{T_{\text{ист}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}} - \frac{T_{\text{ист кал}}^0}{T_{\text{ист кал}}^0 - T_{\text{возд}}} \right). \quad (3.7)$$

Произведем калибровку по двум точкам: 50 и 60 °C, и построим зависимость $\Delta P_{\text{тепл}}(T_{\text{ист}})$ (рисунок 3.1). Значения ошибок приведены в таблице 3.1. Видим, что калибровка приводит к заметному сокращению систематических погрешностей. Дальнейшее их снижение можно получить при усреднении:

$$\delta P_{\text{тепл}} \left(T_{\text{ист}}^0 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \right) = \frac{1}{6} \cdot (13,33 + 3,33 + 0 - 1,66 - 2,66 - 3,66) \approx 1,4 \text{ } \%;$$

$$\delta P_{\text{тепл}} \left(T_{\text{ист}}^0 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C} \right) = \frac{1}{6} \cdot (15 + 5 + 1,66 + 0 - 1 - 1,66) \approx 3,16 \text{ } \%.$$



- 1 — α_1 (без калибровки)
 2 — α_2 при $T_{\text{ист}}^0 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 3 — $\delta P_{\text{тепл}}$ при $T_{\text{ист}}^0 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 4 — α_2 при $T_{\text{ист}}^0 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 5 — $\delta P_{\text{тепл}}$ при $T_{\text{ист}}^0 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.1 – Зависимости $\delta P_{\text{тепл}}(T_{\text{ист}})$ без калибровки и с калибровкой

Таблица 3.1 – Погрешности измерений

Температура $T_{\text{ист}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\delta P_{\text{тепл}}, \text{ } \%$		
	Без калибровки	$T_{\text{ист}}^0 = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ кал	$T_{\text{ист}}^0 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ кал
30	30	13,33	15
40	20	3,33	5
50	16,66	0	1,66
60	15	–1,66	0
70	14	–2,66	–1
80	13,33	–3,66	–1,66

Можно заметить, что выбранная точка калибровки влияет на результат погрешности. Так как есть положительные и отрицательные значения погрешности, то можно найти точку калибровки, в которой погрешность измерений будет равна нулю. Для этого проинтегрируем выражение (3.7) в пределах от T_H до T_B :

$$\begin{aligned} \int_{T_H}^{T_B} \Delta P_{\text{тепл}} dT_{\text{ист}}^0 &= k \int_{T_H}^{T_B} \left(\frac{T_{\text{ист}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}} - \frac{T_{\text{кал}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}} \right) dT_{\text{ист}}^0 = \\ &= k \left[\int_{T_H}^{T_B} \frac{T_{\text{ист}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}} dT_{\text{ист}}^0 - \frac{T_{\text{кал}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}} \int_{T_H}^{T_B} dT_{\text{ист}}^0 \right] = \\ &= k \left[(T_B - T_H) \left(1 - \frac{T_{\text{кал}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}} \right) + T_{\text{возд}} \ln \frac{T_B - T_{\text{возд}}}{T_H - T_{\text{возд}}} \right]. \end{aligned}$$

Для того чтобы найти точку калибровки, при которой погрешность минимальна, приравняем полученный интеграл к нулю:

$$\begin{aligned} k \left[(T_B - T_H) \left(1 - \frac{T_{\text{кал}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{возд}}} \right) + T_{\text{возд}} \ln \frac{T_B - T_{\text{возд}}}{T_H - T_{\text{возд}}} \right] &= 0; \\ T_{\text{ист}}^0 &= T_{\text{возд}} \left(1 + \frac{1}{\frac{T_{\text{возд}}}{T_B - T_H} \ln \frac{T_B - T_{\text{возд}}}{T_H - T_{\text{возд}}}} \right). \end{aligned}$$

Получили оптимальную точку калибровки $T_{\text{ист}}^0 = 47,9^\circ\text{C}$. Используя оптимальную точку калибровки, определим значения ошибок, усредним их и получим:

$$\begin{aligned} \delta Q_{\text{тепл}} \left(T_{\text{ист}}^0 = 47,9^\circ\text{C} \right) &= \\ &= \frac{1}{6} \cdot (12,8 + 2,8 - 0,5 - 2,17 - 3,17 - 3,83) \approx 1\%. \end{aligned}$$

Как видим, погрешность $\delta Q_{\text{тепл}}$ стала меньше.

Сравнение погрешностей для приборов различных типов приведено в таблице 3.2. Для удобства расчет потребляемой т/э можно проводить ежемесячно, при этом за каждый месяц нужно находить функцию распределения плотности вероятностей и точку калибровки.

Таблица 3.2 – Сравнение погрешностей

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

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации одной калибровки на всем диапазоне проводимых измерений может быть не достаточно для получения необходимой (6,1%) точности вычисления т/э [96]. Может потребоваться разбиение диапазона на участки и проведение калибровки с выбором точки калибровки отдельно на каждом участке. Однако предложенный выше подход при этом не изменится. Изменения коснутся лишь значений температуры ОП, используемой в вычислениях. Критерием выбора размеров промежутков на диапазоне измерений является динамика изменения значений коэффициента теплоотдачи с последовательным переходом от одного калибровочного участка диапазона к другому.

Минимальным отрезком для калибровки могут служить три последовательных отсчета температур ОП. При этом, как показывают результаты экспериментов, снятие последовательных значений температуры ОП при калибровочных испытаниях кратно перекрывает скорость изменения температуры отопительного источника. То есть частота снятия показаний

температурных датчиков такова, что на каждые 5 и более показаний на самом крутом участке характеристики изменение температуры не превышает сотых долей градуса. Объем получаемых данных избыточно перекрывает потребность соблюдения границы достоверности измерений при дальнейших вычислениях.

Выводы к главе 3

1. Проанализированы погрешности разных по количеству датчиков температуры устройств, доказана целесообразность применения измерителя т/э с двумя датчиками температуры для достижения большей точности измерений.

2. Анализ способа реализации методики показал, что применяемый метод калибровки в дальнейшем позволяет существенно уменьшить погрешность вычисления тепловой мощности за счет того, что на этапах калибровки и измерения применяются одни и те же температурные датчики. Кроме того статистическая обработка результатов измерения за длительный период позволяет дополнительно снизить погрешность при вычислении т/э.

4 Экспериментальные исследования и тестовые испытания методов и устройств контроля количества тепловой энергии отдаваемой отопительным прибором в локальном помещении

Целью экспериментальных исследований была проверка адекватности разработанной методики измерений теплового состояния помещения, предлагаемых технических решений и устройств реальными условиями эксплуатации, а также количественная оценка эффективной составляющей т/э отдаваемой ОП.

4.1 Объекты исследования

Исследования теплообмена ОП производилось на трех объектах.

1. В лаборатории кафедры ТОР корпус РТФ ТУСУРа по адресу г. Томск, ул. Вершинина 47 в период с ноября 2016 по февраль 2017 гг. Помещение высотой 2,8 м, шириной 2,5 м и длиной 5,7 м максимально соответствовало условиям, необходимым для проведения эксперимента:

- помещение в течение всего периода исследований остается сухим;
- в помещении имеется регулируемый ОП, подключенный к центральному отоплению;
- в наружной стенке исследуемого помещения располагается оконный проем (1,5 * 1,2) м.;
- объект находится на 3-ем этаже 4-х этажного здания, и с пяти сторон окружен смежными отапливаемыми помещениями.

Дополнительно во внутренней перегородке исследуемого помещения имеется открытый дверной проем размерами 1,0*1,9 м. На стенах, по всему периметру помещения, на полу и потолке были размещены платиновые термометры сопротивления типа ТСП. На подводящем и возвратном трубопроводах системы отопления установлены датчики температуры разностные типа КТПТР. Установка этих датчиков схематично показана на

рисунке 4.1. Для контроля температуры воздуха снаружи и внутри помещения дополнительно были установлены ртутные термометры Л-1, соответствующие ГОСТ 5.2156-74. Они были установлены на деревянной рейке вне зоны влияния окна на расстоянии 250 мм, 900 мм и 1800 мм от пола в соответствии с рисунком 4.1.

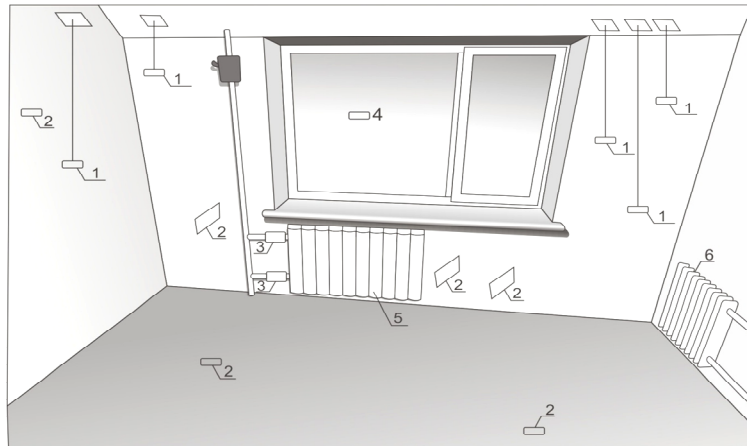


Рисунок 4.1 – Схема помещения с установленными в нем температурными датчиками: 1 – датчик температуры воздуха (термометры сопротивления); 2 – ртутные термометры; 3 – термометры разностные; 4 – датчик температуры внешней среды; 5 – ОП, подключенный к системе центрального отопления; 6 – экспериментальный ОП

2. Вторым объектом, на котором производились тестовые испытания первого варианта АСКУТЭ, был 5-этажный двухподъездный жилой дом по адресу г. Томск, ул. Карташова, д. 31. Исследования проводились с октября 2015 по декабрь 2015 г. (рисунки 4.2). 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. Были получены данные, позволившие подтвердить высокую чувствительность метода. А именно, удалось зафиксировать корреляцию между временем открытия форточки при проветривании и увеличением расхода т/э на отопление данного помещения.



Рисунок 4.2 – Жилой дом по адресу г. Томск, ул. Карташова, д. 31

При этом следует отметить, что удалось установить приборы на 95% ОП (34 квартиры из 36), тем самым подтвердив высокую заинтересованность жителей в индивидуальном контроле количества т/э. Однако, не смотря на высокую активность собственников, использование проводной схемы себя не оправдало. Из-за проблем с проводами и контактами ввести систему в эксплуатацию не удалось.

3. Третьим объектом, на котором производились тестовые испытания, был первый подъезд четырехэтажного жилого дома по адресу г. Томск ул. 19-й Гвардейской дивизии, д. 15/1. Испытания проводились в два этапа: в период с февраля по май 2016 г. и с декабря 2016 по февраль 2017 гг. На этом объекте тестировалась беспроводная схема передачи данных и устройство разработанные в свете работ авторов [8, 10, 45, 50, 81, 101]. Был разработан прототип устройства отраженный в [41, 42, 85]. Разработанная нами система экспериментально исследовалась в условиях эксплуатации в многоквартирном жилом доме. Испытания проводили на одном стояке однотрубной системы, 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. Схема системы отопления приведена на рисунке 4.3. Длина отрезков труб, количество звеньев и теплоемкости ОП приведены в

таблице 4.1. Прямой и обратный трубопроводы подключались к соответствующим магистралям общедомовой системы.

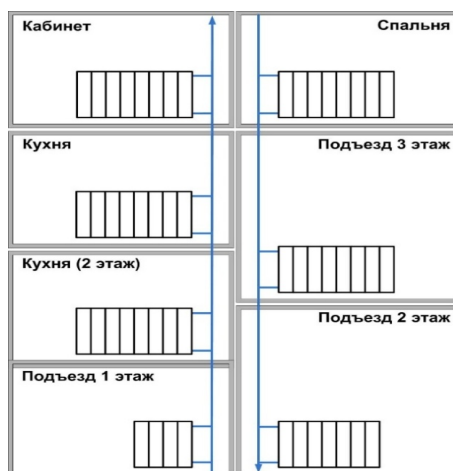


Рисунок 4.3 – Схема системы отопления

Таблица 4.1 – Данные по подключению ОП по ул. 19-й Гвардейской дивизии, д. 15/1

Местоположение	Количество звеньев ОП	Теплоемкость ОП, Дж/°С	Длина труб, м
Подъезд 1 этаж	4	37567	4
Кухня 2 этаж	8	75134	5
Кухня	8	75134	5
Кабинет	8	75134	2,1
Спальня	8	75134	2,1
Подъезд 2 этаж	7	65741	5,7
Подъезд 3 этаж	8	75134	5,7

4.2 Экспериментальный исследовательский стенд

Разработанная и изготовленная экспериментальная установка (рисунок 4.4) предусматривает создание модельной функции расхода теплоносителя через ОП при требуемых температурных напорах ($\Delta T = T_{\text{ОП}} - T_{\text{в}}$) во всем диапазоне воспроизводимых расходов. Здесь $T_{\text{ОП}}$ – температура поверхности ОП; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха в помещении. Отказ от экспериментирования

на единичных ОП, подключенных к системе центрального отопления, объясняется необходимостью анализа работы объекта на параметрах теплоносителя, выходящих за пределы общепринятых в теплоснабжении [56]. Например, оценка теплосъема с ОП при малых расходах теплоносителя вплоть до прекращения циркуляции при отключении и срабатываемых температурных напорах, не превышающих 2–3 °С. А также необходимости исследования режимов, комбинирующих разные температуры, скорости и направления [70] теплоносителя в приемлемых для повторяющихся серий экспериментов сроках. При такой постановке возникает несколько параллельных задач, которые требуют одновременного решения, а именно:

- исследование гидродинамической обстановки на участке, образуемом ОП и переключкой, особенно при 80-100% регулирующем воздействии по расходу теплоносителя;
- оценке теплотерь на участках подвода т/э к ОП, в том числе в стояках;
- анализу степени влияния теплофизических характеристик материалов, из которых изготавливаются ОП на результаты тепломассообмена между прибором и помещением.

Существует метод измерения основных теплофизических характеристик ОП, который применяют при аттестации новых ОП и приборов зарубежных производителей, ввозимых в Россию с целью продажи [37, 105]. Основным элементом метода является изотермическая камера, к одной из стенок которой помещают исследуемый прибор и подключают его к системе циркуляции и нагрева теплоносителя. Получение результатов измерения на нескольких режимах растягивается на 7–8 рабочих дней. Такой срок связан с особенностями метода, по которому система «прибор-комната» должна прийти в равновесное состояние, когда подводимая ОП т/э равна убыли через ограждающие конструкции в окружающую среду. В этом случае можно говорить о стационарном режиме работы ОП, в котором и производится снятие показателей. По понятным причинам мы вынуждены были искать

другие решения, иначе проведения серии экспериментов растянулось бы на годы.

В соответствии с ГОСТ 301311-2005 и ГОСТ 53583-2009, в нашем случае, возможны «электрический» или «водяной» методы исследования ОП. Методы, когда количество энергии, подведенной к ОП, измеряется по величине, затраченной на нагрев электрической энергии, либо классическим способом измерения потребленной т/э, передаваемой теплоносителем [19,102]. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки:

- в «электрическом» случае высокую чувствительность средств измерения электрической энергии ведет к необходимости разделения линий электроснабжения подогрева и циркуляции рабочей жидкости;

- в «водяном» случае метрологические возможности средств измерения т/э, особенно в зоне малых расходов и перепадов температур между подводящим и отводящим потоком теплоносителя, весьма ограничены.

При создании стенда были реализованы оба подхода, что позволило компенсировать недостатки одного метода достоинствами другого. «Электрический» метод дополняет «водяной» в зоне его пороговой чувствительности, а «водяной» снимает зависимости «электрического» метода в зонах сравнительно больших температур и расходов. Такой подход позволил существенно расширить динамический диапазон измерения подводимой к ОП т/э. Схематически стенд представлен на рисунке 4.4.

Состав и технические характеристики используемого экспериментального оборудования:

- радиатор МС 140-500 ГОСТ 53583-2009 (5 секций);
- электрический водонагреватель (Termex Н 15-0) мощностью 1,5 кВт;
- подводящие трубы: армированный полистирол Ду – 20 мм;
- расширительный бачок Wesber WRV 8, объемом 8 л.;
- вычислитель т/э СПТ961.2 производства НПО «Логика», г. С.-Петербург;

- преобразователь расхода электромагнитный ПРЭМ-2 производства НПФ «Тепломер»;
- встраиваемый в радиатор тэн, мощностью 1,0 кВт;
- блок коммутации и контроля электрической энергии, состоящий из однофазного электросчетчика СКАТ 101/М1 – 3 Ш Р 1 и коммутирующего оптореле SHARP S202S12;
- водосчетчик крыльчато-тахометрический ВСГТ-15 производства ЗАО «Тепловодомер», г. Мытищи;
- блок программного управления мощностью нагрева (Termex);
- термометры сопротивления КТПТР – 01 (0-180) С° – 2 шт.;
- датчики перепада давления САПФИР 22 ДД (0-25) кПа – 2 шт.;
- компьютер с оригинальной программой контроля количества т/э и программой управления тепловым узлом;
- комплект термодатчиков.

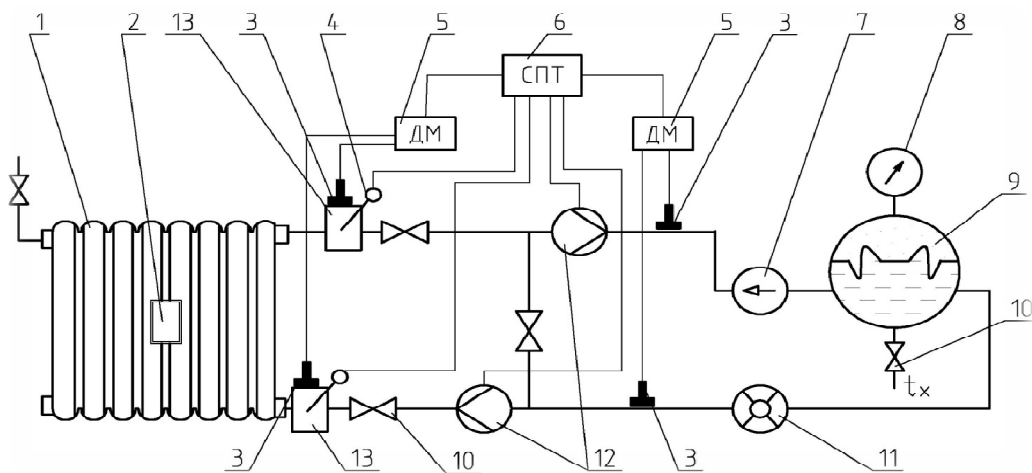


Рисунок 4.4 – Схема экспериментального стенда: 1 – исследуемый ОП; 2 – измеритель т/э; 3 – датчик давления; 4 – датчик температуры; 5 – дифманометр; 6 – тепловычислитель; 7 – циркулярный насос; 8 – манометр показывающий; 9 – электрокотел (Термекс); 10 – вентиль; 11 – водосчетчик крыльчато-тахометрический; 12 – расходомер электромагнитный; 13 – расширитель

Все средства измерения, участвовавшие в экспериментах, имели действующую Госповерку.

Внешний вид экспериментального стенда приведен на рисунке 4.5.

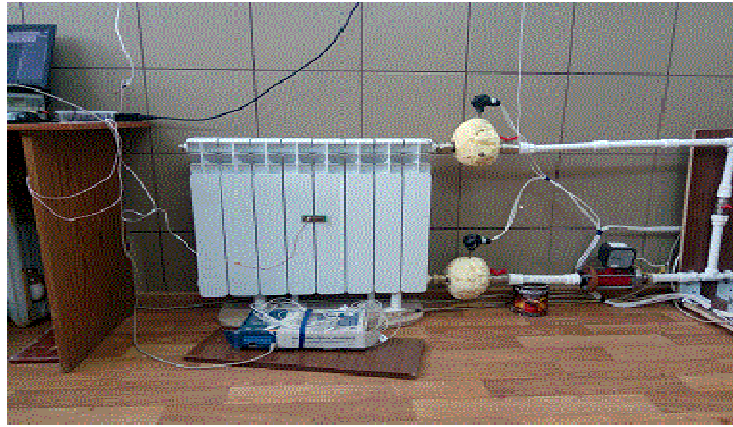


Рисунок 4.5 – Внешний вид экспериментального стенда с установленным алюминиевым радиатором, схема которого с описанием элементов представлена на рисунке 4.4

4.3 Экспериментальная система «сбора-передачи» показаний

Для проведения опытной эксплуатации измерителей на реальном объекте был использован экспериментальный аппаратно-программный комплекс контроля количества т/э, разработанный сотрудниками кафедры ТОР ТУСУРа с учетом [5, 23]. Данные считывались с температурных датчиков, подсоединённых к ОП, с определенным временным интервалом, заносились в память компьютера и обрабатывались в соответствии алгоритмом, приведенным в Приложении А. Теплоемкость ОП вычисляли путем суммирования теплоемкости корпуса металлического прибора и теплоносителя (воды). Данный метод повышает точность измерений т/э, отдаваемой ОП, с учетом его индивидуальных особенностей и существенно сокращает время измерения коэффициента теплоотдачи.

4.4 Методика проведения эксперимента

В ходе проведения эксперимента измеряли коэффициент теплоотдачи, тепловую мощность и энергию ОП. Используемая методика измерений детально описана в Приложении А. Методика разработана автором. В настоящее время методика аттестована на соответствие ГОСТ Р 8.563-2009 ГСИ «Методики (методы) измерений» [35] и внесена в федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений под номером ФР.1.32.2017.27992.

После монтажа ОП и устанавливалась температура нагрева до 90 °С. В характерной точке на поверхности ОП закреплялся измеритель т/э. Измерялась температура воздуха в помещении. После того как были включены водонагреватель и циркуляционный насос, проводилась проверка на предмет соответствия расхода рабочей жидкости в контуре заданному значению и отсутствие воздушных пробок. В зависимости от типа ОП и количества секций нагрев проводился от получаса до полутора часов, пока температура поверхности ОП установится на заданном значении: (90 ± 1) °С. Установившийся процесс тепломасообмена поддерживался в течение 4–5 часов. Одновременно с этим регистрировали параметры по теплоносителю, измерителю т/э, установленному на поверхности ОП, количество т/э, подведенной к ОП по показаниям тепло- и водосчетчиков. По результатам измерений была сформирована база данных для расчета эффективной составляющей т/э, отдаваемой ОП на каждом из режимов его работы. Алгоритм расчета представлен на рисунке 4.6. В описании алгоритма применены следующие обозначения:

T_i, T_v – результаты измерения температуры фиксируемые датчиками; $T_{ист}$ – средняя температура поверхности ОП;

$m_{от}$ – масса одной секции порожнего ОП (без теплоносителя);

$V_{тн}$ – объем теплоносителя потребный для заполнения одной секции ОП;

$F_{оп}$ – площадь поверхности одной секции ОП;

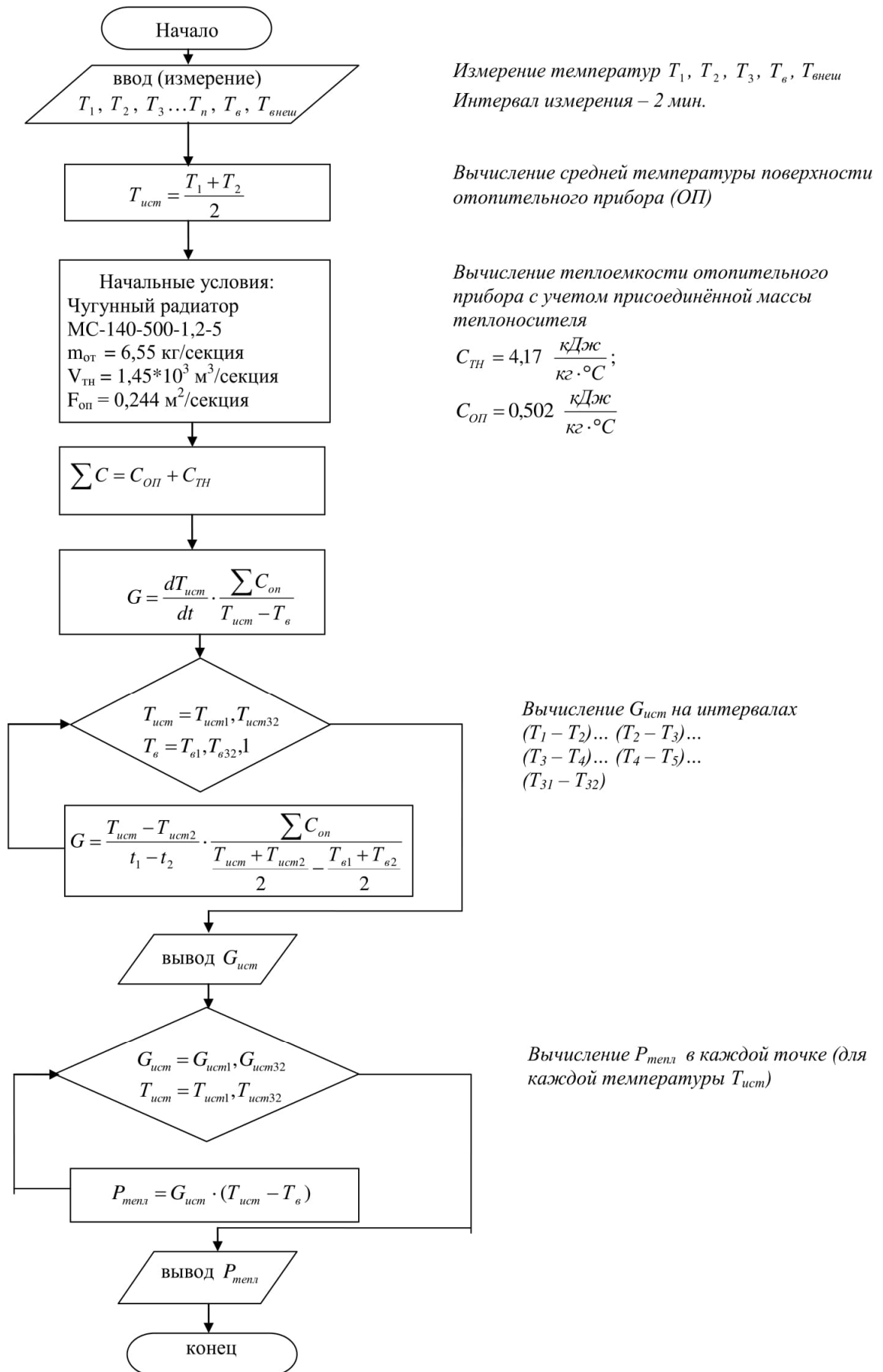


Рисунок 4.6 – Алгоритм расчета т/э подводимой ОП в помещение

$C_{\text{тн}}$ – теплоемкость материала из которого изготовлен ОП;

$C_{\text{оп}}$ – теплоемкость теплоносителя;

G – коэффициент теплоотдачи ОП;

$T_{\text{ист } i}, T_i, T_{\text{в } i}$ – значения температур в разные моменты времени;

$G_{\text{ист}}$ – калибровочный коэффициент теплоотдачи ОП;

$G_{\text{ист } i}$ – коэффициент теплоотдачи ОП в разные моменты времени;

$P_{\text{тепл}}$ – тепловая мощность.

Для этой цели была предусмотрена возможность замены ОП перемычкой того же диаметра, что и подводящие трубы. Анализ потерь т/э, во всех диапазонах, воспроизводимых расходах теплоносителя и срабатываемых температурных напорах, представлен на рисунке 4.7. При вычислениях коэффициента теплоотдачи непосредственно самого ОП делались поправки согласно предварительно полученным результатам по потерям т/э на подводящих и отводящих трубах.

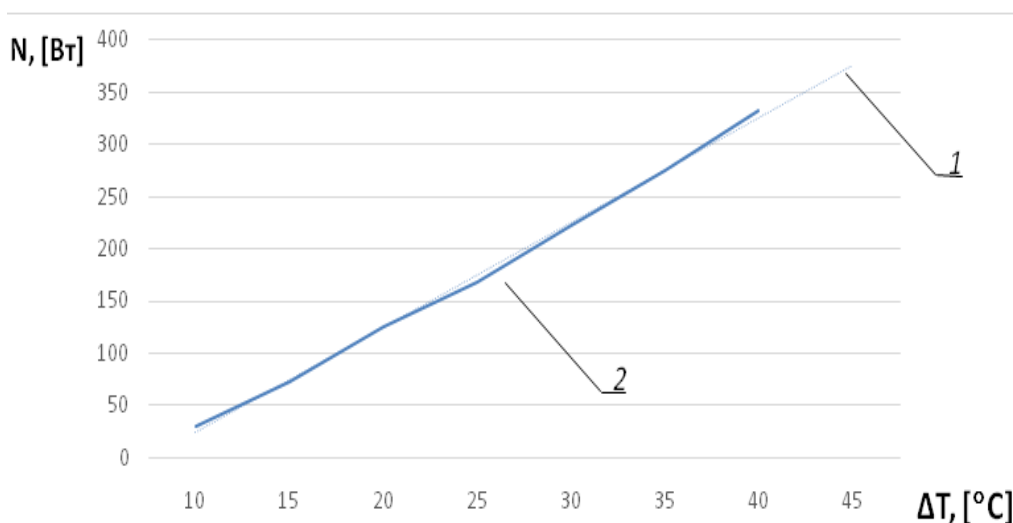


Рисунок 4.7 – Потери энергии на участке подвода, когда ОП заменен перемычкой: 1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая кривая;
 ΔT – температурный напор; N – мощность

4.4.1 Анализ адекватности определения интегрального коэффициента теплоотдачи ОП. Критерий Фишера

Современное законодательство рассматривает классический способ контроля количества т/э как наиболее достоверный [32, 65, 98, 99, 107]. В этой связи оценка возможностей ОП, при передаче т/э отапливаемому помещению «водяной метод» признается наиболее отработанным и метрологически обеспеченным [36, 39, 67]. Поэтому, для анализа адекватности определения интегральной величины коэффициента теплоотдачи ОП в качестве базовой прием модель организации контроля количества т/э с использованием теплосчетчика рисунок 4.4. Исследование проведено на примере серийно выпускаемых ОП отечественного производства (Гост 53583-2009), составляющих на сегодняшний день, более 80% эксплуатируемого парка отопительных приборов. Рассматривая процесс теплопереноса от теплоносителя – воздуху помещения, следует отметить два важных обстоятельства. Первое – для металлических ОП термическое сопротивление стенки, как и сопротивление тепловосприятию на внутренней поверхности, пренебрежимо малы, поэтому общий коэффициент теплопередачи определяется, в основном, теплообменом на внешней поверхности, где определяющими параметрами являются характерные температуры поверхности ОП и воздуха в помещении [42, 57, 63, 103]. Второе – затраты на общедомовые нужды и их учет [124], а также потери т/э на участках подвода выходят за рамки настоящего исследования [116].

В соответствии с [47, 57], процесс преобразования и передачи т/э Θ от теплоносителя в рассматриваемое помещение, может быть представлен уравнением 4.1.

$$\begin{aligned}\theta &= Gc_p(T_1 - T_2) = kF_1(\overline{T}_{\text{вн}} - \overline{T}_{\text{п}}) = \lambda \frac{\overline{T}_{\text{вн}} - \overline{T}_{\text{п}}}{\delta} \\ &= \alpha F_2(\overline{T}_{\text{п}} - \overline{T}_{\text{в}})\end{aligned}\tag{4.1}$$

где G , c_p – массовый расход и теплоемкость; T_1 , T_2 – температура теплоносителя на входе и выходе из ОП; F_1 , F_2 – внутренняя и наружная площадь поверхности ОП; k , α – коэффициенты теплоотдачи на границах раздела теплоноситель-стенка ОП, стенка ОП-воздух; $\overline{T}_{\text{вн}}$, $\overline{T}_{\text{п}}$, $\overline{T}_{\text{в}}$ – средние температуры внутренней, наружной поверхности ОП и воздуха в помещении; λ , δ – коэффициент теплопроводности и толщина стенки ОП. Сложность интерпретации измерений при одновременной сложности их проведения внутри эксплуатируемого ОП, потребовали нестандартного подхода к решению уравнения (4.1), путем введения понятия интегрального коэффициента теплоотдачи ОП и решения обратной задачи теплового баланса (глава 2). Предложенный и разработанный способ [42, 43, 118] при заданном температурном напоре теплоносителя $\Delta T = T_1 - T_6$ известных конструктивных параметрах ОП и измеряемых температуре поверхности ОП и мощности подводимой к измерительному участку стенда, позволяет рассчитать интегральный коэффициент теплоотдачи ОП. Характер изменения интегрального коэффициента теплоотдачи в заданном диапазоне температурных напоров теплоносителя $\Delta T = (10 - 40)^\circ\text{C}$ приведен на рисунке 4.25. В зависимости от способа измерения подаваемой к ОП энергии, относительное изменение коэффициента теплоотдачи достигает (38,4–42,8)%.

Поскольку, в большинстве случаев, уравнение регрессии приходится строить на основе выборочных данных, то возникает вопрос об адекватности уравнения данным генеральных совокупностей не только срабатываемых и рассеиваемых температурных напоров, но и адекватности определения интегрального коэффициента теплоотдачи в пределах каждого из задаваемых диапазонов напоров теплоносителя. Для этого производится проверка статистической значимости получаемых результатов измерения. Для сравнения двух регрессионных зависимостей одна из которых принимается базовой, необходимо найти их разброс относительно друг друга и сравнить его с табличным (критическим) значением критерия Фишера.

Проверка адекватности определения коэффициента теплоотдачи ОП проведена в два этапа. На первом этапе, программно, проверяется нормальность распределения выборок температурных напоров по базовой $\Delta T_1 = T_1 - T_2$ и разработанной моделями $\Delta T_2 = T_n - T_v$, где T_1 , T_2 – температура теплоносителя на входе и выходе из ОП; T_n , T_v – значение температур в характерной точке на поверхности ОП и средняя температура воздуха в рассматриваемом помещении соответственно [108]. Одновременно с анализом температурных напоров рассчитываются математические ожидания температуры на каждом из участков разбиения температурного ряда, которые кроме того необходимы для расчета теплофизических характеристик ОП при калибровке, в частности, теплоемкости ОП с учетом присоединенной массы теплоносителя [43]. На втором этапе, используя критерий Фишера, проверяется гипотеза о принадлежности ΔT_1 и ΔT_2 одной генеральной совокупности. В таблице 4.2 представлены почасовые результаты измерения.

Таблица 4.2 – Результаты измерения температур

Номер эксперимента выборки	T_1 , °C	T_2 , °C	ΔT_1 , °C	T_n , °C	T_v , °C	ΔT_2 , °C
	1	2	3	4	5	6
1	79,93	47,81	32,12	70,37	19,63	50,74
2	78,52	46,93	31,59	69,58	19,54	50,04
3	78,17	45,97	32,2	68,42	19,44	48,98
4	78,12	45,08	33,04	68,1	19,42	48,68
5	78,24	44,31	33,93	67,98	19,37	48,61
6	78,52	44,22	34,3	68,09	19,44	48,65
7	79,01	45	34,01	68,7	20,07	48,63
8	79,76	45,4	34,36	69,21	20,31	48,9
9	80	45,87	34,13	69,87	20,45	49,42
10	79,89	45,99	33,9	70,08	20,6	49,48
11	79,75	46,04	33,71	70,01	20,71	49,3
12	79,55	46,15	33,4	69,9	20,77	49,13
13	79,34	46,23	33,11	69,75	20,8	48,95
14	79,69	46,16	33,53	69,6	20,83	48,77
15	79,92	46,31	33,61	69,92	20,86	49,06
16	80,18	46,75	33,43	70,11	20,87	49,24
17	80,49	47,35	33,14	70,36	20,43	49,93

Номер эксперимента выборки	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	$T_n, ^\circ\text{C}$	$T_e, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$
	1	2	3	4	5	6
18	80,72	48,11	32,61	70,49	20,83	49,66
19	81,08	48,75	32,33	70,99	20,86	50,13
20	81,21	49,14	32,07	70,95	20,91	50,04
21	81,11	49,21	31,9	71,16	20,84	50,32
22	81	48,92	32,08	71,07	20,8	50,27
23	80,9	48,47	32,43	70,97	20,81	50,16
24	80,2	48,17	32,03	70,86	20,84	50,02

По результатам выборки 3;5 и формулам (4.2) производится расчет дисперсий [5, 21, 22].

$$S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_{1i} - \Delta \bar{T}_1)^2}{n_1}; S_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_{2i} - \Delta \bar{T}_2)^2}{n_1 - 1} \quad (4.2)$$

Расчетные значения S_1^2, S_2^2 составили соответственно 0,727911 и 0,381424. Нулевая гипотеза о равенстве двух дисперсий $\delta_1^2 = \delta_2^2$ или $\frac{\delta_1^2}{\delta_2^2} = 1$, принятая первоначально, может быть опровергнута при наличии значительных различий или принята к рассмотрению при условии $F_{\text{расч}} < F_{\text{кр}}$, где $F_{\text{расч}}$ и $F_{\text{кр}}$ – расчетное и критическое значение критерия Фишера. Расчетное значение критерия определяется по формуле (4.3)

$$F_{\text{расч}} = S_1^2 / S_2^2 \quad (4.3)$$

При этом большее значение, из полученных величин дисперсий, должно находиться в числителе; критическое значение $F_{\text{кр}}$ является табличным и определяется степенью свободы и уровнем значимости α , как правило, $\alpha = 0,01 - 0,05$ (1,0–5,0)%.

Полученные результаты вычисления расчетного $F_{\text{расч}} = 1,90$ и критического $F_{\text{кр}} = 1,98$ значений критерия Фишера, подтверждают гипотезу о принадлежности двух дисперсий одной генеральной совокупности при уровне значимости 0,05, что позволяет сделать вывод о возможности применения температурного напора ΔT_2 в качестве информативного параметра для определения эффективной составляющей т/э передаваемой помещению ОП.

4.5 Результаты экспериментальных исследований

4.5.1 Экспериментальное исследование эффективности чугунных радиаторов

Четырехзвенный чугунный радиатор. При проверке адекватности применения математической модели для чугунного радиатора за температуру поверхности радиатора принималось среднеарифметическое значение температур четырех датчиков, расположение которых схематично показано на рисунке 4.8.

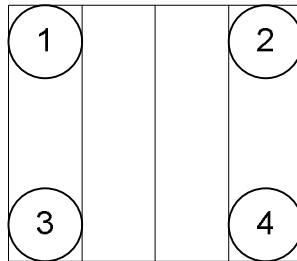


Рисунок 4.8 – Расположение температурных датчиков

Устанавливался стационарный режим, для каждой группы экспериментов выбиралась своя величина температуры предварительного нагрева. Таким образом, процесс остывания ОП начинался с разных температур. Полученные кривые остывания полностью укладываются одна на другую, что говорит о независимости характера остывания от начальной температуры ОП.

Во второй серии экспериментов также использовали четыре датчика измерения средней температуры ОП. Однако в данном случае посредством водяного теплоносителя подавались три разных величины тепловой мощности. Полученные кривые остывания обрабатывались с целью получения динамической характеристики ОП. Этой характеристикой является зависимость коэффициента теплоотдачи G от разности температур между поверхностью ОП и окружающего воздуха ΔT . Эти зависимости приведены на рисунке 4.9.

В целом, кривые совпадают друг с другом, а слабое различие на низких температурах обусловлено особенностью метода расчета. Для удобства при дальнейшем использовании зависимость коэффициента теплоотдачи от разности температур была описана уравнением прямой. Эта прямая показана фиолетовым цветом на рисунке 4.9.

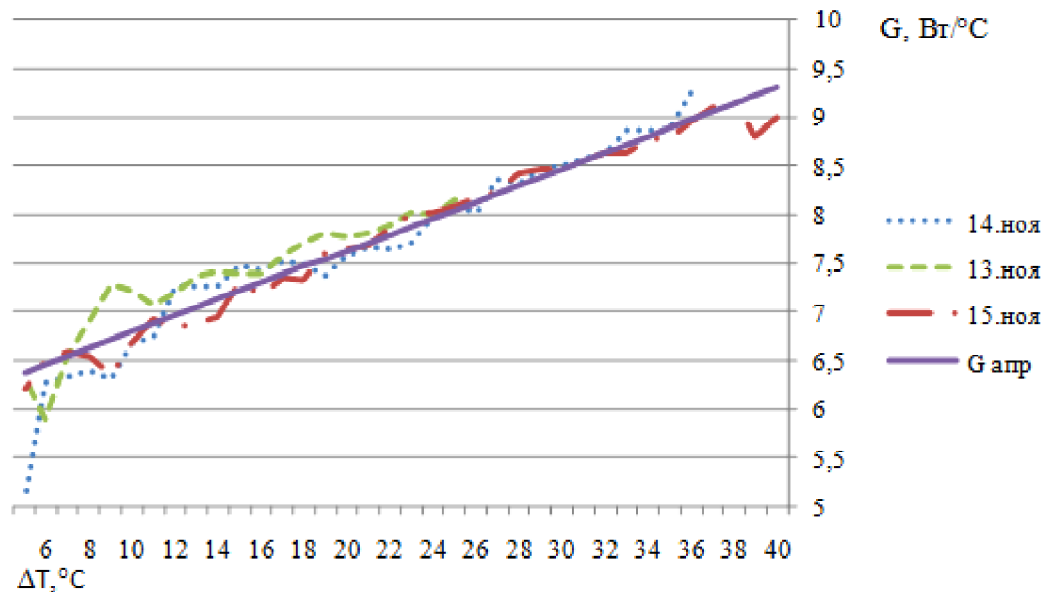


Рисунок 4.9 – Зависимость коэффициента теплоотдачи G от разности температур ΔT

Четырехзвенный чугунный радиатор с ТЭНом. Для нахождения теплоемкости чугунного радиатора и подсчета отдаваемой т/э ОП в качестве источника тепловой мощности использовали теплоэлектронагреватель. При этом учет подаваемой энергии фиксировали с помощью электросчетчика. Температура поверхности ОП измерялась так же с помощью четырех датчиков.

Для нахождения теплоемкости чугунного радиатора был записан и обработан процесс нагревания ОП. После обработки было рассчитано значение теплоемкости, которое оказалось равным $C = 36\,153 \text{ Дж}/^\circ\text{C}$. Это значение отличается незначительно от теплоемкости системы «радиатор –

теплоноситель», рассчитанной как сумма теплоемкостей железного каркаса и воды в нем, которая составила $C = 35\,500 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$. Следовательно, для чугунного радиатора можно использовать предлагаемый метод для определения теплоемкости.

Для нахождения т/э отдаваемой ОП провели описанный ниже эксперимент. Температура поверхности исследуемого объекта изменялась во времени. Подаваемая т/э при этом фиксировалась электросчетчиком, а отдаваемая энергия рассчитывалась описанным выше динамическим методом: применялись теплоемкость и коэффициент ОП, найденные ранее. Сравнивая зафиксированную контрольными приборами и рассчитанную энергии, получили погрешность в 1%. Таким образом, было установлено, что при четырех-датчиковом способе измерений температуры возможно применение математической модели для контроля количества тепла, излучаемой ОП.

Семизвенный чугунный радиатор. Для использования метода расчета энергии в реальных условиях необходимо уменьшить количество термодатчиков. Поэтому был проведен эксперимент для нахождения точки на поверхности радиатора, в которой адекватно измеряются средняя температура и коэффициент теплоотдачи прибора. При этом чугунный радиатор был подключен боковым (традиционным) способом как на рисунке 4.10.

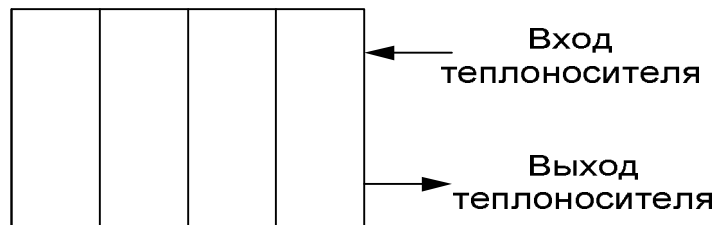


Рисунок 4.10 – Схема чугунного радиатора

Полученные в ходе эксперимента данные сравнивались с четырех-датчиковым способом измерения. Данная точка была найдена приблизительно в геометрическом центре ОП (центральный датчик).

Сравнение показаний четырех-датчикового способа измерений и центрального датчика по температуре и коэффициенту теплоотдачи приведено на рисунках 4.11 и 4.12 соответственно.

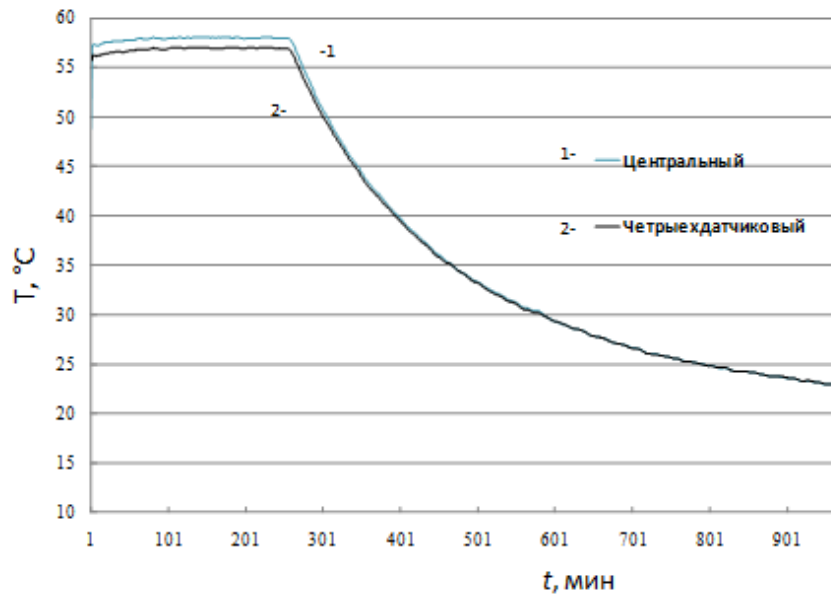


Рисунок 4.11 – Зависимость температуры источника от времени

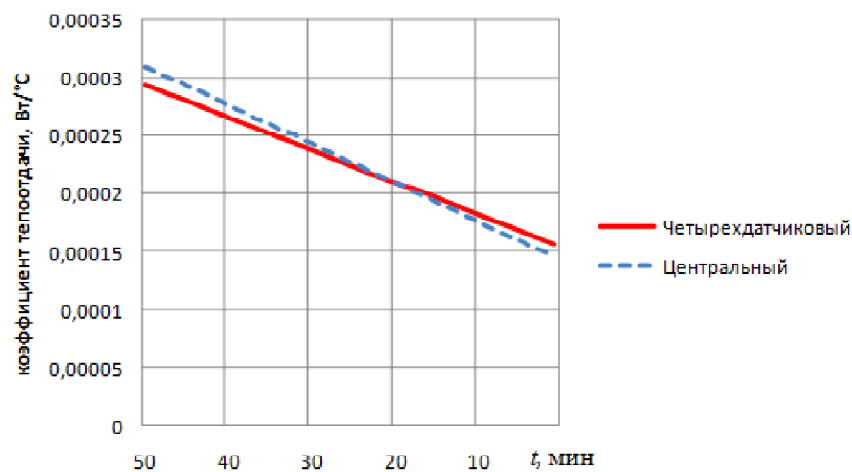


Рисунок 4.12 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени

Из графиков видно, что в данном случае использование центрального датчика для измерений является вполне целесообразным.

Последующий ряд экспериментов был проведен для выявления адекватности использования метода «одного датчика» измерений температуры ОП при различных режимах работы. Чугунный радиатор так же был подключен боковым способом, а режимы работы устанавливались

регулирующей арматурой. В ходе экспериментов при различных углах открытия регулирующей арматуры снимались значения средней температуры и коэффициента теплоотдачи. Средняя температура определялась при стационарном режиме ОП. Коэффициент теплоотдачи вычислялся динамическим методом. Затем проводили сравнение значений коэффициентов теплоотдачи при температурном напоре $\Delta T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Показания фиксировали как методом «четырёх датчиков», так и «одного датчика». При этом за эталон принимали показания, снятые четырех-датчиковым способом. Результаты приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнение результатов измерения одно- и четырех-датчиковыми методами

Степень открытия регулирующей арматуры	Отклонение по температуре, $^{\circ}\text{C}$	Отклонение значения коэффициента теплоотдачи при $\Delta T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, %
1/8	1	20%
2/8	1	29%
3/8	1	25%
4/8	0,9	23%
полностью открыта	0,5	3%

Подобный эксперимент провели с использованием тепловизора, когда снимались показания с 35 точек на поверхности ОП. Одна из точек находилась в геометрическом центре радиатора. При дальнейшем анализе показания, измеренные в этой точке, сравнивали со среднеарифметической температурой радиатора, определенной по 35 точкам. Измерения проводились для двух крайних режимов:

- открытие арматуры максимально (полностью открыта, рисунок 4.13);
- степень открытия арматуры минимальна (1/8, рисунок 4.14).

Результаты сравнения показаний температуры центральной точки со среднеарифметической приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнение показаний температуры центральной точки со среднеарифметической

Степень открытия радиатора	Отклонение по температуре, °C
1/8	1,1
полностью открыта	0,1

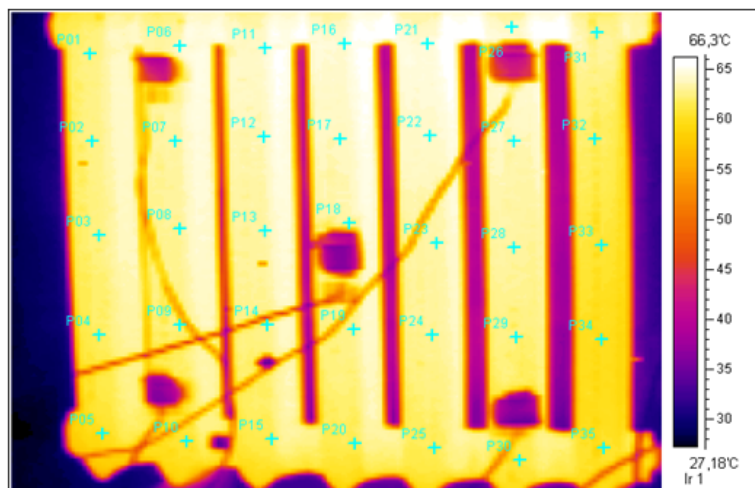


Рисунок 4.13 – Результаты тепловизора при максимальном открытии регулировочной арматуры

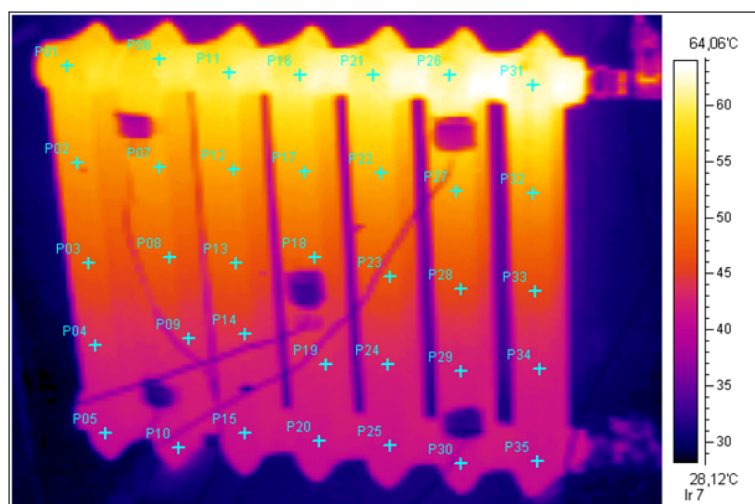


Рисунок 4.14 – Результаты тепловизора при минимальном открытии регулировочной арматуры

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы.

1. Измерение средней температуры при любом режиме работы возможно с помощью центрального датчика.

2. Вычисление коэффициента теплоотдачи динамическим методом необходимо проводить при максимальной степени открытия регулирующей арматуры, так как неравномерность нагрева ОП вносит искажения в процесс остывания радиатора.

Аналогичные эксперименты по сравнению метода «четырех датчиков» с методом «одного датчика» были проведены и при других типах подключения: обратное подключение и нижнее подключение.

Схема обратного подключения приведена на рисунке 4.15. а данные исследований представлены в таблице 4.5.

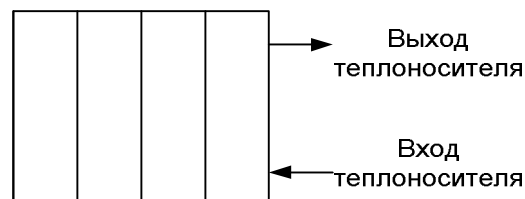


Рисунок 4.15 – Схема чугунного радиатора с обратным подключением

Таблица 4.5 – Данные исследований при обратном подключении радиатора

Степень открытия регулирующей арматуры	Отклонение по температуре, °C	Отклонение значения коэффициента теплоотдачи при $\Delta T = 40^\circ\text{C}$, %
1/8	0,1	30%
полностью открыта	1,1	18%

Из таблицы видно, что при данном способе подключения ОП коэффициент теплоотдачи по центральному датчику определяется с большой погрешностью. Так же средняя температура обратного подключенного радиатора вплоть до 40% ниже средней температуры радиатора подключенного боковым способом при одинаковой подаваемой тепловой мощности. Из выше написанного следует, что обратный тип подключения является неэффективным.

Схема нижнего подключения приведена на рисунке 4.16, а данные исследований представлены в таблице 4.6.

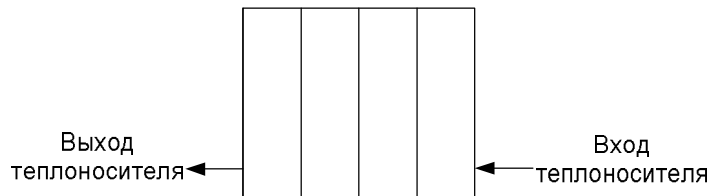


Рисунок 4.16 – Схема чугунного радиатора

Таблица 4.6 – Данные исследований при нижнем подключении радиатора

Степень открытия регулирующей арматуры	Отклонение по температуре, °C	Отклонение значения коэффициента теплоотдачи при $\Delta T = 40\text{ °C}$, %
1/8	0,4	30%
полностью открыта	0,7	1,5%

Из таблицы 4.6 видно, что, как и в случае с боковым подключением для определения температуры можно использовать центральный датчик, а при расчете коэффициента теплоотдачи регулятор радиатора должен быть максимально открыт.

Для подсчета т/э наряду со средней температурой ОП так же важно корректно измерять температуру воздуха. В ходе последующих экспериментов было рассмотрено влияние внешних воздействий на температуру воздуха и коэффициент теплоотдачи, а следовательно, на подсчет т/э. При этом использовали три датчика температуры воздуха. Один измерял температуру на расстоянии 1 м от ОП (истинная температура воздуха), а два других были размещены в пластмассовых корпусах с перфорацией для вентиляции. Один корпус располагался с торца на высоте 2/3 от нижней кромки радиатора, другой находился в нижней половине центрального ребра. Расположение корпусов схематично показано на рисунке 4.17.

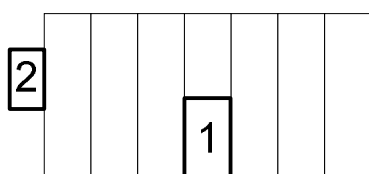


Рисунок 4.17 – Схематичное расположение

корпусов датчиков температуры:

1 – центральный датчик; 2 – торцевой

В качестве внешних воздействий использовали следующие факторы:

- штора (*);
- подоконник и плотная штора до пола (**);
- подоконник и плотная штора приподнята на 5 см от пола (***).

С каждым внешним воздействием и без них проводили полный цикл экспериментов, в которых радиатор нагревался, выходил на стационарный режим и затем остывал. По кривой остывания определяли зависимость коэффициента теплоотдачи, используя которую по полному циклу рассчитывали т/э, излучаемую ОП. Так же проводили перекрестные расчеты, когда калибровочные данные из одного эксперимента использовали для расчета т/э другого эксперимента. Например, калибровка проводилась при закрытой шторе, а подсчет энергии вели для серии экспериментов при открытой шторе. Энергии, рассчитанные при температурах воздуха торцевого и центрального датчика, сравнивались с энергией, рассчитанной при истинной температуре воздуха. При перекрестных измерениях за истинную энергию принималась энергия, калибровка и расчет которой проводились при одних и тех же условиях. Результаты сравнений приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнение результатов измерений при внешних воздействиях

	Торцевой, %	Центральный, %
Без внешних воздействий	2,5	2,5
*	0,7	1
Калибровка с * расчет без внешних воздействий	2,4	–15
Калибровка без внешних воздействий расчет с *	3,8	13
**	–2,5	5
Калибровка с ** расчет без внешних воздействий	10,8	–14
Калибровка без внешних воздействий расчет с **	–11	18
***	–0,5	3,3
Калибровка с *** расчет без внешних воздействий	13	7,3
Калибровка без внешних воздействий расчет с ***	–12	–1,6

Из таблицы следует, что для уменьшения погрешностей при расчете t/ε , необходимо:

- 1) эксплуатировать ОП в тех же условиях, что и калибровка;
- 2) создавать возможность свободно циркулировать воздушным потокам через корпус с термодатчиком.

4.5.2 Экспериментальное исследование эффективности алюминиевого радиатора

Для решения поставленной задачи были сняты динамические (в режиме остывания) и статические характеристики коэффициента теплоотдачи радиатора. При выборе точки установки термодатчиков были приняты во внимание следующие соображения:

1. Поскольку каркас алюминиевого радиатора принципиально не отличается от чугунного, то измерения средней температуры ОП производили в его геометрическом центре.

2. В целях упрощения конструкции и способа крепления измерителя было принято решение измерять температуру наружного ребра в точке, соответствующей проекции геометрического центра на внешнюю часть ОП, с тем, чтобы оценить возможность установки измерителя t/ε на ребро.

3. Для повышения достоверности измерений температуры каркаса и ребра измерялись двумя разными термодатчиками, установленными на соседних звеньях в геометрическом центре радиатора.

Условия проведения эксперимента.

1. Объект испытания подключали по боковой схеме (рисунок 4.10): подающая труба сверху, обратная – снизу.

2. Скорость подачи теплоносителя поддерживалась неизменной на всех этапах проведения экспериментов.

Определение количества t/ε производилось двумя способами: классическим и электрическим. В классическом методе используется

измерение разницы температур между входом и выходом ОП и массовый расход теплоносителя. Вычисление количества т/э производилось с помощью тепловычислителя *ВКТ-7*. Электрический метод основан на измерении электрической энергии, затраченной на генерацию т/э за вычетом тепловых потерь на соединительных трубах. Показания электросчетчика контролируются программой. Измерение потерь на соединительных трубах проводилось путем замены ОП на шунт (короткий отрезок теплоизолированной трубы).

Измерение температуры воздуха производилось термодатчиком в соответствии с рекомендациями АВОК и [36]. В качестве средства измерения температуры использовали цифровые датчики температур DS18B20 [142]. Установка позволяет стабилизировать заданное оператором значение температурного напора путем коммутации электроэнергии, подаваемой на электрический водонагреватель.

Для снятия динамической характеристики коэффициента теплоотдачи после выхода ОП на заданную температуру прекращалась подача теплоносителя. При этом контроль средней температуры ОП в режиме остывания осуществлялся измерителем т/э.

Снятие зависимостей коэффициента теплоотдачи от температурного напора

Измерения статической характеристики проводили для двух вариантов расположения теплосчетчиков: с термодатчиками на каркасе и с термодатчиками на ребре. И в том, и другом случае использовались средние показания по двум термодатчикам.

Измерения на каркасе ОП

Статическая характеристика снималась по семи значениям температурного напора от 10°C до 35°C через 5°C двумя методами: электрическим и классическим. Длительность измерения каждой точки составляла 5 часов. Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле:

$$P = G_{\text{ст}} \cdot \Delta T, \quad (4.4)$$

где $G_{\text{ст}}$ – коэффициент теплоотдачи; P – мощность, замеренная классическим или электрическим методом; ΔT – температурный напор.

Измерения статической характеристики проводились трижды. Каждая из полученных характеристик аппроксимировалась линейным уравнением. По системе из трех уравнений были определены усредненные характеристики для электрического и классического методов. Ниже приведены графики рассчитанных таким способом коэффициентов теплоотдачи (рисунки 4.18 и 4.19).

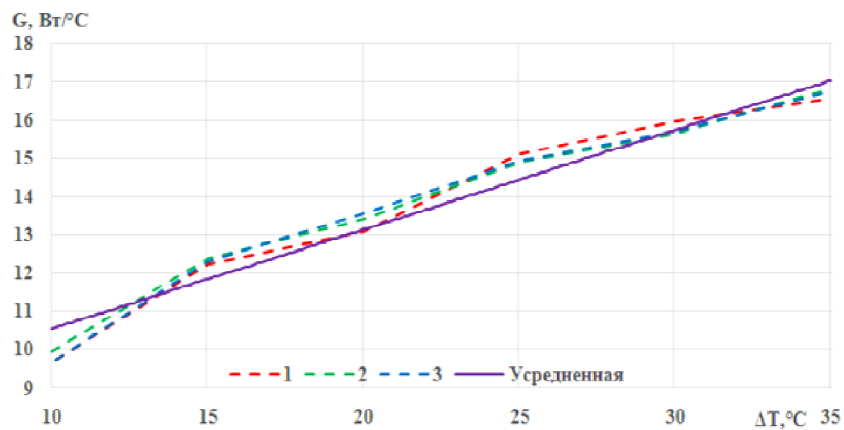


Рисунок 4.18 – Коэффициент теплоотдачи для электрического метода

Динамическую характеристику определяли в режиме остывания: от максимального значения температурного напора до $10\text{ }^\circ\text{C}$. Теплоемкость ОП вычисляли как сумму теплоемкостей алюминиевого корпуса радиатора и воды в нем. Коэффициент теплоотдачи рассчитывали по формуле (4.1).

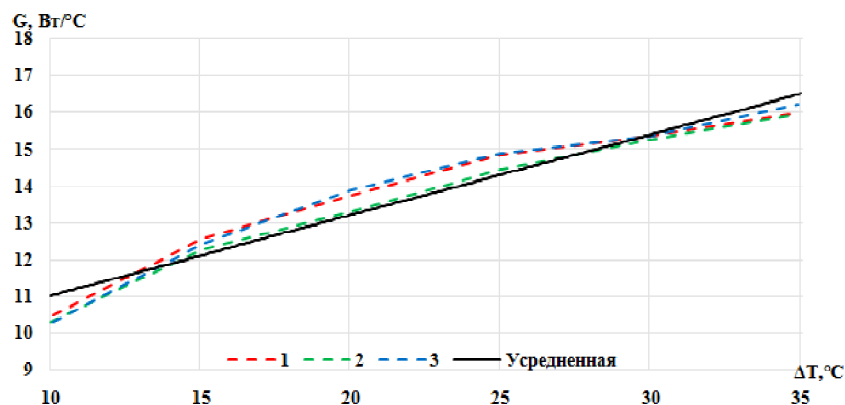


Рисунок.4.19 – Коэффициент теплоотдачи для прямого метода

Результаты сравнений статических и динамических характеристик коэффициента теплоотдачи приведены на рисунке 4.20.

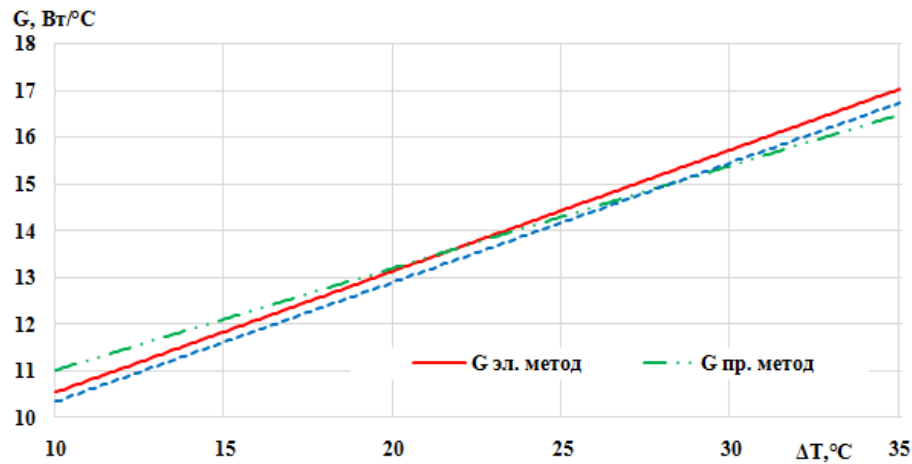


Рисунок 4.20 – Сравнение статических и динамических характеристик коэффициента теплоотдачи

Расхождения значений динамического коэффициента теплоотдачи относительно статического, замеренного электрическим способом, колеблются от $-1,7\%$ при $\Delta T = 35\text{ }^\circ\text{C}$, до $-1,9\%$ при $\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$.

Расхождения значений динамического коэффициента теплоотдачи относительно статического, замеренного классическим способом, колеблются от $-6,1\%$ при $\Delta T = 35\text{ }^\circ\text{C}$, до $1,5\%$ при $\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$.

Столь малое расхождение говорит в пользу адекватности математической модели и метода измерения.

Измерения на ребре ОП

Аналогичным образом были сняты и обработаны характеристики коэффициента теплоотдачи для варианта с термодатчиками на ребре. Расхождения динамической и статических характеристик для каждого метода измерений (электрический и классический) превышают 20% . В этой связи считаем установку датчиков на ребре нецелесообразным.

Таким образом, во-первых, проведенные эксперименты подтвердили адекватность применения математической модели и метода измерения для алюминиевого радиатора. Во-вторых, конструкция измерителя т/э должна

обеспечивать измерение температуры каркаса в геометрическом центре ОП. И, наконец, предпочтительнее использование двух термодатчиков для измерения температур на соседних звеньях каркаса для повышения достоверности измерений.

4.5.3 Экспериментальное исследование эффективности конвектора

Целью данного исследования являлся поиск точки установки измерителя т/э, которая адекватно отражала бы среднюю температуру конвектора, как в режиме статического равновесия, так и в режиме остывания. Для этого использовали семь термопар и съемку тепловизором. Первая группа экспериментов была посвящена исследованию конвектора по семи точкам подключения термопар. Схема расстановки показана на рисунке 4.21.

Из рисунка видно, что в ходе экспериментов вход и выход конвектора располагались справа, а изгиб – слева. Вход подключался к трубе конвектора, расположенной у стены, выход – труба ближе к экрану. Первая пара датчиков устанавливалась на трубах в геометрическом центре ОП. Вторая и третья пары располагались на одинаковом расстоянии от центральной пары вблизи краев орбренного участка (4 ребра от края). Седьмая точка измерения температуры находилась в центре изгиба.

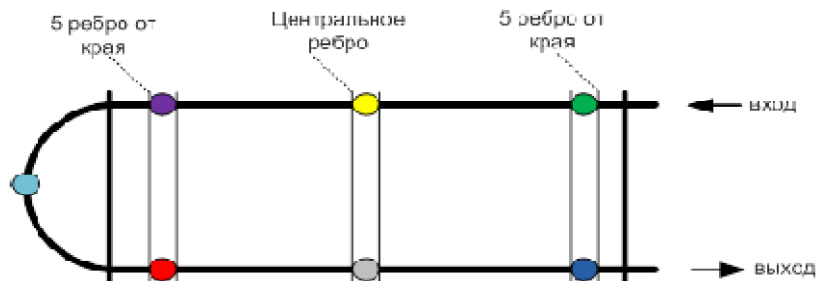


Рисунок 4.21 – Расположение датчиков на конвекторе

Эксперимент проводился при следующих условиях: конвектор собран в штатной конфигурации. Скорость насоса максимальная, шунт закрыт,

регулирующая арматура полностью открыта, нагрев ~50%. Запись данных проводили для двух режимов: статики и остывания. Изучались данные семи датчиков, а средняя арифметическая температура рассчитывалась без датчика на изгибе. В результате получены зависимости коэффициентов теплоотдачи от разности температур:

В режиме статики установлено, что в распределении температур входной трубы существует «провал» в центре конвектора, тогда как выходная труба остывает монотонно. Правый датчик на входной трубе имеет максимальную температуру орбренного участка, тогда как правый датчик на выходной трубе – минимальную. Температура центрального датчика входной трубы оказывается ниже температуры центрального датчика выходной трубы. Эксперименты показали также, что левый край входной трубы всегда холоднее правого края входной и левого края выходной труб. Датчик на изгибе фиксирует максимальную из всех датчиков температуру. Полученные данные существенно отличаются от результатов эксперимента в режиме остывания.

Так, **в режиме остывания** в первоначальный момент (~2-х минут), происходит перераспределение температур, измеряемых датчиками. В дальнейшем резких изменений распределения температуры не обнаружено. При этом изгиб остывает медленнее. После фазы перераспределения температуры правых датчиков уменьшаются до температуры изгиба. Центр прибора характеризуется максимальной скоростью остывания.

Для **поиска оптимальной точки** установки температурного датчика провели анализ измеренных температур. Установлено, что центральный датчик выходной трубы и левая пара датчиков в статике имели температуру, максимально близкую к средней. Получены зависимости коэффициента теплоотдачи по датчикам на изгибе, левому датчику входной трубы, центральному датчику выходной трубы и по средней температуре. Самая близкая корреляция датчика на изгибе, но в статике температура изгиба

постоянно завышает. Левый датчик выходной трубы так же имеет неплохую сходимость, как по коэффициенту теплоотдачи, так и по температуре в статике. Центральной датчик выходной трубы имеет завышенный коэффициент теплоотдачи.

Таким образом, измерения по семи точкам оказались недостаточными для определения оптимальной точки. Кроме того, остались невыясненными следующие вопросы: причина температурного «провала» в центре входной трубы и превышение температуры левого края выходной трубы над таким же краем входной трубы. Эти противоречия не позволяют полностью описать поведение ОП.

Для более детального понимания проводили дополнительные исследования тепловизором. Съемка тепловизором проводилась сверху. Как видно из рисунка 4.22 температурные метки были выставлены на всей протяженности обеих труб конвектора внутри оребренного участка, что позволило построить график изменения температур на всем протяжении исследуемого участка. В режиме статики было сделано два кадра. В режиме остывания съемку проводили с периодом в две минуты.

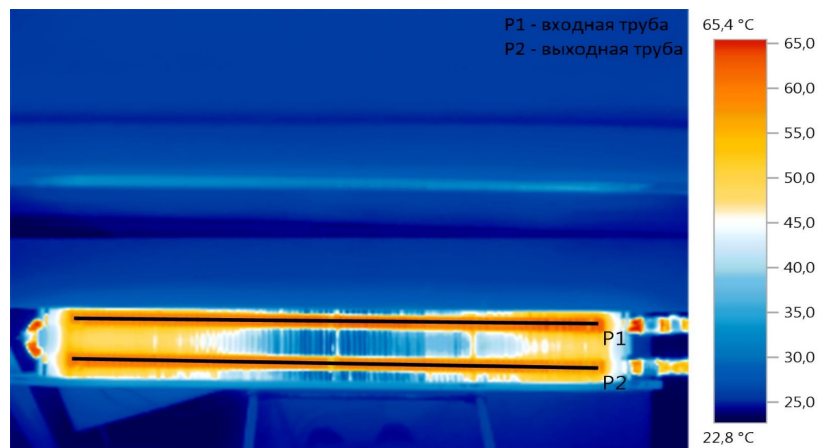


Рисунок 4.22 – Снимок конвектора тепловизором сверху

В результате этих дополнительных исследований было установлено, что **в режиме статики** распределение температуры по входной трубе имеет резкий «провал». «Провал» начинается на расстоянии $\sim 1/8$ длины трубы от

входа и имеет протяженность $\sim 1/4$ длины трубы. Значение температуры в начале входной трубы составило $62,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как в «провале» достигает значения температуры выходной трубы на том же геометрическом участке и равно $59,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. После «провала» температура входной трубы принимает начальное значение $62,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и далее монотонно убывает на всей своей протяженности до температуры $58,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура выходной трубы в точке у начала изгиба имела значение выше, чем температура входной трубы в аналогичной точке и составила $60,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура выходной трубы, начиная с точки у начала изгиба, монотонно убывала до $57,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение температур в режиме статики приведено на рисунке 4.23.

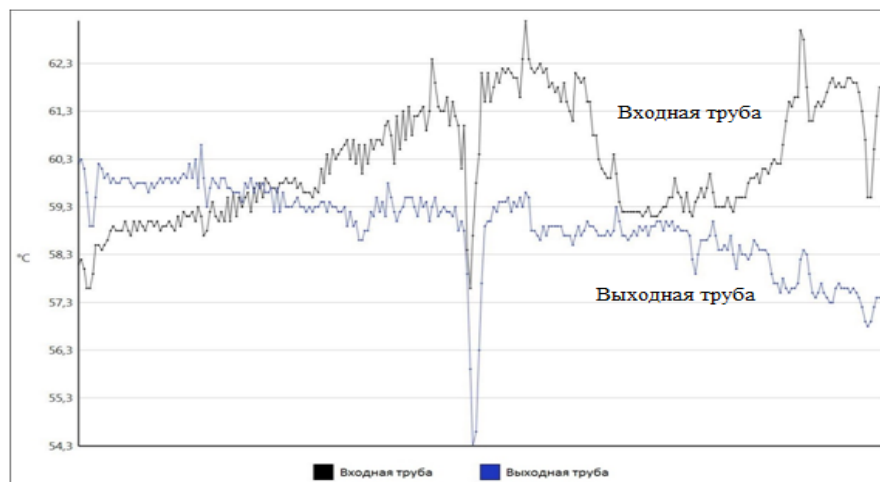


Рисунок 4.23 – Распределение температуры по конвектору в режиме статики

В режиме остывания при использовании тепловизора было получено, что спустя две минуты с начала остывания распределение температуры вдоль труб приобретало квази параболический вид, когда левый край у изгиба трубы ниже правого у входа и выхода конвектора. Нижняя точка параболы оказалась смещенной от центра в сторону изгиба. Правый край параболы входной трубы лежит выше, чем аналогичный край параболы выходной трубы. Температуры левых краев практически совпадают друг с другом по значению. При дальнейшем остывании обнаружены следующие тенденции:

- распределение температуры на входной и выходной трубах сохраняет вид параболы;

– сохраняются превышение температур правого края параболы над левым, при этом разница в начале остывания составляет $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как в конце достигает $4\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– сохраняется положение нижней точки параболы: значение температуры в нижней точке меньше значения левого края в начале остывания на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в конце – на $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– с увеличением времени с момента остывания параболы входной и выходной труб начинают вкладываться в друг друга.

Типичное температурное поведение конвектора при остывании в экспериментах с тепловизором приведено на рисунке 4.24.

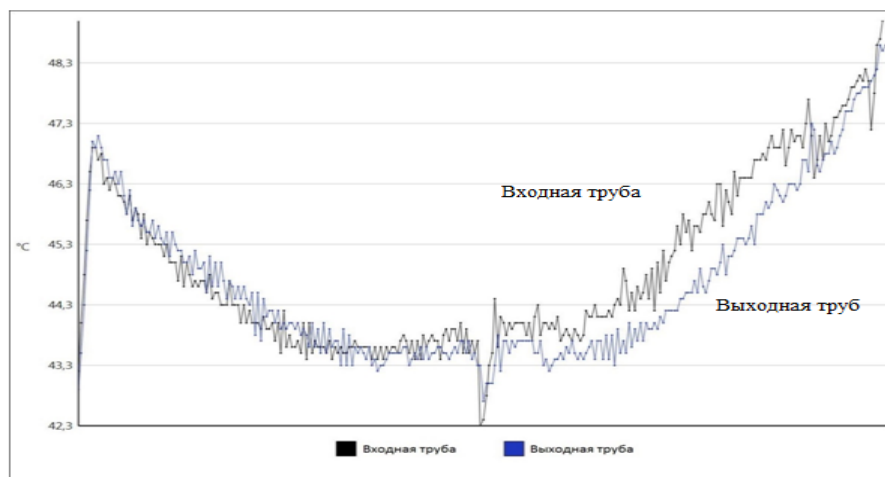


Рисунок 4.24 – Распределение температуры по конвектору после 4 минут с момента начала остывания

Были проведены исследования **по семи точкам отдельных труб конвектора**. В данной серии экспериментов способ подключения конвектора не изменялся. Тогда как датчики располагали вдоль одной исследуемой трубы с номерами в порядке возрастания от правого края (вход или выход) до левого (изгиб). Первый датчик был расположен на расстоянии четырёх ребер от правого края оребренного участка, тогда как седьмой датчик находился на расстоянии четырёх ребер от левого края оребренного участка. Четвертый датчик размещали в геометрическом центре трубы. Эксперименты проводили в следующих режимах испытаний.

Сначала исследуемая труба с семью датчиками подключалась поочередно к входу и к выходу. Датчики располагались как на ближней трубе, так и на дальней. Регулирующий клапан имел три полных оборота, и каждый оборот был размечен на 16 равных частей. Было проведено четыре цикла исследований: дальняя входная труба, дальняя выходная труба, ближняя входная труба, ближняя выходная труба. Изучение зависимости распределения температуры вдоль трубы от скорости теплоносителя проводили в статике для 9 разных режимов, параметры которых приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень режимов исследования распределения температуры по трубе

Режим	Процент нагрева, %	Степень открытия клапана, в долях	Скорость насоса	Использование шунта
1	35	1/16	1	Открыт
2	35	1/8	1	Открыт
3	40	2/8	1	Открыт
4	40	4/8	1	Открыт
5	45	8/8	1	Открыт
6	45	Полностью открыт	1	Открыт
7	50	Полностью открыт	1	Закрит
8	50	Полностью открыт	2	Закрит
9	50	Полностью открыт	3	Закрит

В экспериментах дополнительно варьировалась величина конвективного потока для изучения зависимости распределения температуры вдоль трубы от абсолютной температуры конвектора и от величины конвективного потока. Эксперименты проводили при полностью открытой регулирующей арматуре, закрытом шунте и третьей скорости насоса:

- 50% нагрева, конвекция есть;
- 50% нагрева, конвекция перекрыта;
- 25% нагрева, конвекция есть;
- 25% нагрева, конвекция перекрыта.

Конвективный поток перекрывался при помощи закрытия оребренного участка сверху. Для изучения зависимости распределения температуры вдоль трубы при остывании записывали кривую остывания с максимально возможной температурой ОП.

Проведенные эксперименты позволили сделать следующие выводы:

- для дальней трубы в режиме входа «провал» на 2 датчике отчетливо проявляется, начиная с 4/8 открытия регулирующего вентиля с амплитудой 2–3 °С при максимальной скорости теплоносителя;
- для ближней трубы в режиме входа «провал» имеет протяженность от 2 до 5 датчиков и проявляется, начиная с 4/8 открытия регулирующего вентиля с амплитудой 2–3 °С при максимальной скорости теплоносителя;
- для ближней и дальней труб в режиме входа при малых скоростях потока (от 1/16 до 4/16) температура убывает монотонно от входа к изгибу;
- для дальней и ближней труб в режиме выхода при любых скоростях наблюдается монотонное убывание температуры вдоль трубы от изгиба к выходу;
- для 25% и 50% нагрева при перекрытии конвективного потока «провал» на входных ближней и дальней трубах уменьшается;
- при остывании распределение температуры вдоль труб соответствует данным полученным с использованием тепловизора.

Сравнение поведения входных труб при нагреве 25% и 50% показывает следующие значения неравномерности распределения температуры:

1. Величина «провала» у дальней входной трубы имеет значения 4 °С и 1,5 °С для нагрева 50% и 25%, соответственно. Что в процентном отношении к входному значению температуры составляет 6,4% и 4% соответственно.

2. Величина «провала» у ближней входной трубы имеет значения 3°C и 1°C для нагрева 50% и 25%, соответственно. Что в процентном отношении к входному значению составляет 5% и 2,3%, соответственно и говорит, что неравномерность прогрева уменьшается при снижении абсолютной температуры трубы, которое связано с уменьшением коэффициента теплоотдачи при падении температуры.

Таким образом, во всех режимах работы конвектора изменяется неравномерность прогрева конвектора, а при остывании распределение температур вдоль конвектора приобретает квази параболический вид. Худший случай температурного «провала» зафиксирован на максимальной скорости движения теплоносителя и максимальном разогреве без нарушения конвекции. Температурный «провал» в этом случае имеет протяженность в $1/4$ трубы и амплитуду в 3°C . Оценочное температурное отклонение от теоретического распределения температур составляет 2,5%. Несмотря на это, оптимальная точка для регистрации средней температуры поверхности ОП в статике и динамике может находиться как в точке на выходной трубе ближе к изгибу, так и на самом изгибе.

Следующая группа экспериментов была проведена для **нахождения коэффициента теплоотдачи**. В данном случае конвектор подключали в штатной конфигурации в систему с водяным теплоносителем. Система в своем составе содержит электрический водонагреватель, циркуляционный насос и подводящую арматуру (контур), к которой подключается ОП. Для учета всей сгенерированной т/э водонагреватель включали в сеть электропитания через электрический счетчик с импульсным выходом. Циркуляционный насос имеет ручной переключатель для изменения скорости движения теплоносителя по системе.

При вычислении т/э, отдаваемой радиатором, необходимо учесть тепловые потери, излучаемые подводящей арматурой [47]. Для нахождения этих тепловых потерь был проведен ряд испытаний контура без ОП. В процессе экспериментов контролировали разность температур между

выходом водонагревателя и воздухом в помещении. В результате были получены зависимости тепловых потерь от разности температур при разных скоростях движения теплоносителя.

Коэффициент теплоотдачи конвектора находили в статическом и динамическом (режим остывания) режимах. Исходя из вышеописанных исследований, температуру на изгибе принимали в качестве средней для всей поверхности ОП, рассчитанной по значениям от трех температурных датчиков, закрепленных на нем. Датчик температуры воздуха помещения располагался на расстоянии 1 метра от ОП.

При испытаниях в статическом режиме для нахождения коэффициента теплоотдачи температуру на выходе водонагревателя стабилизировали относительно температуры воздуха в течение трех часов. Мощность ОП рассчитывалась как разность измеренного значения и тепловых потерь контура. Температурные зависимости коэффициента теплоотдачи были сняты статическим методом в диапазоне 5–45 °С с шагом в 5 °С с использованием соотношения Ньютона – Рихмана (1.1). При испытаниях в динамическом режиме прекращалась подача теплоносителя в конвектор. Происходящее остывание ОП записывалось программой-регистратором с шагом в 30 с. Записанные данные обрабатывали по формуле:

$$G_{\text{ист}} = C \frac{dT}{dt} (T_{\text{ист}} - T_{\text{возд}}) \quad (4.5)$$

где C – теплоемкость всего ОП.

Теплоемкость конвектора вычисляли как сумму теплоемкостей материала трубы и теплоносителя. Полученные экспериментальные зависимости приведены на рисунке 4.25. Рассчитанная зависимость коэффициента теплоотдачи от разности температур в диапазоне 15–45 °С имеет линейный характер. Поэтому на данном участке для удобства кривую аппроксимировали линейной зависимостью.

Были проведены исследования зависимости коэффициента теплоотдачи от разности температур для двух режимов работы насоса. Скорость теплоносителя в этом случае отличалась в два раза [43].

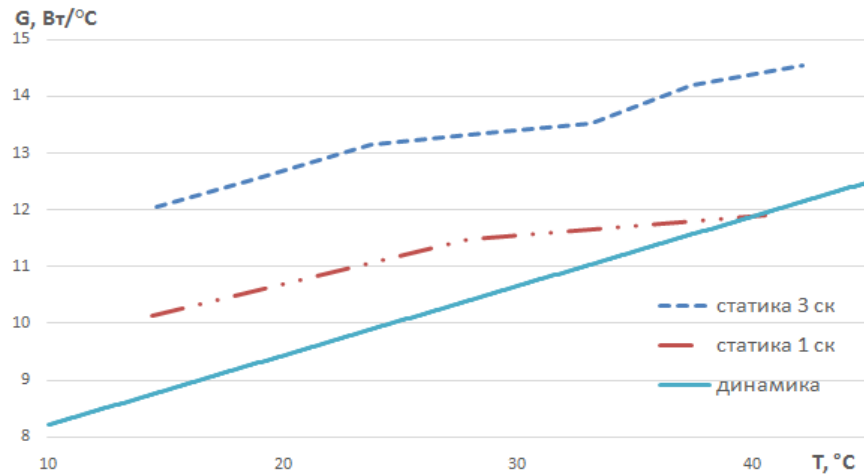


Рисунок 4.25 – Зависимости коэффициентов теплоотдачи от разности температур для динамического и статических режимов

Анализируя представленные данные, можно сделать следующие выводы.

1. Измеренные коэффициенты теплоотдачи в исследованном диапазоне температур (15–45 °C) носят линейный характер.

2. Коэффициенты теплоотдачи, измеренные статическим методом, проявляют аналогичное поведение, но отличаются друг от друга по абсолютному значению, в среднем 17%. Большая величина расхождения обусловлена смещением средней точки температуры поверхности конвектора и методом учета тепловых потерь. Тепловые потери в контуре изменяются при подключении к нему испытуемого ОП.

3. Динамическая характеристика по абсолютным значениям лежит ниже статических, но имеет больший угол наклона. Эти расхождения могут быть вызваны некорректным использованием общей теплоемкости при расчете зависимости коэффициента теплоотдачи по остыванию.

4.6 Испытания методики на жилом доме находящемся в эксплуатации

Тестовые испытания предлагаемой методики проводились на объекте номер 3 (раздел 4.1). В начале эксперимента тепловая система находилась в режиме эксплуатации. Все тепловые приборы были прогреты, помещения находились в обычном тепловом режиме. На ОП закреплялись терморадиомодули в составе термодатчика и ведомого радиомодема. В одном из помещений располагался сервер, к которому был подключен ведущий радиомодем, собиравший данные со всех радиомодулей. Температура воздуха измерялась отдельными выносными датчиками. Значения температур по радиоканалу передавались на сервер и записывались в память по мере поступления.

В режиме эксплуатации, измерения температур производились 1 раз в час. Данные по температурам передавались на сервер раз в сутки. В режим калибровки сервер переводился по команде оператора. Одновременно перекрывался вентиль подачи теплоносителя в стояк. Термодатчики передавали информацию о температурах остывающих радиаторов с интервалом в 1 минуту. Процесс калибровки занимал три часа. После ее завершения возобновлялась подача теплоносителя и тепловая система переводилась в режим эксплуатации.

В результате были получены зависимости коэффициента теплоотдачи ОП от температурного напора, приведенные на рисунке 4.26.

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 близкие друг к другу. Полученные результаты демонстрируют разные условия эксплуатации ОП.

Заметим, что в режиме эксплуатации не работал ведомый модуль в подъезде на первом этаже и в расчетах его показания не учитывали. С остальных модулей были получены данные за четверо суток.

С использованием коэффициентов теплоотдачи и средних температур радиаторов, а также отдаваемой мощности стояков, посчитанная за данный период т/э составила 387 182 Вт*ч.

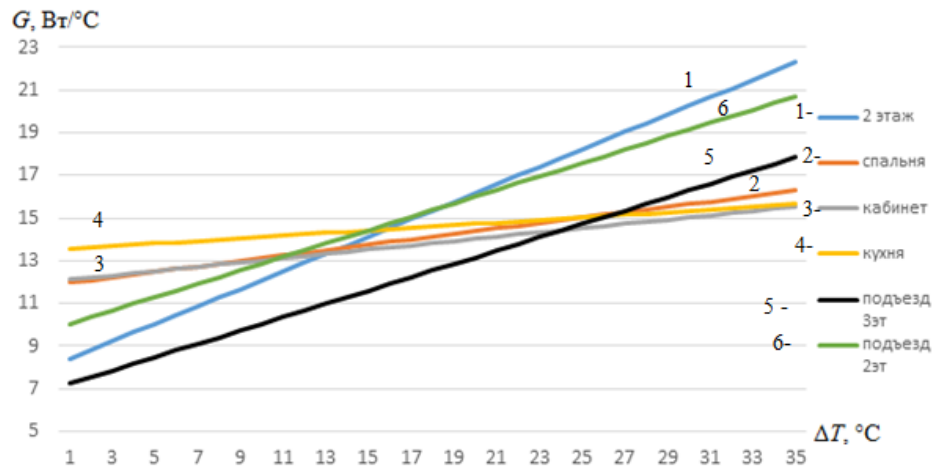


Рисунок 4.26 – Графики зависимости коэффициента теплоотдачи ОП от температурного напора

Выводы

1. Проведенные исследования эффективности ОП позволили проработать структурную схему, конструкцию терморадиомодуля и программное обеспечение всей системы.
2. Тестовые испытания в жилом здании доказали работоспособность системы при ее практической эксплуатации.

4.7 Экономический эффект от применения предлагаемой методики

По результатам тестового эксперимента за четверо суток, проведенного 25–28.01.17 на объекте номер 3, для квартиры № 11 были произведены оценочные расчеты, позволившие сопоставить различные методы начисления за потребленную т/э. Данные снимались с 3 ОП (8-секционные чугунные радиаторы). Всего в квартире 7 аналогичных радиаторов. Из них четыре подключены к другим стоякам.

Данные по квартире из платежки за январь: $S - 122 \text{ м}^2$, начислено за услугу теплоснабжение – 5 264 рублей, что составило – 43,15 руб./м². По дому за рассматриваемый период потребления тепла по показаниям общедомового прибора учета составило – 59,15 Гкал, при стоимости 1 277 руб./Гкал.

С использованием описанной выше методики т/э, посчитанная за четверо суток, составила 37 169 кВт. Приведенные данные позволяют сравнить затраты на отопление, рассчитанные тремя способами: по нормативам, по общедомовому счетчику и предложенным методом.

Расчет по нормативу: $S - 122 \text{ м}^2$, 6 радиаторов по 8 секций, 1 радиатор в 4 секции. Всего 52 секции. Доля площади квартиры на 3 радиатора составляет

$$122 \cdot 24(3 \cdot 8) / 52 = 56,31 \text{ м}^2, \text{ или } 56,31 / 122 = 0,46\%.$$

Итого по нормативу за 1 м² – 68,99 руб. Тогда $68,99 \cdot 122 = 8\,416,78$ руб. За 3 комнаты $8\,416,78 \cdot 0,46 = 3\,871,72$ за месяц (31 день).

За 1 день – 124,89 руб.

За 4 дня – **499,57 руб.**

Расчет по общедомовому теплосчетчику: дом потребил 59,15 Гкал. Норматив на долю одной квартиры по 3 радиаторам составляет

$$56,31 \cdot 43,15 = 2\,429,77 \text{ руб.}$$

За 1 день – 78,38 руб

За 4 дня – **313,52 руб.**

Расчет по предлагаемой методике: по 3 радиаторам в квартире – 164 979 Вт*ч. $1 \text{ кВт} = 0,0008598 \text{ Гкал/час.}$

Отдача по 3 радиаторам за 4 суток

$$164,9 \cdot 0,0008598 = 0,14178 \text{ Гкал}$$

$$0,14178 \cdot 1277 = \mathbf{181,05 \text{ руб.}}$$

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. Разница с

нормативным расчетом составила ~60%, с коллективным способом учета 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, согласно расчету для участия в конкурсе на грант 2016 г. «Фонда посевных инвестиций» РФ, составляла 2 600 на один прибор. Следовательно, собственник экспериментальной квартиры потратит на установку системы $7 \times 2\,600 \text{ руб.} = 18\,200$ рублей. При средней экономии 2 000 руб./ месяц в отопительный сезон затраты окупятся уже на второй год эксплуатации. 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 квартиры принесет ~100 тысяч рублей прибыли собственнику данной квартиры.

Выводы к главе 4

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Предлагаемая методика и модель отвечают происходящим процессам теплообмена между ОП и помещением, позволяет адекватно измерять т/э, отдаваемую ОП, в том числе в динамических режимах работы с учетом его индивидуальных особенностей (размещение в помещении, наличие мебели и подоконников, окраска, и др.).
2. Проведенное экспериментальное исследование позволило найти значения коэффициента теплоотдачи в рабочем диапазоне температур для различных многосекционных ОП. Показано что погрешность вычисления т/э по предлагаемой методике (меньше 6,1 %).
3. При вычислении т/э использованы статистические закономерности поведения температур ОП и воздуха в помещении. Учтены основные факторы, дающие вклад в погрешность измерения: погрешность нахождения

коэффициента теплоотдачи, тепловой контакт присоединения температурного датчика к ОП, загрязнение ОП в процессе эксплуатации из-за несоответствия теплоносителя [29], неточность измерения температуры воздуха и др.

4. Подтверждено наличие характерной точки на поверхности ОП соответствующей средней температуре поверхности ОП при эксплуатации его в рабочих диапазонах.

5. Применение метода в коммерческих расчетах выгодно конечному пользователю и представляет собой ощутимую величину даже для одного потребителя, не говоря уже об экономике страны.

Заключение и выводы

Поставленные в начале диссертации задачи нашли свое решение. Был теоретически обоснован метод измерения коэффициента теплоотдачи ОП в нестационарных режимах и реальных условиях эксплуатации на базе системы нелинейных дифференциальных уравнений и натурных экспериментов, производящихся непосредственно на месте установки прибора. В ходе экспериментальной проверки получили подтверждение результаты моделирования. Разработанная методика позволяет вычислять т/э, отдаваемую ОП, в реальных физических величинах с учетом индивидуальных характеристик ОП. Проведенные тестовые испытания дали обнадеживающий результат подтверждающий необходимость коммерческого внедрения АСКУТЭ в ЖКХ.

Основные выводы и результаты работы.

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

3. Интерактивный характер предлагаемой методики позволяет использовать ее для анализа перетоков т/э при параллельном (последовательном) обогреве нескольких помещений и в зависимости от способа разводки и расположения ОП. Исследование на основе математической модели позволило установить характер и степень влияния

способа подключения ОП к системам теплоснабжения для случая вертикальной однотрубной разводки и байпасных схем подключения ОП.

4. Аппаратная реализация прототипа измерителя т/э представляет собой два температурных датчика, которые измеряют средние 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 т/э.

5. 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. Кроме того статистическая обработка результатов измерения за длительный период дополнительно позволяет снизить погрешность при вычислении т/э.

6. 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.

7. Найдены значения коэффициента теплоотдачи в рабочем диапазоне температур различных многосекционных ОП. Показано что погрешность вычисления т/э по предлагаемой методике составляет не более 6,1%.

8. Достоинством предлагаемой методики является измерение в реальных физических величинах и учет индивидуальных характеристик ОП. Проведенные тестовые испытания дают обнадеживающий результат, подтверждающий эффективность алгоритма и необходимость внедрения АСКУТЭ в ЖКХ. Применение метода приводит к увеличению экономии до 40 % по сравнению с классическим (общедомовом) и до 60% по сравнению с нормативным способом измерения/вычисления количества т/э, 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 учетом детального исследования конвективной и радиационной составляющих теплообмена;
- разработка методов и алгоритмов обработки данных, что повысит точность вычислений;
- разработка принципиальной схемы и конструкции электронного блока позволяющих снизить энергопотребление и повысить его срок службы в автономном режиме (работа от внутреннего источника питания);
- разработка программного обеспечения измерителя т/э необходимого для его встраивания в состав действующих АСКУЭ.

Список литературы

1. Автоматизация процессов мониторинга, регулирования и анализа режимов функционирования источников теплоты / В.Н. Бабенко, А.Н. Виноградов, А.В. Малышко [и др.] // Информатизация и системы упр. в промышленности. – 2004. – № 1. – С. 5–8.
2. Автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии и мощности (АИИС КУЭ) [Электронный ресурс] // Vigen Electro : сайт / ООО «Вижен Электро». – Красноярск, 2009–2017. – URL: <http://www.vigen-electro.ru/as.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).
3. Автоматизированные системы коммерческого учета тепловой энергии. Городское хозяйство и ЖКХ [Электронный ресурс] // Актин МЦФЭР. – 2006–2016. – URL: <http://www.gkh.ru/article/28706-avtomatizirovannye-sistemy-kommercheskogo-ucheta-teplovoy-energii>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 15.04.2017).
4. [Альфа Центр \[Электронный ресурс\] // Симэнерго.com : сайт. – Волгоград : Симэнерго, cop. 2009–2017. – URL: https://simenergo.com/catalog/askue/elster/po/alfatsentr](http://simenergo.com/), свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).
5. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Марков. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
6. Адрианов, В.Н. Конвективный и лучистый теплообмен / В.Н. Адрианов, С.М. Шорин. – М. : Высш. шк., 1975. – 231 с.
7. Алексеенко, С.В. Энергосбережение и энергоэффективность в ЖКХ / С.В. Алексеенко // Энергообеспечение и энергосбережение – региональный аспект : материалы докл. XII Всерос. совещ., Томск, 9–11 нояб. 2011 г. – Томск : Изд-во «СПб Графика», 2011. – С. 6–15.
8. Аникин, А. Обзор современных технологий беспроводной передачи данных в частотных диапазонах ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) и 434/868 МГц [Электронный ресурс] / А. Аникин // Беспровод. технологии. – 2011. –

№ 4. – С. 6–12. – URL : http://www.wireless-e.ru/assets/files/pdf/2011_4_6.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

9. Аношин, А. Протоколы связи в электроэнергетике. Предпосылки для создания стандарта МЭК 61850 [Электронный ресурс] / А. Аношин, А. Головин // Новости электротехники. – 2012. – № 3. – URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/75/07.php>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

10. Антенны 868 МГц [Электронный ресурс] // Мир беспроводных решений : сайт. – 2010–2017. – URL: http://www.wless.ru/query/engineer/?action=select&pf=tech&pf_id=3&prod=20&tech=3&type=23, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

11. АСКУЭ [Электронный ресурс] // Энергомера : сайт. – Б. м., 2001–2017. – URL: <http://www.energomera.ru/ru/products/askue>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 20.07.2017).

12. АСКУЭ – информационно-измерительная система «Энергомера» [Электронный ресурс] : информ. буклет / ОАО «Концерн Энергомера». – [Б. м., б. г.]. – 12 с. – URL: http://www.energomera.ru/documentations/booklets/booklet_askue_energomera.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

13. Балашов, О.В. Автоматизированная система контроля и учета бытового энергопотребления на базе комплекса технических средств «ЭМОС-МЗЭП» [Электронный ресурс] / О.В. Балашов, С.Г. Быченко // Энергосбережение. – 1999. – № 2. – URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=970, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

14. Банхиди, Л. Тепловой микроклимат помещений / Л. Банхиди. – М. : Стройиздат, 1981. – 247 с.

15. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : учеб. / В.Н. Богословский. – М. : Высш. шк., 1982 – 415 с.

16. Богословский, В.Н. Тепловой режим здания / В.Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1979. – 248 с.

17. Большой энциклопедический политехнический словарь [Электронный ресурс] // Академик : сайт. – М., 2000–2016. – URL: <http://http://dic.academic.ru/contents.nsf/polytechnic>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 05.05.2017).
18. Бошняк, Л.Л. Измерения при теплотехнических исследованиях / Л.Л. Бошняк. – Л. : Машиностроение, 1974. – 448 с.
19. Варфоломеев, Ю.М. Отопление и тепловые сети / Ю.М. Варфоломеев, О.Я. Кокорин. – М. : ИНФРА-М, 2006. – 480 с.
20. Васильев, А.П. Персидский залив в эпицентре борьбы / А.П. Васильев. – М. : Кр. Проспект, 1983. – 288 с.
21. Вербицкий, А.С. Что мешает поквартирному учёту тепла и воды в жилых зданиях / А.С. Вербицкий // Энергосбережение. – 2003. – № 1. – С. 38–43.
22. Вологдин, С.В. К вопросу об экономии тепловой энергии за счет регулирования тепловой нагрузки зданий / С.В. Вологдин, Р.Г. Шихарев // Проектирование и строительство в Сибири. – 2001. – № 2. – С. 20–22.
23. Володарский, Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, В.Н. Мамоговский, Ю.М. Туз. – Киев : Вища шк., 1987. – 280 с.
24. Волокитин, Д.А. Программно-технический комплекс «ТопИнфо-АТ»: учет электроэнергии на розничном и оптовом рынках / Д.А. Волокитин, Ю.О. Резник, С.Ю. Соловьев // Информатизация и системы упр. в промышленности. – 2007. – № 2. – С. 18–25.
25. Гаврилин, Н.П. Разработка программно-математической модели прогноза потребления энергии на основе фактических данных / Н.П. Гаврилин // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2005. – № 5. – С. 14–17.
26. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике / В.Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 2004. – 404 с.
27. Гмурман, В.Е. Теория вероятности и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 2003. – 479 с.

28. ГОСТ 12.1.005-76. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. – Введ. 01.01.77. – Переизд. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 33 с.

29. ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством [Электронный ресурс]. – Введ. 01.01.1985. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

30. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче теплоотражающих конструкций. – Введ. 01.01.1985. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 27 с.

31. ГОСТ 30494-96. Здания жилые и административные. Параметры микроклимата в помещениях [Электронный ресурс]. – Введ. 1999-03-01. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

32. ГОСТ 31168-14. Здания жилые. Метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление [Электронный ресурс]. – Взамен ГОСТ 31168-03 ; введ. 2015-01-01. – Доступ из информ.- справоч. системы «Кодекс».

33. ГОСТ Р МЭК 870-5-101-2001. Устройства и системы телемеханики [Электронный ресурс]. Ч. 5. Протоколы передачи. Разд. 101. Обобщающий стандарт по основным функциям телемеханики. – Введ. 2002-07-01. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

34. ГОСТ Р МЭК 60870-5-104-2004 Устройства и системы телемеханики [Электронный ресурс]. Ч. 5. Протоколы передачи. Разд. 104. Доступ к сети для ГОСТ Р МЭК 870-5-101 с использованием стандартных транспортных профилей. – Введ. 2005-07-01. – Доступ из информ. - справоч. системы «Кодекс».

35. ГОСТ Р 8.563-2009 ГСИ «Методики (методы) измерений» [Электронный ресурс]. - Взамен ; введ. 2009-12-15. – Доступ из информ. - справоч. системы «Кодекс».

36. Гримитлин, М.И. Распределение воздуха в помещениях / М.И. Гримитлин. – М. : Стройиздат, 1982. – 164 с.

37. Действующая методика испытания отопительных приборов / [Электронный ресурс] / В.И. Сасин [и др.] // АВОК : сайт. – М., 1991–2017. – URL : https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3630, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

38. Динамический метод измерения эффективности отопительных приборов / А.В. Пуговкин [и др.] // Приборы. – 2014. – № 7. – С. 10–15.

39. Ерёмкин, А.И. Тепловой режим зданий: учебное пособие для вузов / А.И. Ерёмкин, Т.И. Королёва. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 364 с.

40. Заявка 2005117011 Российская Федерация, МПК G01K17/08. Устройство для измерения теплового измерения (варианты) [Электронный ресурс] / Дацюк Т.А. [и др.] – № 2005117011/28; заявл. 27.05.2005; опубл. 10.03.2006. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

41. Заявка 2012134982 Российская Федерация. Способ измерения сопротивления теплоотдачи отопительного прибора [Электронный ресурс] / Пуговкин А.В., Купреков С.В., Муслимова Н.И. – № 2012134982/28; заявл. 15.08.2012; опубл. 20.02.2014. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

42. Заявка 2013135623 Российская Федерация, МПК G01K17/08. Способ учета тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором [Электронный ресурс] / Пуговкин А.В., Купреков С.В., Муслимова Н.И. – № 2013135623/28; заявл. 29.07.2013; опубл. [10.02.2015](#). – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

43. Зингер, Н.М. Оптимизация конструкции сопла и иглы водоструйного насоса (элеватора) с регулируемым сечением сопла / Н.М. Зингер, А.И. Белевич // Теплоэнергетика. – 1990. – № 2. – С. 60–63.

44. Инженерное оборудование зданий и сооружений : энцикл. / В.С. Алексеев [и др.]. – М. : Стройиздат, 1994. – 512 с.

45. Использование диапазонов 433 и 868 МГц [Электронный ресурс] // Время электроники : сайт. – 2007–2017. – URL: <http://www.>

russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/58633, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

46. Казачков, В.С. Учет теплopotребления в многоквартирных домах / В.С. Казачков, В.В. Шалай, А.А. Попов // Ом. науч. вестн. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2007. – № 3. – С. 78–83.

47. Калишевский, Л.Л. Некоторые результаты исследования турбулентного движения / Л.Л. Калишевский, С.В. Салиховкин // Теплоэнергетика. – 1967. – № 1. – С. 65–69.

48. Карпов, В.Н. Поквартирный учет расхода тепла в системах отопления. Проблемы внедрения [Электронный ресурс] / В.Н. Карпов // АВОК : сайт. – 2012. – № 4. – URL : https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5249 свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

49. Карпов, В.Н. Поквартирный учет расхода тепла. Теплосчетчики или водомеры / В.Н. Карпов // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строит. теплофизика. – 2013. – № 2. – С. 102–106.

50. Кормилин, В.А. Микропроцессоры в устройствах и системах радиосвязи, радиовещания и телевидения : учеб. пособие / В.А. Кормилин, А.Г. Костевич. – Томск : ТМЦДО, 2004. – 313 с.

51. Корниенко, А. (Korni). Стандарт EN 442. Тепловая мощность отопительных приборов [Электронный ресурс] : материалы журн. «ТермометрЪ» / А. Корниенко (Korni) // Мlynok : Б-ка статей на проф. тему : персон. блог / Александр Корниенко. – 2010. – 22 мая. – URL: <https://mlynok.wordpress.com/2010/05/22/стандарт-en-442-тепловая-мощность-отопите>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

52. Крупнов, Б.А. Руководство по проектированию систем отопления вентиляции и кондиционирования воздуха / Б.А. Крупнов, Н.С. Шарафутдинов. – М.; Вена : [Б. и.], 2006. – 216 с.

53. Кузник, И.В. Централизованное теплоснабжение: проектируем эффективность / И.В. Кузник. – М. : Изд. дом МЭИ, 2008. – 155 с.

54. Купреков, С.В. Анализ перераспределения тепловой энергии при использовании квартирных регуляторов тепла / С.В. Купреков,

Н.И. Муслимова // Энергоресурсосбережение. Диагностика : сб. материалов XV Междунар. науч.-практ. конф., Димитровград, 26–28 марта 2013 г. – Димитровград : Мир печати, 2013. – С. 295–300.

55. Кутателадзе, С.С. Моделирование теплоэнергетического оборудования / С.С. Кутателадзе, Д.Н. Ляховский, В.А. Пермяков. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 351 с.

56. Ливчак, В.И. Сомнения в обоснованности энергоэффективности принципов автоматизации систем водяного отопления по концепции ООО «Данфосс» [Электронный ресурс] / В.И. Ливчак // Энергосовет. – 2012. – № 3. – С. 44–52. – URL: http://www.energosovet.ru/bul/22_2012.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

57. Ливчак, В.И. Теплоснабжение жилых микрорайонов города на современном этапе / В.И. Ливчак // Энергосбережение. – 2005. – № 1. – С. 47–57.

58. Логинов, А.Ю. Построение систем передачи данных для инженерных систем / А.Ю. Логинов // Коммерческий учет энергоносителей : тр. XXV Междунар. науч.-практ. конф. – СПб. : Борей-Арт, 2007. – С. 300–306.

59. Логинов, А.Ю. Эволюция систем контроля, учёта энергоресурсов / А.Ю. Логинов // Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности : сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., С.-Петербург, 31 мая–2 июня 2011 г. – СПб. : Политехника, 2011. – С. 42–46.

60. Манюк, В.И. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей / В.И. Манюк, Я.П. Каплинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1982. – 215 с.

61. Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения [Электронный ресурс] / А.В. Пуговкин [и др.] // Управление, вычислительная техника и информатика : докл. ТУСУРа. – 2010. – № 2. – С. 293–298. – URL: <http://old.tusur.ru/filearchive/reports-magazine/2010-2-1/293.pdf>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 16.04.2017).

62. МГСН 2.01–99. Энергосбережение в зданиях. Нормы по тепловодоэлектроснабжению для вновь строящихся зданий [Электронный ресурс]. – Введ. 1999–02–23. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

63. МДС 41-4.2000. Методика определения количеств тепловой энергии и теплоносителя в водяных системах коммунального теплоснабжения (практическое пособие к Рекомендациям по организации учета тепловой энергии и теплоносителей на предприятиях, в учреждениях и организациях жилищно-коммунального хозяйства и бюджетной сферы) [Электронный ресурс] : утв. приказом Госстроя России от 06.05.2000 № 105. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

64. Медведев, В.А. Методы «комбинированных» измерений при индивидуальном учете потребленной тепловой энергии / В.А. Медведев // Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности : V Междунар. науч.-техн. конф., С.-Петербург, 27–29 мая 2014 г. – СПб. : [б. и.], 2014. – С. 184–190.

65. Методика определения номинального теплового потока отопительных приборов при теплоносителе воде / Т.А. Бершидский, В.И. Сасин, В.А. Сотченко. – М. : НИИСантехники, 1984. – 29 с.

66. Метрология, стандартизация и сертификация. Основные термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iit.tusur.ru/stud.php>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 16.04.2017).

67. Микроклимат зданий и сооружений / В.И. Бодров [и др.] – Н. Новгород : Арабеск, 2001. – 393 с.

68. Национальный доклад «Теплоснабжение Российской Федерации. Пути выхода из кризиса» [Электронный ресурс] // РосТепло Ру : информ. справ. система по теплоснабжению : [портал]. – М., 2003–2017. – URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=596, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 05.05.2017).

69. Немцов, Б. Коммунальные тарифы, Путин и «Газпром» [Электронный ресурс] : независимый эксперт. докл. / Б. Немцов // Движение

Солидарность : [сайт]. – 2000–2016. – URL: <http://www.libros.am/book/read/id/330705/slug/putin-itogi-10-let-nezavisimyyj-ehkspertnyjj-doklad>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 05.05.2017).

70. Низовцев, М.И. Влияние режимных параметров и направления подачи теплоносителя на работу регистраторов расхода тепла / М.И. Низовцев, В.И. Терехов, З.П. Чепурная // Теплосиб-2006 : материалы 5 Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : Сибпринт, 2006. – С. 48–53.

71. Низовцев, М.И. Влияние физических параметров на радиаторные коэффициенты регистраторов расхода тепла отопительных приборов / М.И. Низовцев, В.И. Терехов, З.П. Чепурная // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строит. теплофизика. – 2005. – № 5. – С. 36–40.

72. Никитин, С. Обзор датчиков температуры [Электронный ресурс] / С. Никитин // Энергосбережение, автоматизация в промышленности, интеллектуальные здания и АСУТП : сб. ст. : сайт. – Опул. 15.05.2010. – URL: <http://d.17-71.com/2009/04/14/obzor-datchikov-temperaturyi>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 15.04.2017).

73. Никитина, С.В. Поквартирный учёт и регулирование тепла: обзор существующего оборудования и способов учёта / С.В. Никитина // Энергосбережение. – 2003. – № 2. – С. 40–43.

74. Никитина, С.В. Система квартирного учёта тепла INDIV AMR с дистанционным считыванием показаний [Электронный ресурс] / С.В. Никитина // Клуб комфорт / DANFOSS. Enginireeng Tomorrow : тепловой портал. – 2007. – № 83. – С. 6–7. – URL: <http://heating.danfoss.ru/workarea/downloadasset.aspx?id=17179937280>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

75. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

76. О коммерческом учете тепловой энергии, теплоносителя [Электронный ресурс] : постановление Правительства Рос. Федерации от 18.11.2013 № 1034. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

77. О проблемах организации оплаты коммунальных услуг по приборам учета в многоквартирных жилых домах [Электронный ресурс] / Б.В. Башкин [и др.] // АВОК : сайт. – М., 1991–2017. – URL : https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2629, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017)

78. Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изменениями на 3 июля 2016 года) [Электронный ресурс] : Федер. закон Рос. Федерации от 11.11.2009 № 261-ФЗ. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

79. Обзор и рекомендации МЭА по развитию централизованного теплоснабжения в России (Париж, февр. 2005) [Электронный ресурс] // РосТепло.ру : информ. система по теплоснабжению : сайт. – М., 2003–2017. – URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=589, свободный. Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

80. Обзор рынка энергосбережения и энергоэффективности в России [Электронный ресурс] // РБК : сайт. – М., 1995–2017. – URL: http://marketing.rbc.ru/reviews/energy2014/chapter_3_2.shtml, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

81. Обзор технологии Ethernet [Электронный ресурс] // BG.NET : сайт. – 2017. – URL: <http://bg.net.ua/content/obzor-tekhnologii-ethernet>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 10.05.2017).

82. Оборудование Teleco Climactive для управления системами отопления и кондиционирования [Электронный ресурс] // НОУ-ХАУС.ру : нац. информ. система по строительству : сайт. – [Б. м.], 2000–2017. – URL: <http://www.know-house.ru/avtor/teleco.htm>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

83. Обслуживание инженерных систем зданий [Электронный ресурс] / пресс-служба компании «Grundfos» // Стройэксперт. – 2010 (дек.). – URL: <http://expert74.com/nomer.php?art=593>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

84. Описание шины CAN [Электронный ресурс] // ИТТ Лтд : сайт / ООО «ИТТ Лтд». – Киев, 2004–2017. – URL: http://www.itt-ltd.com/reference/ref_can.html, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

85. П. м. 115472 Российская Федерация, МПК G01K17/00. Устройство для измерения теплового сопротивления отопительной системы отдельного помещения / Пуговкин А.В. Купреков С.В. – № 2011117371/28; заявл. 04.05.2011; опубл. 27.04.2012. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

86. Пат. 2095769 Российская Федерация, МПК G01K17/20. Устройство учета расхода тепловой энергии отопительного прибора [Электронный ресурс] / Чистов К.Л. [и др.]. – № 95102356/28; заявл. 20.02.1995; опубл. 10.11.1997. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. экрана.

87. Пат. 2138029 Российская Федерация, МПК G01K 17/08. Способ определения расхода тепла локальными потребителями, входящими в объединённую систему потребителей тепла [Электронный ресурс] / Казачков В.С. – № 98110982/28; заявл. 09.06.1998; опубл. 20.09.1999. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

88. Пат. 2145063 Российская Федерация, МПК G01K17/08. Способ учета расхода тепловой энергии отопительного прибора и устройство для его осуществления [Электронный ресурс] / Карамов Ф.А. – № 98119907/28; заявл. 26.10.1998; опубл. 27.01.2000. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

89. Пат. 2273833 Российская Федерация, МПК G01K17/08. Способ определения расхода тепловой энергии потребителя с вертикальной и другими видами разводки теплоисточников [Электронный ресурс] / Чистов Г.Л., Слепнев В.Н., Раскошный А.А. – № 2004122355/28; заявл. 20.07.2004; опубл. 10.04.2006. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

90. Пат. 2329492 Российская Федерация, МПК G01N25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления [Электронный ресурс] / Короткий И.А. [и др.]. – № 2006119890/28; заявл. 06.06.06; опубл. 27.12.07. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

91. Пат. 2389986 Российская Федерация, МПК G01K17/08. Способ определения расхода тепла локальными потребителями (варианты) [Электронный ресурс] / Ушаков Л.В. [и др.]. – № 2008150006/28; заявл. 17.12.2008; опубл. 20.05.2010. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

92. Пат. 2403541 Российская Федерация, МПК G01K17/08. Способ определения доли потребления тепловой энергии отдельным потребителем при отоплении многоквартирного дома с двухтрубной системой отопления и система отопления для его осуществления [Электронный ресурс] / Сурнов С.В., Сунов Г.С., Бычковский И.А. – № 2009120213/28; заявл. 27.05.2009; опубл. 10.11.2010. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

93. Пат. 2403542 Российская Федерация, МПК G01K17/08. Устройство учета расхода тепловой энергии отопительного прибора и отопительный прибор [Электронный ресурс] / Вырыпаев С.Э., Варыпаев Э.С. – № 2009141762/28; заявл. 11.11.2009; опубл. 10.11.2010. – Электрон. версия печ. публ. – Доступ с сайта ФГУ ФИПС, свободный. – Загл. с экрана.

94. Потери тепловой энергии при передаче [Электронный ресурс] // ООО «Теплогидроизоляция» : сайт. – Тула, 2005–2017. – URL : http://www.teplogi.ru/article_heatenergy.php, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

95. Правила предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов [Электронный ресурс] : постановление Правительства РФ от 06.05.2011 г. № 354 (ред. от 27.02.2017). – Доступ из информ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

96. Правила учета тепловой энергии, теплоносителя [Электронный ресурс] : утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 18 нояб. 2013 г. № 1034. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

97. Правила учета тепловой энергии, теплоносителя [Электронный ресурс] : утв. Минтопэнерго Рос. Федерации от 25 сент. 1995 г. № 954. – Доступ из информ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

98. Программное обеспечение «ПИРАМИДА 2000» [Электронный ресурс] // СТ. Системы и технологии : сайт. – [Б. м.], 2001–2017. – URL: <http://www.sicon.ru/prod/po/pyramid2000>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

99. Пуговкин, А.В. Автоматизация мониторинга и управления теплоснабжением зданий и помещений / А.В. Пуговкин, Н.И. Муслимова, С.В. Купреков. – Томск : ТУСУР, 2013. – 290 с.

100. Пуговкин, А.В. Модель автоматизированной системы поквартирного учета тепловой энергии / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, Н.И. Муслимова // Энергоресурсосбережение. Диагностика – 2012 : сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Димитровград : Мир печати, 2012. – С. 275–282.

101. Ракович, Н.В. Выбор сети для коммуникации и управления [Электронный ресурс] // Chipinfo : сайт. – 1997–2017. – URL: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200005/25.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

102. РБЯК.400880.037 РЭ. Теплосчетчики ТСК7 : руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Мытищи : Тепловодомер, 2002. – 16 с. – URL: <http://su29.ru/f/uchet/org/equipment/tsk-7.pdf>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 10.05.2017).

103. Руденко, С.Н. Проблемы квартирного учёта и оплаты тепловой энергии и пути их решения / С.Н. Руденко // Энергосбережение в системе тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности : сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., С.-Петербург, 31 мая–2 июня 2011 г. – СПб. : Политехника, 2011. – С. 108–115.

104. Рябинкин, В.Н. Распределение количества тепловой энергии на отопление квартир многоквартирного жилого дома / В.Н. Рябинкин // Энергосбережение – 2002. – № 3. – С. 20–24.

105. Сасин, В.И. Рекомендации по применению стальных панельно-компактных и вертикальных радиаторов фирмы KEDMN [Электронный ресурс] // ООО «ВИТАТЕРМ» : сайт. – Москва, 2005–2017. – URL : http://www.cinto.ru/files/prado_recomendations.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

106. Свириденко, С.А. Трудности преобразований в сфере ЖКХ // ЖКХ: экономика и упр. предприятием жилищ.-комму. хоз-ва. – 2009. – № 10. – С. 3–7.

107. Российская приборостроительная корпорация «Системы управления» [Электронный ресурс] : сайт. – Челябинск, 2004–2017. – URL: <http://rpk-su.ru>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

108. Сканави, А.Н. Отопление : учеб. для вузов / А.Н. Сканави, Л.М. Махов. – М. : Изд-во АСВ, 2008. – 576 с.

109. СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Электронный ресурс]. – Введ. 1992-01-01. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

110. СНиП 23-01-99. Строительная климатология (с Изм. № 1). – Введ. 2000-01-01. – М. : ГУП ЦПП, 2003. – 74 с.

111. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – Введ. 2003-10-01. – М. : ФГУП ЦПП, 2004. – 30 с.

112. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – Введ. 2004-01-01. – М. : Госстрой России, 2004. – 59 с.

113. СНиП II-3-79. Строительная теплотехника / Минстрой России. – Введ. 1979-07-01. – М. : ГУП ЦПП, 1995. – 29 с.

114. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – 8-е изд. – М. : Изд-во МЭИ, 2006. – 472 с.

115. СП 23-101-2000. Проектирование тепловой защиты зданий [Электронный ресурс]. – Введ. 2001-07-01. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

116. СП 60-13330-2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха [Электронный ресурс]. – Введ. 2001-07-01. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

117. Справочник по теплоснабжению и вентиляции : в 2 кн. Кн. 1 / Р.В. Щекин [и др.] – 4-е изд., переработ. и доп. – Киев : Будівельник, 1976. – 416 с.

118. Стандарт беспроводной связи WI-FI [Электронный ресурс] // TADVISER SUMMIT. – М., 2006–2017. – URL : <http://www.tadviser.ru/index.php>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 12.04.2017).

119. Стек DLMS – простое решение для сбора данных со счетчиков [Электронный ресурс] // Компоненты и технологии : сайт. – СПб. : Finestreet, сор. 2011–2014. – URL: http://www.kit-e.ru/news/microchip_30_08_2011.php , свободный. – Загл. с экрана (дата обращения:).

120. СТО НП «АВОК» 4.3-2007. Распределители стоимости потребленной теплоты от комнатных отопительных приборов. Распределители с электрическим питанием [Электронный ресурс]. – Введ. 2007-05-01. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

121. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М. : АВОК-Пресс, 2002. – 194 с.

122. Табунщиков, Ю.А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений / Ю.А. Табунщиков, Д.Ю. Хромец, Ю.А. Матросов. – М. : Стройиздат, 1986. – 382 с.

123. Температурные измерения : справ. / О.А. Геращенко [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1984. – 494 с.

124. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент : справ. / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 427 с.

125. Теплодомус [Электронный ресурс] : сайт. – 2007–2012. – URL: <http://teplodomus.ru>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

126. Термическое сопротивление ограждающих конструкций серии 447С и 464АЯТ эксплуатируемых зданий старой застройки г. Томска / А.И. Гныря [и др.] // Изв. вузов. Сер. Строительство. – 1998. – № 2. – С. 121–125.

127. Технология Bluetooth [Электронный ресурс] // Nokia–Nseriac : сайт. – [Рига, 2007–2017]. – URL : <http://www.nokia-n.org/article6.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 10.04.2017).

128. ТСН 23-340-2003. Территориальные строительные нормы. Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий. Нормы по энергопотреблению и теплозащите [Электронный ресурс]. – Введ. 2007-07-01. – Доступ из информ.-справоч. системы «Кодекс».

129. Федюк, Р.С. Математическая модель теплового баланса здания: особенности системного подхода / Р.С. Федюк, З.А. Муталибов, Н.Б. Овчаров // Вологдинские чтения : материалы науч. конф. [23–26 нояб. 2010 г.]. Секц. : Строительство и архитектура. – Владивосток : [б. и.], 2010. – С. 80–82.

130. Фортов, В.Е. Энергетика в современном мире / В.Е. Фортов, О.С. Понель. – М. : ОЭММНУ РАН, 2011. – 168 с.

131. Черепанов, В.Я. Вопросы метрологического обеспечения измерений температуры в системах учета количества теплоты // Приборы. – 2002. – № 6. – С. 63–66.

132. Черепанов, В.Я. Методы и средства метрологического обеспечения измерений параметров теплообмена и теплоносителей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.15, 05.11.01 / Черепанов Виктор Яковлевич. – Новосибирск, 2005. – 42 с. : ил.

133. Чистович, С.А. Автоматизированные системы теплофикации, теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.Б. Харитонов. – СПб. : АВОК Северо-Запад, 2008. – 304 с.

134. Чистович, С.А. Метод учета влияния инерционности наружных ограждений зданий на режим отпуска теплоты в условиях АСУТП / С.А. Чистович, С.И. Быков, П.И. Лебедев // Индустриальные отопительные системы и технология их монтажа. – Л. : ВНИИГС, 1983. – С. 23–29.
135. Чистяков, В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
136. Шарапов, В.И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, П.В. Ротов. – М. : Новости теплоснабжения, 2007. – 164 с.
137. Шелгинский, А.Я. Энергосбережение и энергетическая эффективность в системах централизованного теплоснабжения (СЦТ) // Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности : сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., С.-Петербург, 31 мая–2 июня 2011 г. – СПб. : Политехника, 2011. – С. 88–93.
138. Энергосбережение: Приборы учета–2013 : аналит. обзор / РосБизнесКонсалтинг Research. – М. : [б. и.], 2013. – 117 с.
139. Яновский, Ф.Б. Энергетическая стратегия и развитие теплоснабжения / Ф.Б. Яновский, С.А. Михайлова // Энергосбережение. – 2003. – № 6. – С. 26–32.
140. Classic [Electronic resource] // OPC Foundation : website. – Scottsdale : OPC Foundation, cop. 2017. – URL: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-classic>, free. – Tit. screen (usage date: 01.09.2017).
141. Data Access [Electronic resource] // OPC Foundation : website. – Scottsdale : OPC Foundation, cop. 2017. – URL: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-classic/data-access>, free. – Tit. screen (usage date: 01.09.2017).
142. Datasheet. ADT7410 – $\pm 0,5$ °C Accurate, 16-Bit Digital I2C Temperature Sensor – Analog Devices [Electronic resource]. – [S. l. : s. n.], 2009. – 24 p. – URL : <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/300940/AD/ADT7410.html>, free. – Tit. screen (usage date: 01.04.2017).

143. DLMS User Association : website. – Zug : DLMS User Assoc., cop. 2009–2017. – URL: <http://www.dlms.com/index2.php>, free. – Tit. screen (usage date: 01.09.2017).

144. Elster [Электронный ресурс] : офиц. сайт компании «Эльстер». – [Б. м.], 2002–2017. – URL: www.elster.ru, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 01.09.2017).

145. Products and services [Electronic resource] // DLMS User Association : website. – Zug : DLMS User Assoc., cop. 2009–2017. – URL: <http://www.dlms.com/productsandservices/index.html>, free. – Tit. screen (usage date: 01.09.2017).

Приложение А
Методика измерения тепловой энергии
отдаваемой отопительным прибором

МДК 4-01.16.

Томск
2017

Разработана:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования ТОМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ,

Общество с ограниченной ответственностью «Энергоэффект», г. Томск,

Общество с ограниченной ответственностью «ЦСО», г. Томск.

Составители:

Купреков С.В., Пуговкин А.В., Купреков В.С., Медведев А.В.,
Абрамчук С.И.

1 Назначение и область применения

Настоящая методика устанавливает метод нахождения зависимости коэффициента теплоотдачи отопительного прибора от срабатываемого температурного напора данного отопительного прибора в данном помещении с учетом совокупности факторов отражающих индивидуальные особенности, как системы теплоснабжения, так и помещения.

Методика распространяется на коммерческий способ измерений эффективной составляющей тепловой энергии в системных физических единицах, для отопительных приборов серий МС-90, МС-140 [3] и срабатываемых температурных напоров (10–50) °С.

Методика рекомендована к применению в многоквартирных домах, общественных и производственных зданиях, снабжаемых тепловой энергией от централизованных или местных систем отопления. Когда необходимо установить теплопотребление локального помещения (группы помещений) в конкретных условиях эксплуатации без дополнительных врезок в действующую систему отопления объекта, независимо от вида разводки, способа подключения отопительного прибора и направления течения теплоносителя.

Методика отражает результаты исследования авторов [6,12] и базируется на применении уравнения Ньютона – Рихмана [5] $Q = \alpha t S (T - T_{\text{в}})$ где α – коэффициент теплоотдачи, t – время, S – площадь поверхности, T и $T_{\text{в}}$ температуры поверхности и окружающей среды соответственно.

2 Основные термины и определения

В методике применяются термины и определения, наделенные следующими смысловыми значениями:

Калибровка – нахождение функции коэффициента теплоотдачи от величины срабатываемого **температурного напора** данного отопительного

прибора в обогреваемом помещении с учетом совокупности факторов отражающих индивидуальные особенности системы отопления и помещения.

Коэффициент теплоотдачи – отношение передаваемой мощности отопительного прибора к срабатываемому тепловому напору.

Надежное термосоединение – присоединение чувствительного элемента датчика температуры к отопительному прибору, которое максимально возможно исключает влияние посторонних и паразитных процессов на измерение температуры поверхности отопительного прибора.

Расчетный период – промежуток времени между двумя последовательными расчетами за отопление между поставщиком и потребителем.

Стационарный режим – режим работы отопительного прибора, при котором прирост тепловой энергии от теплоносителя равен убыли тепловой энергии в окружающую среду с поверхности отопительного прибора.

Температура воздуха – температура, измеренная в **характерной точке для воздуха**.

Температурный напор – разница температур между **характерными точками отопительного прибора и воздуха**.

Температура отопительного прибора – температура, измеренная в **характерной точке отопительного прибора**.

Точка(-и) калибровки – значение температуры отопительного прибора, на выбранном промежутке характеристики принимаемое для дальнейших вычислений на этом промежутке значения функции коэффициента теплоотдачи. При наличии серии экспериментов это значения температуры, с наибольшим математическим ожиданием для выбранного промежутка характеристики при доверительной вероятности 0,95.

Характерная температура – температура, измеренная в **характерной точке**.

Характерной точка для воздуха – точка, в которой производятся измерения температуры воздуха помещения, позволяющая достоверно учесть зависимость характера теплоотдачи от температурного напора.

Характерная точка отопительного прибора – место на поверхности отопительного прибора (или специального приспособления используемого для крепления измерительного элемента к поверхности отопительного прибора) температура которого соответствует средней температуре наружной поверхности отопительного прибора в пределах устанавливаемых методикой погрешностей.

В тексте методики термины точность и погрешность рассматриваются как синонимы [8].

3 Требования к показателям точности (погрешности) измерений тепловой энергии

Погрешность измерения тепловой энергии по настоящей методике не хуже $\pm 6,1\%$ [9] в диапазоне температур поверхности отопительного прибора $10\text{--}75^\circ\text{C}$ и температурным напором между поверхностью отопительного прибора и окружающей средой в диапазоне $10\text{--}50^\circ\text{C}$.

Погрешность метода складывается из погрешностей измерений температур, теплоемкости, временных интервалов.

При использовании:

- датчиков измерения температуры с погрешностью измерения в диапазоне эксплуатации на уровне $\pm 0,5\%$,
- табличных значений теплоемкости материалов корпуса отопительного прибора и теплоносителя с точностью до третьего знака после запятой,
- отсчета временных интервалов с точностью от $\pm 0.05\%$,

4 Требования к средствам измерений, вспомогательным устройствам

В соответствии с законодательством Российской Федерации об обеспечении единства измерений для коммерческих расчетов могут применяться только средства измерения, типы которых внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (ранее внесенные в реестр средств измерения РФ) имеющие действующую поверку [9].

Для использования настоящей методики необходимы следующие средства измерения:

- температуры поверхности отопительных приборов;
- температуры воздуха;
- временных интервалов,

Предлагаемый алгоритм вычисления тепловой энергии отдаваемой отопительным прибором реализован как программное обеспечение и включен в систему сбора-передачи данных и вычисления тепловой энергии [6].

Для уменьшения погрешности измерения температуры и результатов расчета необходимо, чтобы датчики для измерения температуры поверхности отопительного прибора и воздуха были одного типа, одного производителя, партии и, как минимум, имели конгруэнтные статические характеристики с погрешностью одного знака.

Для целей настоящей методики могут быть применены термометры контактного типа: (термопары, термометры сопротивления, полупроводниковые датчики температуры);

- с диапазонами измерений отвечающим условиям эксплуатации теплового оборудования;
- с ценой деления шкалы 0,5 градуса и менее;

– с погрешностью измерения соответствующей [11] с приведенной погрешностью измерения не хуже $\pm 1\%$ в диапазоне эксплуатации отопительных приборов конкретного помещения;

Для организации измерения характерной температуры отопительного прибора допускается применение приспособлений обеспечивающих надежный контакт чувствительного элемента термопреобразователя с характерной точкой отопительного прибора [1]. Примеры рекомендованных термометров приведены в приложении № 2.

Для измерения времени можно использовать системное время компьютера или любой другой метод с погрешностью не более $\pm 0,05\%$.

Допускается применения других средств измерений, вспомогательных устройств, с аналогичными или лучшими метрологическими и техническими характеристиками.

5 Метод измерений

5.1 Математическая модель

Для определения количества тепловой энергии, подводимой отопительным прибором, используется математическая модель, в основе которой лежит метод дифференциальных балансных уравнений [2].

Тепловая мощность, отдаваемая отопительным прибором, определяется из закона Ньютона-Рихмана, согласно которому тепловая мощность $P_{\text{тепл}}$, отдаваемая отопительным прибором, пропорциональна разности средних значений температур отопительного прибора $T_{\text{ист}}$ и воздуха помещения $T_{\text{в}}$ [5]:

$$P_{\text{тепл.}} = \alpha_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_{\text{в}}), \quad (1)$$

здесь $\alpha_{\text{ист}}$ – коэффициент теплоотдачи отопительного прибора с учетом его площади поверхности, [Вт/°С].

Для перехода от тепловой мощности к тепловой энергии мгновенные значения тепловой мощности суммируются (интегрируются) во времени.

$$Q = \sum_i \alpha_{ист} \cdot (T_{ист} - T_{ив}) \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где i – номер отсчета во времени; Δt – интервал временных отсчетов.

Принципиальным отличием рассматриваемого подхода является определение α не в лабораторных условиях [12] или по справочным данным, а на месте непосредственной эксплуатации отопительного прибора. Предлагаемое решение является принципиально новым, запатентовано [1, 2] и опубликовано в материалах [6, 12].

Процесс измерения потребляемой тепловой энергии осуществляется в три этапа. **Первый этап** называется калибровкой. На этой стадии находится зависимость коэффициента теплоотдачи отопительного прибора от величины температурного напора.

С помощью температурных датчиков в характерных точках измеряются температуры поверхности отопительного прибора и воздуха помещения. Математическая модель теплового баланса для отопительного прибора описывается уравнением:

$$\frac{C_{ист} \cdot dT_{ист}}{dt} = G \cdot c \cdot (T_1 - T_2) - \alpha_{ист} \cdot (T_{ист} - T_{в}), \quad (3)$$

где $C_{ист}$ – теплоемкость отопительного прибора, [Дж/°C].

В данном уравнении прирост тепловой энергии происходит за счет подачи теплоносителя $G \cdot c \cdot (T_1 - T_2)$, а уменьшение за счет теплообмена отопительного прибора с окружающей средой $\alpha_{ист} \cdot (T_{ист} - T_{в})$. Прекращая подачу теплоносителя, т.е. полагая $G \cdot c \cdot (T_1 - T_2) = 0$, из уравнения (3) находим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{ист} = \frac{C_{ист.} \cdot \frac{dT_{ист}}{dt}}{T_{ист.}^K - T_{в}^K} \quad (4)$$

Коэффициент носит интегральный характер. В данном случае значение температур воздуха и поверхности отопительного прибора фиксированы $(T_{\text{ист.}}^K, T_B^K)$ в границах каждого выбранного калибровочного интервала. Процедура измерения на данном этапе заключается в следующих действиях:

- нахождение температуры остывающего отопительного прибора, как функции времени $(T_{\text{ист.}} = f(t))$;
- измерение температуры воздуха;
- выбор точек калибровки в середине каждого температурного интервала исследуемого участка от минимальной T_H до максимальной температур T_B на кривой зависимости $T_{\text{ист.}} = f(t)$;
- нахождение скорости изменения температуры отопительного прибора $\frac{dT_{\text{ист.}}}{dt}$ в точках калибровки;
- вычисление коэффициента теплоотдачи (4) при известной теплоемкости отопительного прибора, для каждой точки калибровки.

Таким образом, вычисляется функция зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора для каждого отопительного прибора с учетом его индивидуальных особенностей.

Второй этап метода является измерительным. На данном этапе система отопления переводиться в рабочее состояние, т.е. в режим эксплуатации. С помощью тех же датчиков температур в тех же характерных точках, где производилась калибровка, осуществляется измерение температур воздуха и поверхности отопительного прибора. С использованием полученных данных решается уравнение Ньютона-Рихмана, в котором коэффициент теплоотдачи задается выражением (4), а формула для вычисления тепловой мощности принимает следующий вид:

$$P_{\text{тепл.}} = \frac{C_{\text{ист.}} \cdot \frac{dT_{\text{ист.}}}{dt}}{T_{\text{ист.}}^K - T_B^K} \cdot (T_{\text{ист.}} - T_B), \quad (5)$$

в уравнении (5) погрешности измерения тепловой мощности определяются погрешностями измерения температур. Если представить температурный напор, как действительное значение и абсолютную систематическую погрешность $\left[(T_{\text{ист}}^0 \pm \delta T_{\text{ист}}) - (T_{\text{в}}^0 \pm \delta T_{\text{в}}) \right]$, то выражение для тепловой мощности примет вид:

$$\begin{aligned} P_{\text{тепл.}} &= C_{\text{ист.}} \cdot \frac{dT_{\text{ист.}}}{dt} \cdot \frac{T_{\text{ист}}^0 \pm \Delta T_{\text{ист}} - T_{\text{в}}^0 \mp \Delta T_{\text{в}}}{T_{\text{ист}}^{0\kappa} \pm \Delta T_{\text{ист}}^{\kappa} - T_{\text{в}}^{0\kappa} \mp \Delta T_{\text{в}}^{\kappa}} = \\ &= C_{\text{ист.}} \cdot \frac{dT_{\text{ист.}}}{dt} \cdot \frac{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{в}}^0}{T_{\text{ист}}^{0\kappa} - T_{\text{в}}^{0\kappa}} \cdot \frac{1 \pm \frac{\Delta T_{\text{ист}} - \Delta T_{\text{в}}}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{в}}^0}}{1 \pm \frac{\Delta T_{\text{ист}}^{\kappa} - \Delta T_{\text{в}}^{\kappa}}{T_{\text{ист}}^{0\kappa} - T_{\text{в}}^{0\kappa}}} = , \\ &= C_{\text{ист.}} \cdot \frac{dT_{\text{ист.}}}{dt} \cdot \frac{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{в}}^0}{T_{\text{ист}}^{0\kappa} - T_{\text{в}}^{0\kappa}} \cdot \frac{1 + \delta_1}{1 + \delta_2} , \end{aligned}$$

где δ_1, δ_2 – относительные погрешности ($\delta_1 \ll 1, \delta_2 \ll 1$).

Малость этих значений позволяет разложить дробь $\frac{1 + \delta_1}{1 + \delta_2}$ в ряд Тейлора.

Учтем также, что систематические погрешности $\Delta T_{\text{ист}}$ и $\Delta T_{\text{в}}$ линейно зависят от текущих измерений температуры отопительного прибора и воздуха. Соответственно

$$\Delta T_{\text{ист}} - \Delta T_{\text{в}} = k_1 \cdot T_{\text{ист}}^0 - k_2 \cdot T_{\text{в}}^0 ,$$

здесь $k = (1 \div 10\%) T_{\text{ист}}^0$ – коэффициент пропорциональности. На практике за счет ряда факторов (выбор характерной точки измерения на поверхности отопительного прибора, несоответствие температуры в точке измерения и средней температуры отопительного прибора, несовершенства теплового контакта и т.д.) систематическая составляющая погрешности $\Delta T_{\text{ист}}$ значительно выше $\Delta T_{\text{в}}$. В связи с этим, рассматривается предельный случай, когда $k_2 = 0$.

Погрешность измерений тепловой мощности $\Delta P_{\text{тепл.}}$ определяется следующим соотношением:

$$\Delta P_{\text{тепл.}} = \delta_1 - \delta_2 = k_1 \cdot \left(\frac{T_{\text{ист}}^0}{T_{\text{ист}}^0 - T_{\text{в}}^0} - \frac{T_{\text{ист}}^{0\kappa}}{T_{\text{ист}}^{0\kappa} - T_{\text{в}}^{0\kappa}} \right). \quad (6)$$

Нетрудно заметить, что погрешности при измерении и калибровке будут частично компенсировать друг друга. Поэтому суммарная погрешность измерения тепловой мощности будет уменьшена.

Третий этап – вычисление потребляемой тепловой энергии. Все мгновенные значения энергии суммируются, полученная сумма умножается на интервал временных отсчетов Δt , согласно формуле (2). При этом так же будет суммироваться и систематическая погрешность. Поскольку она имеет переменный знак в зависимости от мгновенного значения температуры источника, то при суммировании эта погрешность будет существенно снижаться, $\delta Q_{\text{тепл}} \approx 1\%$.

5.2 Измерения температур

Датчик температуры закрепляется в предварительно определенной характерной точке. Для надежного термического контакта используется сварное соединение, термоклей, термопаста, дополнительные приспособления как прижимающие датчик к поверхности, так и надежно изолирующие место измерения температуры от внешних воздействий. Организуется снятие показаний датчика визуально, по проводному интерфейсу, или беспроводным способом (радиоканал, акустический сигнал).

Регистрация показаний синхронизируется с устройством отсчета временных интервалов.

Снимаемые показания вносятся в таблицу температур отопительного прибора. Для удобства и увеличения точности измерений рекомендуется

применять компьютер со специализированным программным обеспечением [6].

Для каждой зарегистрированной температуры отопительного прибора одновременно считывается значение, температуры воздуха, которые также вносятся в таблицу.

Для исключения случайных выбросов значений применяем метод скользящего среднего. Величину скользящего окна [7] выбираем так, чтобы перепад температур в окне был не более 1 °С.

5.3 Определение коэффициента теплоотдачи отопительного прибора (калибровка)

Калибровка проводится после выхода температуры отопительного прибора на стационарный режим. То есть, после завершения первоначального прогрева помещения в начале отопительного сезона или отсутствии резких перепадов наружной температуры в течение отопительного сезона до начала и в процессе калибровки.

Начало калибровки должно совпадать с окончанием циркуляции теплоносителя в отопительном приборе и той части системы отопления здания, которая влияет на нагрев помещения отапливаемого калибруемым прибором отопления.

Для калибровки берутся данные из таблицы температур отопительного прибора полученной по 5.3 с момента прекращения циркуляции до момента выполнения равенства температуры отопительного прибора и воздуха.

Калибровка осуществляется по формуле (4) [2]. Для удобства составим таблицу № 2 (Приложение № 1).

Столбец «А» время нарастающим итогом через равные промежутки (промежутки отсчетов).

Столбец «Б» температура отопительного прибора.

Столбец «В» температура воздуха.

Столбец «Г» и «Д» температура отопительного прибора и температура воздуха после применения метода скользящего среднего.

Столбец «Е» разница между температурой отопительного прибора и температурой воздуха – температурный напор.

Столбец «Ж» значение крутизны спада температуры радиатора $dT_{\text{ист}}/dt$.

Крутизну определяем на участке остывания, состоящем из n точек, где n – минимальное количество отсчетов, при котором температура радиатора упадет на величину, не менее 3 °С (n выбираем нечетное);

Из значения n -й точки температуры вычитается значение первой точки температуры;

Полученная разница значений температур делится на разницу значений времени первой и n -й точек, в которых были взяты эти отчеты;

Результат деления заносится в графу, соответствующую времени $(n+1)/2$ отсчета.

Столбец «З» значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ист}}$ как функции времени, для его определения производим следующие действия:

В столбце «Ж» находим точку максимального значения крутизны спада температуры;

Начиная с этой точки, делим значение крутизны на соответствующий ей температурный напор;

Полученный результат умножаем на теплоемкость отопительного прибора, которую находим по справочным данным и документации на отопительный прибор.

Столбец «И» табличная функция зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ист}}$ от температурного напора. Исходными данными являются график изменения температурного напора от времени (столбец Е) и график изменения $\alpha_{\text{ист}}$ как функции времени (столбец З).

Для формирования функции зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ист}}$ от температурного напора применяем линейную аппроксимацию. Для этого необходимо вычислить тангенс угла наклона кривой по двум точкам, каждая из которой определяется парой значений ($\alpha_{\text{ист}}$ и ΔT). Для определения первой точки находим максимальное значение $\alpha_{\text{ист}}$ (столбец 3).

Находим соответствующую разницу температур ($T_{\text{макс}}$) (столбец E).

Находим значение температурного напора (T_1) меньшее значения $T_{\text{макс}}$ на величину не менее $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_1 \leq T_{\text{макс}} - 5$).

Находим коэффициент теплоотдачи ($\alpha_{\text{ист } 1}$) соответствующий значению T_1 .

Для определения второй точки находим значение температурного напора не менее $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_2 \geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и соответствующий ей коэффициент теплоотдачи ($\alpha_{\text{ист } 2}$).

Вычисляем угол наклона кривой коэффициента теплоотдачи от температуры

$$(\text{tg}=(\alpha_{\text{ист } 1} - \alpha_{\text{ист } 2})/(T_1 - T_2)).$$

Формируем функцию зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора $\alpha_{\text{ист текущее}} = \alpha_{\text{ист } 1} - \text{tg}*(T_1 - \Delta T)$ (столбец И).

Пример вычисления приведен в Приложении № 1.

Результатом калибровки является зависимость коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ист}}$ от разницы температур отопительного прибора и воздуха.

5.4 Определение количества тепловой энергии, расходуемой отопительным прибором

Для определения количества тепловой энергии приносимой отопительным прибором необходимо наличие зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ист}}$ от температурного напора между отопительным прибором и воздухом, результаты измерения срабатываемого температурного напора за

расчетный период и выполнение следующих операций. По формуле (5) вычисляется тепловая мощность. Для этого каждая разница температур ΔT умножается на $\alpha_{\text{ист}}$ значение, которого взято из зависимости, рассчитанной по 5.3. Выбирается такое $\alpha_{\text{ист}}(\Delta T)$ для которого табличное значение ΔT является ближайшим относительно фактически измеренного.

Израсходованная тепловая энергия вычисляется как:

$$Q = \int_{t1}^{t2} P_{\text{ист.}} dt.$$

Таким образом, значение тепловой энергии отданной отопительным прибором Q определяется как нарастающий итог суммы всех последовательно вычисленных тепловых мощностей за период измерения. Следует отметить, что влияние площади поверхности отопительного прибора на конечный результат учитывается при калибровке. Путем определения характерной точки отопительного прибора, $\alpha_{\text{ист}}(\Delta T)$ таким образом, несет интегральное значение.

6 Требования безопасности, охраны окружающей среды

Производимые в соответствии с настоящей методикой действия и мероприятия не оказывают сколь-нибудь заметное влияние на окружающую среду.

При монтаже оборудования на поверхность отопительного прибора следует убедиться, что температура прибора не окажет повреждающего термического воздействия на кожные покровы рук. При необходимости следует использовать перчатки или, отключив циркуляцию теплоносителя в отопительном приборе дождаться остывания поверхности до приемлемой для производства работ температуры без опасности ожога или повреждения кожного покрова. При монтаже устройств на поверхность отопительного

прибора следует помнить о возможности повреждения кожного покрова об заусенцы, острые грани и неровности поверхностей отопительного прибора.

7 Требования к квалификации операторов

Для проведения измерений в соответствии с данной методикой специальных требований на квалификацию оператора не накладывается. Желательным будут являться среднетехнический уровень образования и технические навыки по обслуживанию отопительного оборудования эксплуатирующегося в системах центрального отопления в помещениях потребителей.

8 Требования к условиям измерений

При проведении измерений следует соблюдать граничные температурные условия, указанные в методике для получения результатов с заявленной в методике точностью.

Ограждающие конструкции (ширмы, экраны и т.п.) конструктивные и интерьерные элементы (шторы, мебель и т.п.) могущие повлиять на температурные потоки около отопительного прибора должны находиться в своем постоянном положении. Если таких положений несколько, то серия калибровочных испытаний необходима для каждого такого положения или для крайних положений (полностью открыто, полностью закрыто) с целью установления степени их влияния на результаты расчетов. При существенной разнице между результатами калибровок предлагается использовать дающее наибольшее (увеличивающее) значение величин измеряемой тепловой энергии.

9 Подготовка к выполнению измерений

Перед креплением датчика на поверхность отопительного прибора следует убедиться, что вместе примыкания измерительной поверхности датчика и поверхности отопительного прибора обеспечено надежное термосоединение. При необходимости место касания следует подготовить. Допускается механическая обработка поверхности отопительного прибора отчистка от краски и других покрытий и/или использование термоинтерфейсов (теплопроводящих паст и клеев).

Измерение температуры отопительного прибора следует производить в характерной точке. Характерная точка выбирается из условий, ранее проведенных натурных, лабораторных измерений и может быть откорректирована по результатам анализа измерений прошлых лет. Для отопительных приборов серии М-140 М-90 она располагается на середине средней секции (любой из средних при четном количестве секций).

Датчик температуры воздуха должен быть расположен вне пристеночного слоя воздуха непосредственно прилегающего к стенке отопительного прибора. Для этого он должен быть размещен на расстоянии 8- 10 мм от фронтальной поверхности ребра отопительного прибора или под отопительным прибором на том же расстоянии от нижней поверхности в месте крепления датчика.

10 Порядок выполнения измерений

Момент начала калибровки следует выбирать из условия максимального первоначального нагрева отопительного прибора, при этом обязательного достижения температуры верхней границы диапазона заданного в методике не требуется, достаточно соответствия температуры отопительного прибора обеспечивающей комфортность (целесообразность) в помещении в текущих климатических условиях. Если прибор находился в состоянии нагрева от

меньшей температуры к большей следует выдержать временную паузу для выхода его на стационарный режим работы. Если прибор находится в режиме остывания, смены более горячего стационарного режима на режим с меньшей температурой поверхности калибровку можно производить сразу.

Моментом начала калибровки является момент надежного перекрытия, остановки циркуляции теплоносителя в отопительном приборе.

В процессе калибровки показания с датчиков температуры поверхности отопительного прибора и воздуха, достаточно снимать с периодичностью не реже чем 1 раз в минуту.

В процессе эксплуатации показания с датчиков температуры поверхности отопительного прибора и воздуха, достаточно снимать с периодичностью не реже чем 1 раз в час.

Следует отметить, что промежуток отсчета показаний должен быть увеличен, если показания не меняются в течение трех и более промежутков отсчета. Или уменьшен если разница между последовательно снятыми показаниями более чем в 2 раза. В любом случае величина промежутка между двумя последовательными снятиями показаний должна быть обратно пропорциональна скорости изменения измеряемой величины (температуры).

Снятие показаний с датчиков производится через равные промежутки времени и вносятся в таблицу № 1.

Таблица № 1

Номер по порядку	Время снятие показания	Температура измеренная датчиком	
		Отопительного прибора	Воздуха
1.	12.00	Тист 1	Тв 1
2.	12.02	Тист 2	Тв 2
...	...	...	...
n	t	Тист n	Тв n

Для значений, вносимых в таблицу непосредственно измеряемых физических величин количество значащих цифр после запятой не менее двух.

Снятие показаний прекращается, когда температура отопительного прибора становится равна температуре воздуха. Допускается прекращение снятия показаний при разнице между температурами отопительного прибора и воздуха менее 5 °С. В любом случае процесс накопления результатов измерения нецелесообразно производить более 4 часов.

11 Обработка результатов измерений при калибровке

Результаты калибровки, сведенные в таблицу № 1, обрабатываются по алгоритму на основании математической модели настоящей методики измерения п. 5 Метод измерений. Полученные промежуточные результаты вносятся в таблицу № 2 приведенную в приложении № 1.

Дальнейшая обработка результатов предполагает внесение уточнений в результаты натурных (по месту) измерений связанных с учетом особенностей месторасположения помещения: первый – последний этажи, северная – южная сторона, ветровая нагрузка, сравнительная величина инсоляции, длине стояков проходящих по помещению, срокам бесперебойной работы системы учета, количеству отопительных приборов в помещении и их взаимному влиянию и т.п. Следует отметить, что указанная обработка является дополнительной и в действующих на момент опубликования методики законодательных актах не отражена, ее необходимость остается на усмотрение пользователей/собственников помещений, а в жилых домах общих собраний собственников помещений.

В случаях невозможности (поломка, выход из строя, потеря данных измерений) использования на месте эксплуатации необходимых средств и результатов измерения за действительное значение принимается общее среднее значение (математическое ожидание) заданной совокупности результатов измерений температуры за возможно более длительный период времени [8]. Однако период усреднения не должен превышать один отопительный сезон и расчет за такой промежуток временем следует

производить по регламентам, оговоренным в [10]. Технология эксплуатации отопительных систем, предусматривающая остановку циркуляции на летний период, способствует накоплению отложений на внутренних поверхностях отопительных приборов. Поэтому при начале очередного цикла отопления требуется проведение новой серии калибровок.

Предполагаемая длительность измерений (в течение отопительного сезона) и неоднократность проведения калибровок (фактически такая возможность может быть реализована при каждом факте отключения циркуляции теплоносителя в системе отопления) позволяет отслеживать прецизионность измерений. При возникновении сомнений в достоверности результатов измерений необходимо провести внеочередную калибровку. Такой подход, в том числе позволит выявить недобросовестных пользователей системы, дабы таковые найдутся. Если к необходимости корректировки значений калибровочных измерений привели объективные факторы и ее результаты существенно влияют на величину коммерческих расчетов согласно [10] перерасчет разрешен в течение текущего года.

12 Оформление результатов измерений

Результаты вычисления отданной (потребленной) тепловой энергией могут быть использованы для коммерческих расчетов за услугу «теплоснабжения» между Потребителями и Поставщиком тепловой энергии. В целях энергоаудита и для нужд регулировки режимов теплоснабжения помещений.

13 Контроль точности (погрешности) результатов измерений

Для контроля точности результатов измерений необходимо проведения количества экспериментов достаточного для попадания в интервал достоверности измерений ($P = 0,95$). Калибровка может проводиться всякий

раз, когда восстанавливаются условия проведения калибровки согласно п. 5.4 «Метод измерения коэффициента теплоотдачи отопительного прибора (калибровка)» для подтверждения точности результатов измерения и необходимых корректировок связанных с эксплуатацией приборов.

При необходимости увеличения точности измерений могут быть предприняты следующие шаги. Так как измеряемая физическая величина (температура) носит непрерывный характер, то есть может принимать любое значение из выбранного диапазона. В процессе калибровке путем выбора размеров промежутков, на которых выбираются точки калибровки для конкретных температур, можно существенно уменьшить величину ожидаемой погрешности. Для целей настоящей методики значение коэффициента теплоотдачи отопительного прибора носит кусочно-линейный характер, т.е. каждый раз выбираются такие отрезки экспериментально полученной функции на графике (температура/теплоотдача) нелинейностью которых можно пренебречь (кривизна менее 1%). С математической точки зрения мы можем выбрать участки температурной зависимости со сколь угодно малыми изменениями значений соответственно в этом случае погрешность при калибровке стремиться к нулю. Ограничением точности в этом случае будут технические возможности (характеристики) применяемых датчиков. Дополнительно на улучшение точности измерения в этом случае сказывается смена знака погрешности при переходе через точку калибровки, в пределах каждого выбранного промежутка.

14 Литература

1. Пуговкин А.В. и Купреков С.В. Патент РФ № 115472. «Устройство для измерения теплового сопротивления отопительной системы отдельного помещения».

2. Пуговкин А.В., Купреков С.В., Муслимова Н.И., Патент РФ № 2566641 «Способ учета тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором».
3. Гост 31311-2005 «Приборы отопительные. Общие технические условия»[Текст]: стандарт.-М. Стандартинформ, 2006.-III, 11с.
4. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с. – ISBN 5-256-01352-1.
5. Михеев М.А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стер. / И.М. Михеев. М. : Энергия, 1997. – 344 с.
6. Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения / А.В. Пуговкин [и др.] // Докл. ТУСУР. – Томск : В-Спектр, 2010. – № 2 (22).
7. Репин С.В. Математические методы обработки статистической информации с помощью ЭВМ / С.В. Репин. – Минск : Университетское, 1990. – 127 с.
8. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.
9. Постановление Правительства РФ от 18 ноября 2013 г. № 1034. «О коммерческом учете тепловой энергии, теплоносителя».
10. Постановление Правительства РФ от 06 мая 2011 г. № 354. «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов».
11. Методика осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя. Зарегистрировано в Минюсте России 12 сентября 2014 г. № 34040, Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ приказ от 17 марта 2014 г. N 99/пр.
12. Динамический метод измерения эффективности нагревательных приборов / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, В.А. Медведев, Н.И. Муслимова, В.С. Степной // Приборы, 12.12.2013.

13. Богословский В.Н. Тепловой режим здания / В.Н. Богословский. – М. : Стройиздат, 1979. – 248 с.
14. Федеральный закон РФ «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ.
15. Европейский стандарт EN422. Тепловая мощность отопительных приборов [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.abok.ru/>
16. Патент РФ № 2566640.

Пример вычисления коэффициента теплоотдачи.

Ниже приведен алгоритм вычисления зависимости коэффициента теплоотдачи от разности температур для чугунного радиатора МС-140-500 по двум параметрам.

Столбцы А, Б, В данные непосредственно измеренные при калибровке.

Столбец Г : $\Gamma_n = \text{среднее}(B_{n-5}; B_{n+5})$.

Столбец Д : $D_n = \text{среднее}(B_{n-5}; B_{n+5})$.

Столбец Е : $E_n = \Gamma_n - D_n$.

Столбец Ж: $\mathcal{K}_n = (\Gamma_{n-4} - \Gamma_{n+4}) / (A_{n+4} - A_{n-4})$.

Столбец З : $3_n = c * (\mathcal{K}_n / E_n)$. где c – теплоемкость найденная из [13]

Столбец И : $I_n = 3_{19} - \text{tg}(\alpha_{\text{ист}}) * (\Gamma_{19} - E_n)$. где

$$\text{tg}(\alpha_{\text{ист}}) = (3_{19} - 3_{175}) / (E_{175} - E_{19}).$$

п/п	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
	Измеренные данные			Скользющие средние		Температурный напор	Производная	Теплоемкость	
	Время t, c	Тист, °C	Тв, °C	Т(ф)ист, °C	Т(ф)в, °C	$\Delta T, ^\circ C$	$dT(ф)ист/dt$	$\alpha (t)$	$\alpha (\Delta T)$
1	0	72,56	22,12						
...									
6	100	72,62	22,12	71,18545455	22,0381818	49,14727273			
...									
13	240	65,25	22	65,51090909	22	43,51090909	0,044988636	20,67924449	
14	260	64,31	22	64,56181818	22	42,56181818	0,044744318	21,02556709	20,21722596
19	360	60,31	22	60,47	21,9563636	38,51363636	0,037	19,2139738	19,2139738
...									
175	3480	26,25	21,25	26,29	21,2336364	5,056363636	0,002761364	10,9223301	10,9223301
...									
244	4860	23,75	21,31	23,776	21,274	2,502	0,000806818	6,449385946	10,28928767

Перечень рекомендуемых устройств и датчиков для измерения температуры

ADT7420 цифровой датчик температуры, точность $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$

ADT7320 цифровой датчик температуры, точность $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$

ADT7311 цифровой датчик температуры, точность $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

DS18B20 цифровой датчик температуры, точность $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

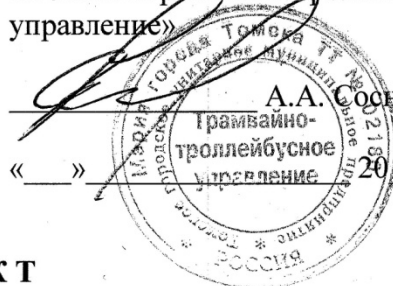
MAX31725 цифровой датчик температуры, точность $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
ТГУМП «Трамвайно-троллейбусное
управление»

« » г. А.А. Сосновский
Трамвайно-троллейбусное
управление



А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы Купрекова Степана Владимировича, выполненной в Томском университете систем управления и радиоэлектроники на тему: «Разработка метода индивидуального контроля количества тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором помещению», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13. – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

Комиссия в составе:

Председатель:

Свахина Ольга Анатольевна – заместитель генерального директора по эксплуатации ТГУМП «ТТУ»

Члены комиссии:

Манджинеев Виктор Сергеевич – начальник производственно-технической службы ТГУМП «ТТУ»

Раскумандрин Владимир Николаевич – главный инженер цеха обслуживания и ремонта трамваев ТГУМП «ТТУ»

Составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Купрекова С.В. внедрены в систему индивидуального учета и контроля потребляемой тепловой энергии в административном корпусе ТГУМП «ТТУ», расположенном по адресу г. Томск, ул. Енисейская, 33 (строение 7).

В системе учета внедрены следующие результаты исследований:

1. Математическая модель (система управлений) с учетом фактического коэффициента теплоотдачи отопительного прибора.
2. Способы измерения сопротивления теплоотдачи отопительного прибора и количества тепловой энергии, привносимой им в помещения (патенты).
3. Алгоритмы анализа экспериментальных данных.

Подписи членов комиссии:

Председатель комиссии:

О.А. Свахина

Члены комиссии:

В.С. Манджинеев

В.Н. Раскумандрин