

А. С. Солдатенков

**Математическое моделирование системы управления
теплопотреблением комплекса зданий**

Монография

Белгород
2015

УДК 697
ББК 38.762.1
С60

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова *В.А. Уваров*

Кандидат технических наук, профессор Белгородского государственного национального исследовательского университета (НИУ "БелГУ")
В.В. Ломакин

Кандидат технических наук, начальник отдела разработки и внедрения Белгородского отделения ООО "ЭнергоСтройТелеком" *С.В. Костиков*

Солдатенков, А.С.

С60 Математическое моделирование системы управления теплотреблением комплекса зданий: монография/
А.С. Солдатенков. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. – 176 с.

ISBN 987-5-361-00317-4

В монографии дан анализ систем децентрализованного теплоснабжения зданий и особенности их автоматизации. Предложен метод математического моделирования системы управления децентрализованным отоплением комплекса зданий, основанный на математических моделях распределенных энергосистем и экспериментальных исследованиях. Представлены особенности имитационной модели, результаты экспериментальных исследований и моделирования управления отоплением комплекса зданий при теплоснабжении от автономного источника тепловой энергии.

Издание рассчитано на научных сотрудников и инженеров, ведущих прикладные расчеты, а также аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей. Монография публикуется в авторской редакции.

УДК 697
ББК 38.762.1

ISBN 987-5-361-00317-4

© Солдатенков А.С., 2015
© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСОВ ЗДАНИЙ	8
1.1. Анализ особенностей управления отоплением зданий	8
1.2. Анализ существующих схем теплоснабжения зданий и сооружений	10
1.3. Особенности автоматизации децентрализованного отопления зданий	19
1.4. Особенности современных автоматизированных систем диспетчерского управления теплоснабжением комплексов зданий	28
1.5. Существующие методы и математические модели расчета систем теплоснабжения комплексов зданий	35
1.6. Выводы по проведенному обзору	41
Глава 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ ОТОПЛЕНИЕМ КОМПЛЕКСА ЗДАНИЙ, ОСНОВАННОГО НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	43
2.1. Математическая модель объекта управления в виде системы отопления здания при зависимом присоединении к источнику тепла	43
2.2. Основные законы регулирования с применением исполнительных механизмов при релейно-импульсном управлении	49
2.3. Особенности математической модели регулятора в системах управления теплоснабжением зданий	56
2.4. Разработка метода математического моделирования системы управления децентрализованным отоплением комплекса зданий, основанного на имитационном моделировании и экспериментальных исследованиях	60
2.4.1. Математическая модель системы управления отоплением здания на базе автоматизированного индивидуального	

теплого пункта с зависимым присоединением к источнику тепловой энергии	60
2.4.2. Математическая модель системы управления отоплением комплекса зданий с основными схемами теплоснабжения	68
Глава 3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОТОПЛЕНИЯ КОМПЛЕКСА ЗДАНИЙ	82
3.1. Параметрическая идентификация объектов управления	82
3.2. Разработка структуры имитационной модели системы управления отоплением здания с автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом	87
3.3. Имитационное моделирование динамических процессов системы управления отоплением здания с автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом при изменении параметров исполнительного механизма	94
3.4. Имитационное моделирование динамических процессов системы управления отоплением здания с автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом при изменении параметров и структуры регулятора	101
3.5. Структура имитационной модели, результаты имитационного моделирования и сравнительный анализ с экспериментальными исследованиями системы управления теплоснабжением комплекса трех зданий	112
3.6. Имитационное моделирование системы управления отоплением комплекса пяти зданий	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
ПРИЛОЖЕНИЕ	137
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	149

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие систем децентрализованного теплоснабжения связано с ростом объемов строительства в пригородных и сельских зонах застройки, а также с реконструкцией старой застройки городов, являющихся конечными потребителями в системах централизованного теплоснабжения. В результате возникают проблемы нехватки имеющихся мощностей централизованных источников и тепловых сетей. Строительство автономных котельных позволяет эффективнее адаптировать систему теплоснабжения к условиям потребления тепловой энергии реальными объектами, а отсутствие протяженных распределительных сетей существенно снижает потери тепла при транспортировке теплоносителя. Повышенный интерес к автономным источникам тепла во многом связан с инвестиционно-кредитной политикой в РФ, т.к. строительство централизованной системы теплоснабжения требует больших единовременных финансовых вложений. В случае децентрализованного теплоснабжения от автономного источника тепла можно достичь существенного их снижения за счет отсутствия распределенных тепловых сетей.

Применение современных средств автоматизации потребителей тепловой энергии позволяет снизить максимальную температуру теплоносителя и обеспечить возможность работы нескольких источников тепла на единую сеть с возможностью эффективного функционирования каждого. Однако реконструкция и модернизация энергосистем на базе создания локальных систем автоматического регулирования (САР) отдельно стоящими зданиями в виде автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) в целом не дает экономии и приводит к возникновению зон с существенным избытком или недостатком тепловой энергии. Это объясняется наличием у большинства потребителей относительно недорогих тепловых узлов с водоструйными элеваторами, изначально не предназначенными для совместной работы в тепловой сети с количественным регулированием теплоносителя.

Не менее остро стоят задачи создания основ управления энергоресурсопотреблением зданий, энергохозяйства и инженерными инфраструктурами города с целью энергосбережения и повышения

эффективности распределенных энергосистем с учетом их энергобезопасности. Для решения одной из таких задач необходимо отработать технологии управления процессами децентрализованного теплоснабжения распределенного комплекса зданий с основными схемами теплоснабжения, включая автоматизированные и неавтоматизированные тепловые узлы зданий.

Это направление соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ "Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика", а также перечню критических технологий РФ "Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии" (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899); учитывает тенденцию непрерывного возрастания стоимости потребляемых энергоресурсов и связано с созданием современных энергоэффективных технологий по управлению энергоресурсопотреблением распределенными зданиями, энергохозяйством и инженерными инфраструктурами микрорайонов города на основе поисковых проблемно-ориентированных исследований.

В качестве примера надежного и эффективного теплоснабжения можно назвать страны Северной Европы. Например, в Дании проводится эффективная государственная политика по подключению новых потребителей тепла к автоматизированным системам теплоснабжения. При этом в Дании впервые были изобретены бесшумные циркуляционные насосы "с мокрым ротором", теплосчетчики и эффективные системы автоматического регулирования процессом теплоснабжения, что позволило создавать автоматизированные ИТП в зданиях различного назначения. Однако, учитывая сделанные наработки за рубежом в области автоматизации систем теплоснабжения, необходимо отметить, что механическое перенесение этого опыта не является наилучшим решением для РФ, что связано не только с климатическими условиями нашей страны, но, прежде всего, со спецификой существующих схем систем отопления и горячего водоснабжения (ГВС).

В связи с этим актуальным направлением решения задач энергосбережения является реконструкция существующих объектов теплоснабжения зданий с созданием энергоэффективных

автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ) и учета тепловой энергии на основе современного оборудования, базирующихся на математическом моделировании процессов теплоснабжения. Важным моментом при создании таких систем является предоставление удаленного доступа по сетям общего пользования к технологической информации для повышения прозрачности работы энергосистемы.

В работе для анализа систем отопления комплекса зданий применялись методы системного анализа, теории автоматического управления, математического и имитационного моделирования, численные методы решения дифференциальных уравнений и методы идентификации систем управления. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением адекватной математической модели, апробированной методики расчета, применением аттестованных средств измерения и анализом погрешности измерений.

Монография состоит из 3-х разделов, заключения, списка литературы и приложений. В первом разделе представлен анализ современного состояния в области децентрализованного теплоснабжения зданий, показаны основные способы и принципы автоматического регулирования отопления; рассмотрены основные схемы теплоснабжения зданий, показаны их преимущества и недостатки; выполнен обзор методов и математических моделей расчета таких систем, а также представлены особенности современных промышленных АСДУ теплоснабжением комплексов зданий.

Вторая глава посвящена разработке метода математического моделирования системы управления децентрализованным отоплением комплекса зданий, основанного на математических моделях распределенных энергосистем и экспериментальных исследованиях.

В третьем разделе рассмотрены вопросы разработки имитационной модели, экспериментальных исследований и моделирования управления отоплением комплекса зданий при децентрализованном теплоснабжении.

В основу монографии положена кандидатская диссертация А.С. Солдатенкова на тему: "Автоматизация децентрализованного отопления комплекса зданий с основными схемами теплоснабжения".

Глава 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСОВ ЗДАНИЙ

1.1. Анализ особенностей управления отоплением зданий

В общем случае, система теплоснабжения включает источник тепла, тепловую сеть и теплопотребляющие объекты. Источниками тепла при децентрализованном теплоснабжении, как правило, являются котельные установки различной мощности, энергоустановки для утилизации тепловых отходов промышленности и т.п. Под тепловой сетью в системах теплоснабжения зданий понимается среда, которая передает тепловую энергию от источника в системы теплопотребления. Основными потребителями тепловой энергии в системах теплоснабжения зданий являются системы отопления, горячего водоснабжения (ГВС), кондиционирования воздуха, приточно-вентиляционные установки, тепловые завесы и т.п. Эффективность систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в зданиях определяется, в первую очередь, стабильностью поддержания в помещении требуемых параметров микроклимата [1].

В настоящее время самыми распространенными являются водяные системы теплоснабжения. При этом обеспечивается достаточно равномерная температура помещений, ограничивается температура поверхности отопительных приборов, в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями, а также достигается бесшумность циркуляции теплоносителя в трубопроводах [2]. Основными регулируемыми величинами в системах водяного отопления являются температура воздуха в помещениях и температура теплоносителя в системе.

Температурный режим зданий и сооружений определяется совместным влиянием изменяющихся во времени управляющих и возмущающих воздействий. Последние делятся на внешние и внутренние [3]. К внешним воздействиям относятся: температура наружного воздуха, солнечная радиация, воздействие ветра, снег, дождь и пр. [4], изменения температуры и расхода теплоносителя на вводе в здания.

К внутренним тепловым воздействиям относятся различные выделения теплоты в зданиях, например, от работающих электроприборов, оборудования, и т.п. Сюда же относятся и

тепловыделения непосредственно людьми. Следует отметить, что внутренние возмущающие воздействия достаточно велики и могут приближаться к величине тепловых потерь зданий в переходные периоды отопительного сезона.

В системах децентрализованного теплоснабжения регулирование теплоснабжения может осуществляться следующими способами [5]:

- центральное – производится в источниках тепловой энергии (котельных);
- местное – осуществляется в тепловых пунктах зданий;
- пофасадное – осуществляется в тепловых пунктах зданий с учетом объекта управления в виде отдельных ветвей системы отопления;
- индивидуальное регулирование – производится непосредственно на отопительных приборах [6].

Центральное регулирование применяется, как правило, только при однородной тепловой нагрузке теплопотребителей. В случае тепловой нагрузки здания в виде отопления и ГВС, добиться высокого качества теплоснабжения весьма сложно. Кроме того, центральное регулирование не учитывает влияние изменений направления ветра и излучения солнечной радиации на теплоснабжение зданий относительно сторон света, а также не позволяет осуществлять индивидуальное регулирование температуры в зданиях. Наилучших результатов регулирования можно добиться при сочетании всех способов. Но из-за высокой стоимостью организации пофасадного и индивидуального регулирования часто ограничиваются только центральным и местным.

Наибольшее распространение в РФ имеет центральное качественное регулирование, предполагающее изменение температуры подаваемого теплоносителя, дополняемое количественным регулированием, предполагающим изменение расхода теплоносителя на вводе в здание в тепловых пунктах. Если рассматривать местное регулирование в индивидуальном тепловом пункте (ИТП), то можно выделить 3 принципа автоматического регулирования отопления здания: по отклонению при изменении температуры внутри помещения [7], по возмущению при изменении внешних климатических условий [8], и комбинированный способ.

Регулирование по отклонению предполагает установку датчиков температуры внутри помещений и в ИТП на подающем трубопроводе системы отопления. Основное преимущество – учет всей совокупности возмущений. Недостатки – сложность выбора контрольных точек установки датчиков, вследствие разброса значений температур по помещениям, а также организации сбора информации с них [9]. Такой способ целесообразно применять для относительно небольших зданий.

Регулирование по возмущению предполагает установку датчика температуры наружного воздуха. При этом в зависимости от климатических факторов в системе отопления поддерживается заданный температурный режим. Основное преимущество – хорошие динамические характеристики, обусловленные отсутствием в контуре управления системы отопления, обладающей большой инерционностью. Недостатки – регулирование осуществляется в соответствии с температурным графиком, который не учитывает особенности здания как объекта управления.

Регулирование комбинированным способом сочетает оба указанных подхода к управлению системой отопления здания [10].

1.2. Анализ существующих схем теплopotребления зданий и сооружений

Тепловой пункт является одним из основных элементов системы теплоснабжения. В нем осуществляется связь между тепловыми сетями и потребителями тепловой энергии. Чаще всего при децентрализованном водяном теплоснабжении применяют следующие основные способы присоединения системы теплopotребления к внешним тепловым сетям [2]:

- зависимое прямоточное присоединение;
- зависимое присоединение со смешением теплоносителя;
- независимое присоединение.

Зависимая прямоточная схема присоединения системы отопления, представленная на рис. 1.1, является наиболее простой. В ней отсутствуют теплообменник, смесительный узел, циркуляционный и подпиточный насосы. Такую схему применяют, когда в системе допускается подача высокотемпературного теплоносителя и

значительное гидростатическое давление, либо в случае прямой подачи низкотемпературного теплоносителя. Основной недостаток – невозможность местного регулирования температуры теплоносителя в системе отопления здания.

Для жилых зданий температура теплоносителя, поступающего в нагревательные приборы, по санитарным нормам не должна превышать 95°C а в магистралях тепловых сетей может подаваться теплоноситель с температурой $130\text{-}150^{\circ}\text{C}$, а значит необходимо понижение его температуры [2]. Чаще всего достигается это применением схемы зависимого присоединения со смешением теплоносителя, например, с помощью водоструйного элеватора [11], установленного на вводе в здание как представлено на рис. 1.2.

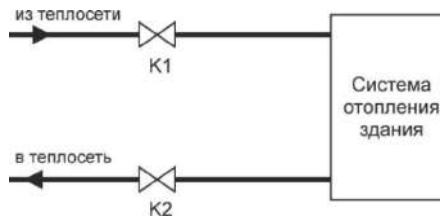


Рис. 1.1. Блок-схема зависимого прямоточного присоединения системы отопления

В элеваторе происходит смешение исходного (G_1) и охлажденного (G_3) теплоносителя, поступающего из системы отопления, в результате чего в нагревательные приборы поступает теплоноситель требуемой температуры.

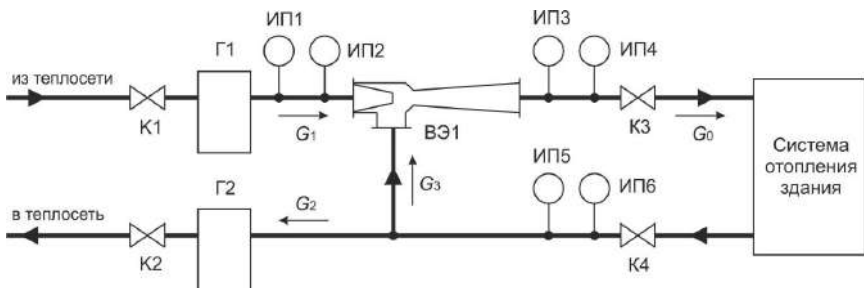


Рис. 1.2. Блок-схема элеваторного узла: K1-K4 – клапаны; Г1, Г2 – грейзики; ИП1,3,5 – манометры, ИП2,4,6 – термометры, ВЭ1 – водоструйный элеватор, G_1 - G_2 – расход теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах на вводе ($G_1=G_2$), G_3 – расход через перемычку, G_0 – расход в системе отопления здания

Широкое распространение элеваторов вызвано их постоянной устойчивой работой при изменении теплового и гидравлического режима в тепловых сетях. Так же элеваторы не требуют постоянного наблюдения, а регулировка его производительности заключается лишь в выборе правильного диаметра сопла. Недостатки – невозможность регулирования температуры теплоносителя в подающем трубопроводе системы отопления здания при изменении температуры наружного воздуха, или при изменении режимов эксплуатации здания, а также сложность обеспечения надежной циркуляции теплоносителя в системе при колебаниях давления [12, 13].

Зависимое присоединение с установкой насоса используется вместо элеваторной схемы, когда на вводе разность давлений в подающем и обратном трубопроводах недостаточна для работы элеватора, или при необходимости индивидуального регулирования температурного режима здания [14]. Такое подсоединение системы отопления представлено на рис. 1.3.

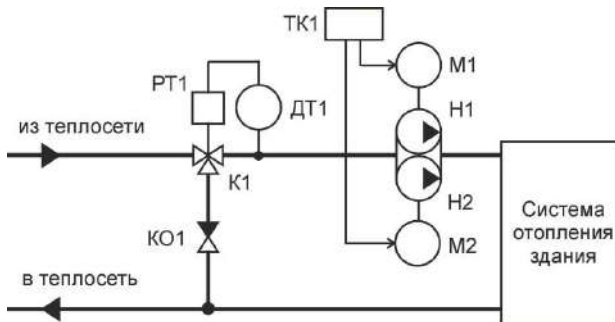


Рис. 1.3. Зависимая схема присоединения с использованием насоса

Оно обеспечивает создание комфортных условий в помещениях здания за счет регулирования расхода притока теплоносителя из присоединяемых тепловых сетей в подающем трубопроводе с помощью регулирующего клапана K1. В результате температура теплоносителя (циркулирующего за счет насосов Н1-Н2 с электроприводами М1-М2 и поочередным управлением с помощью контроллера ТК1) во внутреннем контуре системы отопления изменяется в зависимости от температуры наружного воздуха (с учетом температурного графика) и температуры воздуха в помещении [11]. Однако это достигается только применением

автоматизированных систем регулирования на основе электронных регуляторов или регуляторов прямого действия (контроллера ТК1 и регулятора РТ1 с датчиком температуры ДТ1).

Основной недостаток зависимого присоединения потребителей состоит в том, что давление теплоносителя в тепловых сетях передается на приборы местных систем. Поэтому зависимые местные системы отопления используются в условиях, когда давление в тепловых сетях не превышает прочности применяемых приборов.

При независимой схеме присоединения системы отопления, представленной на рис. 1.4, гидравлический режим и инерционность процессов в теплообменнике не отражаются на системе отопления [2], а регулятор температуры позволяет поддерживать оптимальные параметры микроклимата в отапливаемых помещениях.

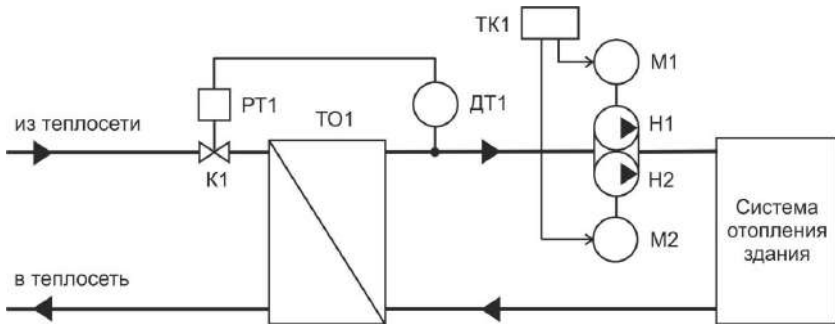


Рис. 1.4. Независимая схема присоединения системы отопления

В такой схеме, теплоноситель из тепловой сети проходит через теплообменник (ТО1) и нагревает теплоноситель, циркулирующий за счет насосов Н1 и Н2 по контуру системы отопления здания. Регулятор РТ1 с помощью клапана К1 поддерживает заданный температурный режим. Независимое присоединение применяется в том случае, когда в системе отопления не допускается повышение гидростатического давления теплоносителя до величины, соответствующей наружным теплосетям. К преимуществам такой схемы также относится возможность сохранения циркуляции теплоносителя в системе отопления здания в течение некоторого времени при повреждениях внешних трубопроводов до теплообменника.

Автоматизированные ИТП, независимо от схемы подключения,

помимо основных функций позволяют автоматически обеспечивать требуемые значения расхода и температуры теплоносителя для поддержания заданных температурных режимов в помещениях, поддерживать заданную температуру в системе ГВС, а также выполнять согласование гидравлических режимов в тепловых сетях и в системах теплоснабжения с применением электронных регуляторов или регуляторов прямого действия [14]. В результате обеспечиваются не только комфортные условия в помещениях, но и существенная экономия энергопотребления, особенно во время переходных периодов, когда температура наружного воздуха превышает 0°C [15].

Для типовой схемы автоматизированного ИТП на основе независимого присоединения к тепловым сетям характерно наличие узла учета тепловой энергии (УУТ) [16], например, теплосчетчика КМ-5 с комплектом датчиков, а также специализированного электронного регулятора, например, двухканального контроллера ECL Comfort 300 (Danfoss, Дания) [17]. Система автоматического регулирования теплоснабжения здания, представленная на рис. 1.5, содержит следующие основные приборы и оборудование:

- регулятор перепада давления РД1 с клапаном К1;
- регулирующий клапан К2 с исполнительным механизмом М1;
- теплообменники ТО1-ТО3 в системах отопления и ГВС;
- моноблок циркуляционных насосов Н1 и Н2 с электроприводами М2 и М3;
- специализированный контроллер ТК1, управляющий температурными режимами в системах отопления и ГВС [18];
- датчики давления ДД2 и ДД3 со специализированным контроллером ТК2, управляющим насосами Н1-Н3;
- подпиточный контур содержит: клапан К3 с приводом М4, связанный с датчиком-реле давления ДД1, входящие в состав регулятора прямого действия, клапан обратный КО1, расширительный бак РБ1;
- регулирующий клапан К5 с исполнительным механизмом М5 в системе ГВС;
- датчики температуры теплоносителя ДТ1 и ДТ2, горячей воды ДТ3, а также датчик температуры наружного воздуха ДТ4.

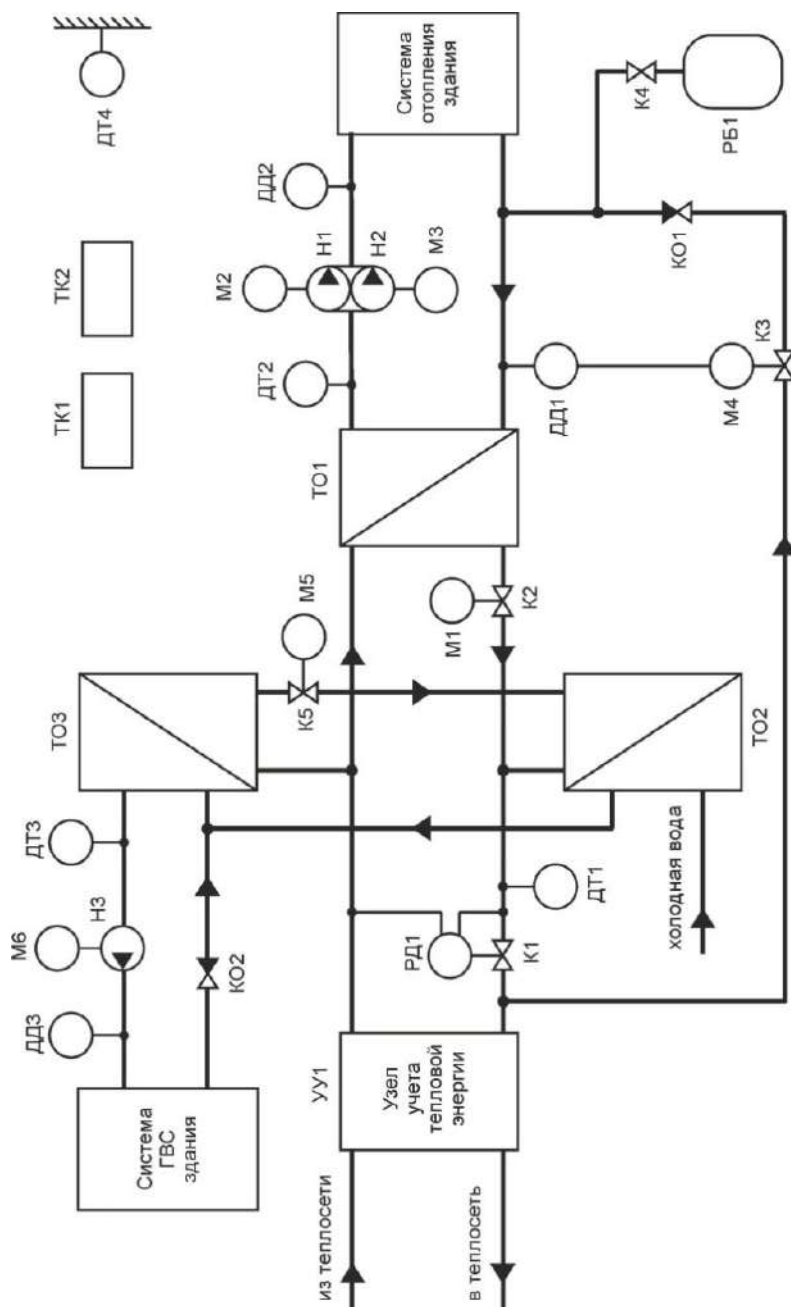


Рис. 1.5. Блок-схема автоматизированного ИТП с независимым присоединением к тепловым сетям и двухступенчатой закрытой системой ГВС

Существуют ИТП на основе различных комбинаций схем подключения систем отопления и ГВС [19], например известна схема автоматизированного ИТП на основе закрытой системы горячего водоснабжения при зависимом присоединении к тепловым сетям [18], представленная на рис. 1.6. Такой ИТП можно разделить на отдельные функциональные элементы, связанные между собой трубопроводами и имеющие общие средства автоматического управления на основе контроллера ТК1: узел ввода тепловой сети (I), узел учета теплотребления (II), узлы присоединения систем вентиляции (III), ГВС (V), системы отопления (VI), узел согласования давлений (IV).

В соответствии с принятой схемой теплового узла, количество и типы используемых элементов могут варьироваться в широких пределах. Однако в соответствии с нормативами [13] тепловой пункт обязательно должен быть оборудован узлом согласования давлений, который предназначен для обеспечения эффективной совместной работы всех элементов и систем теплотребления в безаварийном гидравлическом режиме. Узел позволяет [20]:

- поддерживать неизменные перепады давлений теплоносителя на элементах системы теплотребления;
- обеспечивать допустимое давление теплоносителя в трубопроводах;
- ограничивать максимальный расход теплоносителя.

Следует отметить, что системы отопления зданий гидравлически очень неустойчивы и требуют постоянного по величине расхода теплоносителя. Изменение его расхода ведет к гидравлической разрегулировке системы – теплоноситель прекращает поступать в отдельные стояки, и отопление подключенных к ним потребителей прекращается [18, 21, 22].

Помимо преимуществ, применение автоматизированных ИТП имеет ряд недостатков [23, 24], таких как высокая стоимость и зависимость от наличия электроэнергии. Поэтому в некоторых случаях используется регулируемый элеваторный узел – он позволяет ликвидировать перетопы, но при этом сохраняет все достоинства элеваторного узла и вносит меньше возмущений в работу системы отопления [25, 26].

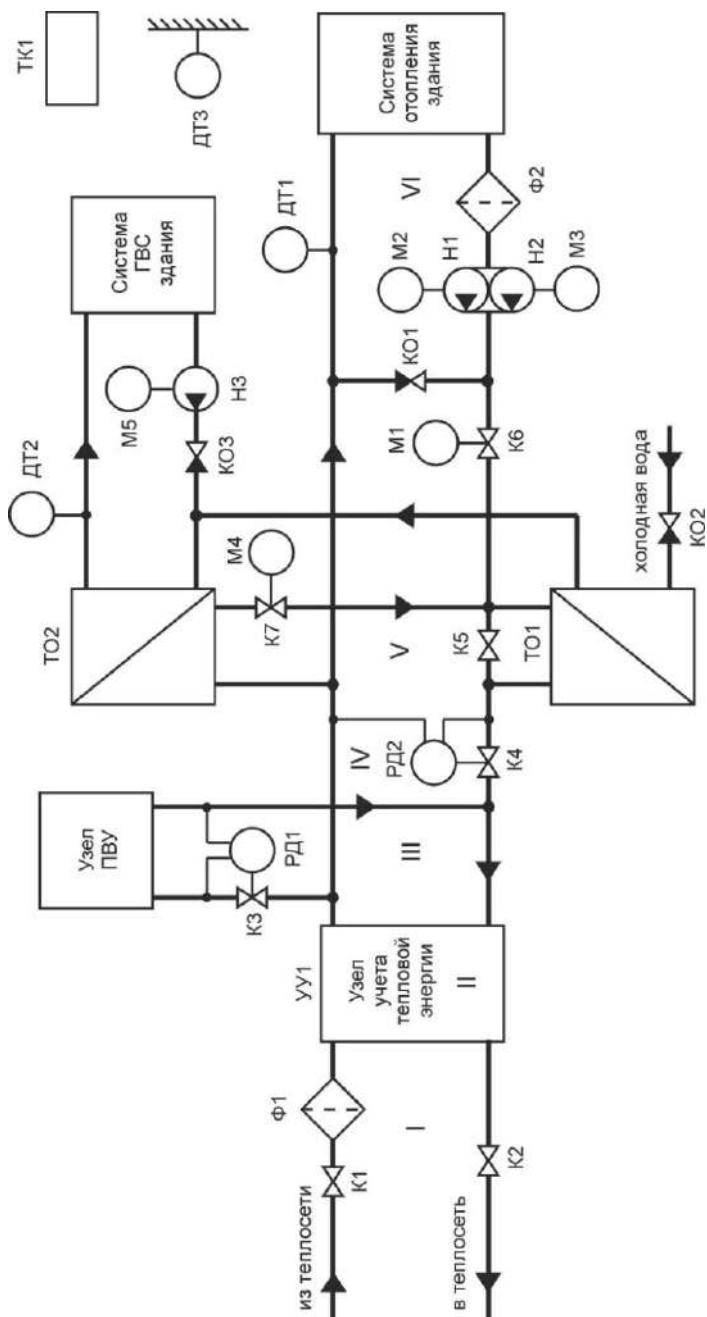


Рис. 1.6. Блок-схема автоматизированного ИТП с зависимым присоединением системы отопления к тепловым сетям и закрытой системой ГВС

Схема, представленная на рис. 1.7, включает в себя элеватор и регулятор располагаемого напора перед элеватором. Дополнительное оборудование – переключка, параллельная элеватору, насос с электроприводом, обратный клапан, управляющий контроллер, датчики температуры.

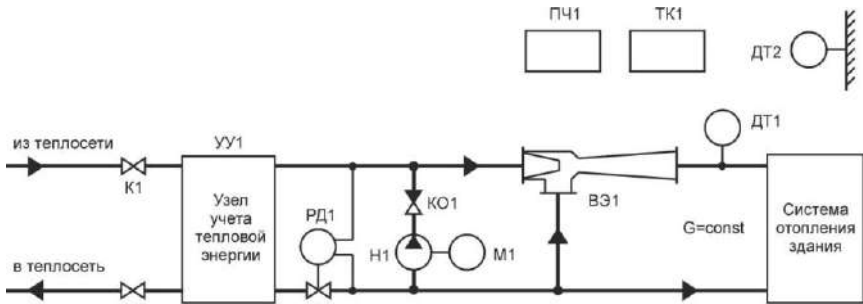


Рис. 1.7. Блок-схема регулируемого элеваторного узла

При соблюдении температурного графика на вводе в здание насос отключен, и элеватор работает в штатном режиме. При превышении температуры теплоносителя (относительно графика) включается насос, который подмешивает теплоноситель из обратного трубопровода в подающий, снижая температуру перед элеватором согласно отопительному графику. Одновременно регулятор РД1 сокращает расход теплоносителя из теплосети, но суммарный расход через сопло элеватора остается постоянным. При пропадании электроэнергии подмешивающий насос отключается, и элеватор работает в штатном режиме. Автоматического регулирования при этом не происходит, но аварийный режим исключается. Тем не менее, стоимость такого решения соизмерима с автоматизированным ИТП, из-за чего оно не получило широкого распространения.

Известны технические решения по применению водоструйных элеваторных узлов с регулируемым соплом [27, 28]. Однако из-за отсутствия циркуляционных насосов не обеспечивается надежная и эффективная циркуляция теплоносителя в системе отопления здания, а их конструкция не обеспечивает точное регулирование температуры в узле смешивания.

Большей эффективностью обладают решения в виде пофасадного регулирования на основе автоматизированных ИТП. Известно, что,

например, в осенне-весенний период с южной стороны в помещениях здания немного теплее, чем с северной. В связи с этим для каждой из сторон здания по-отдельности применяются независимые системы регулирования расхода теплоносителя – в зависимости от температуры наружного воздуха и с учетом внутренней температуры воздуха в помещениях. Основной недостаток таких систем – высокая стоимость, хотя испытания подтвердили их надежность и эффективность [29–31].

Лучших результатов при создании комфортной температуры в помещениях здания можно добиться при дополнительном применении индивидуального регулирования на отопительных приборах [32, 33]. Для вертикально-однотрубной системы отопления в этом случае необходимо устанавливать на отопительных приборах перемычки (байпасы) между подающими и обратными трубопроводами в целях пропуска теплоносителя мимо отопительного прибора, а также непосредственно радиаторный терморегулятор (термостат). Однако при срабатывании термостатов возникает вертикальная гидравлическая разбалансировка системы, что приводит к снижению качества регулирования температуры в здании. Кроме того, такой способ регулирования обладает высокой стоимостью.

1.3. Особенности автоматизации децентрализованного отопления зданий

Предлагаемые на рынке водогрейные котлы классифицируются на группы малой (до 65 кВт), средней (до 1750 кВт) и большой (до 15 МВт) мощности [34].

Котлы малой мощности работают преимущественно с одноступенчатыми горелками. Применение модулированных горелок для конденсационных котлов обеспечивает длительную низкую тепловую нагрузку котла, что повышает эффективность конденсации водяного пара из уходящих газов. Для настенных котлов, функционирующих в проточном режиме, управление горелкой обеспечивает плавное регулирование мощности котла без накопления тепловой энергии в небольшом объеме котлового теплоносителя. В котлах большой и средней мощности, как правило, применяются горелки со ступенчатым или модулированным регулированием;

первая ступень обычно настраивается на 60% мощности горелки [35].

Котлы малой мощности характеризуются наиболее низкими эксплуатационными требованиями [34, 36, 37], благодаря чему отпадает необходимость в дополнительной защите от чрезмерного понижения температуры теплоносителя в котле – достаточно осуществлять защиту только за счет горелки, например, вкл. при 35°C и выкл. при 42°C. Такого рода защита характерна только для нормального режима работы котла, однако в ночном режиме теплоноситель в котле может охлаждаться и до более низких температур (но с сохранением защиты от замерзания).

Котлы средней и большой мощности, обладающие большим водяным объемом и дополнительными требованиями к границам температур теплоносителя, кроме защиты по минимальной температуре котлового теплоносителя, требуют дополнительно защиту по минимальной температуре теплоносителя на входе в котел [38, 39]. Например, при использовании природного газа минимальная температура теплоносителя в котле не должна быть менее 50°C, минимальная температура обратного теплоносителя – не менее 40°C, а предельная максимальная температура (точка срабатывания термостатического ограничителя) – не более 115°C [40, 41]. На температуру теплоносителя в обратном трубопроводе влияют преимущественно водяной объем системы и динамика изменения температур и расходов в отдельных отопительных контурах, которые, в свою очередь, во многом определяются используемой гидравлической схемой.

Известна одноступенчатая система защиты Therm–Control [34], которая применяется в системах отопления с небольшим объемом теплоносителя, при управлении отопительными контурами с помощью смесительных клапанов, расположенных вместе с коллекторами рядом с котлами. Во время работы котельной датчиками постоянно измеряется температура в зоне обратного потока. Если температура обратного потока одного из котлов опустится ниже допустимого значения, происходит запуск горелок, после чего регуляторы либо управляют закрытием смесительных клапанов в системах теплоснабжения, либо уменьшают расход теплоносителя через котлы с помощью закрытия клапанов. В результате расход

теплоносителя через котлы снижается минимум на 50% и уменьшается поступление охлажденного теплоносителя из обратного трубопровода в котел. После достижения необходимого значения температуры в обратном трубопроводе, система управления котлами передает регуляторам системы отопления команду либо на разблокировку смесительных клапанов, либо на полное открытие котловых клапанов. Отпуск тепловой энергии переходит в нормальный режим.

Котлы, работающие с системами теплоснабжения больших водяных объемов, имеют устройства повышения или стабилизации температуры теплоносителя в обратном трубопроводе [42]. В этом случае применяется двухступенчатая система защиты с использованием смесительных насосов, представленная на рис. 1.8. Это решение применяется для систем при условии управления отопительными контурами с помощью смесительных клапанов, расположенных вместе с коллекторами рядом с котлами.

Подмешивание подающего теплоносителя в обратную магистраль с помощью одного смесительного насоса должно быть одинаковым для всех котлов, поэтому многокотловую установку выполняют по схеме с попутным движением теплоносителя. Особенностью схемы является применение дополнительного смесительного насоса Н1 с целью подачи теплоносителя из подающего трубопровода непосредственно в обратную магистраль котельной (см. рис. 1.8 – узел смешивания УС1). Далее за УС1 осуществляется повторный контроль температуры теплоносителя в обратном трубопроводе для каждого котла. Температура, измеренная датчиками ДТ2 и ДТ4, постоянно сравнивается с допустимой, и, если температура обратного теплоносителя опускается ниже, выполняется запуск горелки. После этого регулятор получает команду закрыть смесительные клапаны, что приводит к уменьшению расхода котлового теплоносителя и подачи переохлажденного теплоносителя из обратного трубопровода к котлам. В результате работы горелок и циркуляции теплоносителя, усиленной насосом РМ, температура обратного потока повышается. После достижения определенной температуры автоматика разблокирует смесительные клапаны, и отпуск тепла переходит в нормальный режим. При повышении температуры в обратном трубопроводе регулятор (по показаниям ДТ6) выключает насос.

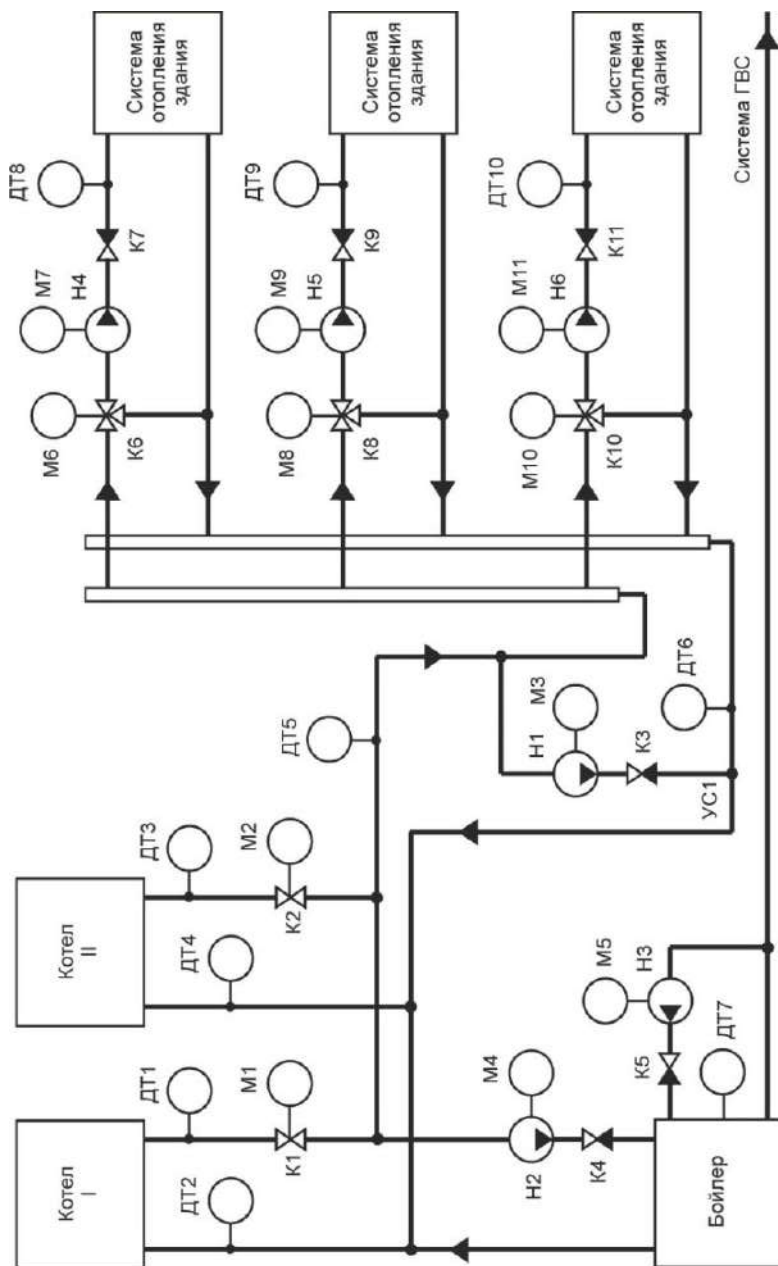


Рис. 1.8. Блок-схема многокотловой установки с двухступенчатой системой защиты и применением смесительного насоса

Если котельная работает с системой теплоснабжения большого водяного объема, либо отопительные контуры удалены от котельной и не управляются, то каждый котел дополнительно снабжается системой повышения и стабилизации температуры теплоносителя в обратном трубопроводе (первая ступень защиты). Вторая ступень – принудительное отделение (сепарация) котлового контура от отопительных контуров.

Отделение контура котла осуществляется закрытием поворотных заслонок К2 и К4 с приводами, причем, если исполнительные механизмы размещены в непосредственной близости от котлов (сразу за смесительными насосами Н1 и Н2), то дополнительное управление отопительными контурами не требуется. Схема такой сепарации представлена на рис. 1.9. Если система автоматизации котлов управляет удаленными отопительными контурами, то при их отключении на второй ступени защиты, ожидаемого результата не будет, что связано с наличием большого количества охлажденного теплоносителя в протяженном обратном трубопроводе и создает опасность его поступления в котел. Назначение смесительного насоса любого котла состоит в подаче теплоносителя из подающего трубопровода непосредственно в обратный – к узлу смешения УС1 или УС2 (см. рис. 1.9). Включение смесительного насоса осуществляется регулятором по показаниям датчиков температуры ДТ3 и ДТ6, а также ДТ1 и ДТ4 [34, 40]. Когда температура теплоносителя опускается ниже предельного значения, регулятор каждого котла по-отдельности начинает закрытие двухходовых клапанов К2 и К4. В результате начинается процесс сепарации котлового контура от системы отопления, снижение отбора котлового теплоносителя и подачи переохлажденного теплоносителя из обратного трубопровода к котлам. За счет работы горелки и циркуляции теплоносителя (за счет смесительных насосов Н1 и Н2), повышается температура котлового теплоносителя. При достижении соответствующего значения температуры регулятор котла открывает двухходовой клапан, отключает смесительный насос, и наступает нормальный режим подачи тепловой энергии в систему отопления.

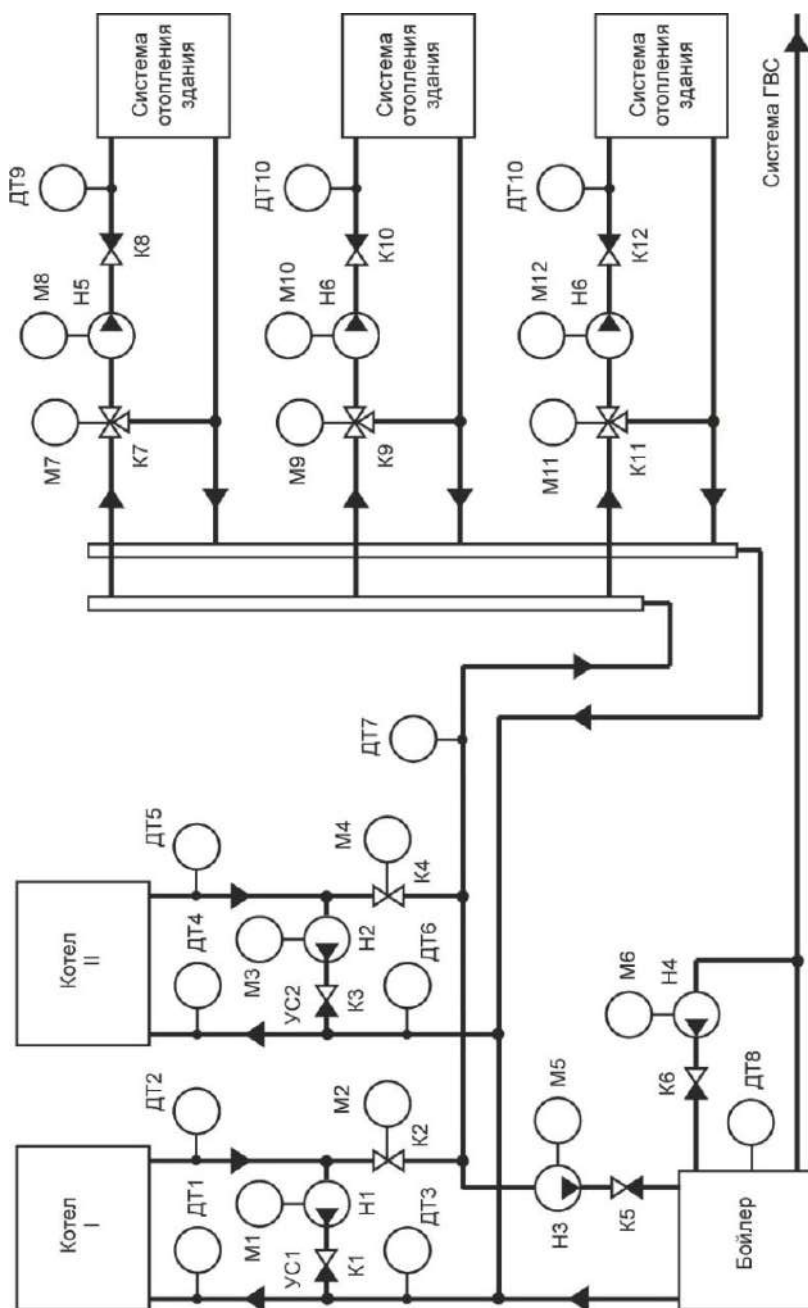


Рис. 1.9. Блок-схема многокотловой установки с separating контуров

Существуют системы с неуправляемыми удаленными потребителями тепловой энергии и большим водяным объемом (большинство существующих систем). Такие системы характеризуются повышенным (более 3 кПа) гидравлическим сопротивлением магистральных трубопроводов и опасностью разбалансировки всех отопительных контуров [37, 42]. В таких случаях насосы котлового контура устанавливаются на каждом котле. Постоянная работа этих насосов заметно улучшает собственную циркуляцию котлов и поддерживает циркуляционные насосы отопительных контуров. Для реализации второй ступени защиты используют трехходовой смесительный клапан, как показано на рис. 1.10, или дополнительно устанавливают гидравлическую стрелку – термогидравлический распределитель (см. рис. 1.11).

Назначение насосов котловых контуров Н1 и Н2 состоит в преодолении гидравлических сопротивлений трубопроводов и систем теплоснабжения с подачей теплоносителя в распределительный коллектор. Дополнительно осуществляется защита по температуре возвращаемого теплоносителя путем подмешивания теплоносителя из подающего коллектора в обратный через байпас с обратным клапаном ОК1. Эта процедура обязательна, т.к. при большом водяном объеме системы, а также при большом расстоянии между котлами и системами отопления, необходима постоянная стабилизация температуры в подающем и обратном трубопроводах [37]. При малом отборе тепла котловой насос работает постоянно – осуществляется стабилизация температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах. Если температура обратного теплоносителя, измеренная датчиками ДТ1 и ДТ3 опускается ниже предельного значения, регулятор каждого котла начинает перевод соответствующего трехходового клапана К1 или К2 в защитное положение, то есть сепарирует котел от системы отопления, что приводит к уменьшению поступления в котел переохлажденного теплоносителя из обратного трубопровода. Одновременно включаются горелки, и падение температуры котлового теплоносителя прекращается. После того, как температура теплоносителя превысит заданную величину, трехходовой клапан переводится в нормальный режим работы, и поставка тепловой энергии возобновляется.

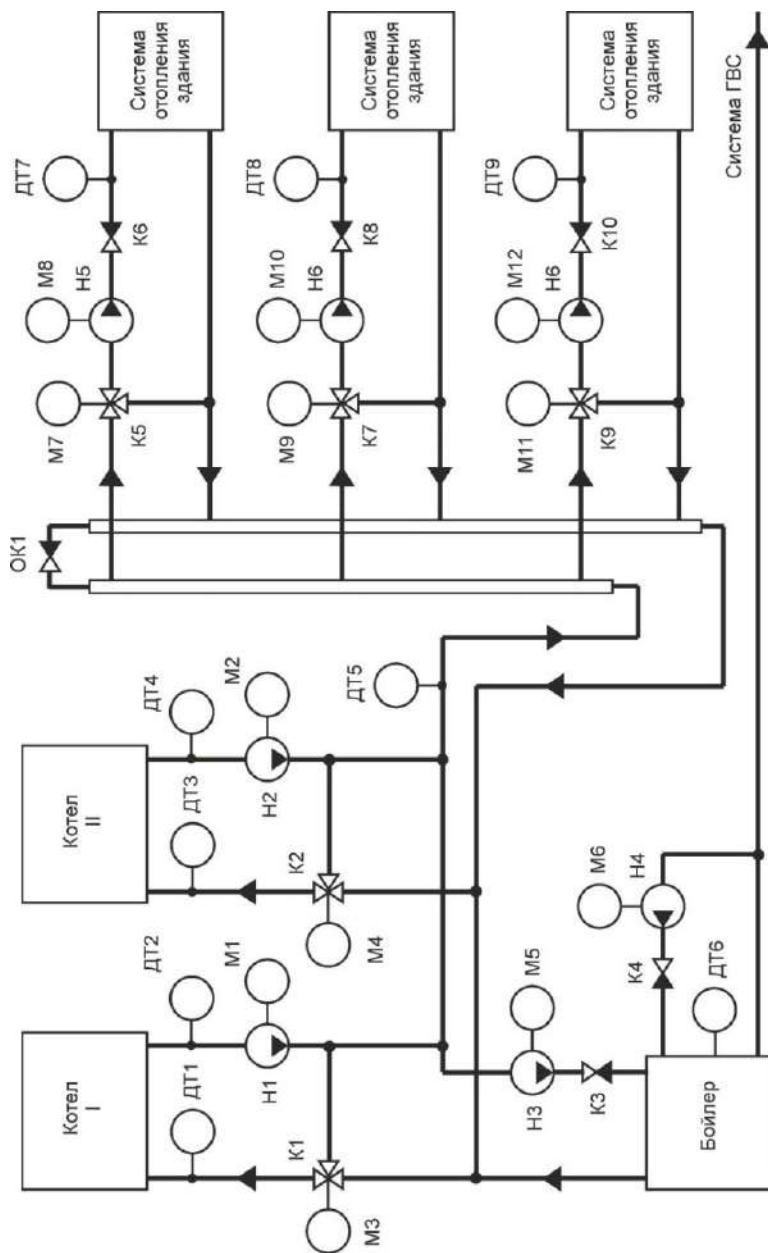


Рис. 1.10. Блок-схема многокотловой установки с насосами котловых контуров и трехходовыми смесительными клапанами

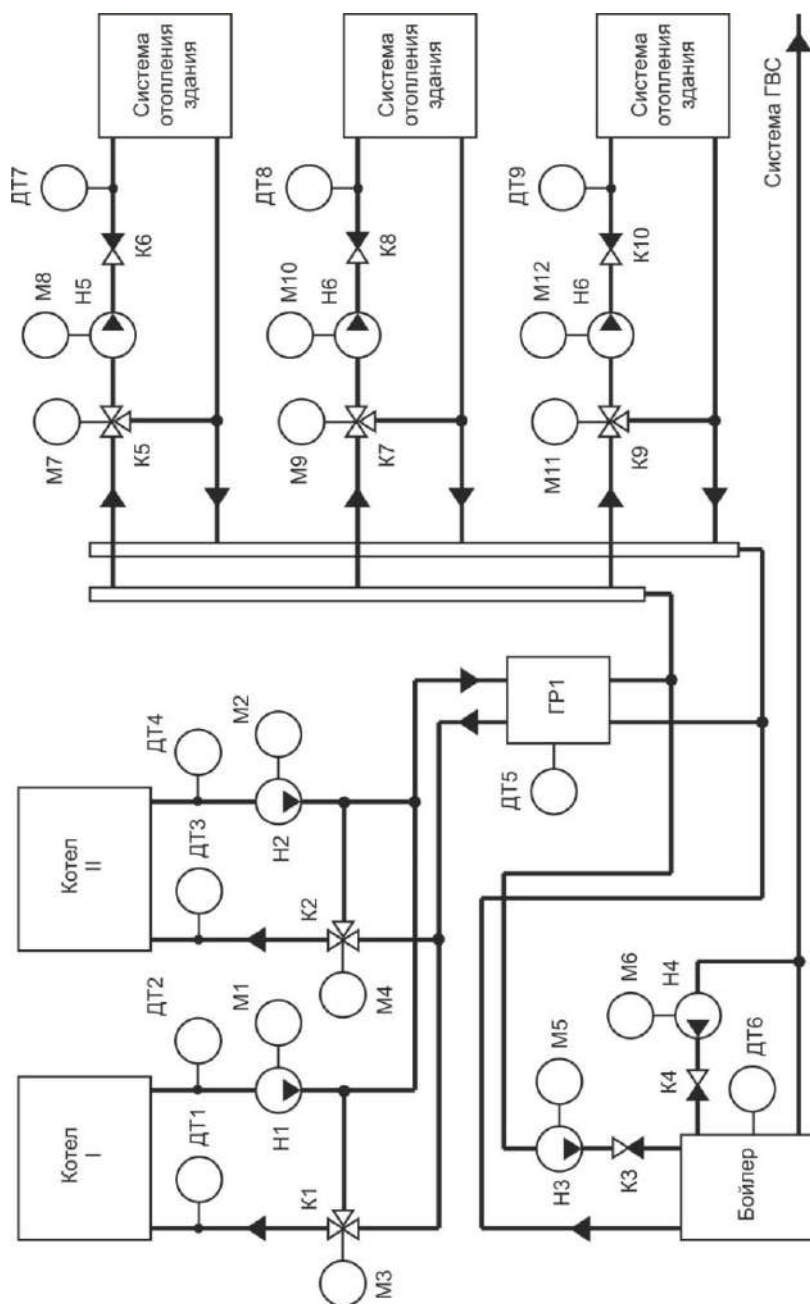


Рис. 1.1.1. Блок-схема многокотловой установки с термогидравлическим распределителем

Для систем с большим гидравлическим сопротивлением соединительных трубопроводов и отсутствии управления отопительными контурами со значительным водяным объемом, при наличии большой динамики изменения параметров системы, или в случае, когда от котельной требуется различная тепловая мощность котлов, применяются более эффективные методы разделения котловых и отопительных контуров, например, гидравлическая стрелка (термогидравлический распределитель) [43–45]. Принцип работы термогидравлического распределителя состоит в том, чтобы снизить влияние котлового и отопительных контуров с изменяющимися параметрами друг на друга. Такая схема надежна и эффективна, но требует дополнительных вложений. В данной схеме (см. рис. 1.11) заданием насосов котловых контуров Н1 и Н2 является подача теплоносителя на вход термогидравлического распределителя ГР1 (функция стабилизации питания). Также осуществляется защита котла от низкой температуры теплоносителя в обратном трубопроводе – ее повышение происходит благодаря прохождению через ГР1 избыточного количества нагретого теплоносителя из подающего трубопровода. Это обязательно, т.к. при большой динамике изменения расхода и значительном водяном объеме системы, требуется постоянная стабилизация температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах.

1.4. Особенности современных автоматизированных систем диспетчерского управления теплоснабжением комплексов зданий

Комплексная автоматизация инженерных систем зданий по сравнению с не взаимодействующими между собой решениями, имеет следующие преимущества:

- снижение потребления энергии;
- повышение надежности и оперативности управления;
- открытость, предоставляющая возможность дальнейшего расширения системы с применением оборудования различных производителей.

Современные комплексы зданий и сооружений, как правило, являются многофункциональными и могут содержать жилые помещения, офисные, торговые, спортивные, развлекательные

площади, гаражи и т.п. с различными требованиями к организации внутреннего микроклимата, системам безопасности и жизнеобеспечения. Эти обстоятельства приводят к использованию сложных систем отопления, вентиляции и кондиционирования совместно с рядом других систем – таких как освещение, охранные системы, системы связи, противопожарные системы и т.п. Обеспечить надежную и безотказную работу всей совокупности этих систем позволяют автоматизированные системы диспетчерского управления (АСДУ) [46].

Структурно АСДУ инженерными системами состоит из следующих элементов:

1. Нижний уровень – представлен различными наборами датчиков (температуры, давления, расхода и т.п.), исполнительных механизмов (клапаны, приводы, запорно-регулирующая арматура), контроллеров (локальные регуляторы САР и т.п.).
2. Средний уровень – представлен системами телеметрии, локальной обработки данных, преобразователями интерфейсов/протоколов, усилителями сигналов и пр.
3. Верхний уровень – представлен программно-аппаратными средствами высокоуровневой обработки данных, визуализации технологической информации, комплексным управлением всем технологическим процессом.

Большинство существующих в настоящее время АСДУ базируются на SCADA-системах (Supervisory Control And Data Acquisition, диспетчерское управление и сбор данных) [47–49], под которыми понимается программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий сбор информации в реальном или псевдореальном времени с удаленных объектов для обработки, анализа и возможного управления, а также содержащий набор инструментальных средств, для его разработки. Современные SCADA-системы включают в себя три основных структурных компонента:

1. Удаленный терминал (RTU, Remote Terminal Unit). Может представлять собой как простейшие датчики, выполняющие сбор данных с объекта, так и специализированные отказоустойчивые комплексы на базе микропроцессорных систем, выполняющие обработку информации и управление в

real-time режиме. Применение на нижнем уровне устройств для первичной обработки информации позволяет упростить требования к качеству линий связи с диспетчерским пунктом.

2. Диспетчерский пункт управления (MTU, Master Terminal Unit). Выполняет основную обработку данных и высокоуровневое управление в режиме псевдореального времени (реже в real-time), а также обеспечение человеко-машинного интерфейса (HMI) между оператором и системой.
3. Коммуникационная система (CS, Communication System) – каналы связи, необходимые для передачи информации с удаленных объектов на центральный диспетчерский пункт и передачи управляющих команд на удаленные терминалы.

В последнее время, принципиально новым подходом к автоматизации, стало создание удаленных автоматизированных рабочих мест (АРМ), связанных с технологическим процессом через сеть интернет [50] на базе WebSCADA. Очевидным плюсом сети интернет является ее уникальная протяженность и распределенность, что позволяет передавать информацию между любыми точками земного шара. Кроме этого, сеть интернет отличается уникальной стандартизацией передаваемых данных, что обеспечивает одинаковую читаемость, информативность и однозначность информации вне зависимости от операционной системы. Однако, распределенность и гетерогенность сети влекут за собой основной недостаток – низкую скорость передачи данных. Сочетание различных физических сред передачи и особенностей протоколов TCP/IP, приводит к недетерминированности интервалов времени запросов-ответов [51].

Существуют следующие основные способы организации совместной работы АСДУ на уровне HMI и сети интернет:

1. Отправка электронных сообщений. Самым простым является использование электронной почты, как средства оповещения при появлении новых записей в журнале тревог. Этими возможностями обладает большинство SCADA-систем. Однако существенными недостатками такого подхода являются невозможность управления технологическими объектами и низкая интерактивность взаимодействия с оператором, вследствие статичности электронных сообщений.

2. Генерация отчетов в виде HTML-файлов. Гораздо более информативной является возможность генерирования отчетов о состоянии объекта в стандарте HTML. Для этого SCADA-система формирует отчет с диаграммами и графиками в виде HTML-файла, который сохраняется на диске (локально или удаленно). Периодичность обновления отчета зависит только от настроек SCADA-системы и не влияет на производительность остальных компонентов АСДУ. Сохраненный файл, в свою очередь, может использоваться web-сервером для предоставления доступа к этим данным через сеть интернет с помощью любого web-браузера. Недостатки в целом такие же, как и при использовании электронных сообщений.
3. Технология "толстый клиент". Большие возможности предоставляет супервизорное управление через интернет. Для этого необходима SCADA-система, поддерживающая функции управления по сети TCP/IP. При этом функционирующая на удаленном персональном компьютере (ПК) система должна иметь в своем распоряжении копию проекта, выполняющегося на главном компьютере, включая описания используемых тэгов, графические объекты, скрипты и описания математических преобразований. В этом случае пересылаемые по сети интернет данные будут содержать только текущие значения параметров, считанных главной системой из контроллеров объекта, и команды удаленного компьютера системе. Примером реализации такой системы могут служить, например, программы WebCast (компания Intellution, пакет iFix), NetLink (компания AdAstrA, пакет Trace Mode) и Scout (компания Wonderware, пакет InTouch). Недостатки – необходимость наличия дорогостоящей лицензии на пакет среды исполнения системы, работающей не главной машине.
4. Технология "тонкий клиент". Тонкий клиент – это программа-клиент в сетях с клиент-серверной или терминальной архитектурой, который переносит все или большую часть задач по обработке информации на выделенный сервер [52]. При использовании специализированного web-сервера, между ним и удаленным клиентом осуществляется обмен данными о

состоянии работающего на сервере SCADA-системы проекта по стандартному HTTP протоколу через web-браузер. В этом случае вся обработка данных происходит на сервере SCADA-системы, а на удаленном компьютере идет только визуализация данных, с использованием Java, ActiveX, CGI или другой web-технологии. В результате, нет необходимости устанавливать на клиентской машине копию лицензионного пакета SCADA-системы, работающей на сервере. Этот подход является наиболее эффективным и используется в WebSCADA.

WebSCADA – это SCADA-система, реализующая человеко-машинный интерфейс на основе интернет-технологий, что позволяет осуществлять удаленный контроль и управление системой через стандартный браузер (Internet Explorer, Google Chrome, и т.д.), выступающий в роли "тонкого клиента". Архитектурно такие системы состоят из сервера и удаленных клиентских терминалов – ПК, планшетов и смартфонов со встроенным интернет-браузером. Подключение удаленных клиентов к WebSCADA-серверу осуществляется через интернет/интранет и позволяет им интерактивно взаимодействовать с системой как с простой web-страницей. Однако следует отметить, что в настоящее время WebSCADA не достигли широкого промышленного внедрения из-за проблем с защитой, передаваемой по общим каналам связи информации. В связи с этим, web-интерфейсы преимущественно используются в качестве удаленных клиентов для контроля информации и сбора данных (например, SCADA-система IntegraXor [53]).

SCADA-система InTouch (Wonderware, США) – мощный человеко-машинный интерфейс для промышленной автоматизации, управления технологическими процессами и диспетчерского контроля. Активно применяется для создания распределенных систем управления (DCS, Distributed Control System) [54]. Доступ к универсальным приложениям InTouch может быть обеспечен с различных устройств через интернет, для обеспечения этих возможностей требуется дополнительное программное обеспечение Terminal Services for InTouch – компонент многопользовательского клиентского доступа к InTouch, установленный на терминальном сервере (web-сервер). Разработанная в Wonderware технология позволяет использовать все

функции SCADA-системы без необходимости установки копии пакета InTouch на ПК локальной сети предприятия. ПК, или любые другие устройства, выполняющие роль "тонких клиентов" подключаются к терминальному сеансу, который выполняется на сервере. При этом клиентские компьютеры могут работать под различными операционными системами (Windows, Linux, Unix, QNX, Mac OS и т.д.). Терминальный сеанс реализует все функции среды InTouch.

SCADA-система WinCC (Siemens, Германия) – операторская система для управления и мониторинга технологических процессов, машин и производств во всех секторах, начиная от простых однопользовательских станций и заканчивая территориально распределенными многопользовательскими системами с резервируемыми серверами и web-клиентами. Мощный интерфейс управления процессом и надежное архивирование данных обеспечивает создание отказоустойчивых решений для измерения и контроля [55]. Для обеспечения многопользовательского доступа к функционирующей на сервере SCADA-системе через сеть интернет, предназначен дополнительный компонент Web Navigator, позволяющий, не устанавливая дополнительного ПО на клиентском рабочем месте, а используя стандартный браузер IE, управлять технологическим процессом, однако для работы клиенту необходима установка нескольких ActiveX объектов, являющихся дополнительными модулями для IE.

SCADA-система Trace Mode (AdAstrA, Россия) – одна из самых покупаемых в России SCADA-система, предназначенная для разработки крупных распределенных АСУТП широкого назначения. Это интегрированная SCADA-система, поддерживающая сквозное программирование операторских станций и контроллеров при помощи единого инструмента. Для поддержки web-диспетчеризации компания AdAstrA разработала программный продукт Data Center [56], являющийся специализированным web-сервером Trace Mode, обеспечивающим удаленный доступ к информации реального времени через web-браузер по локальным сетям, интернет или по беспроводным сетям (GSM, GPRS, Wi-Fi, Bluetooth). Data Center выполняет функции web-шлюза для локальных АСУТП – программа получает данные реального времени от серверов Trace Mode по

протоколу I-NET (TCP/IP) и предоставляет к ним web-доступ, через браузеры или через приложения Trace Mode SCADA Mobile для мобильных устройств.

Главным недостатком представленных решений на базе SCADA-систем является высокая стоимость минимального набора программных модулей, которая резко варьируется в зависимости от количества возможных точек ввода/вывода для подключения оборудования нижнего уровня и количества возможных Web-клиентов [57, 58]. При такой стоимости продукта, зачастую, конечный потребитель использует всего 20–30% всех возможностей системы. Кроме этого, работа с конкретной (уникальной) системой любого производителя требует определенных навыков, что в свою очередь требует затрат на подготовку персонала.

Еще одним существенным недостатком SCADA-систем является тот факт, что при своей высокой стоимости они не так безопасны, как должны быть [59]. Например, эксперты из компании Riptech, известного провайдера услуг в области информационной безопасности, на основании своего опыта по обследованию большого количества крупнейших американских промышленных предприятий делают вывод об уязвимости критичных для американской экономики SCADA-систем. Серверы SCADA часто контролируют предельно чувствительное оборудование и важные государственные инфраструктуры, такие как атомные и другие электростанции, гидроэлектрические дамбы и международные нефте- и газопроводы. Естественно данное оборудование представляет собой привлекательную цель для проведения операций, связанных с вредительством и терроризмом. Такие операции могут привести к катастрофическим последствиям – нарушениям технологического процесса, поломкам и крупным авариям.

Кроме того, в связи со сложностью построения SCADA-систем, часто возникают внутренние ошибки, которые могут привести к серьезным последствиям и даже краху системы [60]. Например, 7 марта 2008 г. произошло внештатное аварийное выключение на 48 часов после установки обновления программного обеспечения второго блока ядерной станции "Hatch" (штат Джорджия, США), а в мае 2008 г. проверка регуляторов (GAO, NNS) выявила порядка 2000

уязвимостей разной степени критичности корпорации Tennessee Valley Authority (TVA) (в ведомости данной энергетической корпорации находятся 11 угольных станций, 8 ТЭС, 3 ядерных станции, 29 ГЭС в США). Среди брешей в безопасности были выявлены сегменты производственной сети, подключенные к сети интернет без защиты, множественные уязвимости прикладного ПО. 5 апреля 2010 г. специалистами энергетической компании LCRA (Lower Colorado River Authority) зафиксировано свыше 4800 попыток получения доступа к их технологической компьютерной системе.

1.5. Существующие методы и математические модели расчета систем теплоснабжения комплексов зданий

Система теплоснабжения представляет собой совокупность распределенных теплообменных устройств, интегрированных в единую систему выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии. Элементы системы водяного теплоснабжения разделяются по видам теплопередачи (конвекция, теплопроводность, излучение) и по конструктивному выполнению (прямоток, противоток, перекрестный ток). Процесс динамики теплообмена каждого из этих элементов описывается дифференциальными уравнениями [61–63].

Если пренебречь незначительным изменением массы теплоносителя, то скорость изменения его температуры будет пропорциональна количеству тепла:

$$\left\{ \begin{array}{l} cmdT = Q_{\kappa} + Q_{\lambda} + Q_{uz} + Q_{\phi} + Q_m, \\ Q_{\kappa} = \pm \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot F_i \cdot (T_i - T_{i-1}), \\ Q_{\lambda} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot F_i \cdot \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2}, \\ Q_{uz} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot q_i(t), \\ Q_{\phi} = \sum_{i=1}^n k_{\phi i} \cdot F_i \cdot (T_i - T_{i-1}), \end{array} \right. \quad (1.1)$$

где Q_k , Q_λ , $Q_{из}$, Q_ϕ – суммарные расходы подведенной и отведенной теплоты соответственно путем конвекции, теплопроводности, излучением, и фильтрацией, Q_m – источник тепла, c – теплоемкость, m – масса среды, α_i – коэффициент теплоотдачи, F_i – поверхность теплообмена, λ_i – коэффициент теплопроводности среды, x – пространственная координата, $q_i(t)$ – удельный тепловой поток, $k_{\phi i}$ – коэффициент фильтрационного теплообмена.

Выражение dT в первом уравнении (1.1) представляет собой дифференциал:

$$dT = \frac{\partial T_i}{\partial t} + w_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i}. \quad (1.2)$$

Для каждого из элементов системы теплоснабжения можно получить систему дифференциальных уравнений в частных производных путем подстановки значений Q_k , Q_λ , $Q_{из}$, Q_ϕ , Q_m и dT в выражение (1.1).

Соответствующие дифференциальные уравнения вытекают из законов сохранения, при этом вещество рассматривается как сплошная непрерывная среда, а характеристики процессов переноса являются непрерывными функциями координат и времени. Для исследования нестационарных задач вынужденного конвективного теплообмена используется дифференциальное уравнение, описывающее перенос тепла в движущейся среде с постоянной скоростью [63–65]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{Q_v}{c\rho}, \quad (1.3)$$

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (1.4)$$

где T – температура теплоносителя, t – время, λ – коэффициент теплопроводности, c – теплоемкость теплоносителя, ρ – плотность теплоносителя, x , y , z – координаты, w_x , w_y , w_z – проекции вектора скорости теплоносителя, Δ – оператор Лапласа в прямоугольной системе координат. В случае твердых тел применяется дифференциальное уравнение теплопроводности вида:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{Q_v}{c\rho}, \quad (1.5)$$

где λ , c и ρ – коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность тела.

Для единственности решения уравнения (1.3)–(1.5) должны быть дополнены геометрическими, физическими, граничными и временными условия. Геометрические – определяют размеры и форму тела, физические – включают численные значения и характер изменения теплофизических параметров тела и окружающей среды, интенсивность внутренних источников теплоты (Q_v). Граничные условия определяют условия теплообмена на границе тела, временные – задают характер изменения температуры или теплового потока в начальный и конечный моменты времени.

Для решения линейных задач широкое распространение получили аналитические методы расчета теплопроводности, например, методы разделения переменных и интегральных преобразований. Метод разделения переменных (метод Фурье) основан на построении частных решений [66]. Построение же общего решения затруднено и слабо описано в учебниках по теории теплопередачи [67, 68].

Для описания процессов распространения тепловой энергии в средах с непостоянными теплофизическими параметрами, зависящими от температуры, необходимо учитывать нелинейности, что позволяет выявить ряд важных эффектов, которые невозможно получить с помощью линейных моделей. Точные решения нелинейных задач теплопроводности могут быть получены путем использования автомодельных переменных и переходом от частных производных к полным. Например, автомодельное решение типа бегущей тепловой волны для уравнения теплопроводности с нелинейным источником (уравнение Колмогорова-Петровского-Пискунова). Частные решения нелинейных задач могут использоваться для проверки результатов численных расчетов вычислительных алгоритмов.

Среди приближенных методов можно выделить методы возмущений [67, 68] – выделение некоторого малого параметра позволяет в некоторых случаях построить приближенное аналитическое решение. Например, на основе теории гомогенизации в случае композитных сред с включениями малых размеров можно вычислить эффективные характеристики исследуемых сред.

При математическом моделировании теплового объекта широко

используются асимптотические методы. При описании процессов распространения тепла в твердом теле выделяют три стадии. Одна из них называется стадией регулярного режима, существует при достаточно большом изменении процесса во времени. Асимптотические методы применяются, например, при исследованиях регулярных тепловых режимов, соответствующих развитой стадии процесса. Асимптотические методы нашли применение при распространении процессов теплопередачи не только в слабо искривлённых стержнях, цилиндрах переменного сечения, но и в исследованиях композиционных материалов [19, 68].

Широкое распространение также получили численные методы решения уравнений, описывающих тепло- и массообменные процессы в системах [69–71]. Современные компьютеры позволяют выполнять детальные исследования математических моделей сложных физических процессов в случаях, когда аналитические методы применить невозможно или нецелесообразно. Например, для приближенного решения обыкновенных дифференциальных уравнений часто применяется семейство методов Рунге-Кутты и др. [72].

Применяемые в инженерных методиках подходы к проектированию систем отопления зданий представлены в [69, 73]. Основная цель – определение изменения температуры внутреннего воздуха в помещении в зависимости от теплоинерционных показателей ограждающих конструкций и подачи тепловой энергии в здания. Например, в работах [74, 75] предложен подход прерывистого отопления, минимизирующий расход тепловой энергии.

Реализация систем автоматического управления режимами работы систем теплоснабжения требует совершенствования способов и структур управления теплопотреблением зданий. Однако в существующих подходах не учитываются динамические характеристики системы отопления по каналам управления и возмущения. А поскольку объект управления обладает значительной инерционностью, то возникает некоторое запаздывание регулирования относительно изменений климатических условий. Для его устранения и разработки рациональной системы управления процессом подачи тепловой энергии в систему отопления, применяется имитационное

моделирование, позволяющее решать следующие задачи [76]:

- исследование влияния климатических факторов на внутренний микроклимат в помещениях зданий и сооружений;
- разработка системы управления подачей тепловой энергии в систему отопления здания с учетом динамических свойств по каналам управления и возмущения;
- проверка разработанных алгоритмов систем управления.

Для имитационного моделирования широко применяется инструмент визуального моделирования Simulink, являющийся модулем расширения математического пакета Matlab. Simulink позволяет имитировать динамические системы и исследовать их работоспособность с помощью графических блоков [77, 78]. Применение Real-Time Workshop предоставляет возможность разработки программного обеспечения управляющих систем, обеспечивая генерацию исполняемого и исходного программного кода непосредственно из Simulink. Полученная программа может быть загружена непосредственно в различные целевые аппаратные средства.

Современный рынок оборудования для систем отопления наполнен широким ассортиментом арматуры. В отечественной практике стали чаще использоваться балансировочные клапаны, терморегуляторы, узлы регулирования, регуляторы перепада давления и расхода различных конструкций. В работе [79] исследуется влияние регулирующей арматуры в совокупности с циркуляционным насосом на распределение теплоносителя в системе отопления с помощью компьютерного моделирования. Дана оценка воздействию балансировочных клапанов и терморегуляторов на гидравлику системы отопления в целом и ее отдельных участков с учетом их конструктивных особенностей. Авторами предлагается два подхода к гидравлическому регулированию системы отопления. Первый подход применим, если этажность и протяженность здания велика, здание имеет много корпусов, а регулирования невозможно достичь только за счет клапанов у приборов, то можно установить достаточное количество регулирующей арматуры и автоматики на всей системе отопления. В этом случае упрощается гидравлический расчет и обеспечивается точное регулирование системы при различных

воздействиях. Однако при этом повышается расход электроэнергии за счет необходимости установки более мощных насосов, снижается надежность системы за счет увеличения количества регулирующей арматуры, повышаются капитальные затраты на регулирующую арматуру и требования к качеству теплоносителя.

Второй подход предполагает разбиение системы отопления на несколько подсистем, проведение качественного гидравлического расчета и обеспечение регулирования только за счет клапанов у приборов. В результате при необходимости возможно отключение целой подсистемы отопления, что никак не повлияет на работу остальных подсистем. При этом в такой системе возможна установка менее мощных насосов, что обеспечивает экономию электроэнергии, а за счет сокращения количества дорогостоящей арматуры возможно повышение надежности всей системы. Однако в этом случае требуется более сложный гидравлический расчет, а для больших зданий требуется установка нескольких тепловых пунктов, что приводит к повышенной металлоемкости.

Большое внимание вопросам гидравлического расчета систем отопления уделено в [2, 20, 21, 43, 80]. Такие расчеты используются преимущественно для получения параметров дроссельных устройств с целью наладки подачи теплоносителя ко всем потребителям. Однако при этом [21, 22]:

1. Не воспроизводится количественная картина реального распределения потоков сетевого теплоносителя в контурах тепловой сети. Фактические установившиеся расходы в ветвях системы отопления подменяются арифметическими суммами расчетных расходов потребителей. В результате невозможно отследить последствия различных возмущающих воздействий со стороны самих потребителей, например замена трубопроводов, включение или отключение потребителей, изменение топологии, перекрытие клапанов и задвижек в любых местах подающего и обратного трубопроводов; изменение характеристик сетевых насосов на источнике теплоснабжения и т. д.
2. Не предоставляется качественная оценка изменения тепловой картины при гидравлическом разрегулировании, например,

подаче расхода теплоносителя, отличающегося от расчетного в большую или меньшую стороны. Кроме того, не учитывается работа связанных систем вентиляции и ГВС.

Следует отметить, что большинство применяемых программных средств выполняют гидравлические расчеты с описанными недостатками.

1.6. Выводы по проведенному обзору

Анализ современных децентрализованных систем теплоснабжения и направлений автоматизации комплексов зданий показал следующее:

- наибольшее применение в системах теплоснабжения имеет центральное качественное регулирование температуры подаваемого теплоносителя, дополняемое количественным регулированием расхода в тепловых пунктах зданий; при этом автоматическое управление основано на трех принципах – управление по возмущению (в зависимости от климатических условий), по отклонению (в зависимости от изменений температуры внутри помещения), и комбинированный (по возмущению и отклонению);
- существующие системы отопления выполнены преимущественно с применением водоструйных элеваторов, в основном из-за их простоты и низкой стоимости, однако при этом возможности регулирования температуры ограничены; решение задач энергосбережения и обеспечения рационального использования энергоресурсов возможно путем оборудования тепловых узлов зданий системами автоматического регулирования и учета тепловой энергии с применением современного энергоэффективного оборудования;
- существующие котлы требуют специальную защиту от переохлажденного теплоносителя, что существенно влияет на гидравлическую схему системы теплоснабжения; при этом системы отопления зданий гидравлически очень неустойчивы и требуют неизменного расхода теплоносителя – его изменение ведет к гидравлической разрегулировке, сопровождающейся ухудшением отопления подключенных потребителей;
- для повышения оперативности управления и снижения

трудозатрат эксплуатационных (диспетчерских) служб, автономные источники тепла и инженерные системы зданий необходимо объединять в комплексную интегрированную интеллектуальную систему диспетчерского управления;

- большинство существующих АСДУ базируется на SCADA-системах, обеспечивающих полный спектр мониторинга и управления технологическим процессом, но обладающих рядом недостатков – высокой стоимостью и недостаточной безопасностью; однако в последнее время применяется новый подход к автоматизации, основанный на создании удаленных АРМ (тонких клиентов), связанных с технологическим процессом через сеть интернет на базе WebSCADA.

При рассмотрении существующих методов и математических моделей, применяемых для описания процессов теплоснабжения зданий, было выявлено, что задачи тепломассообмена описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Однако получить аналитическое решение этих уравнений в общем виде невозможно, поэтому для учета динамических процессов в системе по каналам возмущения и управления, а также разработки эффективной системы управления процессом отопления зданий целесообразно применять имитационное моделирование, например, на основе Matlab Simulink.

Таким образом, для эффективного управления теплоснабжением комплекса зданий при теплоснабжении от автономного источника тепла, обеспечения экономии и рационального использования энергоресурсов, необходимо сделать упор на разработку web-ориентированных АСДУ инженерными системами зданий, основанных на экспериментальных исследованиях и имитационном моделировании динамических процессов, протекающих в системе теплоснабжения.

Глава 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ ОТОПЛЕНИЕМ КОМПЛЕКСА ЗДАНИЙ, ОСНОВАННОГО НА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

2.1. Математическая модель объекта управления в виде системы отопления здания при зависимом присоединении к источнику тепла

В целях определения основных соотношений между расходами и температурами теплоносителя в системе отопления здания, а также параметров здания как объекта управления, исследовалась система отопления с зависимым присоединением к источнику тепла на основе автоматизированного индивидуального теплового пункта (см. рис 1.6). Упрощенная схема с обозначением основных исследуемых параметров теплоносителя, представлена на рис. 2.1:

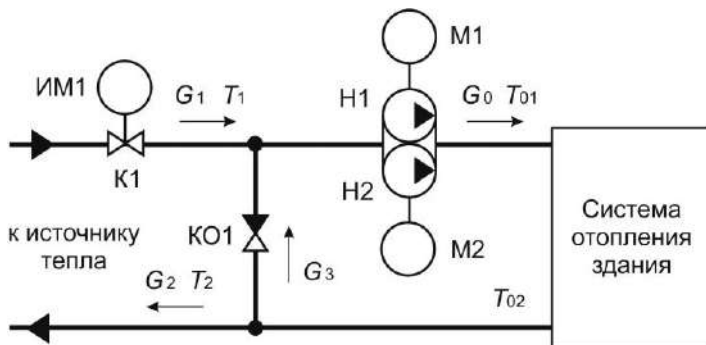


Рис. 2.1. Блок-схема зависимого присоединения системы отопления здания на базе автоматизированного ИТП к источнику тепла

Обозначения на схеме следующие: K1 – регулирующий клапан с электроприводом IM1, KO1 – обратный клапан на перемычке, H1 и H2 – моноблок циркуляционных насосов с электроприводами M1 и M2, G_1 , T_1 и G_2 , T_2 – соответственно расходы и температуры теплоносителя на вводе в ИТП в подающем и обратном трубопроводах, T_{01} и T_{02} – температуры теплоносителя в системе отопления здания в подающем и обратном трубопроводах, G_0 – расход

теплоносителя в системе отопления здания, G_3 – расход теплоносителя через переключку с КО1.

Типовые экспериментальные динамические характеристики по каналам регулирования "расход G_1 – температура T_{01} " и "расход G_1 – температура T_{02} ", полученные путем ступенчатого изменения расхода G_1 , представлены на рис. 2.2. Канал регулирования " $G_1 - T_{01}$ " определяется участком смешивания теплоносителя из подающего трубопровода и переключки с обратным клапаном. За счет циркуляционных насосов Н1 и Н2, создающих поток теплоносителя, процесс смешивания происходит практически мгновенно [19], а значит изменение G_1 (кривая 1 на рис. 2.2, б) приводит к скачкообразному изменению T_{01} в начальный момент времени (кривая 2 на рис. 2.2, а). Динамика канала регулирования " $G_1 - T_{02}$ " определяется протяженностью и разветвленностью трубопроводов системы отопления, а также типом отопительных приборов. Зависимость $T_{02}(t)$ (кривая 3 на рис. 2.2, а) остается гладкой, в том числе при скачкообразных изменениях T_{01} , что объясняется значительной инерционностью ветвей и стояков при протекании по ним теплоносителя. Длительность переходного процесса по каналу регулирования " $G_1 - T_{02}$ " составляет несколько часов. При этом система отопления обладает свойствами фильтра нижних частот [19, 65].

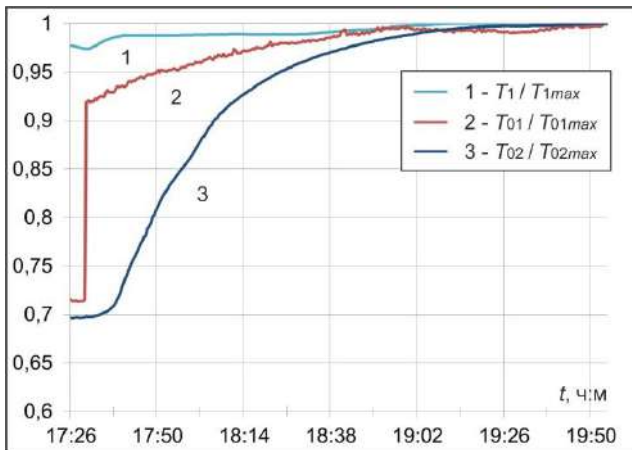


Рис. 2.2. Экспериментальные типовые приведенные динамические характеристики: а – температуры теплоносителя T_1 , T_{01} , T_{02}

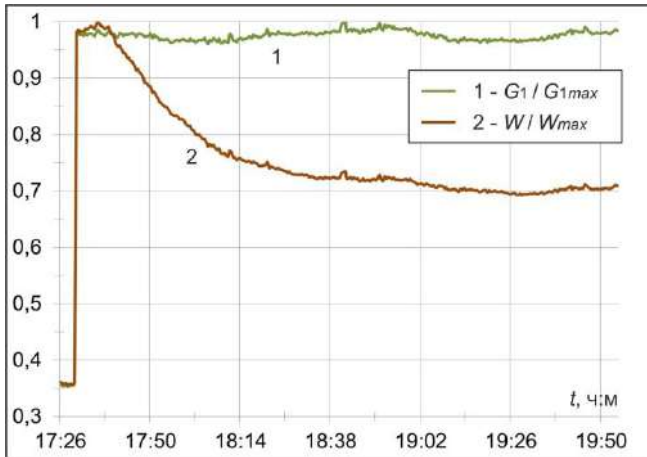


Рис. 2.2. Экспериментальные типовые приведенные динамические характеристики: δ – расход G_1 и тепловая мощность W (Окончание)

Анализ рис. 2.1 и типовых динамических характеристик системы отопления здания показывает, что входными переменными являются расход G_1 , определяемый положением штока регулирующего седельного клапана с исполнительным механизмом (ИМ), и температура T_1 теплоносителя, определяемая режимом работы источника тепла.

Температура подаваемого в систему отопления теплоносителя T_{01} регулируется за счет смешивания теплоносителя из тепловой сети с температурой T_1 и расходом G_1 и теплоносителя из обратного трубопровода через перемычку с температурой T_{02} и расходом G_3 . Этим объясняется последующая динамика температуры T_{01} в системе отопления (кривая 2 на рис. 2.2, а). Поскольку расход G_0 , определяемый циркуляционными насосами Н1 и Н2, неизменен, то из закона сохранения массы следует соотношение:

$$G_3(t) = G_0 - G_1(t). \quad (2.1)$$

На основании допущения о возможности пренебрежения переходными процессами на участке смешивания в связи с тем, что скорость протекания теплоносителя намного меньше скорости распространения звука в среде, закон сохранения количества теплоты в узле смешивания теплоносителя примет вид:

$$G_0 T_{01}(t) = G_1(t) T_1(t) + G_3(t) T_{02}(t). \quad (2.2)$$

Следовательно, задача управления системой отопления сводится к регулированию температуры T_{01} теплоносителя на вводе в систему отопления здания путем смешивания теплоносителей с температурами T_1 и T_{02} . При этом основной управляющей величиной является расход G_1 теплоносителя на вводе в ИТП (см. рис. 2.1). В то же время, входящая в уравнение величина T_{02} определяется параметрами системы отопления и свойствами ограждающих конструкций здания, а также подвержена различным возмущающим воздействиям, в первую очередь – условиям окружающей среды.

Для оценки характера связи между температурами T_{01} и T_{02} , учитывая сложность системы отопления, целесообразно выполнить идентификацию объекта управления по типовым экспериментальным динамическим характеристикам, например, с помощью метода наименьших квадратов. В соответствии с [81] и на основании S-образного вида экспериментальных типовых динамических характеристик температур теплоносителя в системе отопления здания, уравнение объекта управления примет вид:

$$\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 T_{02}(t)}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dT_{02}(t)}{dt} + T_{02}(t) = k T_{01}(t). \quad (2.3)$$

Постоянные времени τ_1 , τ_2 и коэффициент преобразования k зависят от разновидности системы отопления, свойств ограждающих конструкций здания, и климатических факторов.

На рис. 2.3, а представлены сравнительные графики приведенной экспериментальной (по данным рис. 2.2, а) и расчетной (по уравнению (2.3) со значениями $\tau_1 = 591$ с, $\tau_2 = 895$ с, $k = 0,68$) температур $T_{02}(t)$. При этом ошибка рассогласования, представленная на рис. 2.3, б, по величине не превышает $1,2^\circ\text{C}$.

В соответствии с уравнениями (2.1) – (2.3), математическая модель системы отопления здания при зависимом присоединении к источнику тепла, как объекта управления, в виде структурной схемы представлена на рис. 2.4.

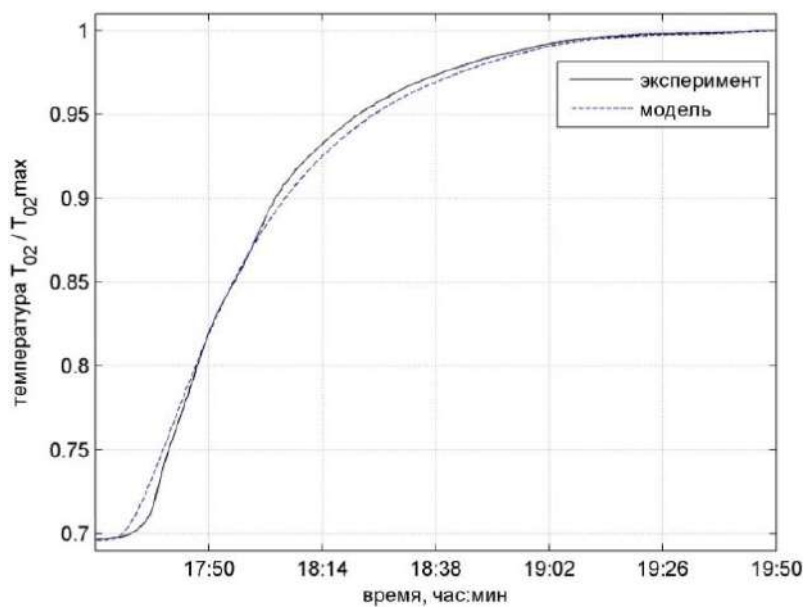
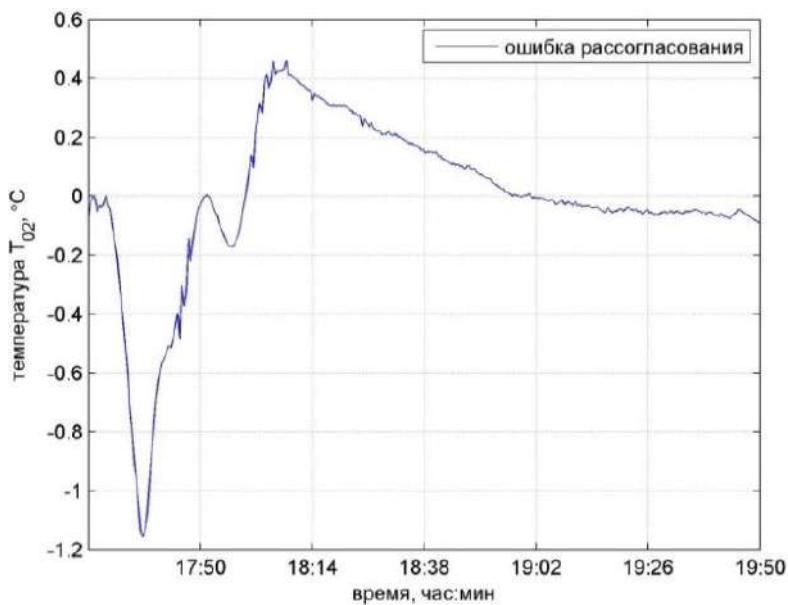
*a**б*

Рис. 2.3. Графики приведенных температур T_{O_2} (а) и ошибки рассогласования (б)

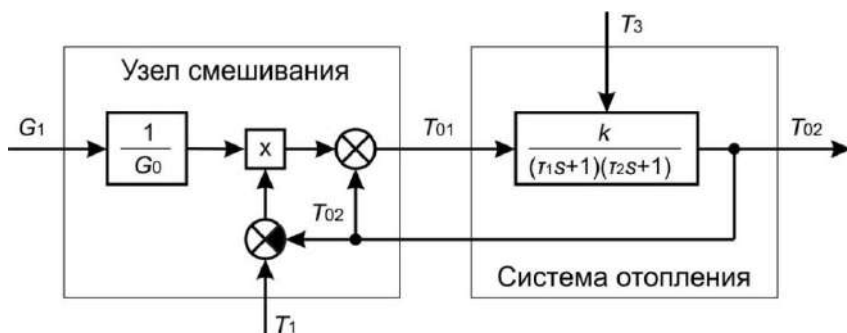


Рис. 2.4. Структурная схема системы отопления здания как объекта управления

Анализ экспериментальных данных [81–84] на суточных выборках показывает, что параметры k , τ_1 , τ_2 изменяются в нешироких пределах, и зависят от температуры наружного воздуха (T_3). В первом приближении положим зависимости $k(T_3)$, $\tau_1(T_3)$ и $\tau_2(T_3)$ линейными, как показано на рис. 2.5, *а*. На рис. 2.5, *б* представлены графики приведенных температур теплоносителя в обратном трубопроводе T_{02} при 3-х значениях температуры T_3 и неизменной (стабилизированной) температуре T_{01} .

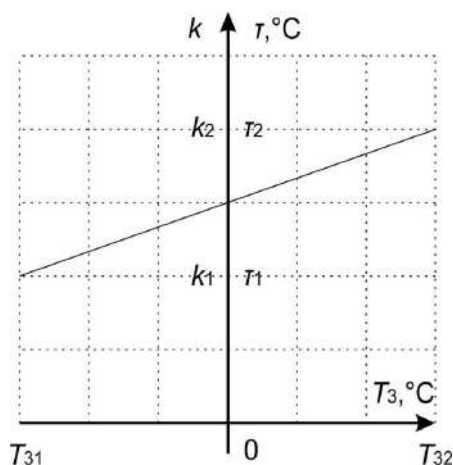


Рис. 2.5. График зависимости коэффициентов k и τ от температуры T_3 (*а*)

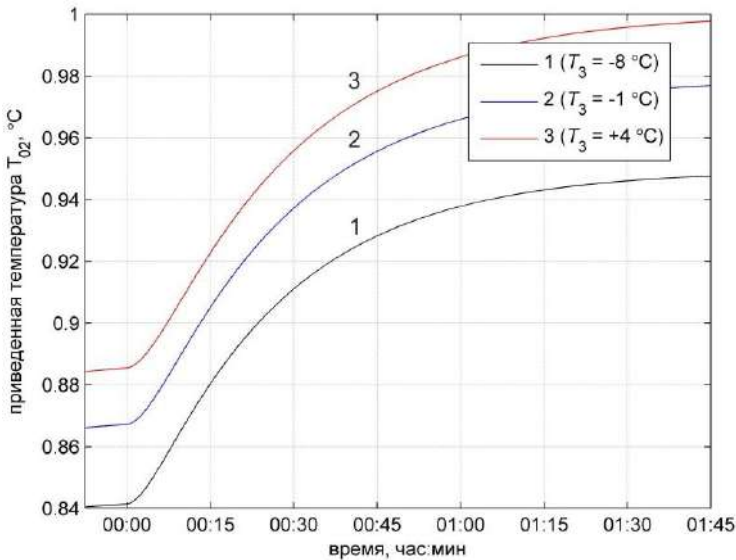


Рис. 2.5. Графики зависимости приведенных температур T_{02} при различных значениях температуры T_3 (б) (Окончание)

Из рис. 2.5 следует, что с повышением температуры T_3 , параметры k , τ_1 , τ_2 увеличиваются: k возрастает с 0,787 до 0,829, τ_1 – от 216 с до 282 с, τ_2 – от 1530 с до 1588 с. Характер этой зависимости объясняется тем, что при изменении температуры наружного воздуха изменяется теплотребление здания и, как следствие, перепад температуры между подающим и обратным трубопроводами системы отопления. Учитывая сложность аналитического определения значений параметров k , τ_1 , τ_2 при различных температурах T_3 , целесообразно применять имитационное моделирование, основываясь на результатах экспериментальных исследований систем отопления.

2.2. Основные законы регулирования с применением исполнительных механизмов при релейно-импульсном управлении

Управление изменением расхода G_1 теплоносителя (см. рис. 2.1) осуществляется за счет перемещения электроприводом ИМ штока регулирующего клапана. В связи с этим возникает необходимость выбора структуры автоматического регулятора, управляющего

исполнительным механизмом. В современных системах количественного регулирования расхода теплоносителя широкое применение в качестве ИМ находят электродвигатели с постоянной частотой вращения выходного вала [17, 85]. Такой ИМ может находиться только в трех состояниях: перемещение рабочего органа (РО) с постоянной скоростью v в прямом или обратном направлении, и неподвижность. Без учета времени разгона и торможения статическая характеристика ИМ имеет вид, представленный на рис. 2.6, *a*. Такая статическая характеристика является существенно нелинейной и ее нельзя линеаризовать с достаточной для практических расчетов точностью при различных диапазонах изменения входного сигнала σ . В то же время такой ИМ может иметь достаточно близкие к линейным характеристики при релейно-импульсном изменении входного сигнала. Если подать на его вход импульсы σ_m с периодом следования Δt_0 и скважностью γ :

$$\gamma = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_0} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2}, \quad (2.4)$$

где Δt_1 — длительность импульсов, Δt_2 — длительность пауз, то во время поступления импульса ИМ будет перемещать РО с постоянной скоростью, определяемой выражением:

$$v = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.5)$$

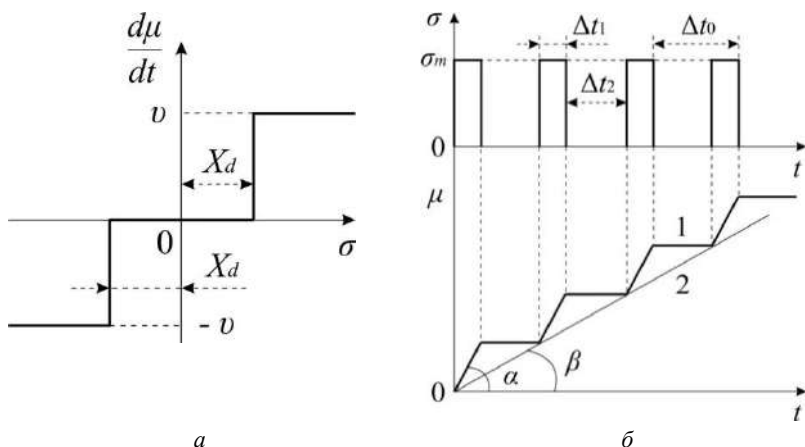


Рис. 2.6. Статическая характеристика ИМ (*a*) и характер его перемещения при подаче на вход серии импульсов (*б*): X_d — зона нечувствительности, $d\mu/dt$ — скорость перемещения РО

Во время пауз ИМ будет неподвижен, а при поступлении на него серии импульсов характер его перемещения будет соответствовать кривой 1 на рис. 2.6, б.

Средняя скорость перемещения РО определяется выражением:

$$\frac{d\mu}{dt} = \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta t_1 v}{\Delta t_0} = \gamma v. \quad (2.6)$$

Таким образом, по каналу " $\gamma - \mu$ " исполнительный механизм можно представить интегрирующим звеном, причем реализация закона И-регулирования будет тем точнее, чем меньше Δt_1 и Δt_2 . Однако при этом повышается частота включений ИМ, а, следовательно, увеличивается его износ.

Если ИМ с пусковым устройством (например, магнитный пускатель или электромагнитное реле), обладающими нелинейной статической характеристикой типа трехпозиционное реле с гистерезисом, охватить обратной связью в виде усилительного звена, то при релейно-импульсном регуляторе с ИМ можно реализовать закон П-регулирования (см. рис. 2.7). Однако следует отметить, что применение П-закона регулирования приводит к появлению установившейся ошибки регулирования, которую даже теоретически нельзя полностью исключить [86, 87].

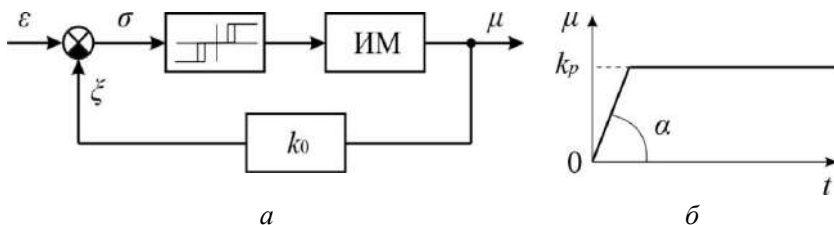


Рис. 2.7. Структурная схема импульсного П-регулятора с исполнительным механизмом (а) и его закон регулирования (б) при входном ступенчатом воздействии

При поступлении на вход регулятора рассогласования $|\varepsilon| > X_d$ ИМ включится, и будет перемещать РО с постоянной скоростью v в сторону ликвидации рассогласования. Перемещение μ регулирующего органа через канал обратной связи передается в виде сигнала обратной связи ζ уменьшая результирующий сигнал σ , воздействующий на

релейный элемент. При $|\sigma| < X_d$ ИМ отключится, т.е. при каждом изменении $|\varepsilon| > X_d$ ИМ будет перемещать РО, ликвидируя отклонение ε от заданного (нулевого) значения.

Так как сигнал обратной связи $\xi = k_0 \mu$, то в установившемся состоянии:

$$\sigma = \varepsilon - k_0 \mu < X_d. \quad (2.7)$$

Поскольку зона нечувствительности регулятора невелика, то выражение (2.7) приближенно можно представить, как:

$$\varepsilon = k_0 \mu = 0. \quad (2.8)$$

Откуда:

$$W(s) = \frac{1}{k_0}. \quad (2.9)$$

Таким образом, импульсный регулятор с ИМ, структурная схема которого представлена на рис. 2.7, а, приближенно реализует П-закон регулирования с коэффициентом передачи:

$$k_p = \frac{1}{k_0}. \quad (2.10)$$

На рис. 2.7, б представлена переходная характеристика такого регулятора при поступлении на его вход единичного ступенчатого сигнала $\varepsilon(t) = 1$.

Следует отметить, что полученный таким образом П-регулятор, соответствует аналоговому П-регулятору с известной структурой [88], представленной на рис. 2.8.

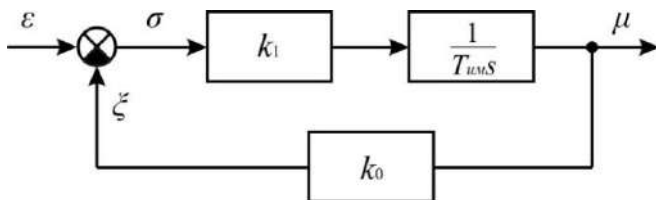


Рис. 2.8. Структурная схема аналогового П-регулятора с ИМ

С помощью импульсного регулирования можно реализовать ПИ-закон в соответствии со структурной схемой, приведенной на

рис. 2.9, *а*. В этом случае релейный усилитель с нелинейной статической характеристикой при включении ИМ охватывается отрицательной обратной связью в виде:

$$W_0(s) = \frac{k}{Ts + 1}. \quad (2.11)$$

В качестве устройства обратной связи в большинстве регулирующих устройств используются RC-цепи. При этом с учетом выражения (2.4) и в соответствии с [88] скважность импульсов определяется как:

$$\gamma = \frac{T}{k\sigma_m} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\varepsilon}{T} \right). \quad (2.12)$$

Тогда, в соответствии с выражением (2.6), средняя скорость перемещения РО:

$$\frac{d\mu}{dt} = \gamma v = \frac{Tv}{k\sigma_m} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\varepsilon}{T} \right). \quad (2.13)$$

Решение данного уравнения примет вид:

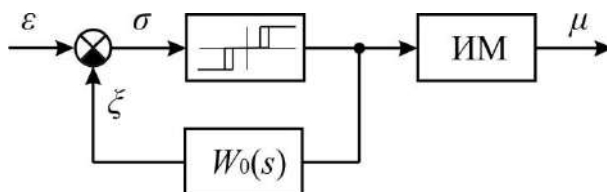
$$\mu = k_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{уз}} \int \varepsilon dt \right), \quad (2.14)$$

где $k_p = \frac{Tv}{k\sigma_m}$, $T_{уз} = T$.

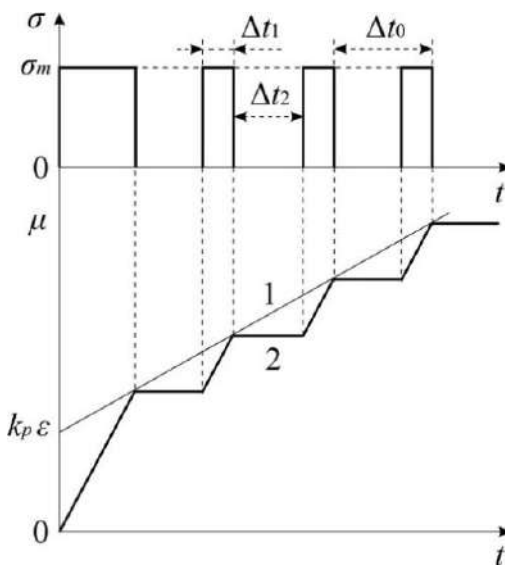
Анализ выражения (2.14) показывает, что релейно-импульсный регулятор с ИМ, показанный на рис. 2.9, *а*, приближенно реализует закон ПИ-регулирования. В действительности же, характер перемещения $\mu = f(t)$ имеет вид ломаной линии (кривая 2 на рис. 2.9, *б*). Эта ломаная линия может быть приближенно заменена прямой, причем, чем меньше длительность одного включения Δt_1 релейного элемента и длительность паузы Δt_2 , тем точнее совпадает действительный закон изменения $\mu(t)$ с линеаризованной прямой. При этом, несмотря на наличие в регуляторе нескольких существенно нелинейных элементов регулятор с достаточной для практических целей точностью реализует линейный закон ПИ-регулирования.

Пропорциональная составляющая приближенно реализуется за счет начального быстрого перемещения РО с постоянной скоростью

при изменении ε , а интегральная составляющая – за счет последующего автоколебательного режима работы релейного усилителя с отрицательной обратной связью и кратковременных перемещений ИМ.



a



б

Рис. 2.9. Структурная схема ПИ-регулятора с исполнительным механизмом при релейно-импульсном управлении (*a*) и переходные процессы в нем (*б*)

При поступлении на вход регулятора постоянного сигнала $\varepsilon = \varepsilon_0$ закон ПИ-регулирования запишется в виде:

$$\mu(t) = k_p \varepsilon_0 \left(1 + \frac{1}{T_{uz}} t \right). \quad (2.15)$$

Уравнение (2.15) определяет переходный процесс в

линеаризованном ПИ-регуляторе при $\varepsilon = \varepsilon_0$ (прямая 1 на рис. 2.9, б), однако фактический переходный процесс определяется ломаной линией, степень приближения которой к идеальному ПИ-регулятору зависит от интервалов времени Δt_1 и Δt_2 . Следует отметить, что системы теплоснабжения характеризуются значительной инерционностью (см. рис. 2.2), а значит интервалами Δt_1 и Δt_2 можно пренебречь и считать исполнительный механизм с пускорегулирующим устройством линейным интегрирующим элементом, несмотря на его существенно нелинейную статическую характеристику (см. рис. 2.6, а). Подтверждением этого тезиса является и тот факт, что промышленностью выпускаются исполнительные механизмы для систем тепло- и водоснабжения с аналоговым регулированием, например, АМЕ-20/23 (Danfoss, Дания) [17, 18].

При применении в ПИ-регуляторе ИМ с передаточной функцией в виде интегрирующего элемента, его структурная схема может принять следующий вид:

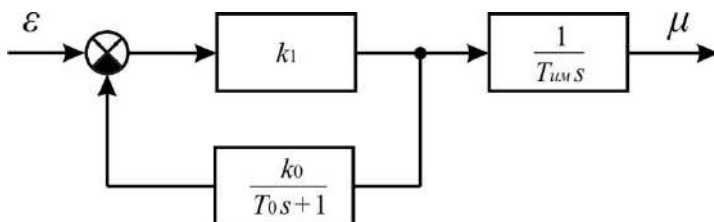


Рис. 2.10. Структурная схема ПИ-регулятора с исполнительным механизмом

В данной структуре динамические свойства интегрирующего исполнительного механизма используются с целью формирования ПИ-закона регулирования. Передаточная функция канала обратной связи определяется как:

$$W_{oc}(s) = \frac{1}{W_{ПИ}(s)} \frac{1}{T_{им}s} \approx \frac{T_{уз}s}{k_p(T_{уз}s + 1)} \frac{1}{T_{им}s} = \frac{k_0}{T_0 s + 1}, \quad (2.16)$$

где $k_0 = \frac{T_{уз}}{k_p T_{им}}$, $T_0 = T_{уз}$.

Поскольку ИМ, как правило, при монтаже располагается непосредственно у объекта управления, а регулятор – в пункте

управления, то представленная схема при прочих равных условиях предполагает меньший расход проводникового материала (т. к. не требуется охватывать ИМ обратной связью). Однако ее аппаратная реализация сопряжена с необходимостью дифференцирования входного сигнала, что приводит к ложным срабатываниям при малом изменении ε и способствует выходу из строя ИМ.

С помощью импульсного регулирования также возможно приближенно реализовать закон ПИД-регулирования. При этом на вход суммирующего элемента, в отличие от ПИ-регулирования, подается не только отклонение ε регулируемой величины от заданного значения, но и ее производная ε_d с выхода реального дифференцирующего звена. Однако, использование регуляторов с дифференциальной составляющей в системах теплоснабжения для управления ИМ неоправданно по следующим причинам:

- настройка ПИД-регулятора на практике сложнее, чем ПИ-регулятора;
- ПИД-регулятор в одинаковых условиях функционирования по сравнению с ПИ-регулятором будет иметь преимущество по времени переходного процесса, но при этом будет проигрывать по вырабатываемому ресурсу ИМ [89];
- при изменении свойств объекта управления в ходе эксплуатации системы запас устойчивости в случае применения ПИД-регулятора уменьшается быстрее, чем при использовании ПИ-регулятора.

2.3. Особенности математической модели регулятора в системах управления теплоснабжением зданий

При программной реализации ПИ-закона регулирования на базе универсальных или специализированных контроллеров (например, ICP DAS I-7188EX, Моха UC-7122, Danfoss ECL Comfort) в силу их высокого быстродействия [90, 91] возможно реализовать достаточно точное численное дифференцирование, и, следовательно, решение дифференциальных уравнений, например, методами Рунге-Кутты или Дормана-Принса [72, 92, 93]. В связи с этим отпадает необходимость в применении обратных связей в виде датчиков положения, например, ППМ (ЗАО "НПФ "Агрострой", Россия), EPS (Wexon OY, Финляндия)

[94, 95] для реализации ПИ-закона совместно с интегрирующим исполнительным механизмом. Вместо этого сигнал с выхода стандартного ПИ-регулятора необходимо предварительно продифференцировать, а потом подать на вход ИМ. В этом случае уравнение ПИ-закона регулирования с учетом последующего интегрирования исполнительным механизмом примет вид:

$$y(t) = \frac{k_m}{X_p} \left[X_u \varepsilon(t) + \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right], \quad (2.17)$$

где k_m – коэффициент пропорциональности, X_p – полоса пропорциональности, $\varepsilon(t)$ – величина рассогласования, X_u – коэффициент интегрирования.

Полоса пропорциональности X_p , как и отклонение ε , выражается в единицах контролируемого параметра. Чем шире полоса пропорциональности X_p , тем меньше величина выходного сигнала $y(t)$ при одном и том же отклонении ε . Вне полосы пропорциональности выходной сигнал $y(t)$ равен 0 или k_m . Введение величин X_p и k_m позволяет работать не в абсолютных значениях регулируемой величины, а в относительных. При небольших значениях величины рассогласования $\varepsilon(t)$ в целях уменьшения износа ИМ вследствие излишних срабатываний регулятора вводится зона нечувствительности X_d регулятора. При этом для вычисления значений $y(t)$ вместо $\varepsilon(t)$ используется уточненное значение $x_1(t)$, определяемое как:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, & |\varepsilon(t)| \leq X_d, \\ \varepsilon(t), & |\varepsilon(t)| > X_d. \end{cases} \quad (2.18)$$

Выражение (2.18) определяет нелинейный элемент типа зона нечувствительности, но при этом вносит в регулируемую переменную статическую ошибку X_d . Устранить ее возможно путем применения выражения:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, & |\varepsilon(t)| \leq X_d, \\ \varepsilon(t) - X_d, & \varepsilon(t) > X_d, \\ \varepsilon(t) + X_d, & \varepsilon(t) < -X_d. \end{cases} \quad (2.19)$$

В любом случае регулятор будет выдавать управляющий сигнал

только после того, как регулируемая величина выйдет из этой зоны (см. рис. 2.11), при этом величина X_d не должна превышать необходимую точность регулирования [85].

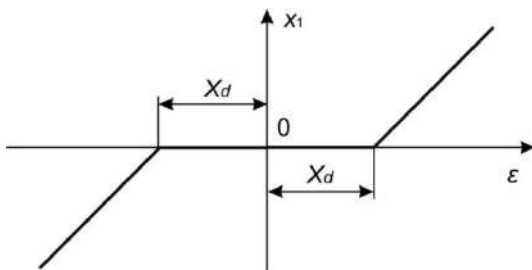


Рис. 2.11. Зона нечувствительности регулятора

Т. к. в уравнении (2.17) выполняется численное дифференцирование величины рассогласования $\varepsilon(t)$, то необходимо задать дополнительное ограничение выходного сигнала $y(t)$ в виде нелинейного звена типа зона насыщение:

$$x_2(t) = \begin{cases} y(t), & -k_m \leq y(t) \leq k_m, \\ k_m, & |y(t)| > k_m. \end{cases} \quad (2.20)$$

Применение выражения (2.20) дополнительно оправдывается тем, что рабочий диапазон ИМ всегда ограничен и для выходного управляющего сигнала также необходимо задание ограничения в виде максимального и минимального значений.

При последующем интегрировании сигнала $x_2(t)$ в уравнении (2.20) с помощью ИМ:

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \frac{k_u}{\tau_u} x_2(t), \quad (2.21)$$

выражение для выходного сигнала $\mu(t)$ приобретает вид, аналогичный

уравнению (2.14), где $k_p = \frac{k_m}{X_p} \frac{k_u}{\tau_u}$, $T_{уз} = \frac{X_p}{k_m X_u} \frac{\tau_u}{k_u}$. Применение

настраиваемых параметров X_u и X_p в составе регулятора совместно с постоянной времени τ_u и коэффициентом пропорциональности k_u ИМ позволяет изменять динамические свойства всей системы [96]. Т.к. в уравнении (2.3) параметры k , τ_1 , τ_2 зависят от температуры T_3 , то для выбора эффективных значений коэффициентов X_p и X_u целесообразно

использовать приближенные методы, например, Циглера-Никольса, Тиреса-Любена и др. [17, 97].

Если рассогласование $\varepsilon(t)$ долго сохраняет знак, величина интегральной составляющей регулятора становится очень большой (эффект интегрального насыщения), что может привести к перегулированию. Для устранения влияния этого эффекта необходимо задать зону накопления интеграла, в пределах которой регулятор вычисляет интегральную составляющую по аналогии с выражением (2.20).

Таким образом, математическая модель регулятора с совместным применением ИМ в виде электродвигателя с постоянной частотой вращения вала в соответствии с уравнениями (2.17)–(2.21) в виде структурной схемы представлена на рис. 2.12. Дополнительный вход μ_0 блока интегрирования с насыщением задает начальное значение положения штока регулирующего клапана ИМ (от 0 до k_m).

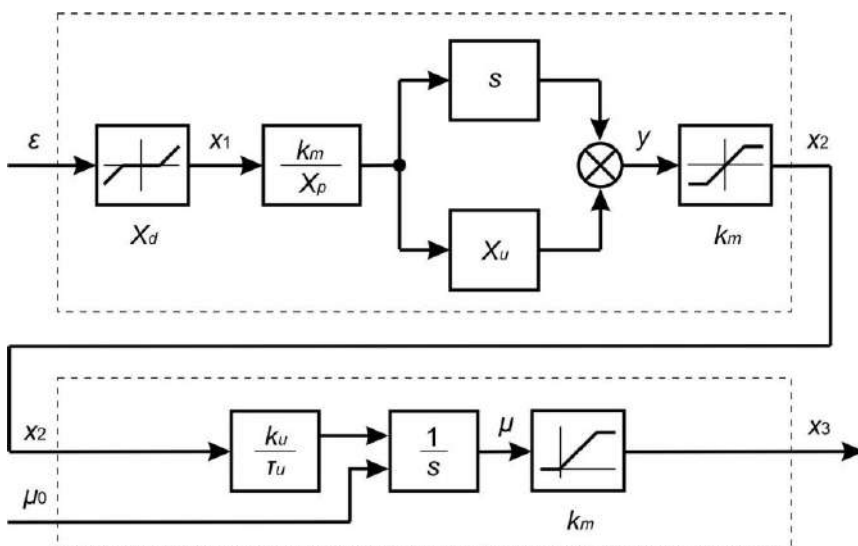


Рис. 2.12. Структурная схема регулятора с исполнительным механизмом

В случае если используется ИМ с позиционно-пропорциональным регулированием, например, AMV20 (Danfoss), то необходимо устанавливать период управляющих импульсов. Особенностью таких ИМ является, например, наличие 2-х пар контактов для управления направлением вращения, а, следовательно, они управляются только

импульсными сигналами [85]. При подаче управляющих импульсов на первую пару контактов шток перемещается в одну сторону, а при подаче импульсов на вторую – в другую сторону.

Если ИМ не имеет датчика положения, то регулятор вычисляет среднюю скорость перемещения задвижки по уравнениям (2.17)–(2.20). Если $x_2 < 0$, то сигнал выдается на контактную группу "закр.", если $x_2 > 0$, то на контактную группу "откр.". Длительность управляющих импульсов при этом определяется как:

$$\Delta t_1 = x_2(t) \Delta t_0, \quad (2.22)$$

где Δt_0 — период следования импульсов.

Следует отметить, что чем выше частота управляющих импульсов (т.е. меньше период Δt_0), тем быстрее реакция регулятора на внешние возмущения. В идеале частота импульсов управления должна совпадать с частотой опроса внешних датчиков. Однако если при использовании на выходе регулятора электромагнитного реле или пускателя установить слишком большую частоту, то частые переключения приведут к быстрому износу силовых контактов и снижению ресурса ИМ. В тоже время при использовании в качестве выходных устройств электронных ключей (например, транзисторных оптопар) проблемы износа контактов не возникает.

2.4. Разработка метода математического моделирования системы управления децентрализованным отоплением комплекса зданий, основанного на имитационном моделировании и экспериментальных исследованиях

2.4.1. Математическая модель системы управления отоплением здания на базе автоматизированного индивидуального теплового пункта с зависимым присоединением к источнику тепловой энергии

Структура типового автоматизированного ИТП с зависимой схемой присоединения системы отопления к источнику тепла, представленная на рис. 2.13, содержит: технологический контроллер ТК1, моноблок циркуляционных насосов Н1 и Н2 с электроприводами М1 и М2, регулирующий клапан К1 с исполнительным механизмом ИМ1, обратный клапан КО1, регулятор перепада давления прямого действия

РД1 с клапаном К2, датчики температуры теплоносителя ДТ1 и ДТ2 соответственно в подающем и обратном трубопроводах, датчики давления ДД1 и ДД2, датчик температуры наружного воздуха ДТЗ, а также узел учета тепловой энергии, например, теплосчетчик с комплектом датчиков. Обозначения основных технологических величин в ИТП аналогичны представленным на рис. 2.1.

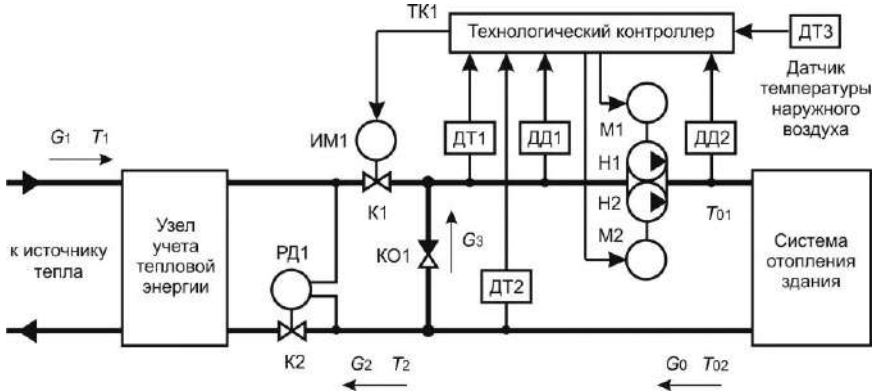


Рис. 2.13. Блок-схема автоматизированного ИТП здания

В соответствии со структурой типового автоматизированного ИТП и стратифицированной моделью [19, 84] теплоснабжения зданий, обобщенная функциональная схема системы управления отоплением здания с автоматизированным ИТП представлена на рис. 2.14.

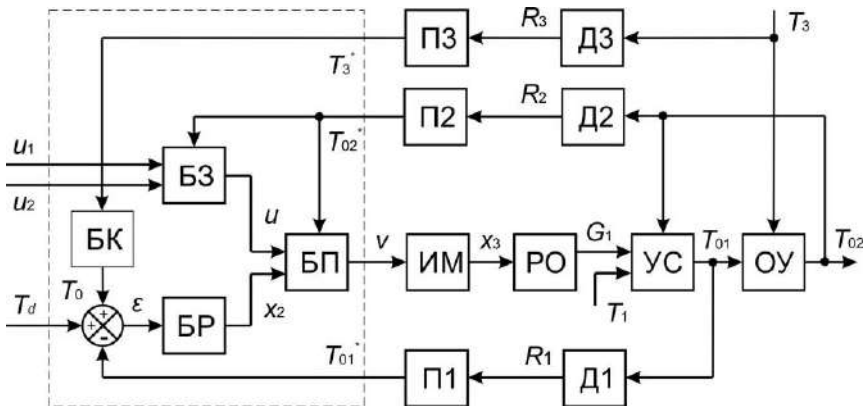


Рис. 2.14. Функциональная схема системы управления отоплением здания с автоматизированным ИТП

Схема содержит следующие элементы: БК – блок погодной компенсации (управление по возмущению); БР – блок регулирования (управление по отклонению, см. рис. 2.12); БЗ – блок защиты (контроль допустимого диапазона температуры теплоносителя в обратном трубопроводе); БП – блок логического переключения входных сигналов u и x_2 в зависимости от температуры T_{02}^* ; П1 – П3 элементы-преобразователи выходных величин (сопротивлений) датчиков температуры Д1 – Д3 в измеряемые ими физические величины (температуры); исполнительный механизм ИМ в виде электродвигателя с постоянной частотой вращения вала; регулирующий орган РО в виде седельного клапана; узел смешивания теплоносителей УС (см. рис.2.13) от присоединяемых тепловых сетей и от обратного трубопровода системы отопления здания через перемычку с обратным клапаном; объект управления ОУ, представляющий собой систему отопления здания. Обозначения основных величин функциональной схемы: T_3 – температура наружного воздуха; T_3^* – преобразованная температура наружного воздуха; T_0 – расчетная температура теплоносителя в подающем трубопроводе системы отопления здания; T_d – управляющее отклонение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе системы отопления здания (задается диспетчером для коррекции T_0); ε – отклонение по температуре величины T_{01} ; x_2 – приведенный управляющий сигнал блока регулирования БР; v – выходной сигнал блока переключения БП; x_3 – приведенная величина перемещения РО; G_1 – расчетный расход теплоносителя через РО; T_1 – температура теплоносителя на вводе в ИТП, формируемая котлоэнергетической установкой в зависимости от T_3 ; T_{01} и T_{02} – температуры теплоносителя соответственно в подающем и обратном трубопроводах системы отопления здания; T_{01}^* и T_{02}^* – преобразованные температуры T_{01} и T_{02} соответственно; R_1 – R_3 – выходные сопротивления датчиков температуры Д1–Д3; u_1 и u_2 – управляющие сигналы блока БЗ, задающие перемещение ИМ в сторону открытия или закрытия РО соответственно; u – выходной сигнал блока защиты БЗ.

Основой современных автоматизированных ИТП является электронный регулятор температуры с функцией погодной компенсации [98, 99], предназначенной для автоматического

определения температуры T_0 по значению температуры T_3 . Чем она меньше, тем больше температура теплоносителя в трубопроводах, и наоборот. Отсутствие этой функции приводит, как правило, к перерасходу тепловой энергии. Связь между расчетной температурой T_0 и температурой T_3 определяется по температурным отопительным графикам, представленным на рис. 2.15.

Аналитически температурный отопительный график можно определить, как:

$$T_0 = -k_0 T_3 + b_0, \quad (2.23)$$

где k_0 – коэффициент наклона, b_0 – параллельное смещение отопительного графика.

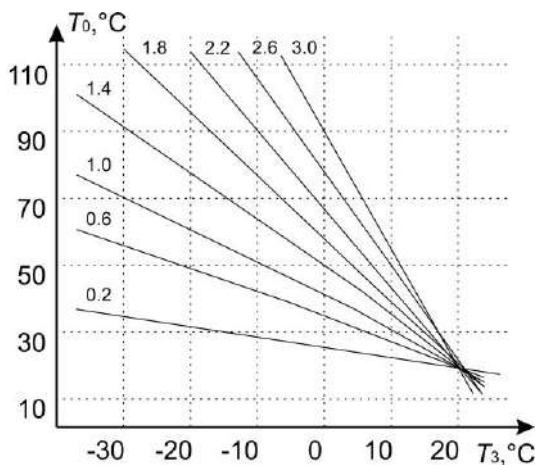


Рис. 2.15. Температурные отопительные графики с различными коэффициентами наклона

Следует отметить, что величины k_0 и b_0 блока компенсации БК (см. рис. 2.14) позволяют выполнять подстройку температурного отопительного графика в зависимости от географического расположения здания, особенностей его ограждающих конструкций, требований энергосбережения и т.п.

Определение температуры наружного воздуха T_3 , как правило, осуществляется с помощью медного или платинового термопреобразователя сопротивления, статическая характеристика которого в рабочем диапазоне температур имеет вид:

$$R_3 = R_{30}(1 + \alpha T_3), \quad (2.24)$$

где R_{30} – сопротивление материала датчика при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления. Например, для термопреобразователя сопротивления ESMT (Danfoss) $R_{30} = 1$ кОм, $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [100].

Динамические свойства термопреобразователя сопротивления в рабочем диапазоне температур описываются апериодическим звеном первого порядка. Однако при моделировании удобно использовать измеренные значения температуры T_3^* , вместо выходных величин сопротивлений R_3 , для чего необходимо выполнить преобразование, обратное (2.24). В связи с этим элементы ДЗ и ПЗ (см. рис. 2.14) в совокупности описываются уравнением:

$$\tau_{d3} \frac{dT_3^*(t)}{dt} + T_3^*(t) = k_{d3} T_3, \quad (2.25)$$

где τ_{d3} – постоянная времени датчика, k_{d3} – коэффициент преобразования датчика.

Аналогично описываются погружные датчики температуры теплоносителя в трубопроводах Д1 и Д2 совместно с преобразовательными элементами П1 и П2:

$$\begin{cases} \tau_{d1} \frac{dT_{01}^*(t)}{dt} + T_{01}^*(t) = k_{d1} T_{01}, \\ \tau_{d2} \frac{dT_{02}^*(t)}{dt} + T_{02}^*(t) = k_{d2} T_{02}, \end{cases} \quad (2.26)$$

где τ_{d1} и τ_{d2} – постоянные времени датчиков в гильзе, k_{d1} и k_{d2} – коэффициенты преобразования датчиков. Например, для термопреобразователя сопротивления типа ESMU (Danfoss) постоянная времени в воде составляет 32 с [100].

Блок регулирования БР совместно с исполнительным механизмом ИМ осуществляет управление положением штока (затвора) РО с целью обеспечения заданной температуры T_{01} , реализуя тем самым управление по отклонению регулируемой величины. Особенности работы такого регулятора представлены в п. 2.2 настоящей главы. При этом на вход блока БР подается величина рассогласования ε , определяемая как:

$$\varepsilon = T_0 - T_{01}^* + T_d. \quad (2.27)$$

Использование величины T_d позволяет осуществлять, например, диспетчеру АСДУ, временную коррекцию температурного отопительного графика (см. рис. 2.15) путем параллельного смещения отопительной кривой по оси ординат, не изменяя при этом постоянно заданный коэффициент b_0 блока БК. Это актуально, например, при переводе системы в режим пониженного или повышенного теплопотребления.

Непосредственное регулирование расхода теплоносителя осуществляется с помощью седельных регулирующих клапанов РО. Пропускная способность регулирующего клапана зависит от перепада давления на нем, расположения штока клапана и соотношения потерь давления в регулирующем отверстии полностью открытого клапана к потерям давления на регулируемом участке [101]. Типовые расходные характеристики клапанов с различными профилями затворов представлены на рис. 2.16. При этом они пересекают ось ординат несколько выше нуля, что объясняется технологическими и гидравлическими причинами: перепадом давления с разных сторон затвора клапана, люфтом резьбы шпинделя, и т. п.

Выбор расходной характеристики клапана зависит от соотношения требуемой пропускной способности клапана, пропускной способности трубопроводной сети, технологического оборудования на регулируемом участке, и осуществляется с учетом [18, 20, 102]. В инженерных системах зданий наибольшее распространение получили клапаны с линейной и логарифмической (равнопроцентной) характеристиками. Клапаны с линейной расходной характеристикой часто применяются в ИТП с зависимым присоединением к тепловой сети. Однако при снижении внешнего авторитета ниже 0,5 линейная характеристика значительно искажается. Клапаны с логарифмической расходной характеристикой наилучшим образом подходят для регулирования систем отопления с постоянным гидравлическим режимом и малым гидравлическим сопротивлением. При уменьшении внешнего авторитета ниже 0,1-0,3 логарифмическая характеристика клапана приближается к линейной, что делает его более универсальным. Для упрощения расчетов и уменьшения погрешности потокораспределения применяются автоматические регуляторы

перепада давления, обеспечивающие внешние авторитеты клапанов более 0,5.

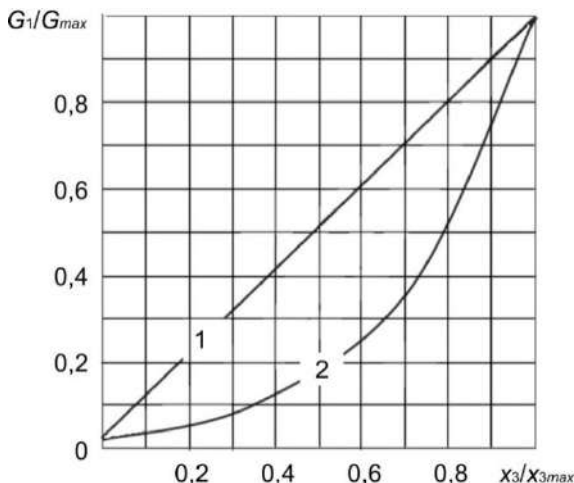


Рис. 2.16. Типовые расходные характеристики РО: 1 – линейная; 2 – логарифмическая

Аналитически расход теплоносителя через РО, например, типа VF-2 (Danfoss) с логарифмической характеристикой [101], имеет вид:

$$G_1(t) = \frac{G_{max}}{k_m} A_k \exp(B_k x_3(t)), \quad (2.28)$$

где G_{max} – максимальный расход теплоносителя через клапан, A_k и B_k – параметры расходной характеристики клапана. Для РО с линейной расходной характеристикой, например, типа VB2 (Danfoss) [103], расход через клапан определяется как:

$$G_1(t) = \frac{G_{max}}{k_m} (A_k x_3(t) + B_k), \quad (2.29)$$

где A_k и B_k – соответственно коэффициент наклона и смещение прямой расходной характеристики клапана.

Кроме регулирования температуры в системе отопления здания необходимо обеспечивать ограничение величины поддерживаемой температуры по верхнему и/или нижнему пределу. В связи с этим в структуру модели вводится дополнительный контур управления (блоки БЗ и БП на рис. 2.14).

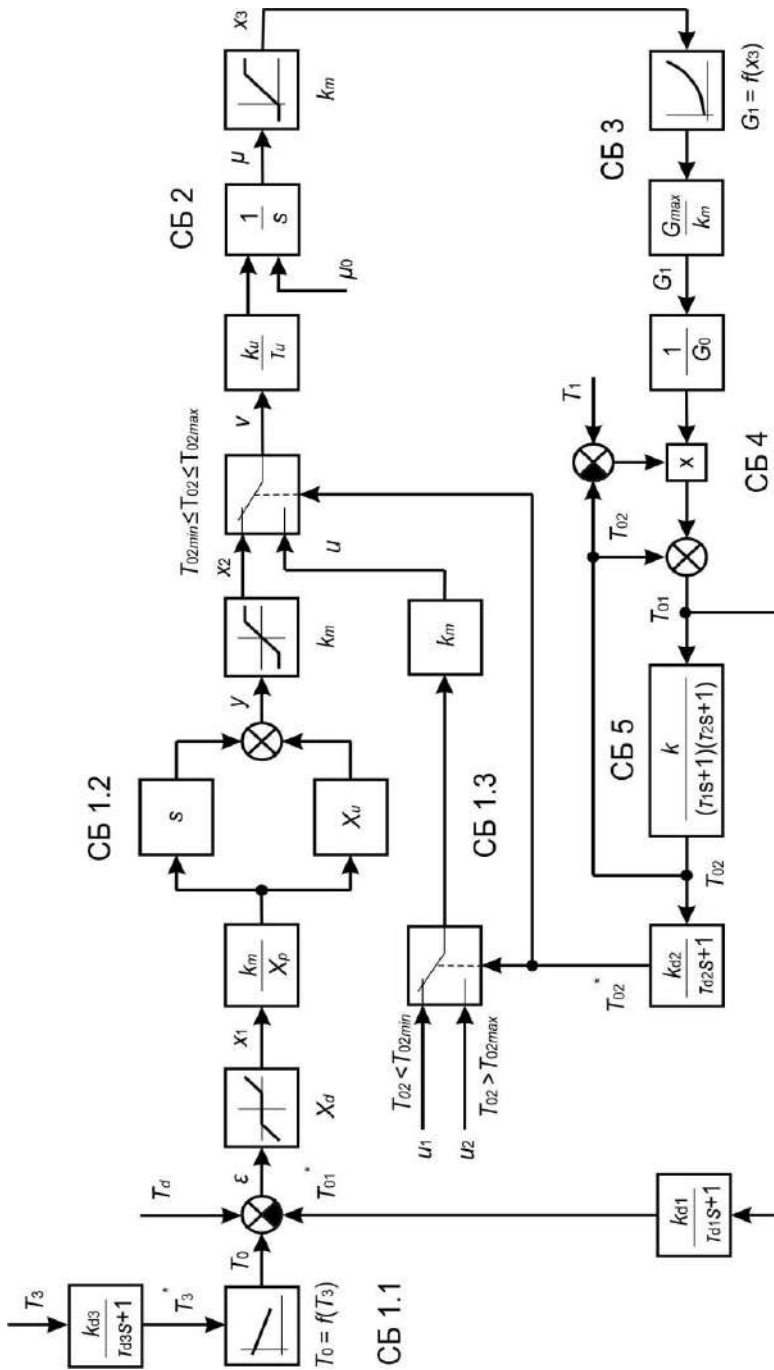


Рис. 2.17. Структурная схема системы управления отоплением с автоматизированным ИТП

Если температура теплоносителя в обратном трубопроводе T_{02} выходит за допустимый диапазон $[T_{02min}, T_{02max}]$, то на вход ИМ подается сигнал управления $v = k_m u_1$ или $v = k_m u_2$, задающий перемещение штока клапана РО в сторону открытия или закрытия до момента возвращения температуры T_{02} в разрешенный диапазон. При этом блок регулирования БР временно отключается с помощью блока переключения БП.

Использование логических сигналов управления u_1 и u_2 также оправдано при выводе системы на рабочий режим до заданных температур T_{01} или T_{02} в зависимости от T_3 при запуске, и при аварийном управлении (например, в случае выхода из строя регулятора или датчиков).

Таким образом, система, составленная из уравнений (2.23), (2.17)–(2.21), (2.25)–(2.29), дополненная уравнениями, описывающими узел смешивания теплоносителя и объект управления по каналу регулирования "Температура теплоносителя T_{01} – температура T_{02} " (2.1)–(2.3), определяет математическую модель системы управления отоплением здания на базе автоматизированного ИТП с зависимым присоединением к источнику тепла. Такая модель в виде структурной схемы представлена на рис. 2.17. Схема содержит следующие основные блоки: СБ1.1 – блок погодной компенсации (управление по возмущению); СБ1.2 – блок регулирования температуры по отклонению; СБ1.3 – блок защиты и переключения (контроль диапазона температуры T_{02} и внешнее управление); СБ2 – блок исполнительного механизма; СБ3 – блок регулирующего органа; СБ4 – узел смешивания теплоносителей от присоединяемых тепловых сетей и обратного трубопровода системы отопления через перемычку; СБ5 – объект управления (система отопления здания).

2.4.2. Математическая модель системы управления отоплением комплекса зданий с основными схемами теплоснабжения

Рассмотрим схему теплоснабжения пяти зданий от автономных источников тепла, содержащую три автоматизированных ИТП и два элеваторных узла, представленную на рис. 2.18. Для упрощения представления этой схемы регуляторы САР в автономных источниках тепла представлены на базе регуляторов прямого действия.

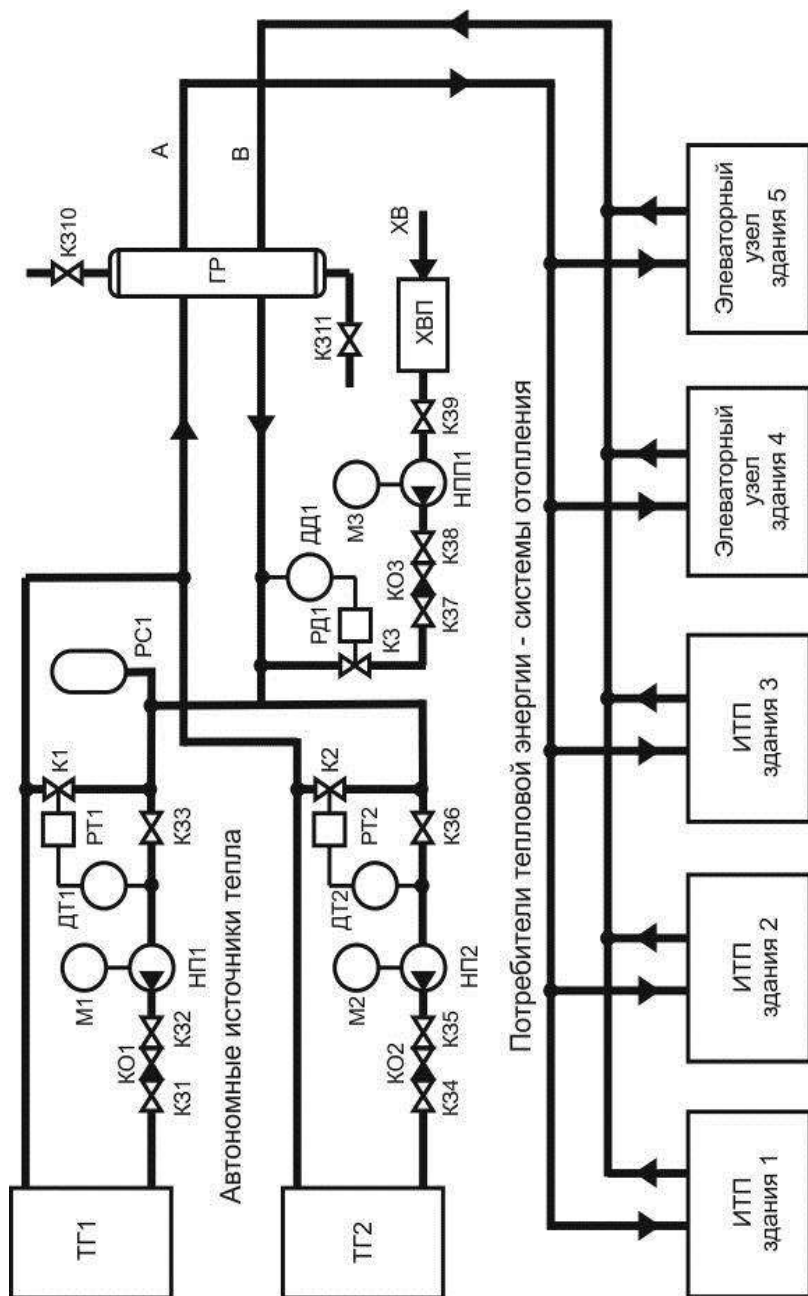


Рис. 2.18. Блок-схема децентрализованного теплоснабжения пяти зданий

Состав основных элементов источника тепла следующий: теплогенераторы ТГ1 и ТГ2; питательные насосы НП1 и НП2 с электроприводами М1 и М2; регуляторы температуры прямого действия РТ1 и РТ2 с соответствующими клапанами К1 и К2 и датчиками температуры ДТ1 и ДТ2; расширительный бак РС1; подпиточный трубопровод с регулятором давления прямого действия РД1, регулирующим клапаном К3 и датчиком давления ДД1, подпиточным насосом НПП1 с электроприводом М3 и с системой химической водоподготовки ХВП; клапаны обратные КО1 – КО3; шаровые (запорные) краны КЗ1 – КЗ11. Особенностью представленной схемы теплоснабжения является наличие термогидравлического распределителя (гидравлической стрелки) ГР, по аналогии с рис.1.11. В представленной схеме три здания оборудованы автоматизированными ИТП, структура которых аналогична представленной на рис. 2.13, а математическая модель в виде структурной схемы представлена на рис. 2.17. Следует отметить, что гидравлические сопротивления зданий на базе ИТП преимущественно определяются положением штоков регулирующих клапанов в результате работы локальных САР, в то время как здания с водоструйными элеваторами такого регулирования лишены. Для выявления особенностей совместной работы систем отопления с элеваторными узлами (см. рис. 1.2) рассмотрим свойства водоструйного элеватора (насоса).

Гидравлическая характеристика водоструйного элеватора определяется из уравнения [104]:

$$\frac{\Delta h_c}{\Delta h_p} = \varphi_1^2 \frac{f_{p1}}{f_3} \left[2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{f_{p1}}{(f_3 - f_{p1})} \frac{v_n}{v_p} u^2 - \right. \\ \left. - \left(2 - \varphi_3^2 \right) \frac{f_{p1}}{f_3} \frac{v_c}{v_p} (1 + u)^2 \right], \quad (2.30)$$

где Δh_c – напор, создаваемый водоструйным элеватором, равный потере напора в системе отопления здания; Δh_p – напор, теряемый в сопле элеватора; f_{p1}, f_3 – сечения сопла и камеры смешения; v_p, v_n, v_c – удельные объемы рабочего (на вводе), инжестируемого (подмешиваемого) и сжатого (на выходе) теплоносителей; $\varphi_1, \dots, \varphi_4$ –

коэффициенты скорости теплоносителя в рабочем сопле, камере смешения, диффузоре, входном участке камеры смешения, учитывающие потери на трение в соответствующих элементах водоструйного элеватора; u – коэффициент смешения (инжекции), равный отношению инжектируемого (подмешиваемого) расхода G_3 и рабочего (через сопло на вводе) расхода G_1 теплоносителя [11]:

$$u = \frac{G_3}{G_1}. \quad (2.31)$$

Для несжимаемого теплоносителя в условиях работы водоструйного насоса $v_p = v_n = v_c$, а значения φ обычно составляют $\varphi_1 = 0,95$; $\varphi_2 = 0,975$; $\varphi_3 = 0,9$; $\varphi_4 = 0,925$. При этом уравнение гидравлической характеристики элеватора принимает вид:

$$\frac{\Delta h_c}{\Delta h_p} = \frac{f_{p1}}{f_3} \left[1,75 + 0,7 \frac{f_{p1}}{(f_3 - f_{p1})} u^2 - 1,07 \frac{f_{p1}}{f_3} (1 + u)^2 \right]. \quad (2.32)$$

Поскольку напор Δh_c , создаваемый водоструйным элеватором, равен потере напора в системе отопления здания Δh_0 , то из характеристики отопительной системы:

$$\Delta h_c = \Delta h_0 = S_0 G_0^2 = S_0 (1 + u)^2 G_1^2, \quad (2.33)$$

где G_0 – расход теплоносителя в системе отопления здания с сопротивлением S_0 .

Поскольку $G_1 = f_{p1} \omega_{p1}$, где $\omega_{p1} = \varphi_1 \sqrt{2g\Delta h_p}$ – скорость истечения теплоносителя из сопла, g – ускорение свободного падения, то:

$$\Delta h_c = S_0 (1 + u)^2 f_{p1}^2 \varphi_1^2 2g\Delta h_p. \quad (2.34)$$

С учетом (2.34) уравнение гидравлической характеристики (2.33) примет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_1^2 f_{p1} f_3 2g S_0 (1 + u)^2 = \\ = 1,75 + 0,7 \frac{f_{p1}}{(f_3 - f_{p1})} u^2 - 1,07 \frac{f_{p1}}{f_3} (1 + u)^2. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Анализ уравнения (2.35) показывает, что коэффициент смешения водоструйного элеватора u зависит лишь от его геометрических

размеров и сопротивления системы отопления здания и не зависит от потери напора в сопле Δh_p . При постоянном сопротивлении S_0 изменение перепада давлений в сопле элеватора вызывает изменение расхода теплоносителя через сопло G_1 , при этом расход теплоносителя в системе отопления здания изменяется пропорционально:

$$G_0 = G_1(1+u), \quad (2.36)$$

а коэффициент смешивания при этом не изменяется. Следует отметить, что потери напора в сопле Δh_p , во много раз превышают потерю напора в системе отопления здания, в связи с чем, основным сопротивлением системы отопления здания является сопротивления сопла водоструйного элеватора.

Таким образом, модель системы отопления здания на базе нерегулируемого водоструйного элеваторного узла может быть представлена в виде трехходового смесительного клапана с фиксированным коэффициентом смешения. Тогда в соответствии с законом сохранения количества теплоты (2.2) и выражением (2.36):

$$G_1(t)[1+u]T_{01}(t) = G_1(t)[T_1(t) + [1+u]T_{02}(t) - T_{02}(t)], \quad (2.37)$$

откуда выражение для температуры теплоносителя T_{01} примет вид:

$$T_{01}(t) = \frac{1}{1+u} [T_1(t) - T_{02}(t)] + T_{02}(t). \quad (2.38)$$

Уравнение (2.38) совместно с уравнением (2.3), описывающим динамические процессы в здании, определяют математическую модель системы отопления здания на базе нерегулируемого водоструйного элеватора. В виде структурной схемы такая модель представлена на рис. 2.19:

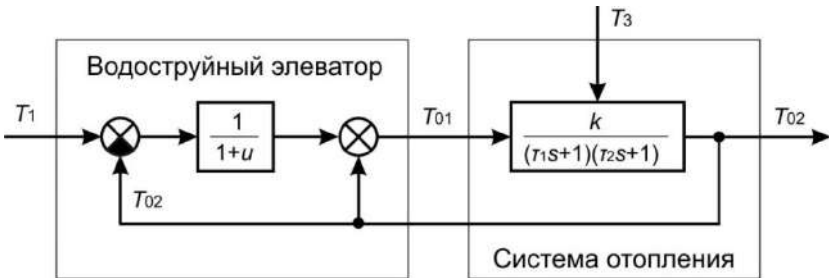


Рис. 2.19. Структурная схема системы управления отоплением здания на базе водоструйного элеваторного узла

Следует отметить, что в системе отопления здания с элеваторным узлом температура теплоносителя T_{01} практически не зависит от расхода G_1 . Однако его изменение приводит к изменению количества тепловой энергии, определяемой как:

$$dQ(t) = W(t)dt, \quad (2.39)$$

при этом тепловая мощность W приближенно определяется по выражению:

$$W(t) = G_1(t) [c\rho(T_1(t) - T_{02}(t))], \quad (2.40)$$

где G_1 – объемный расход на вводе в тепловой пункт здания, $\text{м}^3/\text{ч}$; c – удельная теплоемкость теплоносителя ($1,163 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$); ρ – плотность теплоносителя, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Таким образом, в автоматизированных и неавтоматизированных тепловых пунктах комплекса n зданий входными управляющими величинами являются расход теплоносителя G_1 и его температура T_1 , формируемая котлоэнергетической установкой в зависимости от температуры T_3 . При децентрализованном теплоснабжении, как правило, температуры T_1 на вводе каждого j -го здания комплекса различаются несущественно: $T_{11} = T_{12} = \dots = T_{1j} = \dots = T_{1n}$.

Для определения расходов теплоносителя G_1 выполним гидравлический расчет схемы, представленной на рис. 2.18, по методике [104, 105]. Принцип расчета основан на применении законов неразрывности струи и сохранения энергии [80], т.е. аналогов уравнений Кирхгофа для многокольцевых систем с учетом замыкающих уравнений связи между напорами и расходами для всех участков сети:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^5 G_{1j}(t) = G_u, \\ \sum_{j=1}^5 S_j(t) G_{1j}(t) |G_{1j}(t)| - \sum_{i=1}^q H_i = 0, \end{cases} \quad (2.41)$$

где G_{1j} – расход теплоносителя на вводе j -го здания, G_u – суммарный расход теплоносителя в гидравлической системе комплекса из пяти зданий, S_j – гидравлическое сопротивление системы отопления j -го

здания, $\sum_{i=1}^q H_i$ – алгебраическая сумма напоров сетевых насосных групп источника тепла.

Решение системы нелинейных уравнений (2.41) возможно, например, методами Ньютона-Рафсона, контурных расходов, Лобачева-Харди-Кросса [105, 106], для чего необходимо располагать значениями сопротивлений S_j . Однако их определение классическим методом, например, как в [80], для рассматриваемой схемы (см. рис. 2.18) неэффективно, поскольку расходы теплоносителя на вводах тепловых пунктов комплекса зданий зависят от регулирующих клапанов в автоматизированных ИТП, и изменяются во времени в соответствии с логикой работы локальных управляющих контроллеров (выполняющих, например, погодную компенсацию или регулирование в соответствии с суточным графиком температуры). В связи с этим гидравлические сопротивления систем отопления зданий целесообразно определять экспериментально – путем измерения перепадов давления и расходов теплоносителя в трубопроводах на вводе в здания при полностью открытых регулирующих клапанах всех ИТП. Тогда гидравлические сопротивления можно определить из уравнения:

$$S_j = \frac{\Delta P_j}{G_{1j}^2}, \quad (2.42)$$

где ΔP_j – перепад давления теплоносителя между подающим и обратным трубопроводами на вводе системы отопления здания j .

По известным сопротивлениям гидравлической сети и систем отопления зданий можно определить расходы теплоносителя в системе по аналогии с [104]. Суммарный расход теплоносителя:

$$G_u = \sqrt{\frac{\Delta P_u}{S_g}}, \quad (2.43)$$

где ΔP_u – перепад давления, создаваемый сетевыми насосами автономного источника тепла; S_g – эквивалентное сопротивление всех систем отопления комплекса, $\text{Па} \cdot \text{ч}^2/\text{м}^6$.

При этом для здания 1 (см. рис. 2.18) выполняется следующее соотношение:

$$S_1 G_{11}^2 = S_{1,5} G_u^2, \quad (2.44)$$

где $S_{1,5}$ – сопротивление сети от здания 1 до здания 5.

Тогда расход теплоносителя в системе отопления первого здания составит:

$$G_{11} = G_u \sqrt{\frac{S_{1,5}}{S_1}}. \quad (2.45)$$

Для системы отопления второго здания выполняются соотношения:

$$\begin{cases} S_2 G_{12}^2 = S_{2,5} (G_u - G_{11})^2, \\ (S_2' + S_{2,5}) (G_u - G_{11})^2 = S_{1,5} G_u^2, \end{cases} \quad (2.46)$$

где S_2' – сопротивление участков трубопровода от системы отопления первого здания к системе отопления второго здания.

Из выражения (2.46) следует:

$$G_{12} = G_u \sqrt{\frac{S_{1,5} S_{2,5}}{(S_2' + S_{2,5}) S_2}}. \quad (2.47)$$

Аналогично для комплекса из n зданий расход теплоносителя в системе отопления здания j определяется как:

$$G_{1j} = G_u \sqrt{\frac{S_{1,n}}{S_j} \prod_{k=2}^j \frac{S_{j,n}}{S_j' + S_{j,n}}}. \quad (2.48)$$

где S_j' – сопротивление участков трубопровода от системы отопления здания $j-1$ к системе отопления здания j .

Отношение расходов теплоносителя в системах отопления здания j и n составляет:

$$\frac{G_{1j}}{G_{1n}} = \sqrt{\frac{S_n' + S_{n,n}}{S_j}}. \quad (2.49)$$

Из выражения (2.49) следует, что отношение расходов теплоносителя в системах отопления любых двух зданий зависит от сопротивления сети, начиная от первого из рассматриваемых зданий, и не зависит от сопротивления сети до этого здания. Следовательно, при изменении сопротивления какого-либо участка сети у всех зданий, расположенных далее, будет иметь место пропорциональная

разрегулировка, т.е. у них отношение нового расхода теплоносителя к первоначальному будет одинаковым. В связи с этим достаточно определить степень изменения расхода только у одного из этих зданий. Следует отметить, что у зданий, расположенных между источником тепла и местом изменения сопротивления, разрегулировка будет непропорциональной.

В частном случае, если пренебречь сопротивлениями соединительных трубопроводов, практически не изменяющихся во времени, то для параллельно соединенных систем отопления зданий (см. рис. 2.18) выполняются соотношения:

$$\begin{cases} S_1 G_{11} |G_{11}| = S_2 G_{12} |G_{12}| = S_3 G_{13} |G_{13}| = S_4 G_{14} |G_{14}| = S_5 G_{15} |G_{15}|, \\ G_{11} + G_{12} + G_{13} + G_{14} + G_{15} = G_u. \end{cases} \quad (2.50)$$

Откуда расходы теплоносителя на вводе системы отопления здания j составят:

$$G_{1j}(t) = \frac{G_u}{1 + \sum_{k=1, k \neq j}^n \sqrt{\frac{S_j(t)}{S_k(t)}}}, \quad (2.51)$$

где $n=5$ – количество систем отопления зданий комплекса.

Общий расход теплоносителя G_u в гидравлической системе комплекса зданий зависит от установившегося гидравлического режима в системе, и определяется совмещением характеристик сетевых насосов автономного источника тепла и отопительной сети, как показано на рис. 2.20.

Гидравлическая характеристика сетевого насоса представляет зависимость создаваемого им напора H от расхода теплоносителя G в единицу времени. При неизменной частоте вращения вала насоса в области положительных значений напора и расходов эта зависимость приближенно может быть определена как [80]:

$$H = H_0 - S_{hs} (G - G_s)^2, \quad (2.52)$$

где H_0 – напор, создаваемый насосом при $G=0$, м; $S_{hs} = S / \rho g$ – внутреннее сопротивление, выраженное через единицы напора, $\text{м} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6$; ρ – плотность теплоносителя, $\text{кг} / \text{м}^3$; g – ускорение свободного падения; G_s – смещение точки максимального расхода, $\text{м}^3 / \text{ч}$.

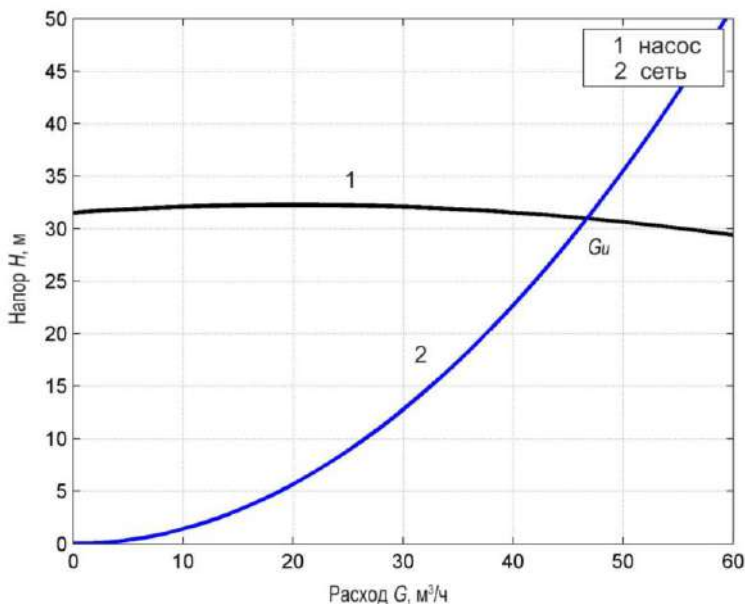


Рис. 2.20. Типовые гидравлические характеристики насоса и тепловой сети

Следует отметить, что гидравлическая характеристика промышленных сетевых насосов, применяемых в системах теплоснабжения, например, CronoBloc-BL (Wilo SE, Германия), Hydro-MPC (Grundfos, Дания) [107, 108], может быть скорректирована путем применения преобразователей частоты с целью стабилизации расхода или напора.

Характеристика сети (см. рис. 2.20) представляет собой квадратичную функцию, определяемую выражением:

$$\Delta H = S_{hэ} G^2, \quad (2.53)$$

где $S_{hэ}$ – эквивалентное гидравлическое сопротивление систем отопления всех зданий комплекса, выраженное через единицы напора, $\text{м} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6$; ΔH – потери напора.

Согласно уравнению (2.51) во время совместной работы автоматизированных ИТП и нерегулируемых элеваторных узлов при изменении сопротивления системы отопления любого здания с автоматизированным ИТП произойдет перераспределение теплоносителя между всеми зданиями комплекса, что может привести

к разрегулировке системы теплоснабжения, ухудшению эффективности функционирования, и снижению возможной экономии тепловой энергии [109–113].

Расход теплоносителя на вводе в ИТП j -го здания с учетом этого перераспределения может превышать номинальный, соответствующий расходу при полностью открытом регулирующем клапане в номинальном режиме работы системы. В связи с этим блок СБЗ на структурной схеме автоматизированного ИТП (см. рис. 2.17) необходимо изменить в соответствии с уравнением:

$$G_{1j}(t) = [G_{1j\text{ном}} + \Delta G_{1j}(t)] \frac{1}{k_m} A_{kj} \exp(B_{kj} x_{3j}(t)), \quad (2.54)$$

где A_{kj} и B_{kj} – параметры расходной характеристики клапана; $G_{1j\text{ном}}$ – расход теплоносителя через РО в номинальном режиме работы системы; ΔG_{1j} – изменение расхода теплоносителя через РО вследствие его перераспределения, определяемое как разность между значением, рассчитанным по выражению (2.51), и его предыдущим значением. Модифицированный блок СБЗ представлен на рис. 2.21:

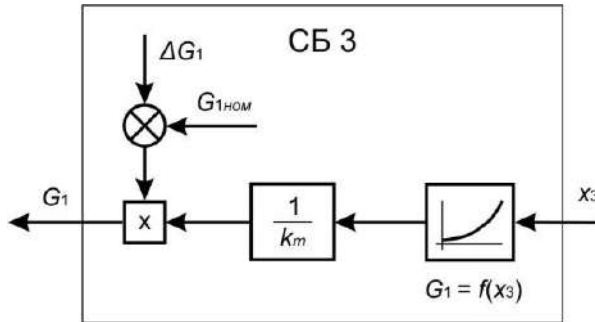


Рис. 2.21. Структурная схема модифицированного блока СБЗ

Метод моделирования системы управления децентрализованным отоплением распределенного комплекса зданий, содержащего n систем отопления с автоматизированными ИТП и m систем отопления с водоструйными элеваторными узлами, основан на применении имитационного моделирования и экспериментальных исследованиях. Метод включает следующие этапы:

1. Для всех $n+m$ зданий проводится параметрическая идентификация систем отопления, и находятся оценки

параметров объектов управления с уравнением (2.3).

2. Для всех $n+m$ зданий экспериментально определяется влияние температуры наружного воздуха T_3 на коэффициенты k , τ_1 , τ_2 уравнений (2.3) объектов управления.
3. Для каждого j -го здания с автоматизированным ИТП ($j = 1 \dots n$) применяются системы уравнений (2.55) и (2.56):

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{d3j} \frac{dT_{3j}^*(t)}{dt} + T_{3j}^*(t) = k_{d3j} T_{3j}, \\ \tau_{d1j} \frac{dT_{01j}^*(t)}{dt} + T_{01j}^*(t) = k_{d1j} T_{01j}, \\ \tau_{d2j} \frac{dT_{02j}^*(t)}{dt} + T_{02j}^*(t) = k_{d2j} T_{02j}, \\ \varepsilon_j = -k_{0j} T_{3j} + b_{0j} - T_{01j}^* + T_{dj}, \\ x_{1j}(t) = \begin{cases} 0, & |\varepsilon_j(t)| \leq X_{dj}, \\ \varepsilon_j(t), & |\varepsilon_j(t)| > X_{dj}, \end{cases} \\ y_j(t) = \frac{k_{mj}}{X_{pj}} \left[X_{uj} x_{1j}(t) + \frac{dx_{1j}(t)}{dt} \right], \\ x_{2j}(t) = \begin{cases} y_j(t), & -k_{mj} \leq y_j(t) \leq k_{mj}, \\ k_{mj}, & |y_j(t)| > k_{mj}, \end{cases} \\ v_j(t) = \begin{cases} x_{2j}(t), & T_{2\min j} \leq T_{2j}^*(t) \leq T_{2\max j}, \\ k_{mj} u_{1j}, & T_{2j}^*(t) < T_{2\min j}, \\ k_{mj} u_{2j}, & T_{2j}^*(t) > T_{2\max j}, \end{cases} \end{array} \right. \quad (2.55)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{d\mu_j(t)}{dt} = \frac{k_{uj}}{\tau_{uj}} v_j(t), \\
 x_{3j}(t) = \begin{cases} 0, \mu_j(t) < 0, \\ x_{2j}(t), 0 \leq \mu_j(t) \leq k_{mj}, \\ k_{mj}, |\mu_j(t)| > k_{mj}, \end{cases} \\
 G_{1j}(t) = [G_{1нo.mj} + \Delta G_{1j}(t)] \frac{1}{k_{mj}} A_{kj} \exp[B_{kj} x_{3j}(t)], \\
 G_{3j}(t) = G_{0j} - G_{1j}(t), \\
 T_{01j}(t) = \frac{1}{G_{0j}} [G_{1j}(t) T_{1j}(t) + G_{3j}(t) T_{02j}(t)], \\
 \tau_{1j} = f_{1j}(T_{3j}^*), \\
 \tau_{2j} = f_{2j}(T_{3j}^*), \\
 k_j = f_{3j}(T_{3j}^*), \\
 \tau_{1j} \tau_{2j} \frac{d^2 T_{02j}(t)}{dt^2} + (\tau_{1j} + \tau_{2j}) \frac{dT_{02j}(t)}{dt} + T_{02j}(t) = k_j T_{01j}(t).
 \end{array} \right. \quad (2.56)$$

4. Для каждого j -го здания с водоструйным элеваторным узлом ($j = n+1 \dots n+m$) применяется система уравнений (2.57):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 G_{0j} = G_{1j}(1 + u_j), \\
 T_{01j}(t) = \frac{1}{1 + u_j} [T_{1j}(t) - T_{02j}(t)] + T_{02j}(t), \\
 \tau_{1j} \tau_{2j} \frac{d^2 T_{02j}(t)}{dt^2} + (\tau_{1j} + \tau_{2j}) \frac{dT_{02j}(t)}{dt} + T_{02j}(t) = k_j T_{01j}(t).
 \end{array} \right. \quad (2.57)$$

5. Для всех $n+m$ зданий экспериментально определяются

гидравлические сопротивления систем отопления (при этом клапаны в автоматизированных ИТП должны быть полностью открыты).

6. Для определения расчетных расходов теплоносителя на вводе всех $n+m$ зданий с учетом характеристики сетевых насосов источника тепловой энергии применяется система уравнений (2.58):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^{n+m} G_{1j}(t) = G_u, \\ \sum_{j=1}^{n+m} S_j(t) G_{1j}(t) |G_{1j}(t)| - \sum_{i=1}^q H_i = 0, \\ S_j = \frac{\Delta P_j}{G_{1j}^2}, \\ H_0 - S_{h6} (G_u - G_s)^2 = S_{h3} G^2, \\ G_{1j}(t) = \frac{G_u}{1 + \sum_{k=1, k \neq j}^{n+m} \sqrt{\frac{S_j(t)}{S_k(t)}}}. \end{array} \right. \quad (2.58)$$

Таким образом, основу метода составляют системы уравнений, описывающие функционирование системы отопления зданий с автоматизированными ИТП, водоструйными элеваторными узлами, и замыкающая система уравнений для определения расходов на вводе распределенных энергосистем.

Глава 3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОТОПЛЕНИЯ КОМПЛЕКСА ЗДАНИЙ

3.1. Параметрическая идентификация объектов управления

Целью параметрической идентификации системы отопления здания, как объекта управления, является определение оценок его параметров, обладающих свойствами несмещенности, состоятельности, эффективности и достаточности [81]. Наиболее распространенными методами параметрической идентификации являются методы наименьших квадратов, вспомогательных переменных, максимального правдоподобия, стохастическая аппроксимация, и корреляционный способ, позволяющие определить по экспериментальным данным оценки параметров объекта управления при известной структуре его математической модели. При этом если внешние воздействия представляют собой белый шум и применяется метод наименьших квадратов, то информация о законах распределения случайных значений не требуется [114 – 116].

В соответствии с уравнением (2.3) модель системы отопления здания по каналу регулирования " $T_{01} - T_{02}$ " (см. рис. 2.1) структурно можно представить в виде последовательного соединения двух апериодических звеньев:

$$W(s) = \frac{k}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}, \quad (3.1)$$

где постоянные времени τ_1 , τ_2 и коэффициент преобразования k зависят от разновидности системы отопления, свойств ограждающих конструкций здания, и условий окружающей среды.

Поскольку в процессе эксперимента измерение непрерывных сигналов производится в дискретные моменты времени, то необходимо перейти от непрерывной модели к дискретной, для чего используется билинейное преобразование Тастина [117]:

$$W(s) \Big|_{s=\frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1}} \rightarrow W(z), \quad (3.2)$$

где $z = e^{sT_0}$, T_0 – период квантования (дискретизации).

Тогда получим:

$$W(z) = \frac{k\tau_0^2(z^2 + 2z + 1)}{Az^2 + Bz + C}. \quad (3.3)$$

где $A = 4\tau_1\tau_2 + 2\tau_0\tau_1 + 2\tau_0\tau_2 + \tau_0^2$, $B = 2\tau_0^2 - 8\tau_1\tau_2$,

$C = 4\tau_1\tau_2 - 2\tau_0\tau_1 - 2\tau_0\tau_2 + \tau_0^2$

Введем обозначения:

$$\begin{cases} b_0 = \frac{k\tau_0^2}{4\tau_1\tau_2 + 2\tau_0\tau_1 + 2\tau_0\tau_2 + \tau_0^2}, \\ b_1 = \frac{8\tau_1\tau_2 - 2\tau_0^2}{4\tau_1\tau_2 + 2\tau_0\tau_1 + 2\tau_0\tau_2 + \tau_0^2}, \\ b_2 = \frac{2\tau_0\tau_1 + 2\tau_0\tau_2 - 4\tau_1\tau_2 - \tau_0^2}{4\tau_1\tau_2 + 2\tau_0\tau_1 + 2\tau_0\tau_2 + \tau_0^2}. \end{cases} \quad (3.4)$$

С учетом постоянных коэффициентов (3.4) уравнение (3.3) примет вид:

$$W(z) = \frac{b_0(z^2 + 2z + 1)}{z^2 - b_1z - b_2} = \frac{b_0(1 + 2z^{-1} + z^{-2})}{1 - b_1z^{-1} - b_2z^{-2}}. \quad (3.5)$$

Используя свойства z -преобразования [118], получим конечно-разностное уравнение, описывающее дискретную модель системы отопления здания по каналу регулирования " $T_{01} - T_{02}$ ":

$$y[n] - b_1y[n-1] - b_2y[n-2] = b_0(u[n] + 2u[n-1] + u[n-2]), \quad (3.6)$$

где u – входное воздействие, y – выходное.

По известным N экспериментальным значениям $u[n]$ и $y[n]$, составим систему конечно-разностных уравнений:

$$\begin{cases} y[2] = b_2y[0] + b_1y[1] + b_0(u[2] + 2u[1] + u[0]), \\ y[3] = b_2y[1] + b_1y[2] + b_0(u[3] + 2u[2] + u[1]), \\ \vdots \\ y[N] = b_2y[N-2] + b_1y[N-1] + \\ + b_0(u[N] + 2u[N-1] + u[N-2]). \end{cases} \quad (3.7)$$

Представим систему (3.7) в векторно-матричном виде:

$$\Psi B = Y, \quad (3.8)$$

где Ψ – расширенная матрица данных, B – вектор оценок параметров модели, Y – вектор выходных данных:

$$\Psi = \begin{bmatrix} y[0] & y[1] & u[2] + 2u[1] + u[0] \\ y[1] & y[2] & u[3] + 2u[2] + u[1] \\ \vdots & & \\ y[N-2] & y[N-1] & u[N] + 2u[N-1] + u[N-2] \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_2 \\ b_1 \\ b_0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y[2] \\ y[3] \\ \vdots \\ y[N] \end{bmatrix}$$

Для нахождения значений вектора оценок B используем метод наименьших квадратов (МНК), минимизирующий сумму квадратов невязок e [114]. Основная формула МНК в матричном виде имеет вид:

$$B = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T Y. \quad (3.10)$$

При использовании МНК получаемые оценки, как правило, оказываются смещенными. Для уменьшения ошибок целесообразно выполнить сглаживание по одной реализации переходного процесса, например, методом скользящего усреднения [119], а также необходимо выполнение ряда условий [115]:

- входной сигнал должен быть достаточно богатым в спектральном отношении, что эквивалентно подаче на вход объекта множества гармонических составляющих;
- объем исследуемой выборки N должен быть достаточным для получения представительных оценок, причем, чем меньше уровень тестового сигнала, тем больше должно быть число N .

Адекватность объекта управления и полученной модели можно оценить с помощью функции потерь вида:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\hat{y}[k] - y[k])^2, \quad (3.11)$$

где N – глубина выборки, e – невязка, y – выходной сигнал, \hat{y} – оценка выходного сигнала, полученная с помощью модели.

Путем решения уравнения (3.10) определяются коэффициенты уравнения регрессии (3.6), откуда с использованием системы (3.4) можно выразить параметры модели объекта управления (3.1): k , τ_1 , τ_2 .

Для численного решения уравнения (3.10) были проведены экспериментальные исследования систем отопления зданий по определению типовых динамических характеристик канала регулирования " $T_{01} - T_{02}$ " на базе учебных корпусов БГТУ им. В.Г. Шухова (см. приложение) в переходные отопительные периоды. Глубина выборки составляла $N=500$ значений, период дискретизации $\tau_0=115$ с. Входная $T_{01}(t)$ и выходная $T_{02}(t)$ температуры системы отопления здания 11 представлены на рис. 3.1.

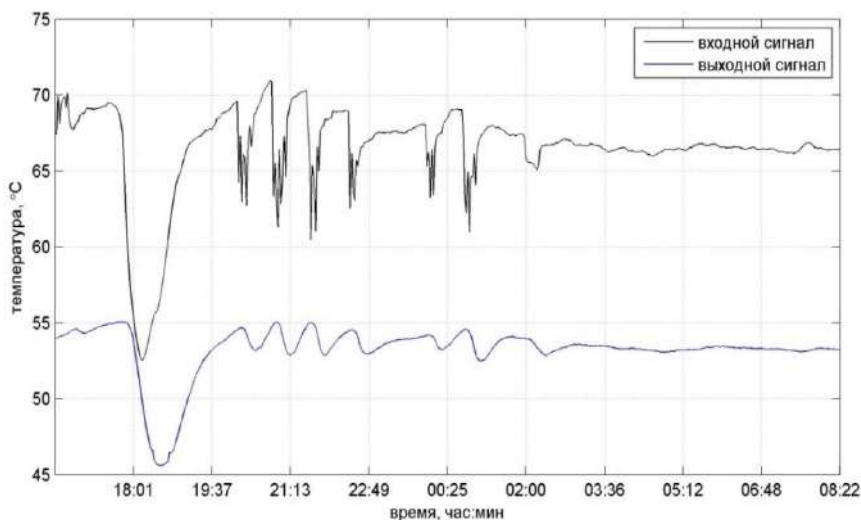
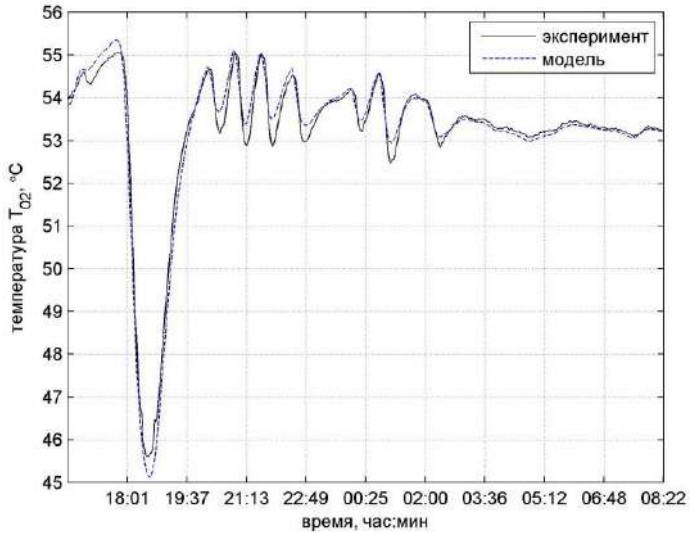


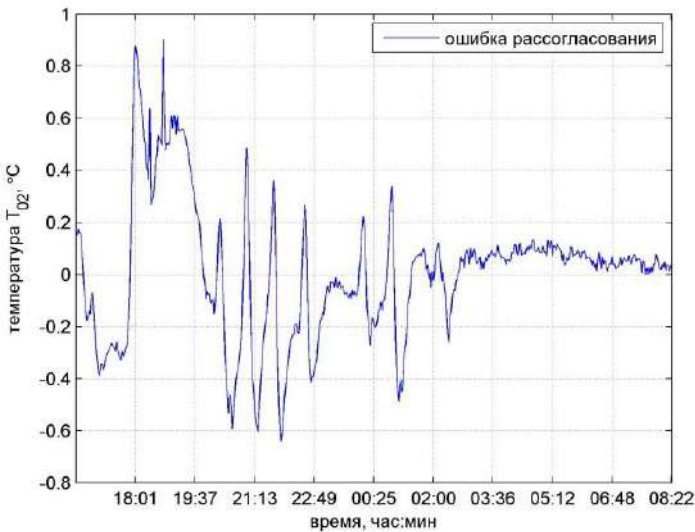
Рис. 3.1. Экспериментальные кривые температуры в подающем (входной сигнал T_{01}) и обратном (выходной сигнал T_{02}) трубопроводах системы отопления здания 11

Анализ рис. 3.1 показывает, что длительность переходного процесса по каналу " $T_{01} - T_{02}$ " превышает несколько часов, причем за

счет инерционности системы отопления объект управления обладает свойствами фильтра нижних частот. Для проведенного эксперимента оценки параметров уравнения (3.1) имеют следующие значения: $k=0.8$, $\tau_1=305.55$ с, $\tau_2=1071.78$ с; функция потерь $E=0.068$.



a



б

Рис. 3.2. Сравнительные экспериментальная и расчетная выходные кривые температуры в обратном трубопроводе системы отопления здания (*a*), невязка (*б*)

На рис. 3.2 представлены результаты идентификации для одного из зданий. Анализ показывает, что максимальное отклонение экспериментальной и расчетной температур не превышает 1 °С, что, в целом, соответствует точности регулирования в существующих системах на основе электронных регуляторов с погодной компенсацией [18]. Результаты параметрической идентификации систем отопления зданий представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Оценки параметров модели объектов управления

Объект управления	Параметр			
	k	$\tau_1, \text{с}$	$\tau_2, \text{с}$	E
Здание 11	0.800493	305.555	1071.78	0.0676563
Здание 12	0.800721	85.7636	1848.53	0.0427322
Здание 13	0.906407	59.0132	818.113	0.0390324
Здание 21	0.817004	65.8534	1576.66	0.0246082
Здание 22	0.783745	128.939	2536.55	0.0771868
Здание 23	0.810467	171.755	1191.4	0.105321
Здание 24	0.89207	70.618	565.172	0.059379
Здание 25	0.848819	248.917	687.023	0.120987

Следует отметить, что найденные параметры модели в процессе функционирования могут незначительно изменяться, например, из-за изменений температуры наружного воздуха, типа ограждающих конструкций зданий, параметров сети трубопроводов и т.п.

3.2. Разработка структуры имитационной модели системы управления отоплением здания с автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом

Расчет и определение основных динамических характеристик процесса отопления здания производится на базе имитационного моделирования в математическом пакете MATLAB 7.10 (R2010a) с использованием модуля расширения Simulink [77, 78, 117]. В основу имитационной модели, представленной на рис. 3.3, положена структурная схема, показанная на рис. 2.17.

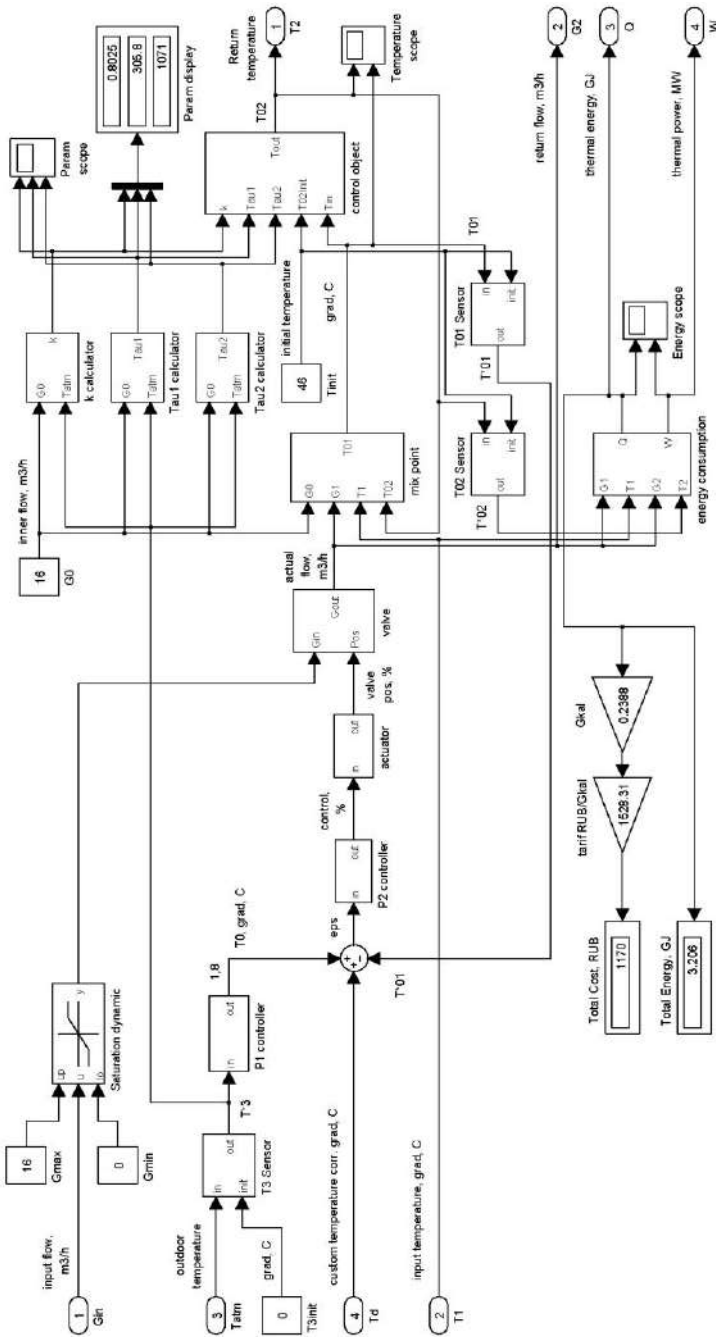


Рис. 3.3. Структура имитационной модели системы управления здания с ИТП

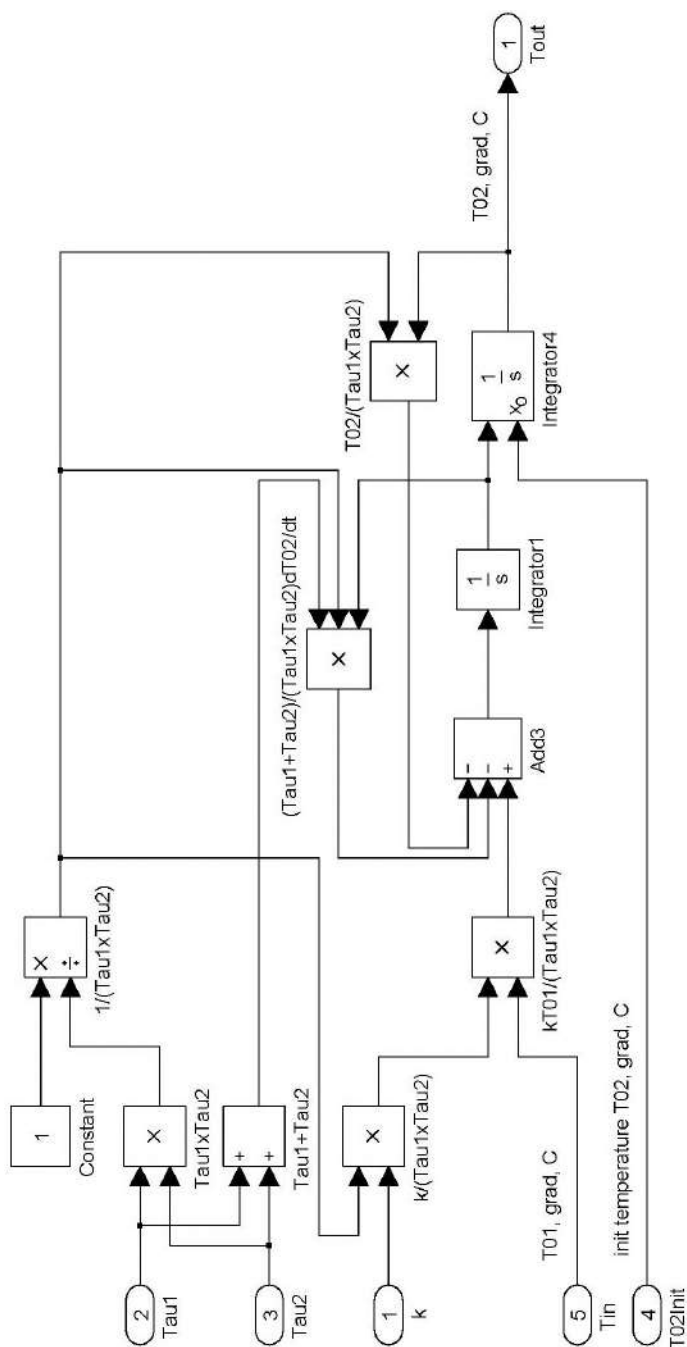


Рис. 3.4. Структура имитационной модели объекта управления

Структура имитационной модели системы отопления здания, как объекта управления (см. рис. 3.3) в виде блока control object, в соответствии с уравнением (2.3) представлена на рис. 3.4.

Узел смешивания теплоносителя на рис. 3.3 обозначен блоком mix point. Структура его имитационной модели, в соответствии со схемой системы отопления здания, представлена на рис. 3.5.

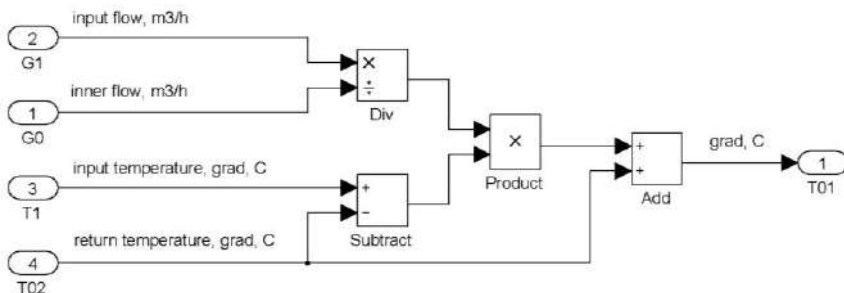


Рис. 3.5. Структура имитационной модели узла смешивания теплоносителя

Блок погодной компенсации БК (см. рис. 2.14), вычисляющий температуру теплоносителя в подающем трубопроводе в зависимости от температуры наружного воздуха, на рис. 3.3 обозначен блоком P1 controller. Структура его модели представлена на рис. 3.6.

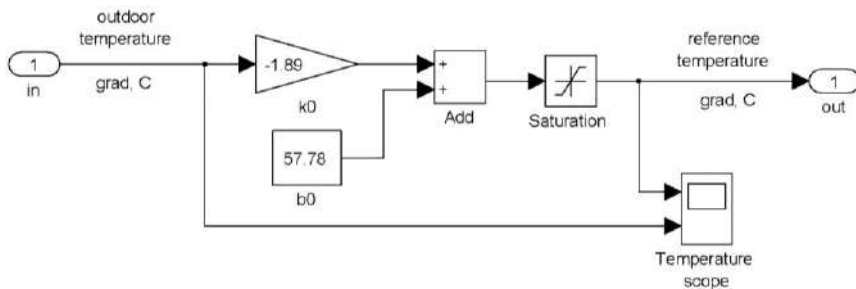


Рис. 3.6. Структура имитационной модели блока погодной компенсации БК

Структура имитационной модели блока регулирования БР, представленного на рис. 3.3 блоком P2 controller, и обеспечивающего при совместной работе с исполнительным механизмом ПИ-закон регулирования, в соответствии с уравнениями (2.17) – (2.21), представлена на рис. 3.7.

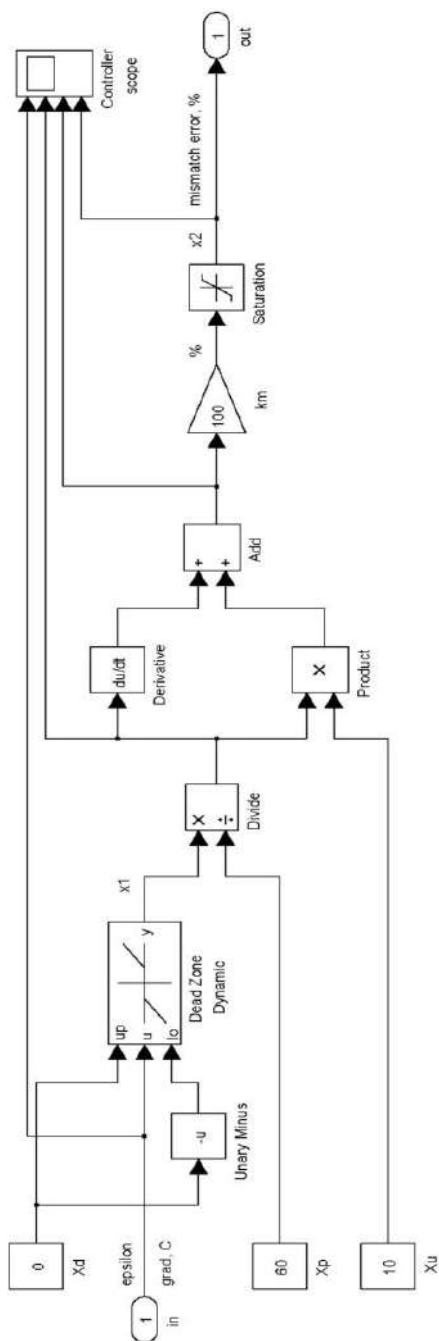


Рис. 3.7. Структура имитационной модели блока регулирования БР

Структура имитационной модели исполнительного механизма (блок actuator на рис. 3.3) в соответствии с уравнением (2.21), представлена на рис. 3.8.

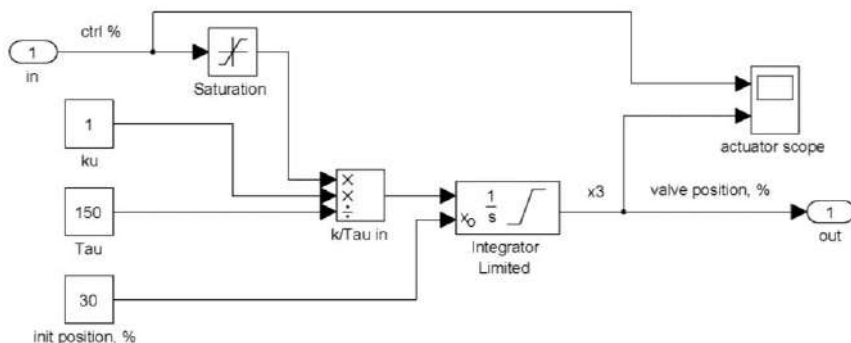


Рис. 3.8. Структура имитационной модели исполнительного механизма

Рабочий орган исполнительного механизма на общей схеме (см. рис. 3.3) обозначен блоком valve. В соответствии с уравнением (2.28) для клапана с логарфмической характеристикой, структура его имитационной модели имеет вид:

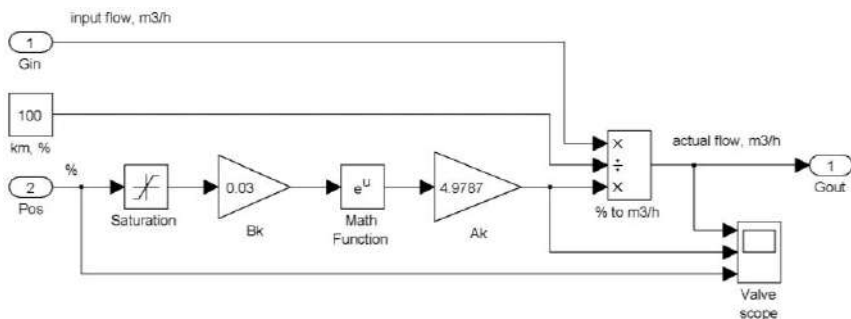


Рис. 3.9. Структура имитационной модели рабочего органа ИМ

Имитационные модели (блоки T01 Sensor, T02 Sensor и T3 Sensor на рис. 3.3) датчиков температуры теплоносителя и наружного воздуха совместно с преобразовательными элементами идентичны, и различаются только значениями параметров k_d и τ_d . Структура блока T3 Sensor представлена на рис. 3.10. Для вычисления теплотребления и тепловой мощности используется блок energy consumption, структура модели которого, представлена на рис. 3.11.

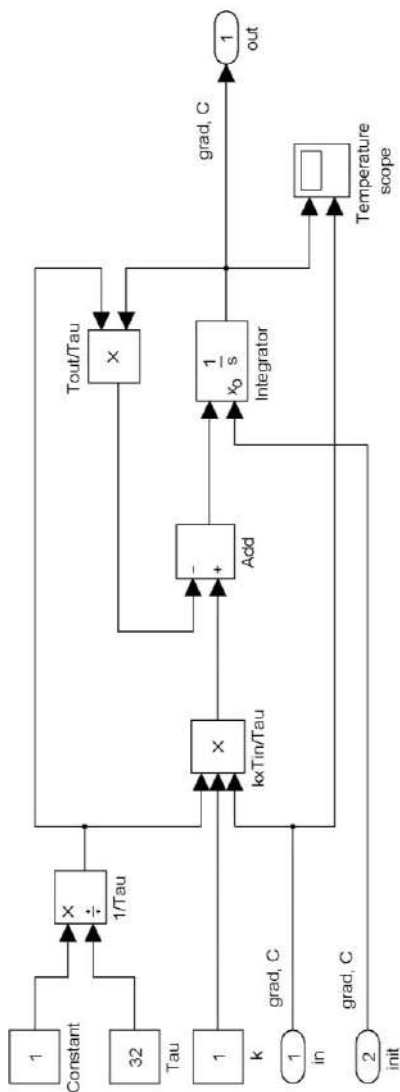


Рис. 3.10. Структура имитационной модели датчика температуры

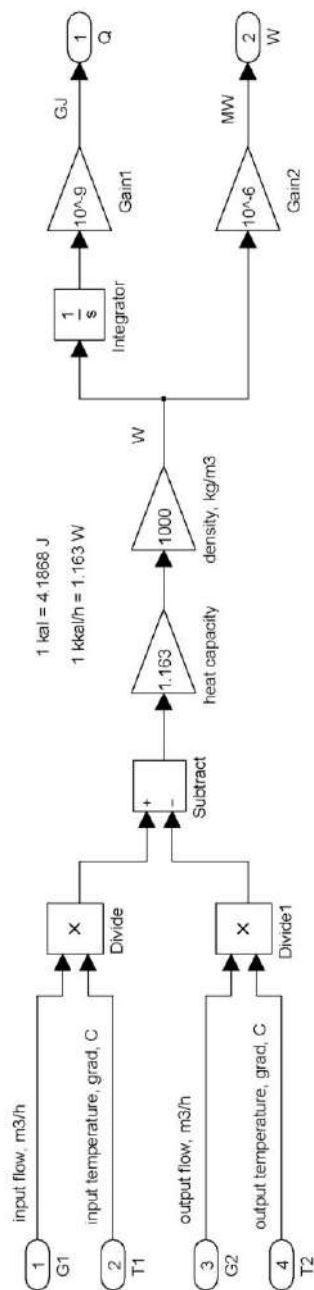


Рис. 3.11. Схема имитационной модели блока вычисления тепловой мощности

Блоки k calculator, Tau1 calculator, и Tau2 calculator (см. рис. 3.3) представлены встроенными m-функциями, и согласно п. 2.1, на основе экспериментальных исследований реализуют линейные зависимости параметров объектов управления (см. рис. 2.5, *a*), соответственно $k=k(T_3)$, $\tau_1=\tau_1(T_3)$, $\tau_2=\tau_2(T_3)$.

3.3. Имитационное моделирование динамических процессов системы управления отоплением здания с автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом при изменении параметров исполнительного механизма

На основе представленной имитационной модели исследуем влияние параметров различных исполнительных механизмов при работе с одним и тем же регулирующим органом и неизменных параметрах системы. Для этого используется РО VB 2 (Danfoss) с характеристиками, представленными в табл. 3.2 [103]. Основные характеристики ИМ АМЕ (Danfoss) для работы с регулирующим клапаном VB 2 представлены в табл. 3.3 [17].

Таблица 3.2

Основные характеристики регулирующего клапана типа VB 2

Наименование параметра, его обозначение	Величина, размерность
Диаметр, D_y	40 мм
Коэффициент, k_{kvs}	25 м ³ /ч
Температура, $T_{min} - T_{max}$	5 – 150 °C
Ход штока, h	10 мм

Таблица 3.3

Характеристики исполнительных механизмов типа АМЕ

Наименование параметра	Тип исполнительного механизма	
	АМЕ 20	АМЕ 30
Напряжение	24 В	24 В
Потребляемая мощность	4 Вт	9 Вт
Управление	аналоговое	аналоговое
Развиваемое усилие	450 Н	450 Н
Ход штока	10 мм	10 мм

Наименование параметра	Тип исполнительного механизма	
	AME 20	AME 30
Время перемещения штока 1 мм	15 с/мм	3 с/мм
Входной сигнал	0–10 В; 0–20 мА	0–10 В; 0–20 мА
Температура	0 – 55 °С	0 – 55 °С

Анализ характеристик представленных ИМ показывает, что они отличаются только потребляемой мощностью и временем перемещения штока клапана. Исходные параметры для имитационного моделирования представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Исходные параметры для моделирования

Наименование параметра, его обозначение	Величина, размерность
Параметры объекта управления, k , τ_1 , τ_2	0,8; 305,5 с; 1071,7 с
Температура теплоносителя в подающей магистрали, T_1	75 °С
Начальная температура теплоносителя в системе, T_2	47,9 °С
Максимальный расход на вводе в ИТП, G_1	14,7 м ³ /ч
Максимальный расход в системе отопления здания, G_0	16 м ³ /ч
Температура наружного воздуха, T_3	-1,0 °С
Постоянная времени датчика температуры наружного воздуха (например, типа ESMT, Danfoss), τ_{d3}	900 с
Постоянные времени датчиков температуры теплоносителя (типа ESMU в гильзе, Danfoss), τ_{d1} и τ_{d2}	32 с
Начальное положение штока клапана исполнительного механизма, x_{30}	75 %
Коэффициенты блока БР, X_d , X_p , X_u	0 °С, 60 °С, 7

В начальный момент времени $t = 0$ выполняется переход

автоматизированного ИТП в режим пониженного теплоснабжения, путем уменьшения температуры T_{01} на 5°C (за счет отклонения T_d). Длительность имитационного моделирования для исследуемых случаев составляет 1 ч. 45 мин.

Результаты имитационного моделирования с применением исполнительного механизма АМЕ 20 показаны на рис. 3.12 и 3.13. Поскольку узел смешивания теплоносителей характеризуется существенно меньшей инерционностью, по сравнению с системой отопления здания, то фактическая температура T_{01} и величина ее отклонения ε от расчетной (см. уравнение (2.27)) температуры в системе отопления представлены на рис. 3.13 в увеличенном масштабе времени.

Анализ изменения температуры T_{01} в подающем трубопроводе системы отопления показывает, что длительность переходного процесса по каналу регулирования " $G_1 - T_{01}$ " не превышает 5 мин.

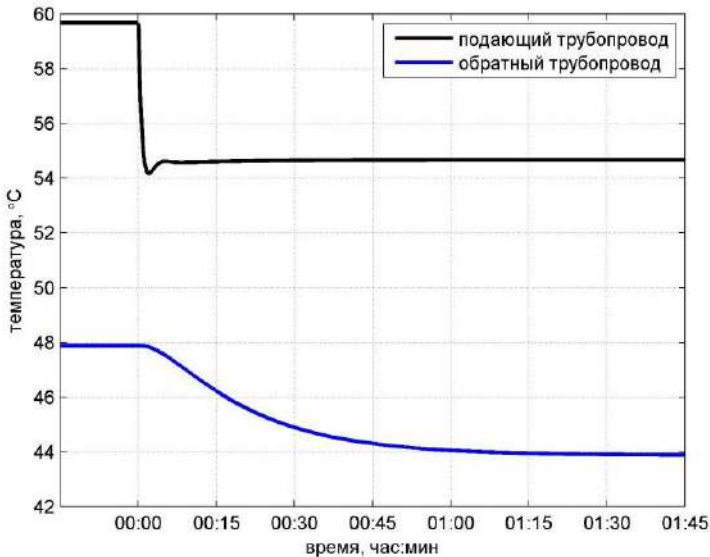


Рис. 3.12. Зависимости изменения температур теплоносителя в системе отопления (а) с применением ИМ АМЕ 20

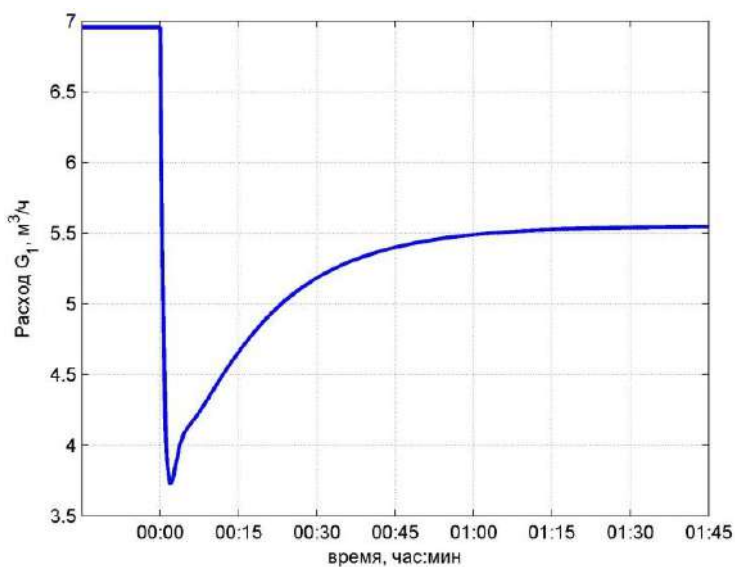


Рис. 3.12. Зависимости изменения расхода теплоносителя на вводе ИТП (б) с применением ИМ АМЕ 20 (Окончание)

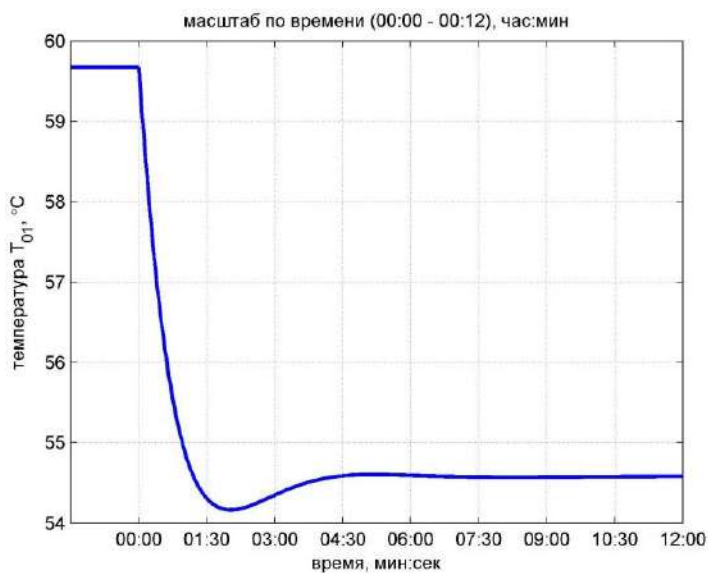


Рис. 3.13. Зависимость изменения температуры теплоносителя (а) в подающем трубопроводе системы отопления с ИМ АМЕ 20

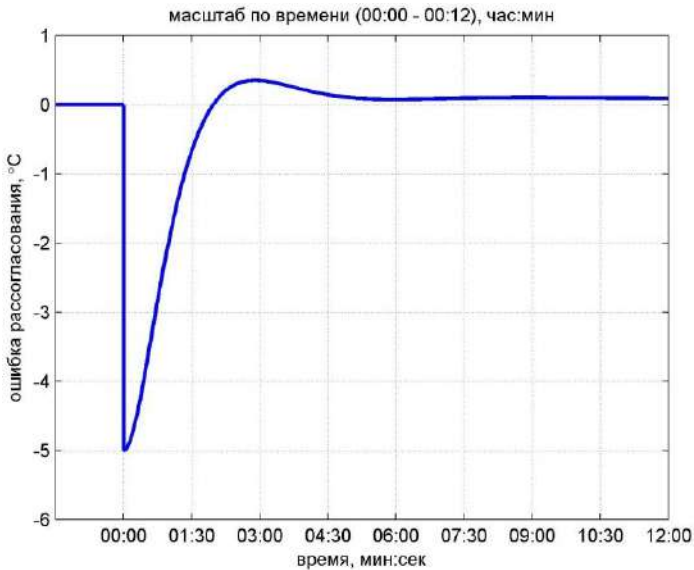


Рис. 3.13. Зависимость изменения ошибки рассогласования (δ) в подающем трубопроводе системы отопления с ИМ АМЕ 20 (Окончание)

Длительность перехода в новое установившееся состояние температуры T_{02} в обратном трубопроводе превышает 1,5 часа, и определяется переходными процессами в системе отопления здания [96]. Следовательно, переходными процессами в узле смешивания теплоносителей можно пренебречь. В исследуемом случае перерегулирование температуры T_{01} составляет 0,93%, а общее расчетное потребление тепловой энергии 1,16256 ГДж.

Анализ характеристики G_1 показывает (см. рис. 3.12, б), что в режиме пониженного теплотребления при отработке команд блока БР с помощью исполнительного механизма АМЕ 20 через регулирующий клапан VB 2 расход G_1 вначале практически мгновенно уменьшается до 3,7 м³/ч (53,3 %), а затем по экспоненциальному закону частично возрастает до 5,54 м³/ч (79,8 %). Это связано с работой регулятора и снижением температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе системы отопления здания (см. рис. 3.12, а).

Результаты имитационного моделирования с исполнительным механизмом АМЕ 30 (см. табл. 3.3) показаны на рис. 3.14 и 3.15.

Анализ изменения температуры T_{01} в подающем трубопроводе системы отопления здания показывает, что процесс стал колебательным, а характер переходного процесса для температуры T_{02} в обратном трубопроводе не изменился. При этом перерегулирование для температуры T_{01} составляет 6,25%, а общее расчетное потребление тепловой энергии 1,1623 ГДж.

Сравнительный анализ характеристик G_1 , представленных на рис. 3.12, б и 3.14, б, показывает, что при переходе автоматизированного ИТП в режим пониженного теплоснабжения при отработке команд блока БР с помощью исполнительного механизма АМЕ 30 расход G_1 изменяется аналогичным образом, но приобретает колебательный характер.

Сравнительный анализ графиков изменений температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе показывает (см. рис. 3.12, а и 3.14, а), что система отопления здания, как объект управления, по отношению к высокочастотным колебаниям на вводе является низкочастотным фильтром [96, 120].

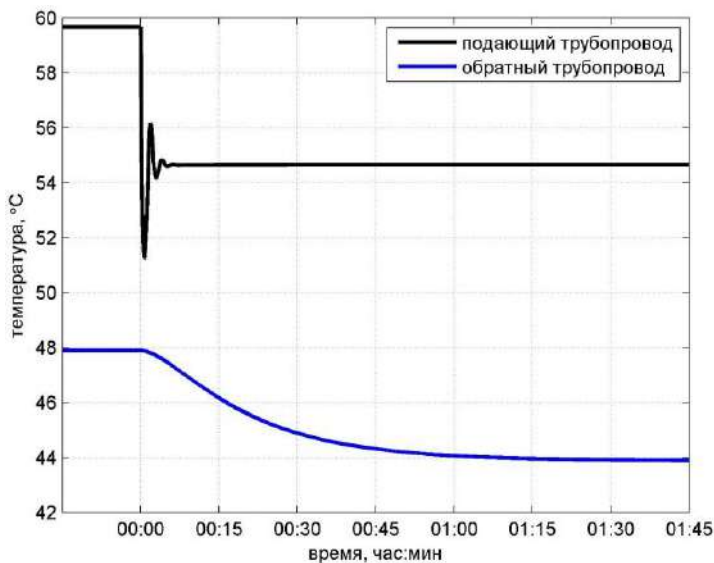


Рис. 3.14. Зависимости изменения температур теплоносителя в системе отопления (а) с применением ИМ АМЕ 30

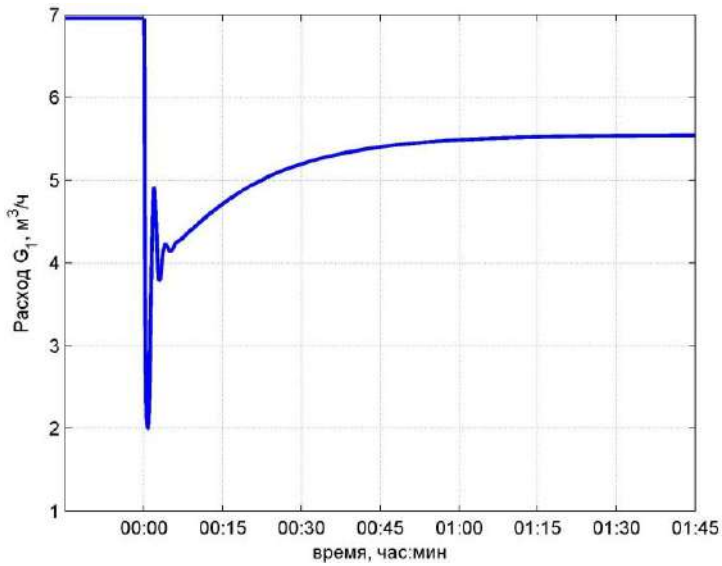


Рис. 3.14. Зависимость изменения расхода теплоносителя на вводе ИТП (б) с применением ИМ АМЕ 30 (Окончание)

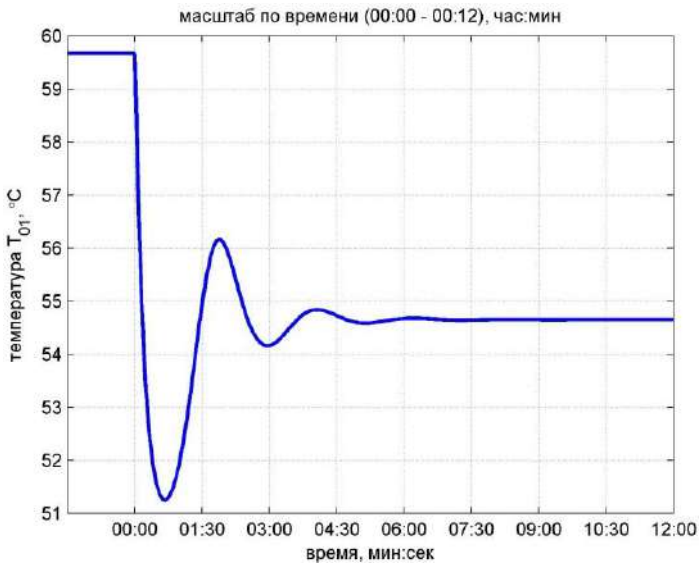


Рис. 3.15. Зависимость изменения температуры теплоносителя (а) в подающем трубопроводе системы отопления с ИМ АМЕ 30

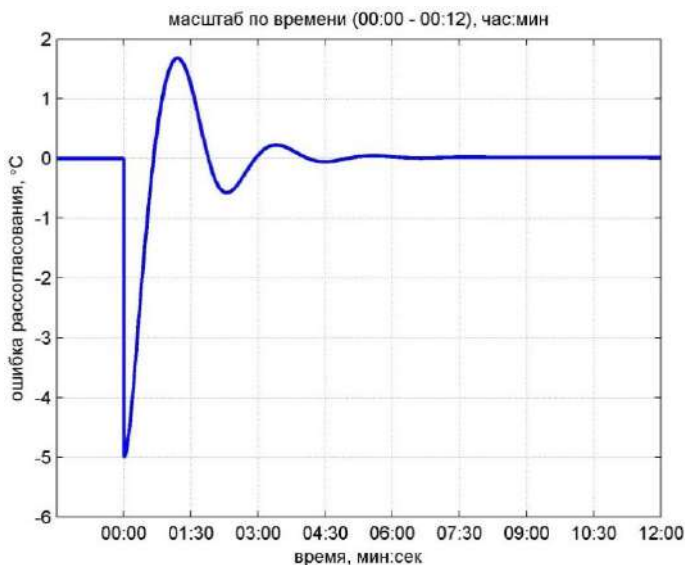


Рис. 3.15. Зависимость изменения ошибки рассогласования (δ) в подающем трубопроводе системы отопления с ИМ АМЕ 30 (Окончание)

Сравнительный анализ динамических процессов для исследуемого автоматизированного ИТП с различными исполнительными механизмами показывает, что увеличение быстродействия исполнительного механизма на базе АМЕ 30 приводит к функционированию его электродвигателя в режиме частого срабатывания (см. рис. 3.13 и 3.15). Однако переходные процессы колебательного типа в системе должны быть исключены, т.к. они способствуют преждевременному выходу из строя электродвигателя ИМ. Следовательно, при смене режима теплоснабжения здания необходимо изменять настроечные коэффициенты блока регулирования БР.

3.4. Имитационное моделирование динамических процессов системы управления отоплением здания с автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом при изменении параметров и структуры регулятора

С помощью имитационного моделирования исследуем особенности управления автоматизированным ИТП с пропорционально-

интегральным и интегральным законами регулирования, формируемыми блоком регулирования БР совместно с исполнительным механизмом при неизменных параметрах системы (см. рис. 2.14). При моделировании используем параметры оборудования Danfoss – исполнительного механизма AME 20, регулирующего клапана VB2, датчиков температуры ESMU и ESMT, характеристики которых представлены в табл. 3.2 – 3.4. Исходные параметры для имитационного моделирования, за исключением коэффициентов блока БР, представлены в табл. 3.4. По аналогии с [121] в начальный момент времени $t = 0$ выполняется переход автоматизированного ИТП в режим пониженного теплоснабжения, путем уменьшения температуры T_{01} на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (за счет отклонения T_d). Длительность моделирования для исследуемых случаев составляет 1 час 45 мин.

Результаты имитационного моделирования с пропорционально-интегральным законом регулирования (ПИ-регулятор), в соответствии с уравнениями (2.17) – (2.21) при значениях коэффициентов $X_d = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X_p = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $X_u = 10$, представлены на рис. 3.16 в виде зависимости изменения температуры теплоносителя T_{01} в подающем трубопроводе на вводе в систему отопления в увеличенном масштабе времени (а) и температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе на выходе из системы отопления здания (б). Перерегулирование для температуры T_{01} составляет 1,08%, а расчетное потребление тепловой энергии 1,16254 ГДж.

Увеличим в уравнении (2.17) параметр X_u до 60. Результаты имитационного моделирования в этом случае представлены на рис. 3.17. При этом для температуры T_{01} переходный процесс, возникающий вследствие изменения задания, носит колебательный характер, перерегулирование составляет 4,8%, а расчетное потребление тепловой энергии – 1,16266 ГДж. В то же время характер изменения температуры теплоносителя в обратном трубопроводе T_{02} остался прежним, что согласуется с экспериментальными данными.

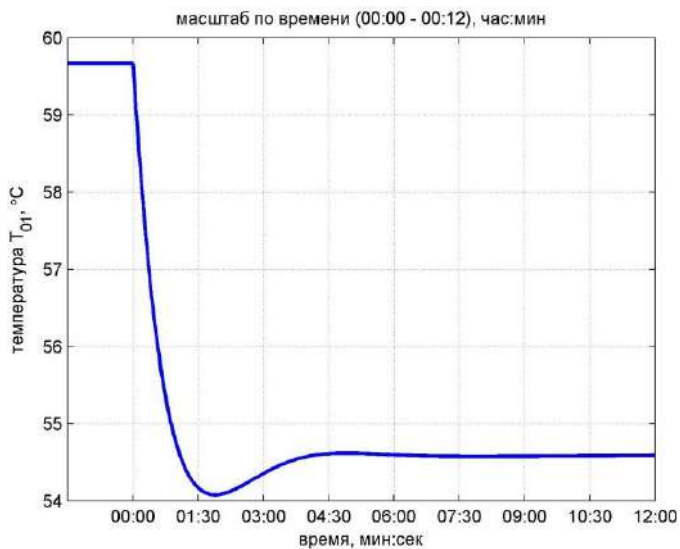
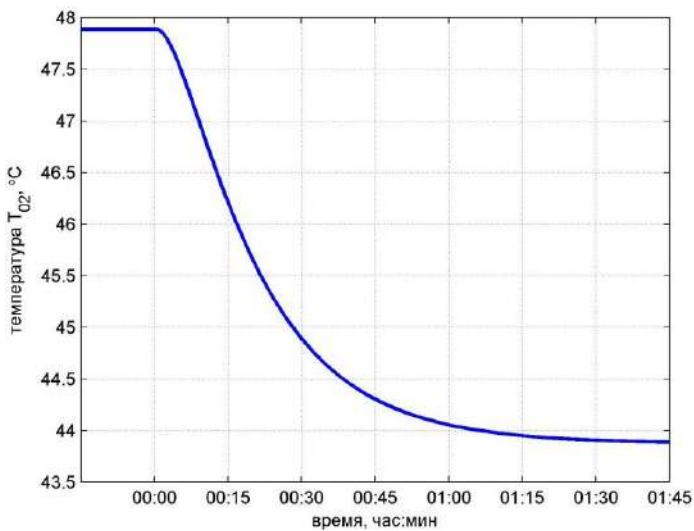
*a**б*

Рис. 3.16. Зависимости изменения температуры теплоносителя T_{01} (а) и T_{02} (б) в трубопроводах системы отопления при $X_d = 0$ °C, $X_p = 80$ °C, $X_u = 10$

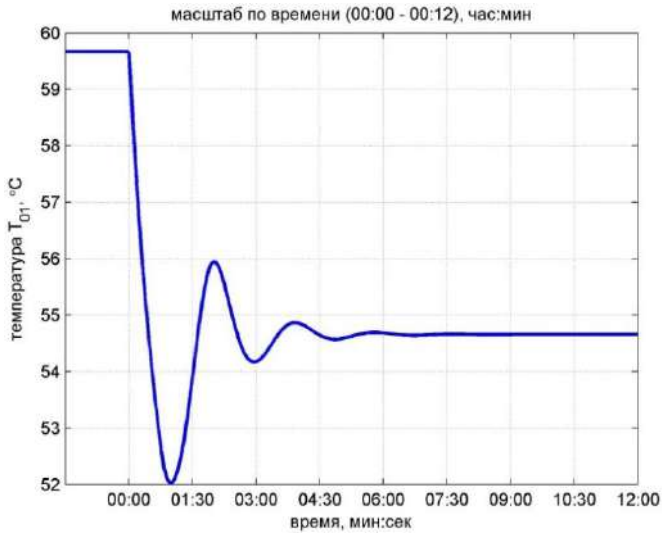
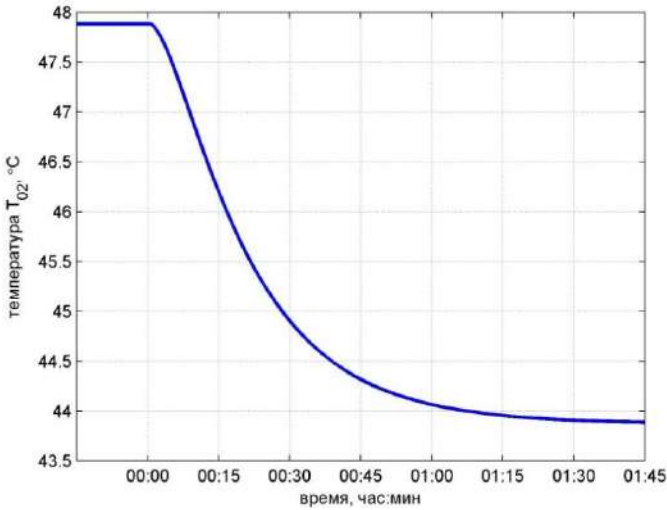
*a**б*

Рис. 3.17. Зависимости изменения температуры теплоносителя T_{01} (а) и T_{02} (б) в трубопроводах системы отопления при $X_d = 0$ °C, $X_p = 80$ °C, $X_u = 60$

Сравнительный анализ полученных результатов для ПИ-закона регулирования при различных параметрах блока БР и фиксированном

времени перемещения штока клапана АМЕ 20 показывает, что расчетное теплopotребление здания незначительно увеличивается (на 0,01 %) при возникновении колебательного переходного процесса. Следовательно, чрезмерное увеличение параметра X_u блока регулирования БР при прочих равных – нежелательно.

Положим в уравнении (2.17) параметр $X_d = 1$ °C при $X_p = 80$ °C, $X_u = 60$. Результаты имитационного моделирования в этом случае представлены на рис. 3.18. Анализ изменения температуры T_{01} показывает, что задание зоны нечувствительности $X_d = 1$ °C приводит к уменьшению колебательности по каналу регулирования " $G_1 - T_{01}$ ", и способствует предотвращению преждевременного выхода из строя электродвигателя ИМ, но в то же время вносит статическую ошибку. Перерегулирование для температуры T_{01} составляет 3,1%, а расчетное потребление тепловой энергии – 1,13468 ГДж, что на 2,4% меньше первого случая. Это объясняется уменьшением температуры T_{01} на входе системы отопления на величину статической ошибки до 53,7 °C и температуры T_{02} на выходе до 43,1 °C.

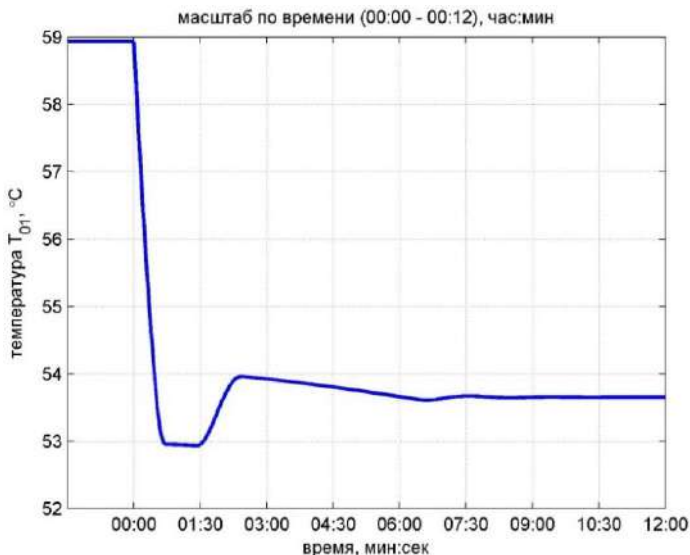


Рис. 3.18. Зависимость изменения температуры теплоносителя T_{01} (а) в подающем трубопроводе системы отопления при $X_d = 1$ °C, $X_p = 80$ °C, $X_u = 60$

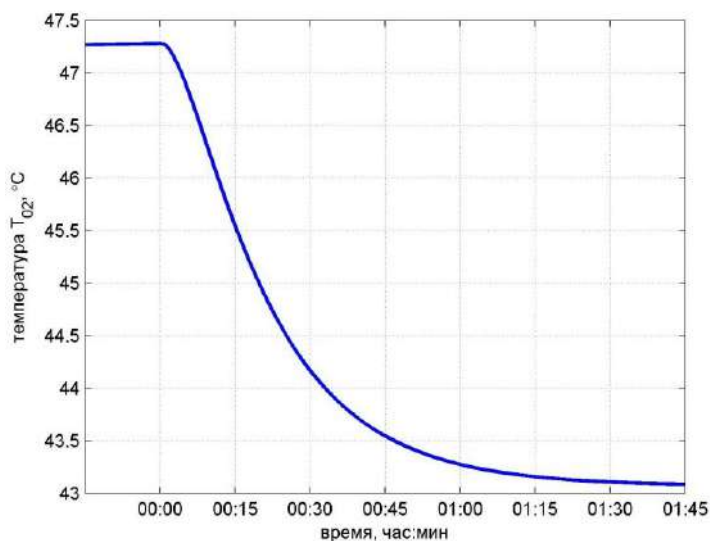


Рис. 3.18. Зависимость изменения температуры теплоносителя T_{02} (б) в обратном трубопроводе системы отопления здания при $X_d = 1$ °C, $X_p = 80$ °C, $X_u = 60$ (Окончание)

Таким образом, изменение коэффициентов регулятора X_p и X_u практически не влияет на величину потребления тепловой энергии, но оказывает существенное влияние на характер переходных процессов. Для оценки колебательности системы с помощью имитационного моделирования выполним анализ переходных характеристик при $X_p=1...100$ и $X_u=1...100$. Результаты расчета с точностью $\pm 0,5$ °C показаны на рис. 3.19.

Из анализа рис. 3.19, а следует, что увеличение зоны пропорциональности X_p приводит к уменьшению колебательности но увеличению времени регулирования температуры. При увеличении коэффициента X_u , напротив, колебательность системы увеличивается (запас устойчивости снижается) а время регулирования температуры уменьшается. Существенное снижение коэффициента X_p (менее 5) с одновременным увеличением X_u может привести к появлению автоколебаний, или сделать систему неустойчивой. На рис. 3.19, б представлены 3 зоны, соответствующие различным диапазонам настройки регулятора, и определяющие характер переходного процесса: 1 – монотонный, 2 – апериодический, 3 – колебательный.

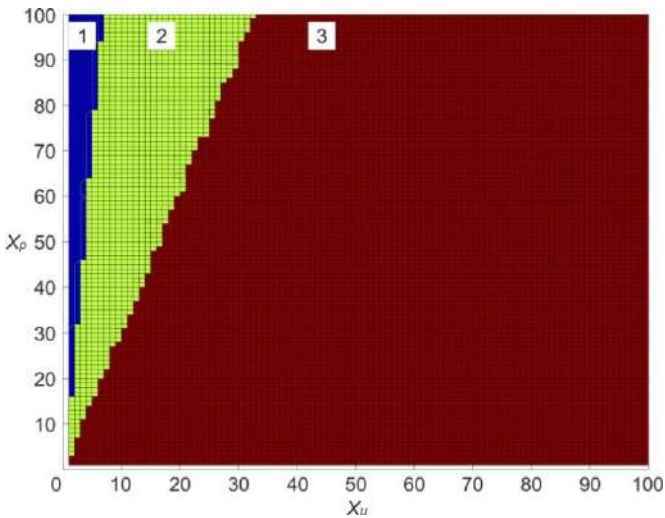
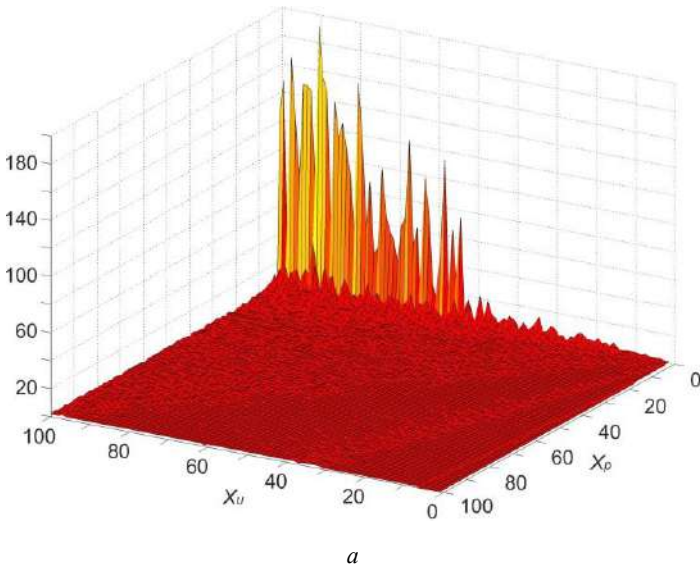
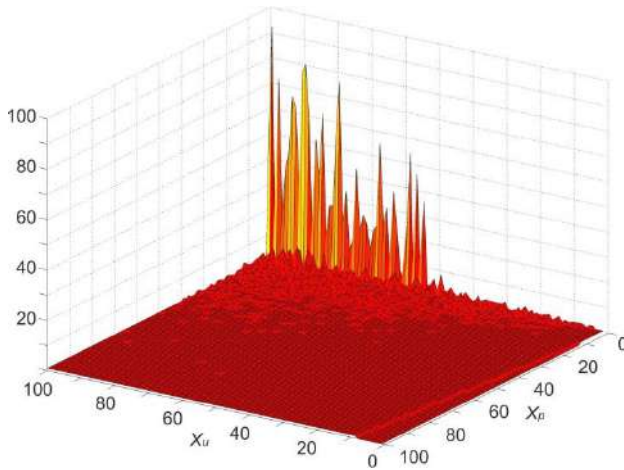


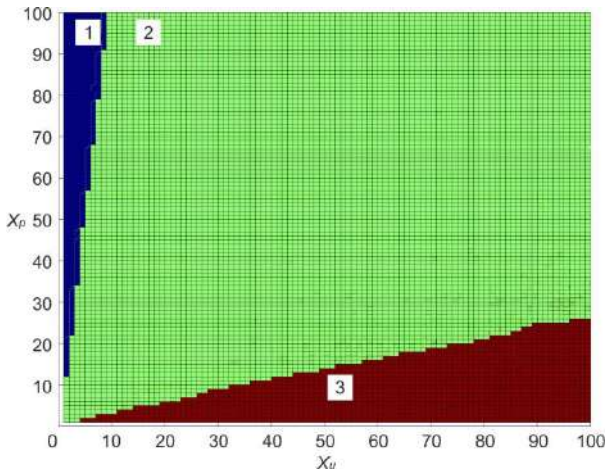
Рис. 3.19. График изменения колебательности системы (*a*) и зоны настройки регулятора (*б*) при различных значениях коэффициентов X_p и X_u с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$

Если уменьшить точность до $\pm 1^\circ\text{C}$, то колебательность в системе существенно уменьшится, как показано на рис. 3.20, *a*. При этом диапазон настроек регулятора, соответствующий аperiodическому

характеру переходных процессов (зона 2 на рис. 3.20, б) увеличивается с 14,78 % (см. зону 2 на рис. 3.19, б) до 85,12 %, а колебательному – снижается с 82,46 % до 10,92 %.



а



б

Рис. 3.20. График изменения колебательности системы (а) и зоны настройки регулятора (б) при различных значениях коэффициентов X_p и X_u с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$

И-закон регулирования, формируемый блоком БР совместно с ИМ, описывается аналогично уравнениям (2.17) – (2.21), если принять в

уравнении (2.17) $d/dt=0$.

Результаты имитационного моделирования при $X_d = 0$ °C, $X_p = 80$ °C, $X_u=60$ представлены на рис. 3.21 в виде зависимости изменения температуры теплоносителя T_{01} в подающем трубопроводе на вводе в систему в увеличенном масштабе времени (а) и температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе на выходе из системы отопления здания (б). Перерегулирование по каналу " $G_1 - T_{01}$ " составляет 4,8%, а потребление тепловой энергии практически неизменно – 1,1665 ГДж.

Для исключения из контура управления блока БР (см. рис. 2.13) положим в уравнении (2.17) параметры $X_p = 100$ °C, $X_u = 1$. Результаты имитационного моделирования в виде зависимости изменения температуры T_{01} на вводе в систему отопления (а) и температуры T_{02} на выходе (б) представлены на рис. 3.22.

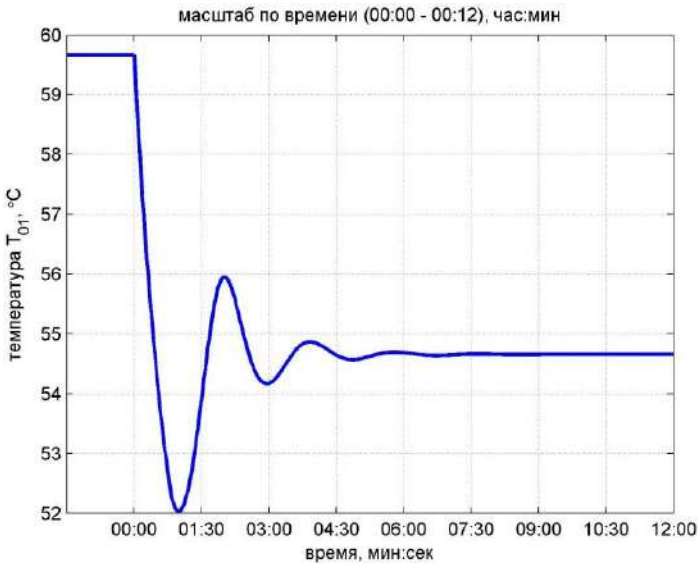


Рис. 3.21. Зависимость изменения температуры теплоносителя T_{01} (а) в трубопроводе системы отопления при $X_d = 0$ °C, $X_p = 80$ °C, $X_u = 60$

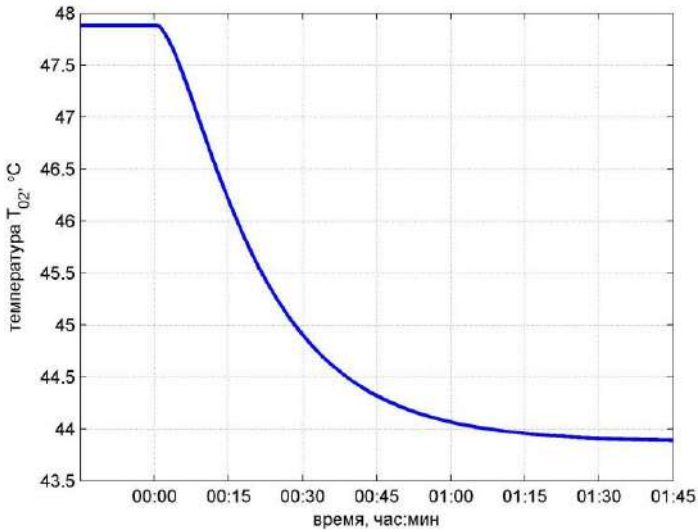


Рис. 3.21. Зависимость изменения температуры теплоносителя T_{02} (б) в трубопроводе системы отопления при $X_d = 0$ °C, $X_p = 80$ °C, $X_u = 60$ (Окончание)

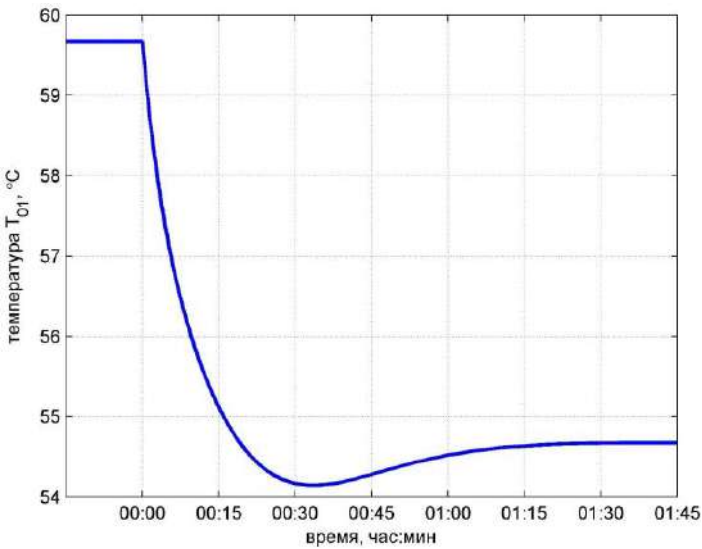


Рис. 3.22. Зависимость изменения температуры теплоносителя T_{01} (а) в трубопроводе системы отопления при $X_d = 0$ °C, $X_p = 100$ °C, $X_u = 1$

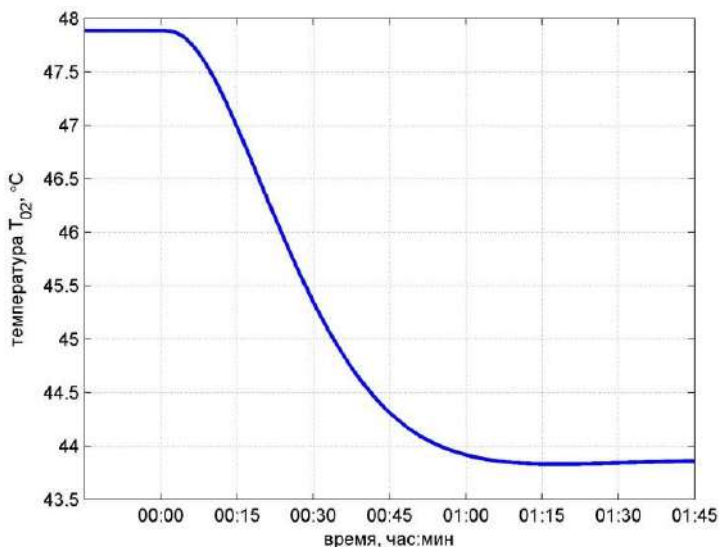


Рис. 3.22. Зависимость изменения температуры теплоносителя T_{02} (б) в трубопроводе системы отопления при $X_d = 0$ °C, $X_p = 100$ °C, $X_u = 1$ (Окончание)

Как и следовало ожидать, расчетное потребление тепловой энергии уменьшилось до величины 1,16577 ГДж, а перерегулирование для температуры T_{01} составило 0,9%. Анализ рис. 3.22 показывает, что в этом случае время переходного процесса по каналу регулирования " $G_1 - T_{01}$ " существенно увеличилось с нескольких минут до 1 часа, а по каналу регулирования " $T_{01} - T_{02}$ " уменьшилось с 1,5 часа до 1 часа.

В целом анализ динамических процессов для исследуемого автоматизированного ИТП с различными законами регулирования (ПИ- или И-регуляторы) показывает, что для заданного типа ИМ увеличение коэффициента X_u в блоке регулирования БР контроллера относительно времени перемещения штока ИМ, являющегося интегрирующим звеном, приводит к увеличению колебательности, и соответственно к частичному увеличению теплотребления здания. Для устранения колебательных процессов в САР ИТП, необходимо уменьшить коэффициент X_u , увеличить коэффициент X_p , либо увеличить зону нечувствительности X_d .

3.5. Структура имитационной модели, результаты имитационного моделирования и сравнительный анализ с экспериментальными исследованиями системы управления теплоснабжением комплекса трех зданий

С целью выявления основных особенностей управления децентрализованным теплоснабжением распределенных объектов применим имитационное моделирование в среде Simulink к упрощенной схеме, представленной на рис. 3.23.



Рис. 3.23. Упрощенная блок-схема системы теплоснабжения трех зданий

От автономного источника тепла осуществляется теплоснабжение трех зданий с зависимым присоединением систем отопления (ТП), ПВУ, и тепловой завесы (ТЗ), содержащих следующие объекты:

- здание 11 – систему отопления ТП 1 и приточно-вентиляционную установку ПВУ 1 на базе ИТП;
- здание 12 – ТП 2, ПВУ 2, ТЗ 1 на базе автоматизированного ИТП;
- здание 13 – ТП 3 с нерегулируемым водоструйным элеваторным узлом.

При разработке структурной схемы имитационного моделирования, гидравлические сопротивления распределенных объектов теплоснабжения определялись с помощью экспериментальных исследований для каждого объекта, а расходы теплоносителя рассчитывались в соответствии с п. 2.5. В качестве источника тепла принималась схема, аналогичная представленной на рис. 2.18 с сетевыми насосами типа Wilo CronoBloc-BL 50/150 – 7,5/2 [122]. Для систем отопления с автоматизированными ИТП принималась модель, показанная на рис. 2.17 и 2.21, а для систем ПВУ и тепловой завесы – аналогичная представленной в [123]; при этом для

всех объектов контур стабилизации температуры теплоносителя в подающих трубопроводах был отключен. С помощью имитационного моделирования исследовался процесс перераспределения расходов теплоносителя между объектами в двух случаях – со стабилизацией общего расхода G_u в системе (например, при наличии других инженерных систем здания), и без стабилизации [13, 124]. Исследуемый процесс характерен для автоматизированных систем управления теплоснабжением при:

- программном снижении температуры в вечернее и ночное время, в выходные и праздничные дни, а также при быстром подъеме температуры в помещениях зданий за счет максимального расхода теплоносителя;
- ограничении максимальной и минимальной температур теплоносителя.

Результаты моделирования распределения расходов теплоносителя в подающих трубопроводах объектов (см. рис. 3.23) при различных условиях их функционирования при неизменном общем расходе G_u , представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Расчетные расходы теплоносителя на вводе при $G_u = \text{const}$

Расход теплоносителя по объектам, м ³ /ч						Общий расход G_u , м ³ /ч
Здание 11		Здание 12		Здание 13		
ТП 1, G_{n2}	ПВУ 1, G_{n3}	ТП 2, G_{n4}	ПВУ 2, G_{n5}	ТЗ 1, G_{n6}	ТП 3, G_{n1}	
14,0000	2,5000	16,4000	5,6000	1,2000	7,0000	
16,4685	2,9408	19,2917	6,5874	1,4116	0	46,7000
0	3,5703	23,4214	7,9976	1,7138	9,9969	46,7000
21,5776	3,8531	0	8,6310	1,8495	10,7888	46,7000
0	4,5428	29,8008	10,1759	2,1805	0	46,7000
0	7,1626	0	16,0442	3,4380	20,0552	46,7000

Из анализа результатов следует (см. табл. 3.5), что относительные соотношения расходов в трубопроводах на вводе объектов, находящихся в рабочих режимах, следующие: $G_{n1} = 15,0 \%$; $G_{n2} = 30,0 \%$; $G_{n3} = 5,4 \%$; $G_{n4} = 35,0 \%$; $G_{n5} = 12,0 \%$; $G_{n6} = 2,6 \%$. Т. к. максимальный расход в системе теплоснабжения наблюдается на

объекте ТП 2, выполним анализ варианта, при $G_{n4} = 0$. Оценим перераспределение соотношений расходов теплоносителя между остальными объектами, находящимися в рабочих режимах: $G_{n1} = 23,0\%$ (увеличился на 8 %); $G_{n2} = 46,0\%$ (увеличился на 16 %); $G_{n3} = 8,3\%$ (увеличился на 2,9 %); $G_{n5} = 18,0\%$ (увеличился на 6 %); $G_{n6} = 4,0\%$ (увеличился на 1,4 %). Следовательно, при $G_{n4} = 0$ наблюдается максимальное увеличение расхода G_{n2} на объекте ТП 1. Это связано с тем, что его гидравлическое сопротивление по отношению к другим объектам минимальное. Аналогично, при $G_{n1} = 0$ максимальное увеличение расхода также наблюдается на объекте ТП 1, причем значение G_{n2} при этом составляет 35,0 % от общего расхода, т.е. увеличивается на 5,0 %. Полученное приращение расхода G_{n2} при $G_{n1} = 0$ меньше, чем в предыдущем варианте, так как $G_{n1} < G_{n4}$. Следует отметить, что полученные результаты имитационного моделирования на первый взгляд не очевидны, так как согласно схемы (см. рис. 3.23) для варианта при $G_{n4} = 0$ и, учитывая, что длина трубопровода до ТП 1 во много раз больше чем до объектов ПВУ 2 и ТЗ 1, то следовало бы ожидать существенного увеличения расходов G_{n5} и G_{n6} в здании 12, а не расхода G_{n2} в здании 11.

В то же время, поскольку объекты зданий 11 и 12 автоматизированы, наибольший интерес представляет перераспределение расхода для неавтоматизированного здания 13. Так, при $G_{n2} = 0$, расход G_{n1} увеличивается на 6 %, при $G_{n4} = 0$ увеличивается на 8 %, а при $G_{n2} = 0$ и $G_{n4} = 0$ – на 28%. Такое увеличение расхода G_{n1} может привести к перетопу здания 13 и повышению его теплопотребления.

Результаты моделирования распределения расходов теплоносителя в подающих трубопроводах объектов (см. рис. 3.23) при различных условиях их функционирования без стабилизации общего расхода G_u , представлены в табл. 3.6. Анализ перераспределения расходов для здания 13 показывает, что аналогично предыдущему случаю при $G_{n2} = 0$ расход G_{n1} увеличился на 6 %, при $G_{n4} = 0$ расход G_{n1} увеличился на 8 %, а при $G_{n2} = 0$ и $G_{n4} = 0$ расход G_{n1} увеличился на 28 %. Однако в абсолютных цифрах увеличение составило всего 0,1 м³/ч; 0,12 м³/ч; и 0,14 м³/ч соответственно. Это объясняется тем, что с изменением гидравлических сопротивлений объектов системы

теплоснабжения, за счет свойства саморегулирования [20, 125] сетевого насоса также изменяется общий расход G_u . В результате также наблюдается перераспределение расходов на вводе объектов системы, но в существенно меньшей степени, чем представленное в табл. 3.5.

Таблица 3.6

Расчетные расходы теплоносителя на вводе при $G_u \neq \text{const}$

Расход теплоносителя по объектам, м ³ /ч						Общий расход G_u , м ³ /ч
Здание 11		Здание 12		Здание 13		
ТП 1, G_{n2}	ПВУ 1, G_{n3}	ТП 2, G_{n4}	ПВУ 2, G_{n5}	ТЗ 1, G_{n6}	ТП 3, G_{n1}	
14,0000	2,5000	16,4000	5,6000	1,2000	7,0000	46,7000
14,1259	2,5225	16,5474	5,6503	1,2108	0	40,0569
0	2,5388	16,6547	5,6870	1,2186	7,1087	33,2078
14,2403	2,5429	0	5,6961	1,2206	7,1202	30,2403
0	2,5485	16,7183	5,7087	1,2233	0	26,1989
0	2,5505	0	5,7130	1,2242	7,1413	16,6290

При проведении экспериментальных исследований [109, 126 – 130] расход теплоносителя в системах теплоснабжения объектов измерялся с помощью ультразвукового портативного расходомера жидкости типа Portaflow 300 (Micronics Ltd, Великобритания) с учетом накладных ультразвуковых датчиков. При этом совместно с расходомером Portaflow применялся ультразвуковой толщиномер типа Sonagage II (Sonatest Ltd., Великобритания) для определения толщины стенки трубы. Абсолютная погрешность измерения скорости потока жидкости прибором Portaflow составляет $\pm 0,03$ м/с, относительная погрешность ± 3 %. Давление определялось с помощью измерительного преобразователя давления типа Метран-100 (ПГ Метран, Россия) с индикаторным устройством при относительной погрешности прибора $\pm 0,2$ % от шкалы. При проведении экспериментальных исследований автоматизированная система управления теплоснабжением зданий была переведена в ручной режим работы, а данные измерений обрабатывались в соответствии с методикой, представленной в [131].

Результаты экспериментальных исследований распределения

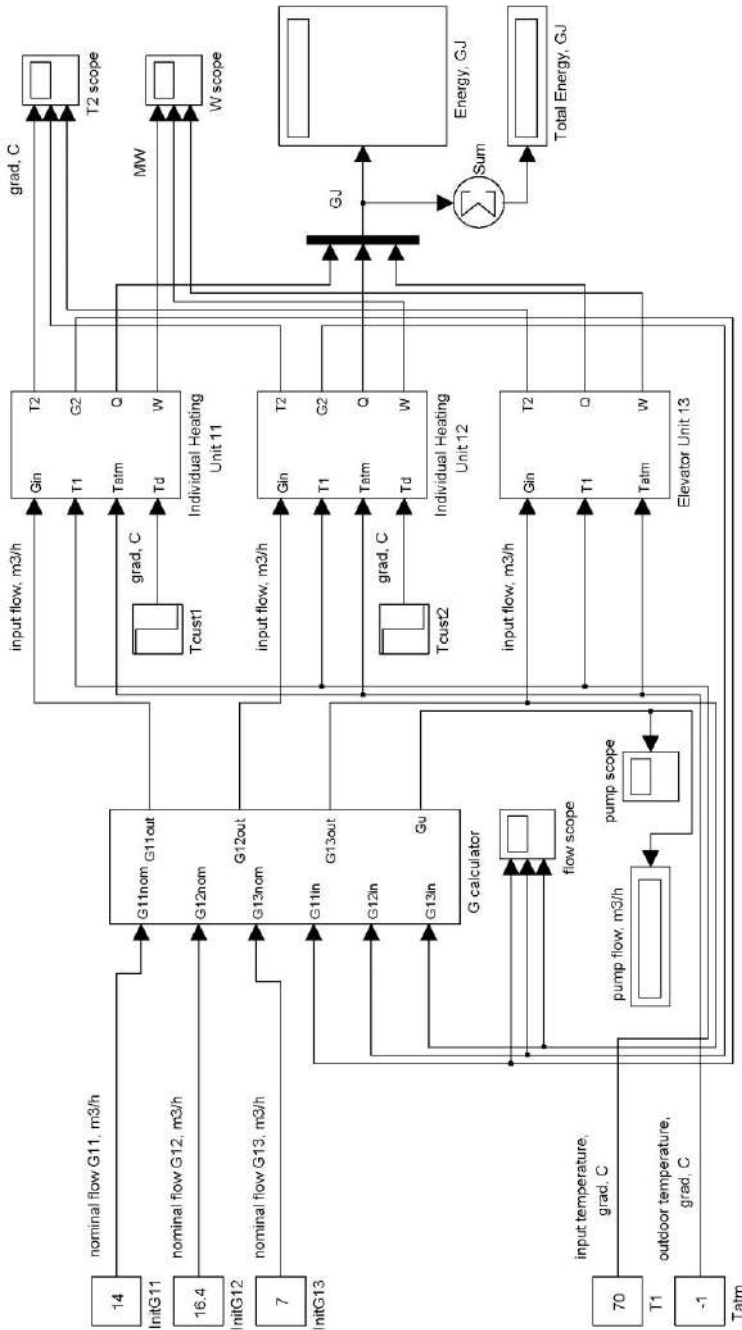
расходов теплоносителя на вводах объектов (см. рис. 3.23) в установившемся режиме при различных условиях их функционирования и $G_u = \text{const}$, представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

**Экспериментальные расходы теплоносителя на вводе объектов
при $G_u = \text{const}$**

Расход теплоносителя по объектам, м³/ч						Общий расход G_u , м³/ч
Здание 11		Здание 12		Здание 13		
ТП 1, G_{n2}	ПВУ 1, G_{n3}	ТП 2, G_{n4}	ПВУ 2, G_{n5}	ТЗ 1, G_{n6}	ТП 3, G_{n1}	
14,00	2,50	16,40	5,60	1,20	7,00	46,70
16,80	2,90	18,76	6,80	1,40	0	46,66
0	3,70	22,37	8,30	1,70	10,50	46,57
21,40	3,70	0	8,80	1,85	10,80	46,55
0	4,67	28,67	10,90	2,21	0	46,45
0	7,00	0	15,94	3,52	19,90	46,36

Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов имитационного моделирования (см. табл. 3.5) показывает, что наибольшая относительная погрешность по объекту ТП 1 составляет $\pm 2,0\%$; по объекту ПВУ 1 составляет $\pm 4,0\%$; по объекту ТП 2 составляет $\pm 4,49\%$; по объекту ПВУ 2 составляет $\pm 7,1\%$; по объекту ТЗ 1 составляет $\pm 2,4\%$; по объекту ТП 3 составляет $\pm 5,0\%$. Наибольшая приведенная погрешность составляет 0,7; 0,3; 2,4; 1,6; 0,2; и 1% соответственно. Появление погрешности может быть обусловлено тем, что в процессе экспериментальных исследований общий расход G_u незначительно изменялся, а гидравлические сопротивления объектов определялись экспериментально, без учета сопротивлений магистральных трубопроводов. Т.к. наибольший расход теплоносителя наблюдается в системах отопления, рассмотрим отдельно перераспределение расходов G_{n1} , G_{n2} и G_{n4} при отсутствии других инженерных систем зданий (см. рис. 3.23) в двух случаях – $G_u = \text{const}$ и $G_u \neq \text{const}$. Однако, в отличие от предыдущих опытов (см. табл. 3.5 – 3.6), в ИТП задействуются контура стабилизации температуры. Общая структура имитационной модели системы управления отоплением трех зданий представлена на рис. 3.24.



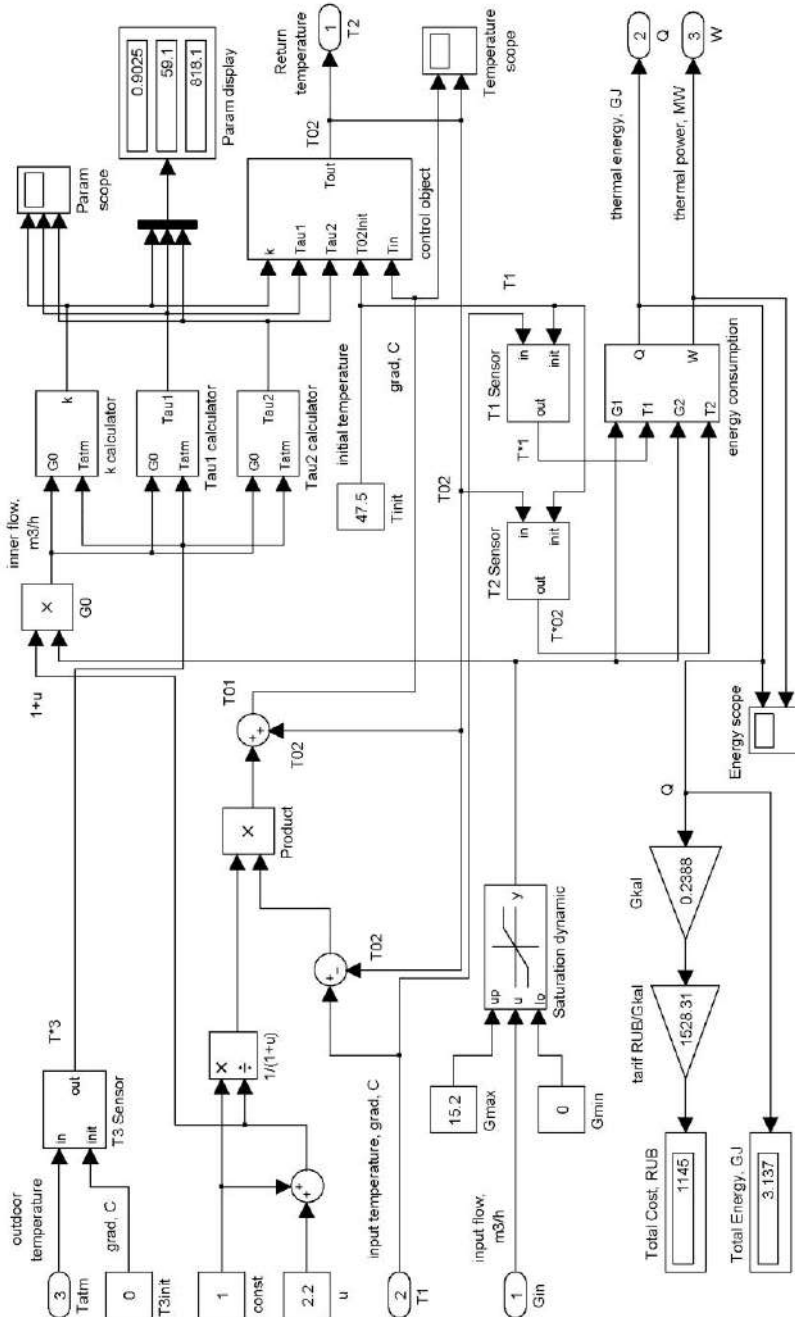


Рис. 3.25. Структура имитационной модели теплового пункта на базе водоструйного элеваторного узла

Блоки Individual Heating Unit 11 и 12 описывают автоматизированные ИТП зданий, и по структуре аналогичны представленным на рис. 3.3 – 3.11. Блок G Calculator (m-функция) осуществляет вычисление расходов теплоносителя на вводе в тепловые пункты в соответствии с п. 2.5. Структура имитационной модели блока Elevator Unit 13, описывающего тепловой пункт с элеваторным узлом, представлена на рис. 3.25.

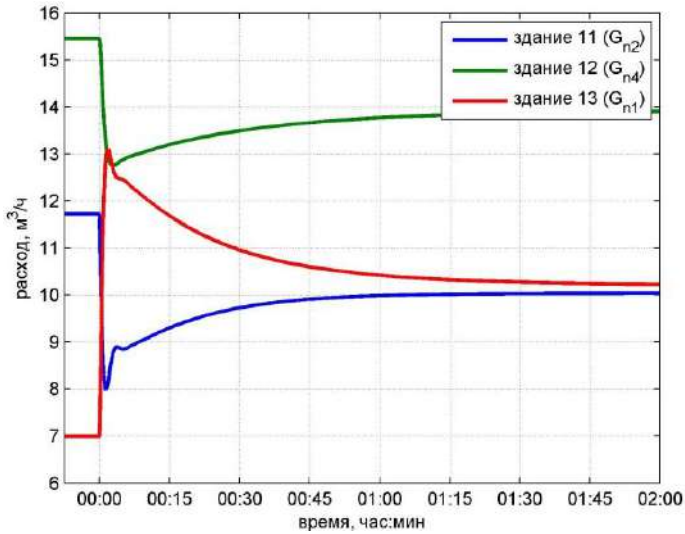
В начальный момент времени $t = 0$ выполняется переход автоматизированных ИТП зданий 11 и 12 в режим пониженного теплопотребления, путем уменьшения температуры T_{01} на 3°C и на 2°C соответственно. Длительность моделирования составляет 2 часа. Параметры систем отопления зданий, как объектов управления, представлены в табл. 3.1, параметры исполнительного механизма АМЕ 20, регулирующего клапана VB2, датчиков температуры ESMU и ESMT, представлены в табл. 3.2 – 3.4. Основные параметры для имитационного моделирования, представлены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

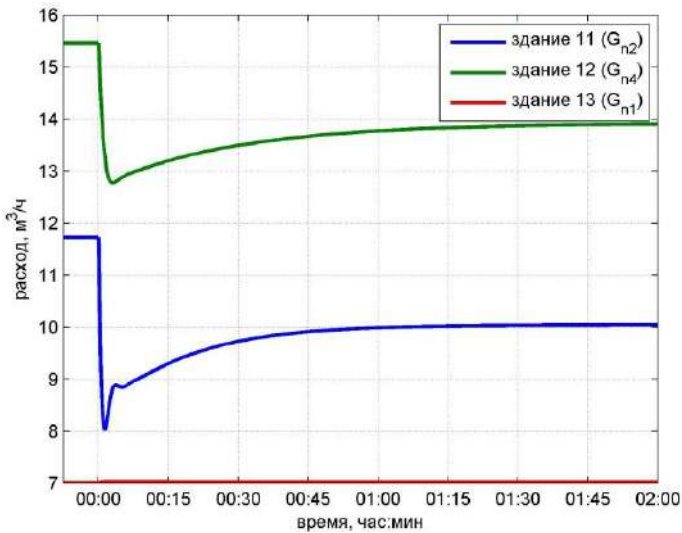
Основные параметры для моделирования

Наименование параметра, его обозначение	Величина, размерность		
	Здание 11	Здание 12	Здание 13
Температура теплоносителя в магистральной, T_1	70 °C		
Температура наружного воздуха, T_3	-1,0 °C		
Начальная температура теплоносителя в системе, T_2	47,9 °C	47,9 °C	52 °C
Максимальный расход на вводе в ИТП, G_1	14 м ³ /ч	16,4 м ³ /ч	
Максимальный расход в системе отопления здания, G_0	22 м ³ /ч	29 м ³ /ч	15,2 м ³ /ч
Параметры блока БР, X_d , X_p , X_u	0 °C, 80 °C, 12	0 °C, 80 °C, 5	
Коэффициент инжекции, u			2,2

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 3.26.



а



б

Рис. 3.26. Расчетные зависимости изменения расходов теплоносителя на вводе в тепловые пункты при $G_u = \text{const}$ (а) и $G_u \neq \text{const}$ (б)

За счет контура стабилизации температуры T_{01} в автоматизированных ИТП поддерживается заданный расход теплоносителя – G_{n2} уменьшается с 11,72 до 10,04 м³/ч; G_{n4}

уменьшается с 15,45 до 13,91 м³/ч. В тепловом пункте на основе нерегулируемого водоструйного элеваторного узла расход теплоносителя G_{n1} при этом, напротив, значительно увеличивается с 7 до 10,22 м³/ч в случае, если общий расход $G_u = \text{const}$, и с 7 до 7,02 м³/ч, если $G_u \neq \text{const}$.

Результаты экспериментальных исследований перераспределения расходов теплоносителя в установившемся режиме при отключении всех инженерных систем, кроме отопления, представлены в табл. 3.9. Из данных таблицы следует, что наибольшая относительная погрешность определения расхода не превышает $\pm 5\%$.

Таблица 3.9

**Экспериментальные расходы теплоносителя в системе отопления
трех зданий**

	Расход теплоносителя, м ³ /ч		
	Здание 11, G_{n2}	Здание 12, G_{n4}	Здание 13, G_{n1}
$G_u = \text{const}$	10,2	13,3	10,6
$G_u \neq \text{const}$	10,2	13,2	7,0

Анализ результатов показывает, что перераспределение соотношений расходов теплоносителя между распределенными объектами определяется их гидравлическими сопротивлениями, которые в свою очередь зависят от положения штока регулирующего клапана в локальных САР. Таким образом, если хотя бы в одном здании будет автоматизированный ИТП, а в остальных – нерегулируемые элеваторные узлы, ПВУ и т.д., то тогда, например, при программном снижении температуры в вечернее или ночное время в автоматизированном ИТП скачкообразно уменьшится расход потребляемого теплоносителя, что приведет к перераспределению расходов между другими объектами. Если в системе теплоснабжения используются сетевые насосы с постоянным (стабилизированным) общим расходом, то при этом ожидаемого снижения потребляемой тепловой энергии в целом по трем зданиям не произойдет; в противном случае, перераспределение расходов будет незначительным.

3.6. Имитационное моделирование системы управления отоплением комплекса пяти зданий

Исследуем возможности управления теплопотреблением комплекса из пяти зданий при теплоснабжении от автономного источника тепла с совместным применением автоматизированных ИТП и нерегулируемых элеваторных узлов (см. рис. 2.18). Структура имитационной модели системы аналогична, представленной на рис. 3.24, но вместо трех объектов содержит пять объектов. Структура системы отопления здания на основе ИТП представлена на рис. 2.17, ее имитационная модель представлена на рис. 3.3 – 3.11. Структура имитационной модели системы отопления на основе элеваторного узла представлена на рис. 3.25.

Положим, что здание 22 с наибольшей тепловой нагрузкой оборудовано автоматизированным ИТП, а остальные здания – элеваторными узлами. В начальный момент времени $t = 0$ выполняется переход ИТП здания 22 в режим пониженного теплопотребления, путем уменьшения температуры T_{01} на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Длительность моделирования для исследуемых случаев составляет 2 часа. Параметры систем отопления зданий, как объектов управления, представлены в табл. 3.1. Параметры исполнительного механизма АМЕ 20, регулирующего клапана VB2, датчиков температуры ESMU и ESMТ, представлены в табл. 3.2 – 3.4. Основные параметры для имитационного моделирования, представлены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

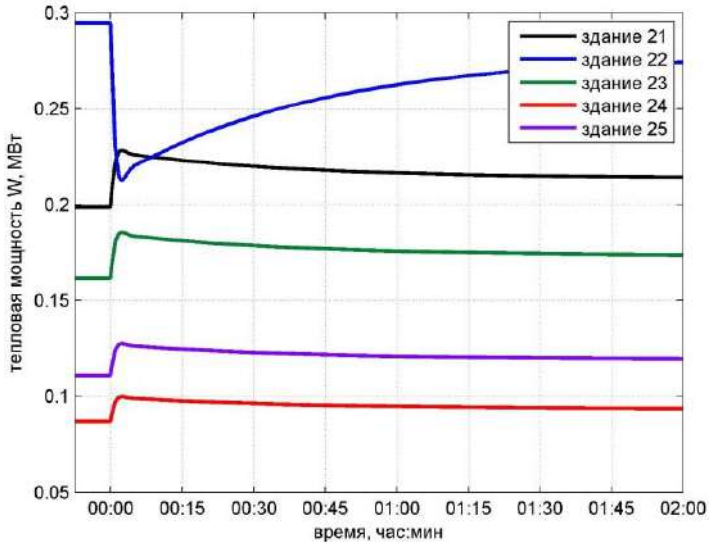
Основные параметры для моделирования

Наименование параметра, его обозначение и размерность	Величина для здания				
	21	22	23	24	25
Тепловая нагрузка W , ГДж/ч	0,894	1,325	0,726	0,391	0,499
Температура теплоносителя в магистрали T_1 , $^{\circ}\text{C}$	67				

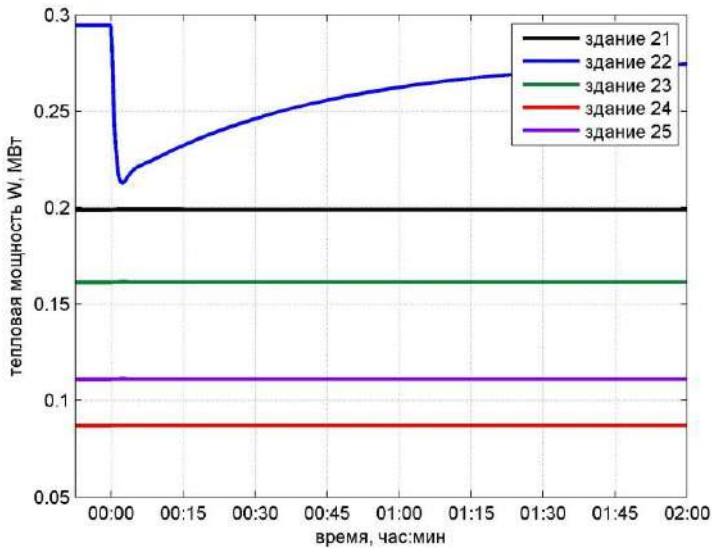
Наименование параметра, его обозначение и размерность	Величина для здания				
	21	22	23	24	25
Температура наружного воздуха T_3 , °C	-1,0				
Максимальный расход в системе отопления здания G_0 , м ³ /ч	10,0	22,0	6,8	5,5	6,1
Коэффициент инжекции u	1,8		1,7	3,6	2,3
Параметры блока БР: X_d , °C; X_p , °C; X_u		0; 80; 7			
Параметры блока БК: k_0 ; b_0 , °C		-1,4; 52			
Начальное положение штока клапана ИМ x_{30} , %		86,8			
Начальная температура теплоносителя T_{02} , °C	41,2	41,9	41,1	43,3	41,7
Начальный расход теплоносителя G_1 , м ³ /ч	6,62	10,08	5,35	3,15	3,78

Результаты расчета изменений тепловой мощности W зданий при переходе автоматизированного ИТП здания 22 в режим пониженного теплоснабжения, например, в ночной период времени, представлены на рис. 3.27. Из анализа результатов следует, что тепловая мощность для здания 22 скачкообразно снижается с 0,2944 МВт до 0,2128 МВт, после чего экспоненциально возрастает до 0,2761 МВт.

При постоянном общем расходе теплоносителя G_u в системе теплоснабжения, за счет перераспределения расходов тепловая мощность здания 21 увеличивается с 0,1987 МВт до 0,2136 МВт в установившемся режиме. Аналогично, тепловая мощность здания 23 увеличивается с 0,1614 МВт до 0,1735 МВт; тепловая мощность здания 24 увеличивается с 0,0870 МВт до 0,0936 МВт; тепловая мощность здания 25 увеличивается с 0,11112 МВт до 0,1194 МВт.



а



б

Рис. 3.27. Расчетная тепловая мощность комплекса пяти зданий с ИТП здания 22 при $G_u = \text{const}$ (а) и $G_u \neq \text{const}$ (б)

Если в системе теплоснабжения общий расход теплоносителя G_u изменяется, то перераспределение расходов незначительно, и тепловая

мощность здания 21 резко увеличивается с 0,1987 МВт до 0,1990 МВт, после чего плавно снижается до 0,1989 МВт. Аналогично, тепловая мощность здания 23 резко увеличивается с 0,1614 МВт до 0,1616 МВт, а затем плавно снижается до 0,1615 МВт; тепловая мощность здания 24 резко увеличивается с 0,0870 МВт до 0,08714 МВт, а затем плавно снижается до 0,0871 МВт; тепловая мощность здания 25 резко увеличивается с 0,11112 МВт до 0,1112 МВт, после чего плавно снижается до 0,11118 МВт.

В пределах длительности имитационного моделирования можно оценить потребление тепловой энергии каждым зданием комплекса. Значения расчетной потребляемой тепловой энергии зданиями представлены в табл. 3.11. При этом: Q_1 – потребляемая тепловая энергия без изменения режима работы тепловых пунктов; Q_2 – потребляемая тепловая энергия с учетом перехода ИТП здания 22 в режим пониженного теплоснабжения при $G_u = \text{const}$; Q_3 – потребляемая тепловая энергия с учетом перехода ИТП здания 22 в режим пониженного теплоснабжения при $G_u \neq \text{const}$.

Таблица 3.11

**Расчетная тепловая энергия комплекса зданий
с автоматизированным ИТП здания 22**

№ здания	Тепловая энергия Q_1 , ГДж	Тепловая энергия Q_2 , ГДж	Тепловая энергия Q_3 , ГДж	$\Delta Q_{21}=Q_2-Q_1$, ГДж	$\Delta Q_{31}=Q_3-Q_1$, ГДж
Здание 21	1,7886	1,9517	1,7899	0,1631	0,0013
Здание 22	2,6500	2,3444	2,3444	-0,3056	-0,3056
Здание 23	1,4526	1,5851	1,4537	0,1325	0,0011
Здание 24	0,7830	0,8544	0,7836	0,0714	0,0006
Здание 25	0,9994	1,0905	1,0000	0,0911	0,0006

Анализ результатов исследований показывает, что тепловая нагрузка здания 22 по отношению к общей нагрузке комплекса максимальна, и равна 34,53 %. Из расчётов следует, что для здания 22

за счет внедрения автоматизированного ИТП абсолютная экономия тепловой энергии составляет 0,3056 ГДж, а относительная 3,98 % по отношению ко всему комплексу зданий. Общая экономия тепловой энергии в системе с $G_u \neq \text{const}$, не смотря на увеличение расхода теплоносителя в нерегулируемых тепловых пунктах, составляет 0,3020 ГДж. В системе с $G_u = \text{const}$ наблюдается незначительный перерасход тепловой энергии (0,1525 ГДж), даже при внедрении автоматизированного ИТП для здания с наибольшей тепловой нагрузкой. Это обусловлено значительным увеличением расходов теплоносителя в зданиях с водоструйными элеваторами, и небольшим снижением перепада температур теплоносителя между подающим и обратным трубопроводами в ИТП здания 22 с 11,51 °С до 10,86 °С.

Рассмотрим случай, при котором 2 здания комплекса (см. рис. 2.18) с наибольшей тепловой нагрузкой оборудованы автоматизированными ИТП – здания 21 и 22; а остальные содержат тепловые пункты с неавтоматизированными элеваторными узлами. В начальный момент времени $t = 0$ выполняется переход ИТП зданий 21 и 22 в режим пониженного теплопотребления, путем уменьшения температуры T_{01} на 3 °С. Длительность моделирования составляет 2 часа. Основные исходные данные для имитационного моделирования представлены в табл. 3.1, 3.2 – 3.4, 3.12.

Таблица 3.12

Основные параметры для моделирования

Наименование параметра, его обозначение и размерность	Величина для здания				
	21	22	23	24	25
Тепловая нагрузка W , ГДж/ч	0,809	1,325	0,726	0,39 1	0,499
Температура теплоносителя в магистрале T_1 , °С	67				
Температура наружного воздуха T_3 , °С	-1,0				
Максимальный расход в системе отопления G_0 , м ³ /ч	15,8	22,0	6,8	5,5	6,1
Коэффициент инжекции u			1,7	3,6	2,3

Наименование параметра, его обозначение и размерность	Величина для здания				
	21	22	23	24	25
Параметры блока БР: X_{db} , °C; X_p , °C; X_u	0; 80; 9	0; 80; 7			
Параметры блока БК: k_0 ; b_0 , °C	-1,4; 52	-1,4; 52			
Начальное положение штока клапана ИМ x_{30} , %	83,1	86,8			
Начальная температура теплоносителя T_{02} , °C	43,6	41,9	41,1	43,3	41,7
Начальный расход теплоносителя G_1 , м ³ /ч	6,62	10,08	5,35	3,15	3,78

Результаты расчета изменений тепловой мощности W зданий при переходе ИТП в режим пониженного теплоснабжения представлены на рис. 3.28 и 3.29. Из анализа результатов следует, что для здания 21 W скачкообразно снижается с 0,1799 МВт до 0,1209 МВт, после чего плавно возрастает до 0,1696 МВт. Для здания 22 – скачкообразно снижается с 0,2944 до 0,2128 МВт, и плавно возрастает до 0,2761 МВт.

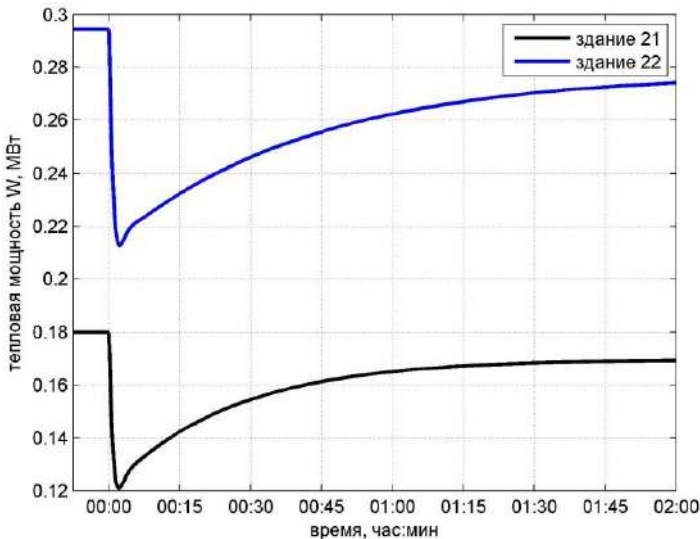


Рис. 3.28. Расчетная тепловая мощность зданий с автоматизированными ИТП:
а – здания 21–22 при $G_u = \text{const}$

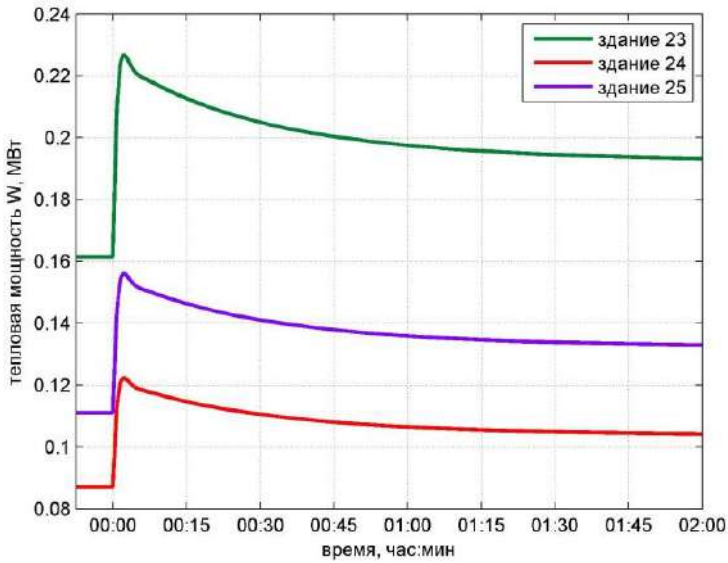


Рис. 3.28. Расчетная тепловая мощность зданий с элеваторными узлами (б) при $G_u = \text{const}$ (Окончание)

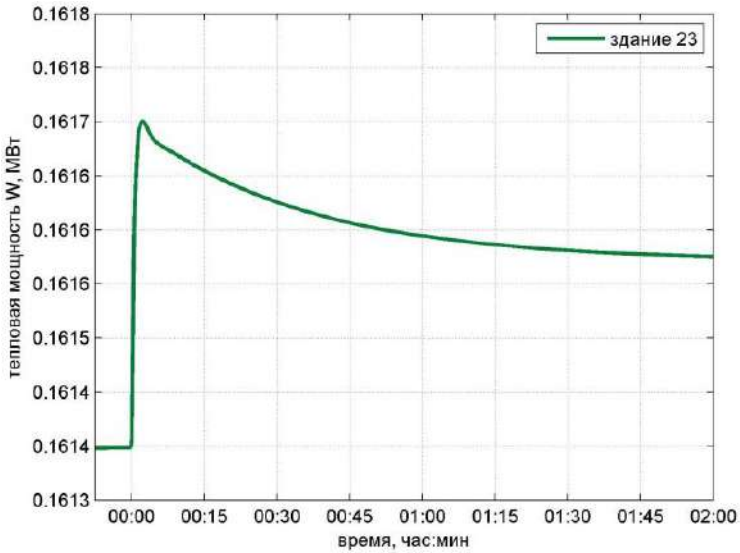


Рис. 3.29. Расчетная тепловая мощность зданий с неавтоматизированными тепловыми пунктами при $G_u \neq \text{const}$: а – здание 23

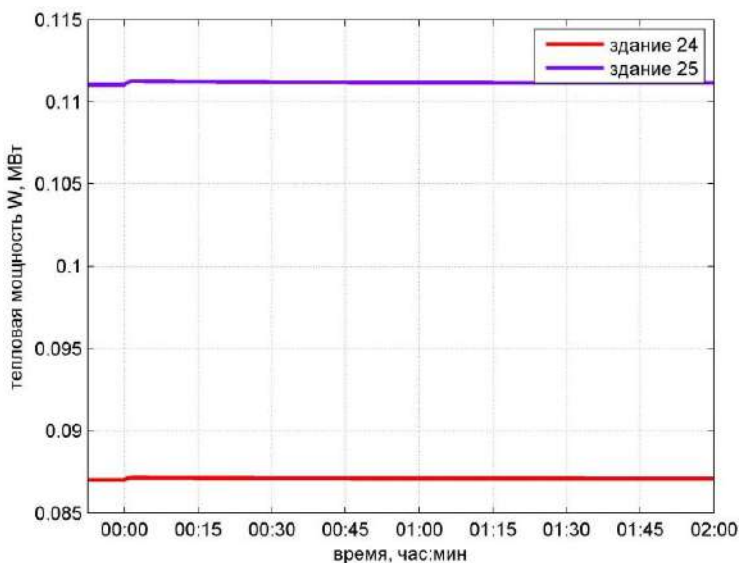


Рис. 3.29. Расчетная тепловая мощность зданий с неавтоматизированными тепловыми пунктами при $G_u \neq \text{const}$: б – здания 24 – 25 (Окончание)

Анализ показывает, что тепловая мощность для зданий с неавтоматизированными элеваторными узлами, напротив, увеличивается, т.е. исследуемый случай аналогичен предыдущему.

В целом, параметры потребления тепловой энергии комплексом зданий с двумя автоматизированными и тремя неавтоматизированными зданиями за время моделирования, представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Расчетная тепловая энергия комплекса с автоматизированными ИТП зданий 21 и 22

№ здания	Тепловая энергия Q_1 , ГДж	Тепловая энергия Q_2 , ГДж	Тепловая энергия Q_3 , ГДж	$\Delta Q_{21}=Q_2-Q_1$, ГДж	$\Delta Q_{31}=Q_3-Q_1$, ГДж
Здание 21	1,6190	1,4535	1,4535	-0,1655	-0,1655
Здание 22	2,6500	2,3444	2,3444	-0,3056	-0,3056
Здание 23	1,4526	1,7926	1,4544	0,3400	0,0018
Здание 24	0,7830	0,9663	0,7840	0,1833	0,0010
Здание 25	0,9994	1,2332	1,0005	0,2338	0,0011

Анализ результатов исследований показывает, что суммарная тепловая нагрузка зданий 21 и 22 составляет 56,9 %, при этом общая экономия тепловой энергии этими зданиями за счет внедрения автоматизированных ИТП составляет 0,4711 ГДж, или 6,28 % от суммарного потребления тепла комплексом зданий. По аналогии с предыдущим случаем, в системе с $G_u \neq \text{const}$ общая экономия тепловой энергии составляет 0,4672 ГДж, а в системе с $G_u = \text{const}$ напротив, наблюдается ее перерасход в пределах 0,2860 ГДж.

Рассмотрим случай, при котором три здания исследуемого комплекса с наибольшей тепловой нагрузкой оборудованы автоматизированными ИТП – здания 21, 22 и 23; а остальные содержат тепловые пункты с неавтоматизированными элеваторными узлами. В начальный момент времени $t = 0$ выполняется переход ИТП зданий 21 и 22 в режим пониженного теплопотребления, путем уменьшения T_{01} на 3 °С, а ИТП здания 23 в режим натопа за счет увеличения T_{01} на 3 °С с запаздыванием 15 мин. Длительность моделирования составляет 2 часа. Исходные данные для имитационного моделирования представлены в табл. 3.1, 3.2 – 3.4, 3.14.

Таблица 3.14

Основные параметры для моделирования

Наименование параметра, его обозначение и размерность	Величина для здания				
	21	22	23	24	25
Тепловая нагрузка W , ГДж/ч	0,809	1,325	0,664	0,391	0,499
Температура теплоносителя на вводе T_1 , °С	67				
Температура воздуха T_3 , °С	-1,0				
Максимальный расход в системе отопления G_0 , м ³ /ч	15,8	22,0	12,6	5,5	6,1
Коэффициент инжекции u				3,6	2,3
Параметры блока БР: X_b , °С; X_p , °С; X_u	0; 80; 9	0; 80; 7	0; 60; 9		
Параметры блока БК: k_0 ; b_0 , °С	-1,4; 52	-1,4; 52	-1,4; 52		
Начальное положение штока клапана ИМ x_{30} , %	83,1	86,8	79,2		

Наименование параметра, его обозначение и размерность	Величина для здания				
	21	22	23	24	25
Начальная температура теплоносителя T_{02} , °C	43,6	41,9	43,3	43,3	41,7
Начальный расход теплоносителя G_1 , м ³ /ч	6,62	10,08	5,35	3,15	3,78

Результаты расчета тепловой мощности W зданий комплекса с изменением режимов работы ИТП представлены на рис. 3.30. Анализ показывает, что тепловая мощность для зданий 21 – 22 снижается аналогично предыдущему случаю, а для здания 23 возрастает с 0,1477 МВт до 0,1561 МВт в установившемся режиме за счет увеличения температуры T_{01} на 3 °C. Одновременно с переходными процессами в автоматизированных ИТП протекают динамические процессы и в элеваторных узлах. В первые моменты времени тепловая мощность в них скачком увеличивается, а затем экспоненциально уменьшается в течение 15 мин.

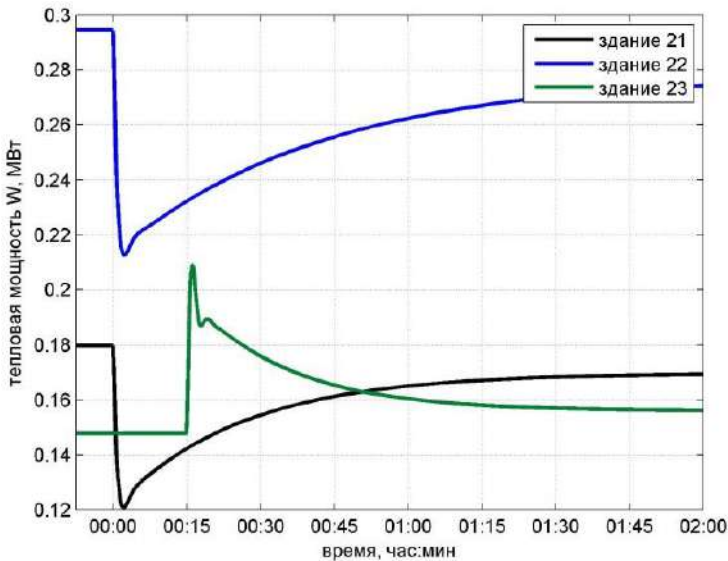


Рис. 3.30. Расчетная тепловая мощность пяти зданий с автоматизированными ИТП: а – здания 21-23 при постоянном расходе G_u

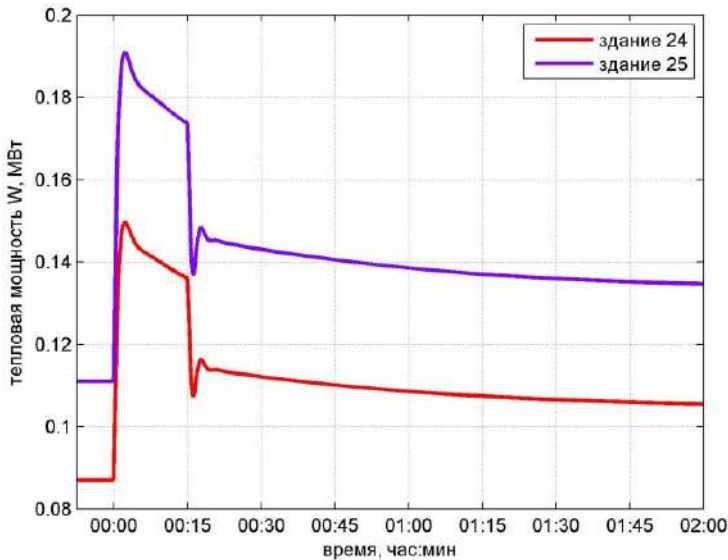


Рис. 3.30. Расчетная тепловая мощность пяти зданий с элеваторными узлами (б) при постоянном расходе G_u (Окончание)

При увеличении в ИТП здания 23 температуры T_{01} наблюдается скачкообразное уменьшение тепловой мощности в элеваторных узлах с последующим их плавным переходом в установившийся режим. В системах с постоянным расходом G_u суммарная тепловая мощность зданий с элеваторными узлами возрастает на 0,0409 МВт, а в системах с $G_u \neq \text{const}$ – на 0,00024 МВт.

В целом, параметры потребления тепловой энергии комплексом пяти зданий за время моделирования, представлены в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Расчетная тепловая энергия комплекса с автоматизированными ИТП зданий 21–23

№ здания	Тепловая энергия Q_1 , ГДж	Тепловая энергия Q_2 , ГДж	Тепловая энергия Q_3 , ГДж	$\Delta Q_{21}=Q_2-Q_1$, ГДж	$\Delta Q_{31}=Q_3-Q_1$, ГДж
Здание 21	1,6190	1,4535	1,4535	-0,1655	-0,1655
Здание 22	2,6500	2,3444	2,3444	-0,3056	-0,3056
Здание 23	1,3298	1,4462	1,4462	0,1164	0,1164

№ здания	Тепловая энергия Q_1 , ГДж	Тепловая энергия Q_2 , ГДж	Тепловая энергия Q_3 , ГДж	$\Delta Q_{21}=Q_2-Q_1$, ГДж	$\Delta Q_{31}=Q_3-Q_1$, ГДж
Здание 24	0,7830	0,9998	0,7836	0,2168	0,0006
Здание 25	0,9994	1,2759	1,0001	0,2765	0,0007

Внедрение автоматизированных ИТП для зданий с наибольшей тепловой нагрузкой приводит к заметной экономии тепловой энергии при различных режимах работы систем теплопотребления и применении сетевых насосов с мокрым ротором [122] без систем стабилизации расхода – до 0,3534 ГДж за время моделирования.

Таким образом, при динамических процессах в тепловых пунктах комплекса зданий наблюдаются существенные колебания величин тепловой мощности W , определяющиеся изменениями расхода теплоносителя и перепада температур в системах отопления. Наиболее заметно эти эффекты проявляются в нерегулируемых тепловых пунктах зданий с водоструйными элеваторными узлами, в особенности, при неизменном сетевом расходе теплоносителя G_n в системе теплоснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлено решение важной задачи математического моделирования процессов теплоснабжения комплекса зданий при децентрализованном теплоснабжении.

Разработанная математическая модель системы управления отоплением здания в виде структурной схемы, учитывает особенности математических моделей элементов САР и их нелинейные характеристики в структуре регулятора с интегрированным исполнительным механизмом, блоков переключения и регулирующего органа, а также нелинейность на участке смешивания теплоносителей в тепловом пункте. Модель позволяет исследовать процессы, протекающие в системе отопления здания с автоматизированным ИТП при изменении управляющих и возмущающих воздействий.

Разработанный метод математического моделирования системы управления децентрализованным отоплением комплекса зданий, основанный на математических моделях распределенных энергосистем и экспериментальных исследованиях, позволяет определять параметры теплоносителя при изменении температуры наружного воздуха, качественном регулировании тепла в автономных источниках, количественном регулировании в автоматизированных ИТП и др. Метод дает возможность исследовать взаимодействие автоматизированных ИТП и водоструйных элеваторных узлов с целью повышения эффективности управления распределенными энергосистемами зданий.

По результатам экспериментальных исследований систем отопления зданий были определены оценки параметров модели объектов управления, и показано, что коэффициент преобразования k находится в интервале $(0,784 \dots 0,906)$, постоянные времени $\tau_1 - (59,0 \dots 305,6)$ с, $\tau_2 - (565,2 \dots 2536,6)$ с. Параметрическая идентификация выполнялась с глубиной выборки $N = 500$ значений, периодом дискретизации $\tau_0 = 115$ с, а наибольшее значение функции потерь $E = 0,120987$. Однако найденные значения параметров модели в процессе функционирования системы могут незначительно изменяться, например, из-за изменений температуры наружного воздуха.

В математическом пакете MATLAB 7.10 (R2010a) с

использованием модуля расширения Simulink разработана структура имитационной модели системы управления децентрализованным отоплением комплекса зданий с автоматизированными ИТП и водоструйными элеваторными узлами. В результате имитационного моделирования установлено следующее:

- применение в автоматизированном ИТП ПИ- или И-регуляторов с различными значениями коэффициентов настройки X_d , X_p , X_u , не оказывает существенного влияния на теплотребление здания (31,82 МДж или 2,7 %), что связано с инерционностью системы отопления, но приводит к изменению перерегулирования (до 4,8 %);
- задание зоны нечувствительности $X_d = 1$ °С приводит к уменьшению колебательности по каналу регулирования " $G_1 - T_{01}$ " с 4-х до 2-х, но вносит статическую ошибку; расчетное потребление тепловой энергии снижается на 2,4 % (до 1134,68 МДж), что объясняется уменьшением температур T_{01} и T_{02} на величину статической ошибки до 53,7 и 43,1 °С соответственно;
- увеличение X_p приводит к уменьшению колебательности и увеличению времени регулирования T_{01} ; увеличение X_u приводит к увеличению колебательности (запас устойчивости снижается) и уменьшению времени регулирования T_{01} ; снижение X_p (менее 5) с увеличением X_u может привести к появлению автоколебаний;
- в рабочем интервале изменения X_p и X_u можно выделить три зоны различных диапазонов настройки коэффициентов регулятора, определяющие характер переходного процесса – монотонный, апериодический и колебательный; при уменьшении точности с $\pm 0,5$ °С до ± 1 °С максимальная колебательность в системе уменьшается с 198 до 91, а диапазон настроек для апериодического характера переходных процессов увеличивается с 14,78 до 85,12 %, для колебательного – снижается с 82,46 до 10,92 %.

Показано, что для комплекса трех зданий с различными инженерными системами зданий изменение расхода G_{1j} через любой автоматизированный объект приводит к перераспределению расходов

теплоносителя между распределенными объектами, определяющемуся их гидравлическими сопротивлениями (зависят от положения штоков регулирующих клапанов в локальных САР). При отключении 1-го ИТП расход в здании с элеваторным узлом увеличивается на 6 %, отключении 2-го ИТП – увеличивается на 8 %, а одновременно двух ИТП – увеличивается на 28 %. В нерегулируемых системах отопления это приводит к перетопу, а в целом по комплексу зданий – к снижению экономии тепловой энергии.

Для комплекса трех зданий с двумя автоматизированными ИТП и одним элеваторным узлом установлено, что при переходе ИТП в режим пониженного теплopotребления (на 3 и 2 °С), расход теплоносителя в первом здании снижается на 14,33 %, во втором здании – на 9,97 %, а в здании с элеваторным узлом – увеличивается на 46 %. Экспериментальные исследования показывают, что наибольшая погрешность при моделировании не превышает ± 5 °С.

В результате имитационного моделирования системы отопления комплекса пяти зданий с двумя автоматизированными ИТП и тремя элеваторными узлами было установлено, что при переходе ИТП зданий с наибольшей тепловой нагрузкой (56,9 %) в режим пониженного теплopotребления (на 3 °С), общая экономия тепловой энергии зданиями с автоматизированными ИТП составляет 6,28 % от суммарного потребления тепла комплексом зданий. При стабилизированном сетевом расходе перерасход тепла составил 3,81 %, а при изменяющемся – экономия составила 6,22 %.

Таким образом, при реконструкциях существующих систем теплopotребления зданий с водоструйными элеваторными узлами необходимо учитывать, что частичное создание автоматизированных ИТП для комплекса зданий не всегда приводит к заметной экономии тепловой энергии при различных режимах работы систем теплopotребления. Для устранения этой проблемы и решения задачи энергосбережения необходимо применять в структуре АСДУ имитационное моделирование, основанное на математических моделях и экспериментальных исследованиях распределенных энергосистем зданий.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Исходные данные, полученные в результате экспериментальных исследований систем отопления зданий и сооружений для первого комплекса зданий представлены в табл. П1, для второго комплекса зданий – в табл. П2.

Таблица П1

Экспериментальные данные температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах первого комплекса зданий

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
67,39063	53,97656	57,5	45,45313	45,83594	41,42188
69,88281	54,02344	57,53906	45,48438	45,71875	41,36719
68,11719	54,07031	57,59375	45,47656	45,58594	41,38281
69,4375	54,14063	57,63281	45,55469	45,52344	41,32031
69,74219	54,15625	57,63281	45,54688	45,46094	41,29688
69,86719	54,1875	57,57031	45,58594	45,48438	41,25781
69,16406	54,23438	57,58594	45,59375	45,51563	41,24219
70,10156	54,28906	57,53906	45,67969	45,46094	41,1875
68,32031	54,35938	57,5625	45,69531	45,42188	41,16406
67,84375	54,45313	57,6875	45,74219	45,4375	41,13281
67,76563	54,51563	57,72656	45,75781	45,5625	41,13281
67,75	54,51563	57,84375	45,82813	45,45313	41,15625
68,08594	54,58594	57,84375	45,82813	45,375	41,13281
68,14063	54,58594	57,88281	45,84375	45,44531	41,11719
68,32031	54,48438	57,92188	45,89844	45,4375	41,08594
68,70313	54,41406	57,97656	45,89844	45,48438	41,0625
68,80469	54,35156	58,03125	45,92188	45,42969	41,07813
68,75	54,33594	58,03906	45,99219	45,42969	41,0625
68,875	54,30469	58,07813	46	45,35938	41,04688
69,11719	54,34375	58,11719	46,05469	45,38281	41,0625
69,125	54,41406	58,14844	46,03906	45,28906	41,03906
69,07813	54,45313	58,14063	46,0625	45,26563	41,01563
69,10156	54,47656	58,19531	46,09375	45,20313	40,94531
69,07031	54,53125	58,28125	46,125	45,17969	40,92969
69,0625	54,60156	58,28125	46,14063	45,13281	40,92969
69,0625	54,64844	58,32031	46,17969	45,10156	40,89844
69,13281	54,6875	58,33594	46,16406	45,05469	40,90625
69,11719	54,73438	58,40625	46,23438	45,07031	40,89844
69,17969	54,77344	58,45313	46,27344	44,99219	40,875
69,20313	54,8125	58,48438	46,27344	44,98438	40,82031
69,26563	54,82813	58,50781	46,32031	45	40,78125

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
69,27344	54,85156	58,58594	46,34375	44,92188	40,74219
69,3125	54,86719	58,64063	46,35938	44,89063	40,75
69,5	54,92969	58,66406	46,375	44,86719	40,71875
69,45313	54,92969	58,71875	46,4375	44,79688	40,69531
69,45313	54,9375	58,74219	46,4375	44,80469	40,66406
69,34375	54,95313	58,65625	46,45313	44,75781	40,61719
69,28125	54,97656	58,61719	46,48438	44,70313	40,60938
69,13281	55,03125	58,5625	46,49219	44,70313	40,60938
68,97656	55,02344	58,67969	46,55469	44,64063	40,57813
68,75781	55,03906	58,64844	46,57031	44,65625	40,57031
68,08594	55,05469	58,67969	46,58594	44,64844	40,54688
67,46875	55,03125	58,57813	46,625	44,55469	40,50781
65,11719	55,03125	58,03906	46,6875	44,57031	40,49219
62,53125	55,01563	57,15625	46,65625	44,46875	40,4375
60,35938	54,98438	55,91406	46,64844	44,46094	40,44531
58,74219	54,85938	54,73438	46,64844	44,22656	40,40625
57,25	54,60938	53,47656	46,63281	43,95313	40,34375
56,21875	54,28125	52,50781	46,57031	43,57813	40,3125
55,3125	53,73438	51,53906	46,48438	43,04688	40,13281
54,47656	53,05469	50,85156	46,32031	42,90625	40,01563
53,83594	52,34375	50,21094	46,13281	42,53906	39,82813
53,24219	51,57031	49,61719	45,88281	42,27344	39,60938
52,82031	50,86719	49,25	45,60938	41,82813	39,54688
52,57813	50,11719	48,82813	45,28906	41,375	39,55469
52,57813	49,44531	48,53125	45,00781	40,98438	39,0625
52,78125	48,73438	48,33594	44,59375	40,60938	38,6875
53,11719	48,16406	48,30469	44,25	40,30469	38,4375
53,625	47,55469	48,39063	43,85938	40,04688	38,16406
54,125	47,09375	48,53125	43,47656	39,8125	37,96094
54,6875	46,67188	48,72656	43,14063	39,60156	37,71094
55,03906	46,625	48,97656	42,80469	39,51563	37,5
55,50781	46	49,20313	42,5	39,54688	37,30469
55,625	45,82031	49,50781	42,19531	39,25	37,09375
55,78906	45,67188	49,5625	42,03125	38,85938	36,88281
56,15625	45,60938	49,73438	42,0625	38,76563	36,73438
56,66406	45,625	49,83594	41,96094	38,67969	36,5625
57,34375	45,58594	49,96875	41,35938	38,49219	36,38281
57,96875	45,66406	50,21875	41,24219	38,42188	36,23438

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
58,75781	45,69531	50,52344	41,17188	38,46094	36,10938
59,57813	45,77344	50,96094	41,08594	38,44531	36,00781
60,4375	45,89063	51,40625	41,04688	38,53125	35,89063
61,33594	46,46875	51,96875	41,01563	38,44531	35,83594
62,07813	46,42969	52,47656	40,99219	38,41406	35,76563
62,77344	46,53125	52,98438	40,96875	38,33594	35,71875
63,35938	46,85156	53,39063	41,02344	38,24219	35,66406
64,02344	47,17188	54,125	41,10938	38,21094	35,63281
64,38281	47,51563	54,30469	41,21875	38,10156	35,54688
64,72656	47,89844	54,53906	41,30469	37,99219	35,47656
65,00781	48,34375	54,86719	41,94531	37,89063	35,38281
65,33594	48,65625	55,10938	42,01563	37,79688	35,3125
65,76563	49,0625	55,375	41,99219	37,71094	35,23438
66,07813	49,41406	55,65625	42,03906	37,66406	35,125
66,44531	49,69531	55,89844	42,22656	37,67969	35,03125
66,72656	50,10938	56,19531	42,45313	37,76563	35,00781
66,84375	50,39063	56,34375	42,60156	37,78906	34,96875
66,92188	50,71094	56,48438	42,79688	37,83594	34,92188
67,05469	51,02344	56,59375	42,98438	37,75781	34,88281
67,10938	51,32031	56,75781	43,21875	37,64063	34,84375
67,15625	51,59375	56,80469	43,39844	37,58594	34,8125
67,22656	51,83594	56,86719	43,57031	37,51563	34,80469
67,29688	52,05469	57,01563	43,74219	37,39063	34,71094
67,32031	52,25	57,03906	44,05469	37,30469	34,6875
67,45313	52,44531	57,32031	44,125	37,17188	34,57813
67,52344	52,57813	57,71875	44,25781	37,09375	34,55469
67,70313	52,73438	57,85156	44,46094	37,03906	34,46875
67,625	52,85156	57,97656	44,57813	36,97656	34,36719
67,73438	53	58,03125	44,71875	36,9375	34,3125
67,79688	53,11719	58,125	44,83594	36,91406	34,27344
67,71875	53,21094	57,92969	44,98438	36,99219	34,21094
67,97656	53,30469	57,86719	45,15625	37,13281	34,1875
68,08594	53,41406	57,90625	45,21875	37,25	34,17969
68,45313	53,51563	57,92969	45,33594	37,38281	34,1875
68,51563	53,60156	58,05469	45,46094	37,59375	34,22656
68,5	53,64063	58,16406	45,51563	37,89063	34,29688
68,73438	53,71094	58,32813	45,61719	38,22656	34,35156
68,82813	53,76563	58,49219	45,6875	38,57031	34,47656

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
68,83594	53,85156	58,64844	45,79688	39,35156	34,61719
68,89844	53,89844	58,69531	45,8125	39,35938	34,78125
68,97656	54,03125	58,76563	45,89844	39,5625	34,96094
68,99219	54,11719	58,83594	45,97656	39,83594	35,17969
69,13281	54,21875	58,96875	46,0625	40,21094	35,35156
69,3125	54,27344	59,07031	46,09375	40,46094	35,57031
69,40625	54,375	59,21094	46,16406	40,85156	35,78906
69,52344	54,46875	59,35156	46,25781	41,36719	35,97656
69,57813	54,50781	59,25781	46,32031	41,75	36,21875
64,25	54,625	59,05469	46,36719	42,26563	36,5
67,3125	54,64844	58,5625	46,44531	42,74219	36,79688
62,96875	54,67188	58,0625	46,49219	43,24219	37,15625
66,10156	54,64844	57,46094	46,51563	43,66406	37,42969
65,875	54,52344	56,66406	46,57031	44,03906	37,76563
62,73438	54,27344	56,32031	46,53125	44,44531	38,0625
66,95313	53,94531	56,20313	46,54688	44,75	38,375
67,97656	53,67969	56,00781	46,54688	45,03125	38,6875
66,63281	53,4375	55,92188	46,44531	45,35156	39,40625
67,36719	53,29688	55,89063	46,35938	45,57813	39,36719
68,71875	53,20313	55,6875	46,27344	45,76563	39,57813
68,82031	53,15625	55,625	46,17188	46,0625	39,85156
69,21094	53,28906	55,52344	46	46,19531	40,0625
69,38281	53,35938	55,5	45,875	46,35938	40,26563
69,60938	53,35938	55,48438	45,72656	46,57031	40,47656
69,95313	53,53906	55,5625	45,625	46,67188	40,64063
70,21875	53,73438	55,77344	45,50781	46,875	40,84375
70,4375	53,95313	55,76563	45,39063	46,875	40,99219
70,55469	54,14063	55,73438	45,28125	47,125	41,1875
70,76563	54,32031	55,66406	45,17969	47,26563	41,49219
70,90625	54,51563	55,70313	45,09375	47,23438	41,48438
70,83594	54,71875	55,48438	45,04688	47,35938	41,58594
63,375	54,875	55,40625	45,05469	47,40625	41,73438
65,51563	55,00781	55,14844	44,88281	47,35156	41,82813
62,76563	55,00781	55,10938	44,8125	47,23438	41,9375
61,32031	55	55,08594	44,78125	47,01563	42
66,40625	54,9375	55,11719	44,70313	47,08594	42,02344
62,85938	54,60156	55,10938	44,65625	47,0625	42,04688
64,32031	54,10156	55,03906	44,60938	47,03125	42,0625

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
67,28906	53,64844	54,96094	44,55469	47,03125	42,08594
64,625	53,27344	55,02344	44,51563	47,04688	42,11719
68,51563	53,01563	55,13281	44,44531	46,97656	42,125
68,9375	52,92969	55,26563	44,39844	47	42,14063
69,42969	52,88281	55,26563	44,36719	47,00781	42,20313
69,74219	52,92969	55,26563	44,30469	46,99219	42,1875
69,8125	53,02344	55,34375	44,30469	47	42,21875
69,89063	53,16406	55,27344	44,30469	47	42,21875
69,91406	53,42969	55,08594	44,28125	46,9375	42,21875
70,0625	53,6875	54,79688	44,21875	46,82813	42,26563
70,125	53,91406	54,6875	44,23438	46,72656	42,23438
70,20313	54,15625	54,60938	44,22656	46,75	42,21094
70,19531	54,35938	54,64063	44,25	46,78906	42,22656
70,24219	54,54688	54,53906	44,25	46,77344	42,25
70,32031	54,70313	54,4375	44,24219	46,74219	42,22656
68,20313	54,90625	54,39063	44,21875	46,75781	42,21094
66,40625	54,98438	54,39063	44,21875	46,73438	42,20313
60,46094	55,02344	54,47656	44,19531	46,6875	42,16406
65,34375	54,96094	54,5	44,09375	46,64844	42,16406
64,30469	54,89063	54,73438	44,00781	46,66406	42,15625
61,04688	54,70313	54,78906	43,9375	46,6875	42,15625
66,57813	54,25	54,69531	43,9375	46,64063	42,13281
65,01563	53,77344	54,76563	43,91406	46,57813	42,16406
67,625	53,3125	54,74219	43,92188	46,53906	42,125
67,9375	53,04688	54,61719	43,84375	46,42188	42,10156
67,96094	52,90625	54,44531	43,83594	46,38281	42,07031
68,39063	52,86719	54,54688	43,84375	46,35156	42,02344
68,39844	52,9375	54,50781	43,84375	46,29688	41,97656
68,35156	53,03906	54,4375	43,80469	46,21875	41,96875
68,47656	53,21094	54,375	43,76563	46,17188	41,92969
68,47656	53,33594	54,53906	43,78125	46,10938	41,875
68,92969	53,46875	54,71875	43,77344	46,07813	41,88281
68,92188	53,60938	54,72656	43,78125	46,05469	41,82813
68,875	53,75	54,6875	43,75	45,96875	41,75
68,89844	53,89063	54,67188	43,72656	45,91406	41,72656
68,94531	53,98438	54,70313	43,71875	45,89844	41,71875
68,89844	54,08594	54,67969	43,71875	45,84375	41,6875
68,92188	54,17188	54,85938	43,71875	45,76563	41,64063

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
68,92969	54,28125	55,09375	43,73438	45,73438	41,63281
69	54,35156	55,23438	43,75	45,67188	41,64063
68,99219	54,38281	55,26563	43,75781	45,66406	41,64063
68,91406	54,4375	55,23438	43,75781	45,625	41,59375
62,58594	54,51563	55,22656	43,78906	45,57813	41,61719
66,14844	54,51563	54,97656	43,80469	45,55469	41,54688
63,51563	54,5	54,80469	43,82031	45,44531	41,35156
63,08594	54,42969	54,74219	43,82813	45,39844	41,32813
65,69531	54,3125	54,69531	43,89063	45,32031	41,27344
65,32813	54,03906	54,6875	43,92969	45,28125	41,25
65,98438	53,61719	54,65625	43,89844	45,24219	41,19531
66,59375	53,32031	54,48438	43,92188	45,125	41,14063
66,60156	53,10938	54,53125	43,89844	45,03906	41,08594
66,85938	52,99219	54,60156	43,92969	45,1875	41,05469
66,875	52,97656	54,66406	43,92969	45,35938	41,03906
66,95313	52,96094	54,72656	43,89844	45,53125	41,07031
67	52,98438	54,75	43,875	45,63281	41,07031
67,07031	53,01563	54,71094	43,86719	45,6875	41,27344
67,09375	53,03906	54,82031	43,85938	45,66406	41,27344
67,32031	53,125	55,03125	43,84375	45,67969	41,24219
67,40625	53,19531	55,19531	43,83594	45,76563	41,25781
67,5	53,28125	55,24219	43,83594	45,70313	41,28125
67,53906	53,32813	55,3125	43,84375	45,72656	41,25781
67,53906	53,39844	55,32031	43,89063	45,76563	41,28906
67,50781	53,42969	55,10938	43,89844	45,79688	41,30469
67,53125	53,53125	54,92969	43,91406	45,75781	41,3125
67,52344	53,59375	54,8125	43,89063	45,69531	41,3125
67,51563	53,65625	54,75	43,92969	45,69531	41,28906
67,5625	53,67188	54,80469	43,91406	45,71094	41,33594
67,49219	53,69531	54,79688	43,92969	45,71875	41,30469
67,52344	53,76563	54,82031	43,92969	45,6875	41,28906
67,625	53,78906	54,85938	43,92969	45,71875	41,33594
67,60156	53,8125	54,85938	43,94531	45,72656	41,3125
67,625	53,82031	54,89844	43,94531	45,6875	41,32031
67,60938	53,88281	54,83594	43,91406	45,70313	41,32031
67,55469	53,86719	54,88281	43,92188	45,66406	41,29688
67,49219	53,88281	54,85938	43,94531	45,66406	41,32031
67,54688	53,92188	54,80469	43,91406	45,67188	41,33594

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
67,47656	53,90625	54,85938	43,92969	45,64063	41,3125
67,53125	53,92188	54,96094	43,94531	45,70313	41,3125
67,53906	53,9375	55,20313	43,94531	45,76563	41,34375
67,67969	53,92188	55,28125	43,96875	45,59375	41,35156
67,71875	53,92188	55,41406	43,95313	45,07031	41,33594
67,69531	53,94531	55,48438	43,92969	43,98438	41,25
67,82031	53,94531	55,46875	44,0625	42,63281	41,07031
67,82813	53,95313	55,28906	43,98438	41,63281	40,6875
67,94531	53,99219	55,17969	44,07031	40,8125	40,21875
67,96094	53,99219	55,08594	44,17188	40,20313	39,66406
67,98438	54,04688	55	44,17188	39,64063	39,17969
68,04688	54,05469	55,07031	44,23438	39,19531	39,03906
68,08594	54,09375	55,00781	44,21094	39,03125	38,21875
68,04688	54,10156	55,14844	44,21094	38,30469	37,71875
68,03906	54,13281	55,11719	44,25	38,27344	37,3125
65,33594	54,16406	55,10156	44,25	38,5625	36,95313
66,1875	54,20313	55,14063	44,24219	39,05469	36,65625
63,28906	54,16406	55,15625	44,21094	38,79688	36,52344
66,40625	54,125	55,10156	44,20313	38,83594	36,40625
63,41406	54,05469	55,15625	44,22656	38,5	36,29688
66,49219	53,85938	55,15625	44,21875	38,73438	36,17969
67,16406	53,60156	55,14844	44,25	38,75781	36,0625
67,3125	53,36719	55,4375	44,21875	38,53906	35,97656
67,46875	53,29688	55,70313	44,28125	38,8125	35,89063
67,49219	53,23438	55,85938	44,27344	38,78906	35,82031
67,91406	53,21094	55,92188	44,23438	38,625	35,75781
68,21094	53,32031	56,04688	44,28125	38,76563	35,69531
68,33594	53,41406	55,92969	44,24219	38,91406	35,66406
68,46875	53,46094	55,74219	44,24219	38,61719	35,61719
68,66406	53,53125	55,64844	44,25	38,53125	35,60156
68,95313	53,625	55,67188	44,28125	38,92969	35,52344
69,05469	53,74219	55,61719	44,29688	38,71875	35,47656
69,00781	53,89063	55,66406	44,33594	38,83594	35,44531
69,04688	53,99219	55,79688	44,375	38,625	35,42969
69,08594	54,125	55,75781	44,375	38,63281	35,375
69,05469	54,1875	55,85156	44,41406	38,63281	35,375
69,03906	54,3125	55,84375	44,40625	38,84375	35,32813
69,04688	54,39844	55,79688	44,41406	38,84375	35,32813

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
67,88281	54,50781	55,78125	44,41406	38,84375	35,32813
63,625	54,5625	55,82813	44,42188	38,8125	35,27344
62,27344	54,5625	56	44,44531	38,8125	35,27344
64,89844	54,48438	56,26563	44,44531	38,9375	35,21875
60,97656	54,34375	56,35156	44,46875	38,77344	35,1875
64,59375	54,14844	56,375	44,49219	38,89844	35,21094
64,61719	53,78125	56,42188	44,54688	38,875	35,21094
66,10156	53,34375	56,35156	44,53125	38,85938	35,17969
64,09375	52,96875	56,07031	44,5625	38,86719	35,15625
66,50781	52,6875	55,76563	44,60938	38,85156	35,14063
67,03125	52,53125	55,60938	44,59375	38,91406	35,16406
67,23438	52,46094	55,57031	44,60938	38,90625	35,17188
67,40625	52,54688	55,60156	44,65625	38,8125	35,13281
67,52344	52,53906	55,63281	44,64844	38,89063	35,16406
67,67969	52,60156	55,64063	44,66406	38,88281	35,16406
67,78906	52,76563	55,66406	44,64063	38,875	35,125
67,95313	52,91406	55,67188	44,61719	38,85156	35,14844
67,91406	53,02344	55,67188	44,61719	38,88281	35,11719
67,99219	53,1875	55,67188	44,64844	38,86719	35,14844
67,99219	53,36719	55,61719	44,57031	38,89844	35,16406
67,89063	53,46094	55,67969	44,60156	38,85938	35,1875
67,82813	53,59375	55,8125	44,61719	38,85938	35,17188
67,89063	53,72656	55,95313	44,60156	38,83594	35,19531
67,8125	53,8125	56,03906	44,60156	38,79688	35,15625
67,76563	53,86719	55,96094	44,59375	38,82813	35,16406
67,70313	53,92969	55,94531	44,57031	38,82813	35,20313
67,625	53,96875	55,8125	44,59375	38,89844	35,19531
67,58594	54,00781	55,58594	44,60938	38,80469	35,21094
67,4375	54,03125	55,32031	44,60156	38,85938	35,19531
67,375	54,05469	55,22656	44,60156	38,85156	35,21094
67,3125	54,05469	55,11719	44,60156	38,83594	35,17188
67,39063	54,07813	55,0625	44,57813	38,88281	35,20313
67,40625	54,08594	55,10938	44,49219	38,85938	35,21875
67,32813	54,05469	55,22656	44,51563	38,84375	35,21094
67,35156	54	55,21875	44,47656	38,84375	35,22656
67,375	54,01563	55,24219	44,4375	38,875	35,24219
67,4375	53,96094	55,22656	44,4375	38,83594	35,25781
67,47656	53,97656	55,25	44,38281	38,85156	35,24219

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
67,42188	53,92188	55,21875	44,34375	38,83594	35,26563
67,25781	53,98438	55,17969	44,3125	38,89063	35,28125
65,88281	53,9375	55,21875	44,28906	38,82031	35,29688
65,60156	53,92188	55,23438	44,30469	38,85938	35,28906
65,5625	53,92969	55,4375	44,29688	38,83594	35,29688
65,55469	53,85938	55,67188	44,30469	38,80469	35,32031
65,51563	53,78906	55,69531	44,32813	38,80469	35,30469
65,375	53,64844	55,79688	44,32813	38,80469	35,30469
65,22656	53,50781	55,69531	44,30469	38,83594	35,32813
65,07813	53,34375	55,57031	44,29688	38,85156	35,30469
65,39063	53,27344	55,39063	44,29688	38,88281	35,32813
66,40625	53,13281	55,20313	44,3125	38,82813	35,33594
66,64063	53,04688	55,11719	44,32813	38,86719	35,28906
66,66406	52,94531	55,19531	44,32031	38,83594	35,29688
66,71875	52,85938	55,23438	44,32813	38,85938	35,29688
66,71094	52,82813	55,25781	44,30469	38,85156	35,28125
66,69531	52,9375	55,25	44,3125	38,85156	35,32031
66,69531	52,97656	55,27344	44,30469	38,86719	35,28125
66,75781	53,05469	55,24219	44,30469	39	35,27344
66,75	53,10156	55,21875	44,29688	39,09375	35,26563
66,73438	53,11719	55,21094	44,30469	38,9375	35,27344
66,85938	53,17969	55,21875	44,33594	39,07031	35,27344
66,85156	53,20313	55,13281	44,30469	38,71094	35,28906
66,88281	53,25781	55,17188	44,28125	38,92188	35,25781
66,97656	53,28906	55,21094	44,30469	39,00781	35,27344
67,03906	53,36719	55,32813	44,34375	38,79688	35,29688
67,0625	53,375	55,51563	44,29688	38,63281	35,28906
67,11719	53,41406	55,71094	44,30469	38,6875	35,27344
67,04688	53,40625	55,72656	44,30469	38,65625	35,26563
67,03125	53,48438	55,6875	44,30469	38,69531	35,28125
67,02344	53,53125	55,61719	44,30469	38,60156	35,25
66,94531	53,53906	55,53125	44,32031	38,67969	35,27344
66,82813	53,51563	55,34375	44,29688	38,71094	35,25781
66,74219	53,58594	55,15625	44,29688	38,6875	35,23438
66,69531	53,55469	55,11719	44,3125	38,70313	35,23438
66,70313	53,5625	55,05469	44,30469	38,66406	35,21094
66,74219	53,58594	55,04688	44,3125	38,67969	35,23438
66,72656	53,5625	55,19531	44,32031	38,64844	35,22656

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
66,64063	53,52344	55,25	44,3125	38,67188	35,24219
66,67188	53,51563	55,27344	44,28125	38,67188	35,26563
66,67188	53,51563	55,24219	44,28125	38,73438	35,25781
66,64844	53,52344	55,27344	44,29688	38,70313	35,25781
66,70313	53,46875	55,25781	44,29688	38,70313	35,25781
66,79688	53,49219	55,30469	44,32031	38,72656	35,27344
66,76563	53,46094	55,30469	44,3125	38,6875	35,23438
66,75	53,48438	55,32031	44,32031	38,73438	35,25
66,69531	53,5	55,26563	44,30469	38,64063	35,24219
66,6875	53,48438	55,28906	44,30469	38,72656	35,25
66,65625	53,50781	55,40625	44,32031	38,67969	35,25
66,63281	53,49219	55,60938	44,32813	38,6875	35,25781
66,60156	53,5	55,73438	44,30469	38,64063	35,22656
66,48438	53,50781	55,75	44,30469	38,74219	35,25
66,4375	53,47656	55,72656	44,30469	38,64063	35,25781
66,32813	53,46875	55,63281	44,29688	38,67188	35,20313
66,23438	53,4375	55,42188	44,29688	38,70313	35,23438
66,24219	53,42969	55,17188	44,30469	38,70313	35,22656
66,28125	53,4375	55,10938	44,32031	38,67969	35,21875
66,35938	53,38281	55,14063	44,36719	38,67188	35,20313
66,36719	53,35938	55,15625	44,35156	38,76563	35,23438
66,39063	53,32813	55,125	44,35156	38,73438	35,27344
66,41406	53,3125	55,17188	44,34375	38,73438	35,25781
66,49219	53,30469	55,17188	44,32813	38,76563	35,26563
66,50781	53,28906	55,19531	44,28906	38,79688	35,29688
66,51563	53,26563	55,27344	44,33594	38,79688	35,24219
66,55469	53,28125	55,3125	44,32813	38,79688	35,25
66,5	53,28125	55,28906	44,33594	38,83594	35,30469
66,46875	53,27344	55,26563	44,32813	38,78906	35,29688
66,34375	53,28125	55,22656	44,30469	38,82813	35,28906
66,3125	53,30469	55,21094	44,3125	38,82813	35,32813
66,375	53,29688	55,10938	44,27344	38,88281	35,32813
66,28906	53,32031	55,10156	44,3125	38,8125	35,33594
66,28125	53,3125	55,11719	44,30469	38,86719	35,33594
66,25781	53,26563	55,30469	44,29688	38,92188	35,33594
66,22656	53,25	55,53906	44,32031	38,90625	35,36719
66,28125	53,28125	55,55469	44,29688	38,88281	35,375
66,28125	53,27344	55,64063	44,3125	39,15625	35,40625

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
66,30469	53,21875	55,63281	44,32031	39,04688	35,375
66,25781	53,21875	55,57031	44,3125	39,21094	35,41406
66,23438	53,21094	55,29688	44,32813	39,03125	35,375
66,11719	53,19531	55,17188	44,32813	39,24219	35,42969
66,07031	53,20313	55,14063	44,32031	39,22656	35,41406
66,07813	53,20313	55,04688	44,30469	39,17969	35,39844
65,96094	53,17188	55,07813	44,3125	39,04688	35,42969
66	53,17188	55,04688	44,30469	39,02344	35,42969
66,02344	53,14063	55,00781	44,3125	39,07031	35,42188
66,07031	53,15625	55,07813	44,3125	39,05469	35,46094
66,10938	53,14063	55,10156	44,32031	38,94531	35,42188
66,17969	53,09375	55,0625	44,29688	39,09375	35,4375
66,27344	53,07813	55,05469	44,3125	39,23438	35,44531
66,24219	53,07813	55,07813	44,29688	39,27344	35,44531
66,40625	53,09375	55,03906	44,28125	39,45313	35,46094
66,42188	53,07813	55,08594	44,32031	39,28906	35,45313
66,39844	53,08594	55,10156	44,32031	39,27344	35,4375
66,42188	53,09375	55,17969	44,30469	39,39844	35,44531
66,42188	53,13281	55,14844	44,28125	39,53906	35,45313
66,39844	53,11719	55,21094	44,3125	39,53906	35,46875
66,38281	53,13281	55,21875	44,28906	39,42188	35,52344
66,4375	53,125	55,53906	44,30469	39,34375	35,49219
66,46094	53,19531	55,74219	44,30469	39,41406	35,49219
66,5	53,1875	55,75	44,29688	39,42969	35,5
66,48438	53,1875	55,74219	44,29688	39,32031	35,5
66,4375	53,22656	55,67969	44,27344	39,39063	35,47656
66,40625	53,17969	55,44531	44,28125	39,34375	35,46875
66,33594	53,22656	55,35938	44,3125	39,55469	35,50781
66,39063	53,22656	55,29688	44,29688	39,49219	35,52344
66,375	53,21875	55,26563	44,29688	39,50781	35,5
66,51563	53,24219	55,23438	44,29688	39,50781	35,53125
66,54688	53,23438	55,32813	44,3125	39,51563	35,51563
66,57813	53,23438	55,29688	44,3125	39,48438	35,51563
66,73438	53,24219	55,30469	44,30469	39,50781	35,54688
66,67969	53,21875	55,32031	44,28125	39,54688	35,53125
66,75781	53,25781	55,33594	44,28125	39,5625	35,55469
66,78906	53,23438	55,36719	44,29688	39,53906	35,58594
66,79688	53,25781	55,39844	44,3125	39,52344	35,58594

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
66,79688	53,30469	55,44531	44,30469	39,57031	35,57813
66,76563	53,3125	55,49219	44,30469	39,53906	35,59375
66,6875	53,33594	55,42188	44,29688	39,59375	35,63281
66,71094	53,39844	55,44531	44,3125	39,54688	35,625
66,67969	53,40625	55,42188	44,28906	39,54688	35,61719
66,71875	53,38281	55,64063	44,29688	39,60156	35,625
66,75	53,39844	55,80469	44,29688	39,53125	35,61719
66,78906	53,40625	55,85156	44,29688	39,59375	35,64844
66,77344	53,42188	55,92969	44,3125	39,53906	35,63281
66,74219	53,44531	55,875	44,33594	39,51563	35,64063
66,6875	53,44531	55,80469	44,34375	39,57031	35,64063
66,60938	53,42969	55,60938	44,35156	39,54688	35,64844
66,58594	53,42969	55,44531	44,375	39,53125	35,64063
66,55469	53,45313	55,39844	44,40625	39,61719	35,69531
66,59375	53,44531	55,50781	44,375	39,61719	35,72656
66,54688	53,45313	55,90625	44,41406	39,53906	35,72656
66,52344	53,41406	56,13281	44,44531	39,53125	35,72656
66,53906	53,41406	56,32031	44,4375	39,54688	35,76563
66,5625	53,40625	56,4375	44,46875	39,50781	35,78125
66,51563	53,39844	56,47656	44,52344	39,60938	35,78906
66,60156	53,38281	56,40625	44,48438	39,57813	35,80469
66,60938	53,35938	56,48438	44,5625	39,61719	35,80469
66,57031	53,375	56,44531	44,55469	39,52344	35,79688
66,60938	53,34375	56,45313	44,57031	39,53906	35,82813
66,57031	53,35938	56,49219	44,64063	39,60938	35,84375
66,49219	53,32813	56,48438	44,65625	39,63281	35,84375
66,50781	53,36719	56,44531	44,6875	39,57031	35,83594
66,46875	53,39063	56,42969	44,75	39,5625	35,83594
66,42969	53,35156	56,51563	44,75	39,57813	35,84375
66,44531	53,3125	56,67188	44,79688	39,59375	35,85156
66,53906	53,35156	56,83594	44,79688	39,57813	35,875
66,49219	53,32031	57,00781	44,85156	39,60156	35,85156
66,55469	53,32813	57,11719	44,85938	39,60938	35,875
66,55469	53,30469	57,17969	44,92188	39,60156	35,85938
66,5	53,28125	57,0625	44,96094	39,59375	35,89844
66,42969	53,29688	56,9375	45	39,5625	35,86719
66,4375	53,30469	56,78906	45,10938	39,60938	35,88281
66,39063	53,29688	56,75	45,125	39,63281	35,88281

*Продолжение прил.
Продолжение табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
66,46094	53,32031	56,74219	45,15625	39,5625	35,90625
66,47656	53,28125	56,71875	45,15625	39,60938	35,94531
66,46094	53,28125	56,71094	45,13281	39,57031	35,92188
66,42188	53,25781	56,82813	45,23438	39,63281	35,92969
66,46094	53,25781	56,8125	45,23438	39,61719	35,90625
66,46875	53,25781	56,82813	45,21875	39,65625	35,94531
66,45313	53,26563	56,875	45,27344	39,66406	35,94531
66,5	53,28906	56,90625	45,27344	39,69531	35,9375
66,45313	53,25781	56,88281	45,26563	39,74219	35,96875
66,40625	53,27344	56,79688	45,27344	39,69531	35,99219
66,32031	53,28125	56,83594	45,27344	39,71094	35,98438
66,25781	53,26563	56,77344	45,3125	39,76563	36,00781
66,28125	53,25	56,71875	45,27344	39,76563	36,00781
66,25781	53,24219	56,75	45,30469	39,78125	36,02344
66,27344	53,25	56,75	45,28906	39,78906	36,03906
66,21094	53,21875	56,77344	45,28125	39,78125	36,04688
66,21094	53,19531	56,78906	45,32031	39,82031	36,07813
66,17969	53,20313	56,79688	45,29688	39,88281	36,08594
66,20313	53,20313	56,66406	45,28906	39,85156	36,03906
66,21875	53,19531	56,70313	45,27344	39,84375	36,10938
66,15625	53,15625	56,74219	45,28125	39,95313	36,10156
66,13281	53,15625	56,69531	45,27344	39,99219	36,11719
66,21094	53,14063	56,67188	45,24219	39,9375	36,14063
66,27344	53,13281	56,67969	45,28906	40	36,11719
66,32813	53,11719	56,77344	45,25	40,01563	36,14844
66,48438	53,07031	56,78906	45,26563	40	36,16406
66,59375	53,11719	56,82031	45,28125	40,08594	36,19531
66,70313	53,125	56,85156	45,23438	40,01563	36,1875
66,75781	53,09375	56,98438	45,22656	40,03125	36,23438
66,89063	53,14063	57,03125	45,25781	40,03125	36,21875
66,83594	53,14063	57,0625	45,27344	40,07813	36,24219
66,85156	53,19531	57,03906	45,29688	40,11719	36,3125
66,75781	53,20313	57,05469	45,26563	40,11719	36,27344
66,70313	53,25	57,04688	45,28125	40,14844	36,28125
66,51563	53,25	57	45,3125	40,16406	36,28906
66,55469	53,29688	57,03125	45,29688	40,19531	36,375
66,49219	53,30469	56,89063	45,29688	40,21094	36,36719
66,5	53,34375	56,96094	45,29688	40,24219	36,36719

*Продолжение прил.
Окончание табл. III*

Здание 11		Здание 12		Здание 13	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
66,51563	53,32813	56,86719	45,32813	40,19531	36,39844
66,46875	53,3125	56,875	45,32031	40,21875	36,40625
66,39063	53,28906	56,91406	45,34375	40,1875	36,39844
66,42969	53,28125	56,82031	45,34375	40,21094	36,4375
66,375	53,29688	56,84375	45,34375	40,20313	36,42969
66,35938	53,27344	56,84375	45,35156	40,20313	36,45313
66,44531	53,28906	56,86719	45,35938	40,21094	36,42188
66,39063	53,25	56,89063	45,34375	40,21875	36,46094
66,42188	53,26563	56,84375	45,34375	40,24219	36,47656
66,45313	53,25781	56,82031	45,33594	40,22656	36,42969
66,35938	53,22656	56,83594	45,33594	40,26563	36,44531
66,44531	53,23438	56,88281	45,36719	40,25	36,48438
66,46875	53,25	56,94531	45,35938	40,21875	36,4375

Таблица II2

**Экспериментальные данные температур теплоносителя в подающем
и обратном трубопроводах второго комплекса зданий**

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
56,08594	45,52344	65,125	50,89063	64,67188	50,78906	58,10938	51,51563	61,77344	53,17969
56,69531	45,53906	65,03906	50,89844	64,64844	50,85156	58,17188	51,53906	59,6875	53,47656
56,78125	45,52344	64,86719	50,95313	64,625	50,98438	58,28125	51,51563	58,11719	53,53906
56,92969	45,63281	64,9375	50,99219	64,78125	51,08594	58,36719	51,59375	56,27344	53,32813
56,82031	45,69531	64,74219	50,98438	64,75781	51,16406	58,49219	51,75	55,84375	53,02344
56,71875	45,71875	64,89844	50,96875	64,10156	51,22656	58,45313	51,78906	55,27344	52,82813
56,69531	45,74219	64,83594	50,98438	63,25	51,28906	58,60938	51,78906	56,85156	51,83594
56,0625	45,77344	65,10938	51,01563	62,55469	51,33594	58,53906	51,79688	55,95313	51,23438
55,92188	45,78125	65,39844	51,00781	61,85156	51,27344	58,60938	51,80469	56,10156	50,78906
55,78125	45,79688	65,29688	51,02344	61,39063	51,23438	58,60156	51,8125	54,125	50,35156
55,8125	45,77344	65,33594	51,01563	60,91406	51,07813	58,55469	51,82813	56,92969	49,92188
55,76563	45,75781	65,28125	51,03906	60,82031	50,92969	58,51563	51,85156	57,875	49,35938
55,78125	45,75781	65,22656	51,02344	60,75	50,78125	58,47656	51,85156	59,66406	49,01563
55,86719	45,75781	65,17969	51,02344	60,57031	50,58594	58,50781	51,85156	62	48,89844
56,10156	45,75	65,10156	51	60,44531	50,47656	58,42188	51,88281	63,64063	48,96094
56,71875	45,75781	65,25781	51,03125	60,51563	50,35938	58,39844	51,84375	63,9375	49,19531
56,75781	45,73438	65,03125	51,01563	61,72656	50,21094	58,36719	51,82813	64,17969	49,73438
56,78906	45,76563	65,02344	51,00781	63,4375	50,13281	58,35938	51,83594	64,42188	50,25

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
56,67969	45,72656	64,91406	50,97656	64,13281	50,09375	58,29688	51,82031	64,71094	50,78906
56,77344	45,75781	64,89844	50,96094	64,14844	50,14844	58,23438	51,82813	65,11719	51,32031
56,24219	45,79688	64,6875	50,92188	64,13281	50,25781	58,24219	51,8125	65,3125	51,69531
55,76563	45,80469	64,74219	50,96875	64,29688	50,32813	58,10156	51,79688	65,5	52,16406
55,57813	45,79688	64,89844	50,92969	64,375	50,45313	58,16406	51,78906	65,70313	52,53906
55,76563	45,79688	64,49219	50,88281	64,38281	50,55469	58,03906	51,77344	63,71094	53,10156
55,72656	45,75781	64,64063	50,91406	64,5	50,67969	58,02344	51,75781	61,29688	53,375
55,75	45,73438	64,53125	50,86719	64,51563	50,74219	57,98438	51,75781	59,66406	53,55469
55,91406	45,75	64,67969	50,85156	64,61719	50,8125	58	51,75	58,1875	53,54688
55,89844	45,73438	64,79688	50,85938	64,57813	50,86719	57,97656	51,75	57,52344	53,34375
56,04688	45,74219	64,76563	50,83594	64,67188	50,96875	57,94531	51,63281	56,92188	53,17969
56,72656	45,75	64,5625	50,83594	64,75	51,04688	57,98438	51,57813	55,25781	52,52344
56,88281	45,77344	64,64844	50,84375	64,89844	51,17969	58,28906	51,59375	54,57031	51,92188
57,16406	45,73438	64,55469	50,83594	64,92188	51,25781	58,44531	51,55469	54,48438	51,36719
57,30469	45,75781	64,65625	50,85156	65	51,35938	58,46875	51,67969	54,82031	50,75781
57,33594	45,75781	64,78125	50,82031	64,63281	51,45313	58,55469	51,76563	56,07813	50,23438
57,1875	45,82031	64,71094	50,80469	64,07031	51,52344	58,57031	51,75781	58,70313	49,70313
56,82031	45,89063	64,78906	50,78906	62,99219	51,5625	58,58594	51,78906	61,44531	49,375
56,72656	45,96094	64,0625	50,78125	61,99219	51,52344	58,60938	51,83594	63,48438	49,25
56,39844	45,97656	63,19531	50,76563	61,25781	51,47656	58,51563	51,84375	64,09375	49,41406
56,38281	45,95313	61,92969	50,72656	60,88281	51,33594	58,42188	51,82031	63,57031	49,73438
56,00781	45,97656	60,42969	50,60938	60,58594	51,14844	58,28906	51,85938	63,23438	50,20313
56,07031	45,92188	58,71094	50,53125	60,29688	50,97656	58,19531	51,84375	62,75781	50,64844
55,75	45,89844	56,42969	50,375	59,41406	50,76563	58,05469	51,80469	62,22656	51,10156
55,0625	45,88281	55,01563	50,11719	58,88281	50,5625	57,94531	51,78125	59,875	51,51563
54,27344	45,84375	53,92188	49,88281	58,84375	50,36719	57,91406	51,75781	58,23438	51,82813
53,0625	45,82813	53,125	49,60938	59	50,20313	57,99219	51,73438	56,97656	51,96875
51,85938	45,75	52,46875	49,3125	57,86719	50,07813	57,99219	51,76563	56,24219	51,94531
50,83594	45,57031	52,02344	49,0625	56,04688	49,9375	58,03906	51,72656	55,65625	51,75781
50,01563	45,3125	51,85156	48,82813	55,05469	49,78906	58,03125	51,60156	55,25	51,36719
49,39844	45,3125	51,69531	48,59375	53,79688	49,53125	57,71094	51,54688	55,17188	50,90625
48,83594	44,66406	51,64063	48,32813	53,02344	49,22656	57,00781	51,59375	55,50781	50,46875
48,35156	44,36719	52,07813	48,11719	52,51563	48,86719	55,92969	51,46875	56,35938	50,10156
47,95313	43,99219	52,59375	47,86719	52,04688	48,4375	54,67188	51,30469	57,69531	49,78125
47,59375	43,73438	53,24219	47,57031	51,9375	48,03906	53,45313	51,30469	59,125	49,57031
47,45313	43,36719	54,02344	47,41406	52,11719	47,66406	52,53906	50,4375	60,88281	49,5625
47,28125	43,03125	54,53125	47,04688	52,45313	47,34375	51,72656	49,88281	62,38281	49,75781
47,35156	42,67969	54,82031	46,8125	53,14063	47,01563	51,30469	49,34375	63,77344	50,10938

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
47,4375	42,35938	55,49219	46,54688	53,70313	46,73438	50,27344	48,73438	64,92969	50,65625
47,66406	42,09375	55,75	46,30469	54,77344	46,53125	49,72656	48,1875	65,89063	51,22656
48,0625	41,85156	56,23438	46,07031	55,14063	46,375	49,27344	47,60156	66,78125	51,96875
48,27344	41,64063	56,375	45,89844	55,99219	46,23438	48,97656	47,14063	67,27344	52,64844
48,5625	41,49219	56,46875	45,64063	56,79688	46,17188	48,80469	46,65625	68,05469	53,45313
48,88281	41,375	56,99219	45,60938	57,26563	46,17969	48,75781	46,3125	68,94531	54,125
49,08594	41,28906	57,57031	45,60156	57,83594	46,14844	48,82813	45,97656	64,625	54,78906
49,17969	41,24219	57,35156	45,60156	57,82031	46,24219	49,01563	45,73438	60,96094	55,19531
49,39063	41,22656	58,49219	45,59375	58,48438	46,33594	49,21094	45,59375	59,72656	55,32031
49,5625	41,1875	59,83594	45,5625	59,23438	46,42188	49,41406	45,45313	58,58594	55,125
49,84375	41,17188	60,89063	45,59375	60,125	46,59375	49,67969	45,35156	58,76563	54,8125
50,27344	41,17969	61,9375	45,59375	61,01563	46,78125	49,96875	45,36719	56,74219	54,21875
50,8125	41,17969	63,00781	45,57031	62,38281	47,00781	50,14844	45,36719	56,86719	53,65625
51,32813	41,28125	63,67969	45,58594	63,4375	47,35156	50,45313	45,41406	56,46875	53,28125
51,94531	41,29688	64,08594	45,75	64,39844	47,66406	50,86719	45,46094	55,89063	52,32031
52,42969	41,39844	64,46875	45,99219	65,48438	48,11719	51,24219	45,53125	54,125	51,75
52,97656	41,53906	64,54688	46,11719	66,35156	48,50781	51,35156	45,67188	54,76563	51,17188
53,47656	41,69531	64,10156	46,32813	67,08594	49,00781	51,75781	45,75781	55,94531	50,44531
53,92188	41,84375	64,67969	46,5	67,65625	49,46094	52,21875	45,90625	58,34375	49,85938
54,19531	42,03125	65,00781	46,64844	68,3125	49,94531	52,70313	46,07813	62,04688	49,44531
54,52344	42,21094	65,28906	46,85938	68,375	50,40625	53,35938	46,3125	64,60156	49,32031
54,89844	42,42188	65,96094	47,11719	67,78906	50,875	53,83594	46,52344	65,6875	49,51563
55,05469	42,625	65,75781	47,44531	67,82813	51,29688	54,42969	46,82031	65,95313	49,92969
55,34375	42,84375	66,00781	47,61719	67,35156	51,60938	54,88281	47,125	66,49219	50,50781
55,48438	42,96875	65,88281	47,88281	65,9375	51,92188	55,42969	47,39063	66,96875	51,125
55,74219	43,17969	65,9375	48,17969	64,19531	52,15625	55,84375	47,76563	67,24219	51,73438
56,15625	43,39063	66,19531	48,39063	62,73438	52,25781	56,28125	48,01563	65,48438	52,40625
56,53125	43,57031	66,17969	48,58594	60,75781	52,1875	56,6875	48,35938	63,48438	53,23438
56,58594	43,75781	66,25	48,85938	59,58594	52,08594	57,03125	48,64844	61,75	53,32813
56,60156	43,96875	66,42188	49,10938	58,79688	51,94531	57,45313	49	59,97656	53,625
56,64063	44,125	67,09375	49,35156	58,32031	51,5625	57,71875	49,25781	58,28125	53,6875
56,67969	44,28125	67,42969	49,57031	58,0625	51,24219	58	49,57813	56,73438	53,42188
56,90625	44,42188	67,33594	49,8125	57,75	50,89063	58,28906	49,84375	55,59375	53,3125
56,96094	44,52344	67,49219	50,02344	58,58594	50,57031	58,46094	50,09375	54,84375	52,48438
57,00781	45,10938	67,41406	50,23438	60,17188	50,28125	58,46875	50,33594	53,98438	51,86719
57,03125	45,17188	67,54688	50,45313	61,71875	50,07031	58,28125	50,53906	53,4375	51,26563
57,10938	45,17969	67,45313	50,625	64,64844	49,96094	57,64063	50,78125	52,64063	50,53906
57,20313	45,19531	67,21875	50,79688	65,53125	50,0625	55,75781	51,23438	53,49219	49,90625

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
57,30469	45,1875	67,21094	50,92969	65,3125	50,21094	52,33594	50,60938	55,4375	49,21094
57,16406	45,26563	68,05469	51,0625	65,53906	50,42188	50,67188	50,09375	57,26563	48,69531
57,14063	45,42188	68,17969	51,20313	65,60156	50,61719	49,45313	49,24219	59,21875	48,35156
57,14063	45,58594	67,75781	51,35156	66,02344	50,82031	48,46875	48,35938	60,72656	48,22656
57,09375	45,65625	68,4375	51,47656	66,09375	50,98438	48,71094	47,50781	61,35156	48,32031
56,98438	45,64844	68,80469	51,57813	66,10938	51,13281	51,24219	46,78906	61,71875	48,58594
56,9375	45,70313	68,36719	51,70313	66,23438	51,22656	53,34375	46,39063	62,04688	49
57,03125	45,71875	68,74219	51,83594	66,5	51,35938	54,48438	46,5625	62,3125	49,36719
57,13281	45,75781	68,35156	51,91406	66,77344	51,55469	55,1875	46,92969	62,66406	49,83594
57,23438	45,79688	67,69531	52,04688	67,0625	51,77344	55,71875	47,47656	62,86719	50,21094
57,19531	45,86719	67,97656	52,09375	66,04688	51,94531	56,21875	47,92969	63,54688	50,61719
57,14844	45,9375	67,82813	52,15625	64,78125	52,15625	56,69531	48,34375	63,55469	50,98438
57,21094	45,96875	68,40625	52,23438	63,0625	52,24219	57,19531	48,75	63,95313	51,34375
57,21875	46,0625	68,28125	52,29688	61,71094	52,25781	57,64844	49,13281	64,28125	51,80469
57,23438	46,07813	68,27344	52,35938	60,35156	52,16406	58,00781	49,51563	64,55469	52,09375
57,10156	46,09375	67,875	52,42188	59,61719	51,92969	58,42969	49,83594	64,34375	52,40625
57,21875	46,11719	67,69531	52,50781	59,38281	51,69531	58,72656	50,17188	63,64063	52,70313
57,25781	46,125	66,91406	52,52344	59,17188	51,36719	59,19531	50,47656	62,4375	52,89063
57,20313	46,17969	66,39063	52,54688	58,85156	51,05469	59,28906	51,25781	60,97656	53,50781
57,3125	46,19531	65,99219	52,5	59,14063	50,75	58,22656	51,25	59,57031	53,47656
57,20313	46,21094	65,63281	52,48438	60,67188	50,44531	54,60938	51,28906	57,9375	53,26563
57,14063	46,24219	65,09375	52,44531	62,3125	50,26563	51,97656	51,25781	56,67188	52,82031
57,35156	46,25	65,71875	52,42969	65,59375	50,17188	50,55469	50,33594	55,76563	52,42188
57,21875	46,27344	65,03125	52,33594	65,83594	50,26563	49,48438	49,4375	55,46094	52,01563
57,17188	46,27344	64,65625	52,35156	65,96875	50,45313	48,57031	48,46094	54,76563	51,4375
56,74219	46,32031	64,59375	52,29688	66,32031	50,66406	49,21875	47,6875	54,38281	50,96094
56,61719	46,32031	64,3125	52,1875	66	50,89844	52,63281	46,97656	54,89844	50,39844
56,61719	46,33594	64,67969	52,16406	66,71875	51,14063	54,74219	46,76563	57,00781	49,83594
55,89063	46,23438	64,375	52,04688	66,63281	51,28906	56,09375	47,07031	58,55469	49,39063
55,65625	46,24219	64,32813	51,97656	66,74219	51,4375	56,83594	47,67188	60,44531	49,08594
55,46875	46,1875	64,47656	51,9375	66,92188	51,57813	57,57813	48,32031	61,57813	49,03906
55,34375	46,10938	64,84375	51,84375	66,92188	51,6875	58,21094	48,85938	61,67188	49,13281
55,25	46,04688	65,41406	51,77344	67,17969	51,875	58,60938	49,42969	61,85938	49,40625
55,125	45,92188	65,89063	51,73438	65,96094	52,07813	58,98438	49,875	62,24219	49,71094
55,03906	45,84375	66,30469	51,72656	64,48438	52,25781	59,30469	50,33594	62,625	50,0625
55,01563	45,76563	66,42188	51,67969	62,74219	52,34375	59,40625	51,03906	62,92969	50,39844
55,03125	45,71094	66,4375	51,61719	61,21094	52,32031	58,85156	51,25781	63,64063	50,75
55,09375	45,67969	67,125	51,60156	60,08594	52,16406	56,26563	51,29688	63,94531	51,10156

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
55,27344	45,63281	67,16406	51,58594	59,35938	51,98438	53,1875	51,28125	64,17969	51,47656
55,25	45,5	67,13281	51,54688	59,07813	51,65625	51,25781	51,19531	64,48438	51,82813
55,26563	45,4375	66,82031	51,53906	58,85156	51,35156	50,08594	49,86719	64,70313	52,19531
55,46094	45,42188	67,09375	51,45313	58,66406	51,03906	49,07813	48,99219	64,79688	52,51563
55,66406	45,39844	66,98438	51,42188	59,50781	50,70313	48,92188	48,09375	63,71875	52,83594
55,92969	45,34375	66,99219	51,42188	61,20313	50,40625	51,28906	47,32031	62,50781	53,10156
56,33594	45,35938	67,10938	51,40625	63,22656	50,23438	54,53906	46,83594	60,80469	53,53906
55,92969	45,35938	66,55469	51,46094	65,71875	50,17969	55,85156	47,01563	59,33594	53,50781
55,77344	45,39063	66,46875	51,44531	65,67188	50,25	57,07813	47,52344	57,83594	53,53906
55,71094	45,39063	66,9375	51,44531	66,02344	50,46875	57,86719	48,20313	56,55469	52,86719
55,58594	45,39063	66,69531	51,47656	66,14063	50,70313	58,75	48,8125	55,70313	52,5
55,57813	45,4375	66,5625	51,5	66,07031	50,85156	59,65625	49,48438	55,14063	52,01563
55,46094	45,40625	66,8125	51,53906	66,25781	51,04688	60,04688	50,13281	54,58594	51,44531
55,25781	45,40625	66,49219	51,54688	66,05469	51,23438	60,15625	50,625	54,03906	50,9375
55,38281	45,39063	66,33594	51,57813	66,17969	51,3125	59,54688	51,26563	55,26563	50,32031
55,39063	45,375	66,49219	51,61719	66,20313	51,42969	56,61719	51,48438	57,28125	49,71875
55,45313	45,35156	66,42188	51,65625	66,29688	51,51563	53,40625	51,52344	59,07813	49,33594
55,44531	45,32813	66,25	51,67969	66,38281	51,66406	51,44531	51,29688	60,71875	49,07813
55,60938	45,33594	66,49219	51,74219	66,46875	51,8125	50,21094	50,08594	61,73438	49,08594
56,03906	45,3125	66,50781	51,71875	66,50781	52,02344	49,125	49,07031	61,875	49,21875
56,71875	45,32031	67,05469	51,75781	65,64844	52,19531	49,07813	48,24219	62,17188	49,46875
56,71875	45,3125	66,53906	51,77344	64,09375	52,32031	51,75	47,44531	62,32031	49,84375
56,74219	45,39063	66,39844	51,82813	62,61719	52,35938	54,74219	46,9375	62,625	50,17969
56,04688	45,39844	66,45313	51,82031	61,51563	52,28906	56,49219	47,17188	62,79688	50,51563
55,78906	45,44531	66,19531	51,8125	60,33594	52,14063	57,48438	47,73438	63,02344	50,88281
55,42969	45,46875	66,20313	51,80469	59,70313	51,9375	58,27344	48,42969	63,15625	51,17188
55,14063	45,47656	66,32031	51,79688	59,55469	51,64063	58,8125	49,14063	63,72656	51,52344
55,00781	45,46875	66,25781	51,78906	59,17969	51,36719	59,27344	49,70313	63,70313	51,84375
54,92969	45,42969	66,36719	51,78906	58,9375	51,0625	59,6875	50,21875	63,83594	52,10938
54,82813	45,375	66,07031	51,78906	59,46875	50,75781	60,0625	50,70313	63,80469	52,35938
54,96094	45,35938	66,07031	51,78906	61,39844	50,4375	59,92969	51,28906	64,11719	52,53125
54,79688	45,34375	65,92969	51,76563	62,99219	50,28125	58,27344	51,53125	64,00781	52,75781
54,95313	45,32813	65,67969	51,76563	65,66406	50,25781	54,75781	51,78125	63,875	52,91406
55,07031	45,32813	66,07031	51,77344	66,01563	50,29688	52,13281	51,34375	62,91406	53,09375
54,875	45,30469	65,60156	51,75	66,03125	50,53906	51,32813	50,67969	60,96875	53,57031
55,16406	45,30469	65,67969	51,70313	66,13281	50,76563	49,61719	49,58594	59,42969	53,60156
55,46094	45,32031	65,96875	51,71094	66,125	51,01563	49,0625	48,71094	57,66406	53,53125
55,38281	45,29688	65,88281	51,71094	66,33594	51,19531	50,10156	47,84375	56,48438	52,89844

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
55,17188	45,32031	65,89844	51,70313	66,1875	51,34375	53,35938	47,17188	55,80469	52,48438
54,91406	45,32813	65,82031	51,67188	66,16406	51,45313	55,19531	47,03906	55,24219	52,03906
54,76563	45,3125	66,19531	51,6875	66,10938	51,57031	56,40625	47,46094	54,64063	51,42969
54,36719	45,32813	66,04688	51,6875	66,11719	51,70313	57,10938	48,03125	54,25781	50,89063
54,35938	45,34375	66	51,64844	66,14844	51,8125	57,66406	48,625	55,52344	50,33594
54,33594	45,30469	66,20313	51,67969	66,13281	51,97656	58,03906	49,11719	57,625	49,78906
54,35938	45,32031	66,26563	51,67188	66,22656	52,10156	58,46094	49,63281	59,49219	49,375
54,39063	45,33594	66,07813	51,63281	64,73438	52,25781	58,76563	50,01563	61,21875	49,17188
54,28906	45,32031	66,07031	51,64063	63,1875	52,38281	59,10938	50,4375	61,96094	49,17188
54,24219	45,07031	66,11719	51,63281	61,86719	52,36719	59,30469	50,98438	62,15625	49,28125
54,39844	44,84375	66,34375	51,64063	60,32813	52,23438	59,34375	51,30469	62,49219	49,60156
54,46875	44,67188	66,17969	51,64844	59,60938	52,09375	59,14063	51,34375	62,83594	49,96875
54,53125	44,67969	66,125	51,64063	59,24219	51,76563	57,35156	51,55469	63,16406	50,40625
54,74219	44,6875	66,05469	51,64063	58,94531	51,49219	53,5625	51,57031	63,78125	50,75781
54,77344	44,70313	66,07813	51,60156	58,66406	51,125	51,75781	51,30469	63,80469	51,125
54,84375	44,71094	66,05469	51,65625	58,79688	50,82813	50,38281	50,21094	63,85156	51,49219
54,76563	44,6875	66,0625	51,65625	60,47656	50,49219	49,39063	49,32813	64,00781	51,86719
54,875	44,67188	66,1875	51,65625	62,20313	50,27344	49,42188	48,38281	64,21875	52,22656
54,59375	44,64844	65,73438	51,60938	64,67188	50,21875	51,625	47,66406	63,99219	52,49219
54,79688	44,69531	65,67969	51,66406	65,67969	50,25781	54,39844	47,20313	63,85938	52,75781
55,01563	44,66406	66,17969	51,61719	65,67969	50,4375	55,71094	47,30469	64,14063	52,96094
55,05469	44,70313	66,01563	51,66406	65,69531	50,64844	56,64063	47,78906	62,32031	53,20313
55,03125	44,67969	66,30469	51,64063	65,78906	50,89844	57,1875	48,36719	60,88281	53,63281
54,83594	44,70313	66,03906	51,66406	65,77344	51,07031	57,71094	48,875	59,11719	53,64063
54,58594	44,8125	65,96094	51,67188	65,89844	51,27344	58,10156	49,38281	57,71875	53,11719
54,35156	45,17188	66,20313	51,67969	65,78125	51,34375	58,30469	49,80469	56,625	52,85156
54,10156	45,125	66,35938	51,70313	65,77344	51,4375	58,53125	50,17969	55,94531	52,42969
54,35156	45,19531	66,35156	51,70313	65,75781	51,57031	58,64063	50,50781	55,46094	51,94531
54,35938	44,67969	66,24219	51,67969	65,9375	51,72656	58,71094	51,02344	54,92188	51,40625
54,32813	44,6875	66,42969	51,75781	66,13281	51,84375	58,82031	51,28906	54,64844	50,92188
54,375	44,67188	66,35938	51,71094	66,09375	52,03906	58,49219	51,30469	55,77344	50,375
54,44531	44,66406	67,04688	51,72656	65,91406	52,1875	57,24219	51,34375	57,78906	49,85938
54,67188	44,67969	67,20313	51,71875	64,00781	52,34375	54,48438	51,32813	59,92188	49,45313
54,82813	44,65625	67,1875	51,76563	62,40625	52,42969	51,82031	51,28906	61,46875	49,3125
54,85938	44,66406	66,57813	51,78125	60,86719	52,38281	50,52344	50,28125	62,11719	49,27344
54,86719	44,66406	67,21875	51,80469	59,67969	52,1875	49,40625	49,33594	62,42969	49,47656
54,82813	44,67188	67,11719	51,80469	59,36719	51,96875	49,36719	48,48438	62,70313	49,77344
54,74219	44,6875	67,23438	51,82813	59,01563	51,64844	51,50781	47,65625	62,88281	50,17188

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
54,6875	44,69531	67,22656	51,85938	58,80469	51,33594	53,75	47,17188	63,10156	50,53906
54,60938	44,67188	67,17969	51,86719	58,61719	50,95313	55,11719	47,30469	63,78125	50,92188
54,53906	44,67188	67,21875	51,90625	59,91406	50,64844	55,85156	47,625	63,80469	51,26563
54,49219	44,65625	67,30469	51,92188	61,625	50,39844	56,30469	48,10156	63,82031	51,58594
54,44531	44,67188	67,16406	51,95313	64,11719	50,28125	56,75	48,5625	63,80469	51,92188
54,38281	44,67969	67,24219	52,00781	65,74219	50,28906	57,07031	48,9375	63,86719	52,25
54,46875	44,67188	67,20313	52	65,92188	50,46094	57,41406	49,30469	63,91406	52,5
54,42969	44,6875	67,21094	52,02344	66,11719	50,71875	57,6875	49,66406	64,0625	52,72656
54,36719	44,64063	67,20313	52,04688	66,28125	50,96875	57,92188	49,92188	64,14063	52,91406
54,41406	44,66406	67,21094	52,03906	66,3125	51,17969	58,13281	50,1875	63,85156	53,05469
54,35938	44,67188	66,35156	52,05469	66,27344	51,41406	58,35156	50,46875	61,73438	53,64063
54,32813	44,67188	67,07813	52,07031	66,30469	51,54688	58,57813	50,625	60,10938	53,61719
54,29688	44,64063	67,02344	52,125	66,45313	51,64063	58,6875	51,28906	58,44531	53,64063
54,3125	44,625	67,20313	52,125	66,625	51,78906	58,53125	51,25	57,19531	53,0625
54,32813	44,59375	67,17969	52,14844	66,77344	51,96875	57,71875	51,28125	56,21875	52,75
54,4375	44,60156	67,13281	52,14844	66,54688	52,13281	54,84375	51,28906	55,59375	52,29688
54,625	44,60156	67,26563	52,1875	64,59375	52,33594	52,32813	51,29688	55,19531	51,76563
54,64844	44,60938	67,15625	52,20313	63,125	52,46094	50,6875	50,36719	54,75781	51,19531
54,71094	44,60156	67,28125	52,19531	61,47656	52,46094	49,69531	49,55469	54,96875	50,66406
54,79688	44,60938	67,17969	52,21875	60,19531	52,35938	49,1875	48,65625	56,75781	50,09375
54,82031	44,60938	67,19531	52,22656	59,40625	52,20313	50,60156	47,78906	58,72656	49,64844
54,85938	44,64063	67,29688	52,23438	59,25	51,89063	53,375	47,25	60,5625	49,36719
55,0625	44,64844	67,67969	52,28125	58,9375	51,5625	54,9375	47,20313	61,89844	49,23438
55,0625	44,67188	67,70313	52,3125	58,6875	51,1875	55,76563	47,49219	62,11719	49,30469
55,05469	44,66406	67,61719	52,28906	59,72656	50,90625	56,30469	47,96094	62,3125	49,55469
55,17188	44,64844	67,75781	52,32813	61,375	50,60938	56,89063	48,46875	62,46094	49,89844
55,17969	44,80469	67,54688	52,35156	63,14063	50,42969	57,25781	48,85156	62,625	50,25781
54,98438	45,10938	67,60938	52,36719	65,69531	50,39063	57,58594	49,28125	62,8125	50,61719
54,9375	45,32813	67,53125	52,375	66,28906	50,49219	57,92188	49,61719	63,10156	50,9375
54,82031	45,32813	67,61719	52,35938	66,19531	50,74219	58,22656	49,97656	63,21875	51,30469
54,89844	45,3125	67,72656	52,38281	66,625	51,03125	58,54688	50,29688	63,89063	51,60938
54,78125	45,32031	67,66406	52,41406	66,67969	51,27344	58,69531	50,60156	63,8125	51,90625
54,92969	45,32813	67,60938	52,42969	66,875	51,52344	58,95313	51,25	64,03125	52,20313
54,84375	45,30469	67,70313	52,46094	67,19531	51,66406	58,96094	51,30469	64,05469	52,46875
54,88281	45,32031	67,61719	52,45313	67,07031	51,80469	58,50781	51,3125	64,27344	52,67188
55,03906	45,33594	67,58594	52,50781	67,25	51,98438	56,09375	51,38281	64,39063	52,89844
55,21875	45,33594	67,84375	52,52344	66,17969	52,14063	53,07813	51,32031	63,01563	53,03906
55,30469	45,30469	67,86719	52,53906	64,8125	52,32031	51,34375	51,25781	61,73438	53,44531

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
55,42969	45,34375	67,96094	52,58594	63,50781	52,42969	50,08594	49,90625	59,96875	53,64844
55,57031	45,36719	68,8125	52,58594	61,9375	52,46875	49,21094	49,02344	58,51563	53,58594
55,58594	45,35938	68,50781	52,64063	60,65625	52,39063	49,71875	48,125	57,10938	53,03125
55,46094	45,33594	68,10938	52,69531	59,64063	52,19531	52,34375	47,44531	56,21875	52,70313
55,47656	45,32813	67,39844	52,71875	59,39063	51,9375	54,60938	47,14844	55,73438	52,22656
55,52344	45,33594	66,71875	52,71094	59,17969	51,61719	55,89844	47,375	55,26563	51,71094
55,74219	45,33594	65,95313	52,70313	58,90625	51,3125	56,67969	47,90625	54,6875	51,14063
56,25781	45,36719	65,5	52,625	58,98438	51,00781	57,39844	48,4375	54,86719	50,60156
56,75	45,32813	65,10938	52,54688	60,46875	50,71094	58,05469	48,96875	56,60156	50,10938
56,76563	45,35156	65,48438	52,48438	62,21094	50,50781	58,45313	49,42969	58,46094	49,60156
56,78125	45,32813	65,20313	52,42188	64,375	50,375	58,8125	49,92969	60,09375	49,33594
56,74219	45,375	65,05469	52,38281	65,74219	50,40625	59,14844	50,32813	61,39844	49,17969
56,09375	45,42969	64,98438	52,34375	65,73438	50,51563	59,40625	50,61719	61,76563	49,25
55,86719	45,49219	65,03906	52,28906	65,78906	50,74219	59,5625	51,3125	62,04688	49,44531
55,82813	45,49219	64,34375	52,28906	65,82813	50,99219	59,5	51,33594	62,28906	49,77344
55,9375	45,55469	65,39844	52,25	66,13281	51,19531	57,65625	51,58594	62,99219	50,14063
55,90625	45,51563	65,02344	52,17969	65,92188	51,32813	53,92188	51,73438	62,875	50,46875
56,10156	45,50781	65,03906	52,17188	66,08594	51,5	51,80469	51,32813	63,17969	50,85156
56,07031	45,55469	65,125	52,10156	66,07813	51,53125	50,57813	50,38281	63,79688	51,19531
56,05469	45,55469	64,78125	52,03125	65,875	51,72656	49,54688	49,4375	63,72656	51,54688
55,9375	45,55469	64,76563	51,92969	65,95313	51,84375	49,19531	48,51563	63,79688	51,84375
55,86719	45,61719	65,47656	51,89844	66,08594	52	50,875	47,73438	63,78906	52,16406
55,64844	45,59375	65,65625	51,84375	65,76563	52,17188	53,82813	47,15625	63,94531	52,4375
55,60938	45,625	65,65625	51,78906	63,90625	52,30469	55,25781	47,16406	64,1875	52,66406
55,57813	45,63281	65,58594	51,73438	62,76563	52,35156	56,25781	47,54688	64,28906	52,85156
55,52344	45,59375	65,78906	51,67969	61,42188	52,32813	56,89063	48,11719	63,88281	53,0625
55,73438	45,5625	65,85156	51,60938	60,24219	52,19531	57,5	48,61719	61,97656	53,5
56,03906	45,52344	65,67188	51,58594	59,49219	52	57,95313	49,125	60,30469	53,67969
56,60938	45,5	65,82031	51,5625	59,375	51,70313	58,35156	49,57031	58,85938	53,6875
56,78906	45,51563	65,67969	51,49219	59,16406	51,41406	58,73438	50	57,19531	53,07031
56,78906	45,5625	65,69531	51,48438	58,90625	51,0625	59,07031	50,38281	56,3125	52,78125
56,78906	45,58594	65,53906	51,48438	59,73438	50,80469	59,32813	50,67188	55,90625	52,33594
56,125	45,65625	65,57031	51,42188	61,32031	50,5	59,46875	51,36719	55,21875	51,8125
55,875	45,71875	65,60938	51,41406	63,15625	50,32813	58,75	51,36719	54,69531	51,23438
55,78906	45,79688	65,42188	51,39844	65,74219	50,34375	56,38281	51,55469	54,875	50,75
55,77344	45,78906	65,57813	51,38281	65,67969	50,42969	52,85938	51,42969	56,63281	50,17188
55,82031	45,82031	65,57031	51,39063	65,71875	50,67969	51,32813	51,20313	58,48438	49,71875
55,77344	45,78125	65,65625	51,39063	65,75781	50,88281	50,01563	49,98438	60,04688	49,39063

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
55,70313	45,79688	65,79688	51,39844	65,70313	51,11719	49,125	49,01563	61,61719	49,25781
55,57031	45,6875	65,70313	51,38281	65,72656	51,28906	49,45313	48,19531	61,84375	49,30469
55,29688	45,6875	65,53125	51,40625	65,70313	51,39063	52,14063	47,44531	61,92969	49,52344
55,44531	45,61719	65,64844	51,39063	65,74219	51,48438	54,17969	47,10156	61,99219	49,80469
55,35156	45,60938	65,80469	51,40625	65,75	51,59375	55,42969	47,29688	62,28906	50,14844
55,3125	45,57813	65,67188	51,41406	65,73438	51,75	55,96875	47,71094	62,47656	50,50781
55,24219	45,54688	65,95313	51,42969	65,77344	51,85156	56,5	48,24219	62,76563	50,80469
55,25	45,53125	65,83594	51,45313	65,86719	52,01563	56,91406	48,63281	62,85938	51,07813
55,22656	45,47656	65,79688	51,47656	65,78906	52,17969	57,25781	49,03125	63,10938	51,40625
55,28906	45,46875	66,0625	51,48438	63,99219	52,29688	57,48438	49,38281	63,75	51,73438
55,22656	45,42969	66,25781	51,46875	62,5625	52,42969	57,82813	49,71094	63,83594	52
55,38281	45,41406	66,34375	51,49219	60,96094	52,34375	58,0625	50,03906	63,89844	52,26563
55,79688	45,38281	66,34375	51,52344	60	52,17188	58,34375	50,32813	64,05469	52,46094
55,74219	45,35938	66,49219	51,54688	59,54688	51,97656	58,57031	50,52344	64,25781	52,6875
55,86719	45,36719	66,36719	51,57031	59,25781	51,65625	58,66406	50,66406	64,33594	52,84375
55,89844	45,39844	66,42188	51,55469	59,04688	51,34375	58,73438	51,375	64,42188	52,99219
55,95313	45,42969	66,38281	51,59375	58,8125	51,01563	58,25781	51,38281	63,66406	53,53906
56,14063	45,4375	66,54688	51,60938	59,88281	50,71094	56,1875	51,39844	61,76563	53,6875
56,60938	45,45313	66,54688	51,625	61,55469	50,47656	52,86719	51,38281	60,03906	53,67188
56,625	45,50781	66,50781	51,65625	64,10156	50,33594	51,36719	50,71094	58,47656	53,67188
56,78125	45,54688	66,47656	51,66406	65,76563	50,35938	49,875	49,75781	57,09375	53,16406
56,84375	45,58594	66,44531	51,71094	66,125	50,53906	49,0625	48,88281	56,38281	52,8125
56,70313	45,60938	66,39063	51,72656	66,17188	50,77344	49,75	47,95313	55,84375	52,33594
56,11719	45,66406	66,3125	51,74219	66,19531	51,05469	52,40625	47,32031	55,32813	51,82031
56,08594	45,78125	66,22656	51,78125	66,39844	51,30469	54,13281	47,10156	54,86719	51,22656
56,07031	45,82031	66,17969	51,73438	66,51563	51,50781	55,1875	47,26563	55,41406	50,71875
56,03906	45,78906	66,00781	51,76563	66,5625	51,64844	55,73438	47,69531	57,28906	50,17969
56,0625	45,80469	65,96094	51,78906	66,71875	51,83594	56,22656	48,14063	59,125	49,75
56,16406	45,79688	65,91406	51,8125	66,6875	51,97656	56,66406	48,54688	61,04688	49,46094
56,22656	45,78906	65,9375	51,79688	66,70313	52,14063	57,02344	48,89844	62,32031	49,40625
56,23438	45,78125	65,95313	51,76563	65,70313	52,33594	57,35156	49,26563	62,64844	49,51563
56,38281	45,80469	66,15625	51,80469	63,64844	52,46875	57,67188	49,55469	62,96875	49,76563
56,39844	45,78906	66,39063	51,85156	62,09375	52,55469	57,96094	49,88281	63,46094	50,14063
56,64844	45,82031	66,44531	51,83594	60,8125	52,48438	58,14063	50,15625	63,85938	50,54688
56,14063	45,82031	66,40625	51,86719	59,61719	52,34375	58,36719	50,4375	63,94531	50,96875
56,07813	45,8125	66,35938	51,85156	59,41406	52,07813	58,49219	50,64844	64,1875	51,32031
56,09375	45,8125	66,41406	51,88281	59,10156	51,72656	58,63281	51,28906	64,38281	51,75781
56,125	45,8125	66,46875	51,86719	58,85156	51,40625	58,39063	51,35938	64,65625	52,09375

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
56,20313	45,8125	66,51563	51,88281	58,65625	51,08594	57,33594	51,35938	64,8125	52,42969
56,625	45,79688	66,26563	51,875	59,78125	50,78906	54,26563	51,39063	64,92188	52,79688
56,75	45,82031	66,29688	51,875	61,32031	50,5	51,83594	51,3125	64,67188	53,0625
56,76563	45,8125	66,19531	51,88281	63,33594	50,375	50,34375	50,14063	62,45313	53,66406
56,83594	45,8125	66,02344	51,89844	65,60938	50,375	49,35156	49,27344	60,8125	53,67188
56,67188	45,80469	65,99219	51,86719	65,72656	50,46875	49,15625	48,34375	59,03906	53,64844
56,11719	45,84375	66,02344	51,85938	65,80469	50,70313	51,3125	47,58594	57,70313	53,64844
56,03906	45,85156	66	51,82813	65,9375	50,95313	53,53906	47,0625	56,35938	53,0625
55,99219	45,86719	66,00781	51,80469	66,04688	51,17188	54,70313	47,07031	55,60938	52,60938
55,89844	45,82031	66,04688	51,84375	66,04688	51,38281	55,46094	47,4375	55,14844	52,07031
55,89844	45,83594	65,94531	51,85156	66,10156	51,53125	55,89063	47,875	54,60938	51,5
55,85156	45,82813	65,97656	51,8125	66,20313	51,64063	56,32813	48,27344	53,96875	50,94531
55,92188	45,82031	65,90625	51,83594	66,24219	51,78906	56,71094	48,66406	54,85156	50,33594
55,84375	45,79688	65,85938	51,84375	66,38281	51,96094	57	49,03125	56,69531	49,78125
55,77344	45,8125	65,91406	51,82031	66,45313	52,13281	57,19531	49,35938	58,74219	49,29688
55,82813	45,79688	65,94531	51,8125	65,75	52,34375	57,42188	49,63281	60,52344	49,03906
55,85156	45,79688	66,03125	51,82031	63,42969	52,48438	57,63281	49,90625	62,0625	48,94531
55,83594	45,77344	66,10156	51,82031	61,91406	52,53906	57,85938	50,14844	62,35938	49,08594
55,85156	45,78906	66,03906	51,8125	60,09375	52,47656	58,08594	50,36719	62,54688	49,375
55,78906	45,77344	66,1875	51,82031	59,10156	52,28125	58,25781	50,53906	62,85938	49,77344
55,82031	45,78125	66,17969	51,82031	58,85156	52,03125	58,34375	50,67188	63,16406	50,23438
55,78125	45,77344	66,20313	51,8125	58,47656	51,63281	58,39844	51,30469	63,59375	50,60156
55,82031	45,77344	66,17188	51,83594	58,19531	51,28125	58,20313	51,33594	63,78906	51,03125
55,76563	45,72656	66,03906	51,79688	58,92969	50,88281	56,83594	51,35156	63,73438	51,40625
55,95313	45,75	66,02344	51,79688	60,41406	50,5625	53,98438	51,375	63,84375	51,78906
55,92188	45,72656	65,91406	51,78906	62,15625	50,32813	51,46875	50,92188	63,91406	52,07031
55,91406	45,75	65,8125	51,78906	64,49219	50,25	50,21875	50,02344	64,10156	52,40625
55,83594	45,71875	65,83594	51,78125	65,78125	50,28906	49,25781	49,17188	64,17969	52,66406
55,82813	45,74219	65,92969	51,76563	66,03125	50,54688	49,25	48,25781	64,22656	52,875
55,60938	45,74219	65,92188	51,77344	66,1875	50,82813	51,32031	47,5	62,94531	53
55,53906	45,71094	65,875	51,72656	66,36719	51,125	53,5	47,03125	61,3125	53,57031
55,54688	45,70313	65,98438	51,75	66,53906	51,35156	54,65625	47,09375	59,60156	53,60156
55,5	45,64844	66,01563	51,73438	66,75	51,59375	55,19531	47,4375	57,90625	53,60156
55,52344	45,60156	66,08594	51,74219	66,82031	51,71875	55,60156	47,83594	56,60938	52,96875
55,52344	45,57813	66	51,77344	66,97656	51,88281	56,03906	48,21875	55,64063	52,57031
55,52344	45,53906	65,9375	51,75781	66,26563	52,11719	56,36719	48,57813	55,21094	52,08594
55,60938	45,53125	65,9375	51,74219	64,78906	52,28906	56,70313	48,89063	54,51563	51,53906
55,64063	45,52344	66	51,74219	62,875	52,44531	57	49,14844	54,02344	50,96094

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
55,60156	45,50781	66,01563	51,72656	61,23438	52,44531	57,27344	49,44531	54,35938	50,33594
55,5625	45,53906	66	51,73438	60,04688	52,29688	57,51563	49,73438	55,84375	49,80469
55,55469	45,49219	66,09375	51,71875	59,01563	52,11719	57,72656	49,99219	57,8125	49,25781
55,52344	45,49219	66,04688	51,75	58,77344	51,83594	57,92969	50,20313	59,46875	48,9375
55,52344	45,48438	66,02344	51,78125	58,49219	51,53906	58,00781	50,39063	61,04688	48,78125
55,46875	45,47656	66,03906	51,75	58,13281	51,125	58,14063	50,57813	61,41406	48,83594
55,46094	45,46875	65,99219	51,75	58,79688	50,82813	58,1875	50,66406	61,54688	49,03125
55,47656	45,48438	65,95313	51,76563	60,24219	50,49219	58,05469	51,28125	61,67969	49,375
55,46094	45,46094	65,84375	51,76563	61,88281	50,28125	57,53125	51,35938	61,80469	49,70313
55,51563	45,44531	65,78906	51,71875	64,30469	50,19531	55,49219	51,33594	62,02344	50,07031
55,66406	45,42969	65,82031	51,75	65,71094	50,25	52,36719	51,3125	62,1875	50,39844
55,625	45,42188	65,91406	51,75	65,6875	50,46094	50,89844	50,3125	62,42969	50,75
55,71875	45,44531	65,72656	51,73438	65,78906	50,67969	49,55469	49,42969	62,55469	51,00781
55,71094	45,44531	65,80469	51,74219	65,96094	50,98438	48,88281	48,5625	62,72656	51,3125
55,5625	45,44531	65,67969	51,73438	66,03125	51,21094	49,5625	47,78125	62,75	51,5625
55,42969	45,46094	65,50781	51,71094	66,0625	51,39063	52,32813	47,07031	62,80469	51,8125
55,36719	45,44531	65,48438	51,71875	66,15625	51,52344	53,73438	46,86719	62,92969	51,98438
55,3125	45,46094	65,49219	51,74219	66,00781	51,64063	54,67969	47,07813	62,96875	52,16406
55,25	45,42188	65,44531	51,67969	66,08594	51,85156	55,13281	47,46094	63,03125	52,3125
55,19531	45,40625	65,46094	51,67969	66,04688	51,96094	55,60938	47,89063	63,10156	52,42969
55,22656	45,42188	65,63281	51,66406	64,6875	52,17188	56,00781	48,23438	63,39844	52,55469
55,25781	45,40625	65,77344	51,66406	62,42969	52,28125	56,39063	48,5625	62,78906	52,6875
55,32813	45,375	65,95313	51,67969	60,75	52,29688	56,66406	48,875	61,58594	52,82031
55,28906	45,35156	66,13281	51,67969	59,35156	52,17969	56,94531	49,17188	60,51563	52,84375
55,36719	45,38281	66,22656	51,66406	58,40625	51,94531	57,14844	49,4375	59,45313	52,82031
55,39063	45,35156	66,39844	51,70313	58,17969	51,64844	57,375	49,72656	58,58594	52,70313
55,41406	45,375	66,42969	51,70313	57,92969	51,28906	57,51563	49,92969	57,84375	52,5
55,46094	45,375	66,47656	51,71094	57,66406	50,89844	57,66406	50,14063	57,55469	52,16406
55,46875	45,35156	66,39844	51,71875	58,96875	50,54688	57,80469	50,29688	57,20313	51,79688
55,54688	45,35156	66,28906	51,74219	60,57813	50,19531	57,875	50,48438	56,83594	51,40625
55,46875	45,38281	66,16406	51,72656	62,72656	50,02344	57,91406	50,57031	56,51563	51,03906
55,44531	45,35938	66,04688	51,73438	64,85938	50,01563	57,96875	50,75	57,8125	50,71094
55,44531	45,38281	65,9375	51,69531	65,76563	50,17969	57,73438	51,27344	59,16406	50,32813
55,4375	45,33594	65,98438	51,71875	65,73438	50,39063	56,67969	51,35938	60,39844	50,08594
55,625	45,35156	65,96094	51,69531	65,77344	50,65625	53,50781	51,36719	61,41406	50
55,71094	45,35156	65,99219	51,69531	65,86719	50,90625	51,38281	50,51563	61,40625	50,03906
55,76563	45,35156	66,00781	51,71094	66,04688	51,13281	49,94531	49,75	61,53906	50,17188
55,76563	45,35938	65,96094	51,72656	66,21094	51,30469	48,92188	48,875	61,72656	50,33594

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
55,65625	45,39844	65,92188	51,72656	66,21094	51,45313	49,07031	48,0625	61,75781	50,5625
55,58594	45,39844	65,84375	51,72656	66,19531	51,57813	51,35938	47,23438	61,88281	50,82813
55,4375	45,42969	65,90625	51,73438	66,25781	51,78906	53,40625	46,85938	61,97656	51,0625
55,42969	45,42188	65,96875	51,78125	66,09375	51,96094	54,625	46,96094	62,16406	51,21094
55,46094	45,4375	66,21094	51,78906	64,46875	52,17188	55,10156	47,3125	62,51563	51,41406
55,45313	45,39063	66,38281	51,78906	62,45313	52,28906	55,67188	47,75781	62,8125	51,63281
55,58594	45,39063	66,57031	51,78906	60,88281	52,29688	56,17188	48,14063	63,08594	51,83594
55,60156	45,40625	66,80469	51,8125	59,28125	52,15625	56,60156	48,46094	63,17969	52
55,67188	45,41406	66,96094	51,82031	58,51563	51,97656	56,88281	48,84375	63,78125	52,17969
55,60938	45,35156	67,17188	51,84375	58,19531	51,65625	57,09375	49,1875	63,79688	52,34375
55,70313	45,42188	66,98438	51,88281	57,91406	51,26563	57,34375	49,49219	63,72656	52,49219
55,72656	45,39063	66,98438	51,91406	57,57813	50,89844	57,57813	49,77344	62,42969	52,69531
55,75781	45,39063	66,92969	51,92188	58,76563	50,55469	57,78125	50,01563	61,29688	52,82031
55,71875	45,42188	66,54688	51,92969	60,26563	50,1875	57,94531	50,22656	60,11719	52,84375
55,71094	45,42969	66,48438	51,89844	62,21094	49,97656	57,99219	50,41406	58,94531	52,78906
55,64063	45,46094	66,29688	51,9375	64,67969	49,94531	58,22656	50,625	57,9375	52,65625
55,60938	45,4375	66,25781	51,91406	65,36719	50,04688	58,08594	50,69531	57,02344	52,34375
55,64844	45,48438	66,21094	51,89063	65,46094	50,25	57,73438	51,33594	56,5	52,00781
55,67188	45,44531	66,39063	51,90625	65,75	50,5	55,75	51,38281	56,14063	51,57031
55,90625	45,45313	66,40625	51,91406	65,77344	50,75	52,71094	51,35938	55,78906	51,14844
55,9375	45,46094	66,39844	51,95313	65,72656	50,97656	50,9375	50,33594	55,4375	50,71094
55,92969	45,47656	66,39063	51,96094	65,73438	51,10938	49,6875	49,57813	56,52344	50,29688
55,9375	45,50781	66,32813	51,96875	65,74219	51,25781	48,69531	48,5625	58,0625	49,83594
55,89063	45,51563	66,24219	51,96875	65,72656	51,36719	49,14063	47,75781	59,28125	49,54688
55,70313	45,5	66,26563	52	65,77344	51,50781	51,85156	47,01563	60,36719	49,39844
55,625	45,53125	66,17188	52,01563	65,77344	51,66406	53,53906	46,75	60,65625	49,375
55,55469	45,53125	66,14844	51,97656	65,85156	51,85938	54,53906	46,89063	60,75781	49,5
55,50781	45,53125	66,19531	51,99219	64,70313	52,05469	55,10156	47,30469	62,95313	49,69531
55,48438	45,53906	65,98438	51,97656	62,57031	52,1875	55,47656	47,71094	64,89844	49,92969
55,46875	45,48438	66,125	51,94531	60,95313	52,21094	55,84375	48,07813	65,42188	50,30469
55,45313	45,46094	66,17188	51,96875	59,85938	52,09375	56,23438	48,42969	65,91406	50,76563
55,44531	45,42969	66,21875	51,96875	58,9375	51,875	56,57813	48,74219	66,17969	51,32813
55,42188	45,44531	66,24219	51,96094	58,67188	51,625	56,78125	49,04688	66,45313	51,82813
55,46094	45,44531	66,4375	52	58,4375	51,25	57,03125	49,32031	66,75781	52,40625
55,50781	45,44531	66,47656	51,97656	58,13281	50,90625	57,27344	49,60156	66,99219	52,94531
55,46094	45,45313	66,47656	51,97656	58,54688	50,52344	57,47656	49,83594	64,63281	53,63281
55,46875	45,44531	66,36719	51,98438	59,92188	50,25	57,59375	50,03906	62,14063	53,78125
55,41406	45,42188	66,24219	51,99219	61,96875	49,98438	57,69531	50,17969	60,05469	54,03125

*Продолжение прил.
Продолжение табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
55,39063	45,40625	66,11719	51,95313	64,34375	49,92969	57,74219	50,35156	58,52344	54,02344
55,34375	45,42969	66,0625	51,91406	65,10156	50,00781	57,82031	50,5	57,44531	53,82031
55,32031	45,36719	65,92969	51,94531	65,50781	50,21875	57,69531	50,63281	56,50781	53,625
55,32813	45,38281	65,94531	51,91406	65,71094	50,45313	57,3125	50,64063	56,03125	52,89063
55,38281	45,32813	66,01563	51,875	65,72656	50,71094	55,94531	50,67969	55,48438	52,32031
55,52344	45,35938	66	51,85938	65,71094	50,9375	53,67188	50,61719	54,9375	51,67188
55,53906	45,35938	66,13281	51,875	65,74219	51,10938	51,625	50,29688	55,26563	51,125
55,60938	45,33594	66,07031	51,86719	65,89063	51,24219	49,95313	49,60938	56,17188	50,54688
55,61719	45,33594	65,94531	51,82031	65,97656	51,39844	48,89063	48,77344	58,02344	50
55,57031	45,36719	66,00781	51,85156	65,9375	51,53125	48,71875	47,91406	61,10156	49,57813
55,48438	45,375	65,90625	51,86719	65,99219	51,69531	50,375	47,16406	63,79688	49,35938
55,34375	45,36719	65,83594	51,84375	64,83594	51,88281	52,78125	46,64063	64,92969	49,4375
55,26563	45,39063	66,01563	51,82813	63,22656	52,02344	53,84375	46,64063	65,36719	49,75781
55,33594	45,35156	66,17188	51,84375	61,64063	52,10938	54,65625	46,94531	65,90625	50,28906
55,34375	45,35156	66,22656	51,8125	60,26563	52,04688	55,15625	47,375	66,23438	50,82031
55,33594	45,32031	66,20313	51,82813	59,05469	51,89063	55,67188	47,77344	66,625	51,47656
55,41406	45,36719	66,28125	51,82813	58,60156	51,67188	56,10156	48,14844	66,94531	52,03906
55,42969	45,35938	66,25	51,8125	58,26563	51,30469	56,42969	48,47656	67,29688	52,63281
55,35938	45,34375	66,19531	51,82031	57,99219	50,9375	56,67188	48,79688	66,28906	53,24219
55,38281	45,35156	66,19531	51,83594	57,77344	50,64063	56,88281	49,10938	63,03125	53,67188
55,30469	45,32813	66,17188	51,82031	58,75	50,29688	57,10156	49,375	60,65625	54,00781
55,28125	45,35156	66,16406	51,80469	60,35156	50	57,26563	49,625	59,11719	54,14844
55,25	45,33594	65,88281	51,78125	62,625	49,84375	57,35156	49,82031	57,66406	54,02344
55,78125	45,32813	65,76563	51,77344	64,28125	49,82031	57,44531	50,00781	56,67188	53,6875
56,44531	45,32031	65,82813	51,77344	64,625	49,92188	57,47656	50,13281	55,92969	53,23438
56,53906	45,30469	65,82813	51,77344	64,71875	50,15625	57,57031	50,3125	55,24219	52,55469
56,6875	45,33594	65,73438	51,73438	64,78906	50,33594	57,65625	50,39844	54,60938	51,86719
56,67969	45,39063	65,63281	51,71875	64,92188	50,59375	57,71875	50,53125	54,46094	51,25781
56,73438	45,4375	65,57813	51,70313	64,96875	50,72656	57,82813	50,60938	55,21094	50,6875
56,75781	45,52344	65,53906	51,71875	65,03125	50,84375	57,83594	50,625	56,53125	50,05469
56,70313	45,53125	65,60938	51,70313	65,10156	50,96094	57,89063	51,05469	59,08594	49,53125
56,72656	45,58594	65,53125	51,73438	65,03906	51,07813	57,9375	51,28906	62,16406	49,23438
56,72656	45,74219	65,48438	51,69531	65,42969	51,21875	57,97656	51,33594	64,39844	49,11719
56,75781	45,76563	65,82031	51,6875	65,60156	51,40625	58,02344	51,32031	64,99219	49,34375
56,73438	45,74219	66,05469	51,70313	64,99219	51,57031	58,08594	51,32813	65,73438	49,78906
56,79688	45,77344	66,1875	51,69531	63,89063	51,73438	58,14063	51,34375	66,10156	50,38281
56,84375	45,76563	66,42969	51,70313	62,01563	51,83594	58,21094	51,34375	66,61719	50,96875
57,0625	45,85938	66,5	51,73438	60,69531	51,83594	58,25781	51,33594	67,0625	51,60156

*Окончание прил.
Окончание табл. П2*

Здание 21		Здание 22		Здание 23		Здание 24		Здание 25	
$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$	$T_{01}, ^\circ\text{C}$	$T_{02}, ^\circ\text{C}$
57,14844	45,89844	66,57031	51,74219	59,28906	51,71094	58,35156	51,32813	67,47656	52,20313
57,25	45,91406	66,46094	51,72656	58,39063	51,47656	58,40625	51,35156	66,71094	52,80469
57,28125	46,01563	66,60156	51,75	58,17969	51,17188	58,48438	51,35938	63,85156	53,59375
57,3125	46,01563	66,52344	51,75781	57,98438	50,82813	58,51563	51,4375	61,25	53,77344
57,42188	46,10938	66,64844	51,75781	57,70313	50,48438	58,64844	51,49219	59,29688	54,02344
57,4375	46,14844	66,60156	51,75781	57,75781	50,15625	58,74219	51,54688	57,78125	53,90625
57,46094	46,17188	66,52344	51,77344	59,20313	49,84375	58,83594	51,61719	56,5	53,625
57,42969	46,22656	66,35156	51,78125	61,03125	49,625	58,875	51,80469	55,49219	52,96875
57,35156	46,28125	66,09375	51,78906	63,60938	49,51563	58,96094	51,80469	54,75781	52,41406
57,35156	46,3125	65,9375	51,75781	64,22656	49,5625	58,91406	51,86719	54,07813	51,73438
57,32813	46,33594	65,92188	51,75	64,28125	49,71094	58,97656	51,89844	53,52344	51,03906
57,27344	46,38281	65,83594	51,77344	64,32031	49,92188	58,99219	51,92969	53,50781	50,42969
57,30469	46,40625	65,8125	51,75781	64,4375	50,10938	59,0625	51,99219	54,28125	49,82813
57,25	46,39063	65,75781	51,73438	64,5	50,32813	58,96875	52,0625	56,49219	49,19531
57,25781	46,32813	65,65625	51,76563	64,53125	50,50781	59,03906	52,11719	59,125	48,75
57,25781	46,39063	65,74219	51,74219	64,63281	50,59375	59,03125	52,10938	61,84375	48,45313
57,25	46,42188	65,72656	51,77344	64,61719	50,64844	59,03906	52,16406	63,59375	48,49219
57,28125	46,44531	65,73438	51,73438	64,625	50,74219	59,01563	52,17188	63,875	48,78906
57,25781	46,48438	65,67188	51,77344	64,73438	50,88281	59,0625	52,17969	64,17188	49,28906
57,25781	46,47656	65,6875	51,72656	64,84375	51,03906	59,07031	52,21875	64,59375	49,84375
57,26563	46,4375	65,69531	51,74219	64,92969	51,21094	59,0625	52,21094	64,90625	50,44531
57,28125	46,4375	65,73438	51,75	65,05469	51,40625	59,04688	52,24219	65,42969	50,96875
57,24219	46,40625	65,66406	51,77344	63,76563	51,55469	59,10156	52,25	65,63281	51,49219
57,35156	46,48438	65,47656	51,69531	62,45313	51,65625	59,14844	52,25781	65,98438	51,97656
57,25	46,48438	65,45313	51,69531	61,14063	51,64063	59,08594	52,28125	66,3125	52,53125
57,32813	46,45313	65,44531	51,65625	60,1875	51,57813	59,03125	52,27344	63,75	53,29688

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шилькрот Е.О. Эффективность систем отопления и вентиляции зданий / Е.О. Шилькрот // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). – 2003. – №4. – с. 6-11.
2. Сканави А.Н. Отопление / А.Н. Сканави, Л.М. Махов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 576 с.
3. Чистович С.А. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович [и др.]. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1987. – 248 с.
4. Кононович Ю.В. Тепловой режим зданий массовой застройки / Ю.В. Кононович. – М.: Стройиздат, 1986. – 157 с.
5. Немцев З.Ф. Теплоэнергетические установки и теплоснабжение / З.Ф. Немцев, Г.В. Арсеньев: учеб. пособие для втузов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.
6. Куклик Л.Ф. Индивидуальное регулирование температуры в отапливаемых помещениях / Л.Ф. Куклик, В.Д. Курбан, С.П. Петров // Водоснабжение и санитарная техника. – 1984. – №8. – с.12-13.
7. Туркин В.П. Автоматическое управление отоплением жилых зданий / В.П. Туркин, П.В. Туркин, Ю.Д. Тыщенко. – М.: Стройиздат, 1987. – 192 с.
8. Чистович С.А. Научно-технические задачи автоматизации систем теплоснабжения / С.А. Чистович // Изв. АН СССР: Энергетика и транспорт, 1984. – №1. – с. 99-107.
9. Николаев В.Б. Эффективные методы управления системами теплоснабжения / В.Б. Николаев. – М.: Стройиздат, 1990. – 121 с.
10. Федяев А.В. Развитие теплоснабжающих систем / А.В. Федяев. – М.: Энергия, 2000. – 254 с.
11. Инженерное оборудование зданий и сооружений: энциклопедия / Глав. ред. С.В. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1994.
12. Ливчак В.И. Энергосбережение в системах централизованного теплоснабжения на новом этапе развития / В.И. Ливчак // Энергосбережение. – 2000. – №2. – с. 4-9.
13. СП 41-101-95 Проектирование тепловых узлов. – Введ. 1996-07-01. – М.: ГУП ЦПП, 1997.

14. Грудзинский М.М. Энергоэффективные системы отопления / М.М. Грудзинский, С.И. Прижижецкий, В.Л. Грановский // АВОК. – 1999. – №6. – с. 38-39.
15. Грановский В.Л. Техничко-экономическая эффективность индивидуального регулирования расхода тепла в системах отопления / В.Л. Грановский // АВОК. – 1995. – №1/2. – с.18-19.
16. ГОСТ Р 8.642-2008. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем узлов учета тепловой энергии. Основные положения. – Введ. 2008-09-30. – М.: Стандартиформ, 2008. – 11с.
17. Электронные регуляторы и электрические средства управления: каталог. RC.08.E1.50. – М.: ООО Данфосс, 2007.
18. Применение средств автоматизации Danfoss в тепловых пунктах систем централизованного теплоснабжения зданий. М: ООО Данфосс, 2007.
19. Потапенко Е.А. Автоматизация процесса отопления распределенного комплекса зданий с алгоритмами управления, учитывающими климатические факторы: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Потапенко. – Орел, 2004. – 152 с.
20. Пырков В.В. Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения. Теория и практика. – К.: ДП Такі справи, 2010. – 304 с.
21. Первовский Ю.А. Гидравлический расчет в тепловых сетях: мертвый подход или живая модель? / Ю.А. Первовский, О.В. Анподистов // Новости теплоснабжения.– 2004. – № 01 (41).
22. Тарновский М.В. Думы об АЭСКО / М.В. Тарновский // Электронный журнал энергосервисной компании "Экологические системы". – 2002. – №2.
23. Гершкович В.Ф. Так ли уж плох элеватор? / В.Ф. Гершкович, К.Д. Маргулис // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 4 (19). – с. 37 – 39.
24. Рябцев В.И. Краткий анализ двух тепловых схем индивидуальных тепловых пунктов / В.И. Рябцев // Новости теплоснабжения. – 2005. – №4.
25. Триш Ф. Использование регулируемых элеваторов в индивидуальных тепловых пунктах систем централизованного

- теплоснабжения / Ф. Триш // Новости теплоснабжения. – 2005. – №10 (62).
26. Ильин В.К. Малозатратное решение по ликвидации перетопов в системах отопления / В.К. Ильин // Энергосовет. – 2011. – №1 (14). – с. 49-50.
 27. Пат. 2087938 Российская Федерация, МПК G05D23/00. Саморегулируемый тепловой элеватор / Майборода П.М.; заявитель и патентообладатель Майборода П.М. – № 94002719/09; заявл. 26.01.1994; опублик. 20.08.1997.
 28. Пат. 2118843 Российская Федерация, МПК G05D23/02, G05D23/12. Регулятор температуры системы теплоснабжения зданий / Юферев Ю.Б., Зверьков Г.Е., Смирнов В.Е.; заявитель и патентообладатель Научно-производственная фирма "ИНПРО". – № 94010642/09; заявл. 28.03.1994; опублик. 10.09.1998.
 29. Ливчак В.И. За оптимальное сочетание автоматизации регулирования подачи и учета тепла / В.И. Ливчак // АВОК. – 1998. – №4. – с. 44-51.
 30. Филиппов А.М. Ошибки при внедрении автоматизированных узлов управления систем отопления в Москве (2008–2009 годы) / А.М. Филиппов // Сантехника. – 2010. – №3.
 31. Кулев М.В. Применение комплекса автоматизации регулирования тепла в административных зданиях Екатеринбурга / М.В. Кулев // Энергосбережение. – 2000. – №2. – с. 24-25.
 32. Грановский В.Л. Система отопления жилых зданий массового строительства и реконструкции с комплексным автоматизированием теплоснабжения / В.Л. Грановский, С.И. Прижижецкий // АВОК. – 2002. – №5. – с. 66-69.
 33. Пат. 2112270 Российская Федерация, МПК G05D23/01, F16K31/64. Термостатический клапан для радиатора / Бег Хансен Хеннинг; заявитель и патентообладатель Данфосс А/С (DK). – № 96101143/09; заявл. 13.06.1994; опублик. 27.05.1998.
 34. Миrowski А. Материалы для проектирования котельных и современных систем отопления / А. Миrowski, Г. Ланге, И. Елень. – 1-е изд. Польша: Изд-во Виссманн, 2005. – 294 с.
 35. ГОСТ 25720-83. Котлы водогрейные. Термины и определения. – Введ. 1984-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005. – 6с.

36. Бузников Е.Ф. Пароводогрейные котлы для электростанций и котельных / Е.Ф. Бузников, А.А. Верес, В.Б. Грибов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
37. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов [Приняты постановлением Госгортехнадзора России от 11.06.2003 № 88] // Российская газета – 2003. – № 120/1.
38. Хаванов П.А. Автономная система теплоснабжения – альтернатива или шаг назад? / П.А. Хаванов // АВОК. – 2004. – №1. – с. 34 – 37.
39. Хаванов П.А. Принципиальные тепловые схемы автономных источников теплоснабжения с коллекторами малых перепадов давления / П.А. Хаванов // АВОК. – 2002. – №3. – с. 26-35.
40. Янкелевич В.И. Перевод паровых котлов на водогрейный режим работы / В.И. Янкелевич, В.Г. Григорьев // Аква-терм. – 2002. – №2 (6).
41. Гафаров А.Х. Особенности перевода паровых котлов ДКВР-20-13 и ДКВР-10-13 в водогрейный режим на предприятии тепловых сетей г. Набережные Челны / А.Х. Гафаров // Новости теплоснабжения. – 2006. – №3 (67).
42. Ковальский Ч. Котлы газовые для центрального отопления / Ч. Ковальский. – Варшава: WNT, 1994.
43. Мижилинська К. Гидравлические схемы источников тепла с несколькими котлами. Гидравлическая стрелка – что это? / К. Мижилинська // Польский монтажник. – 1996. – №5.
44. Мижилинська К. Методы гидравлического разделения котловых и отопительных контуров / К. Мижилинська // Теплоснабжение, отопление, вентиляция. – 1997. – №10.
45. Цвирс Вильгельм. Гидравлические стрелки / Вильгельм Цвирс // Строительная техника. – 1996. – №6.
46. Панкратов В.В. Системы автоматизации и диспетчеризации высотных жилых комплексов / В.В. Панкратов, А.Н. Колубков, Н.В. Шилкин // АВОК. – 2005. – №4. – с. 8-17.
47. Росаткевич Г.К. Единая автоматизированная система диспетчерского контроля и управления городским хозяйством на базе московской волоконно-оптической сети / Г.К. Росаткевич, В.В. Краснобаев // Энергосбережение. – 1999. – №5. – с. 52-62.

48. Родионов В.Д. Технические средства АСУТП / В.Д. Родионов, В.А. Терехов, В.Б. Яковлев: учеб. пособие; под ред. В.Б. Яковлева. – М: Высшая шк., 1989. – 263 с.
49. Системы диспетчерского управления сбора данных (SCADA-системы) // Мир компьютерной автоматизации: URL: <http://www.mka.ru/?p=41524>. Дата обращения: 09.08.2011.
50. Web-технологии на службе АСУТП // Электронный журнал энергетической компании "Экологические системы". – 2002. – №6.
51. Фейт С. TCP/IP Архитектура, протоколы, реализация / С. Фейт. – М.: Лори, 2000. – 424 с.
52. Карташев И. Тонкий клиент / И. Карташев // Компьютерра-онлайн: URL: <http://www.computerra.ru/hitech/35748>. Дата обращения: 13.09.2011.
53. Официальный сайт компании IntegraXor. URL: <http://www.integraxor.com>. Дата обращения: 18.09.2011.
54. Terminal Services for InTouch от компании Wonderware // Сайт официальных представителей компании InTouch в России: URL: http://intouch.ru/catalog/intouch_ts.shtm. Дата обращения: 22.09.2011.
55. Папировский Р.В. Internet технологии в промышленной автоматизации: опыт построения распределенных систем мониторинга с использованием WebNavigator / Р.В. Папировский, Д.В. Маслов / /Автоматизация в промышленности. — 2003. — №7.
56. TRACE MODE Data Center – сервер удаленного Web-доступа к АСУТП // Официальный сайт компании TRACE MODE. URL: <http://www.adastra.ru/products/runtime/scada/DataCenter>. Дата обращения: 28.09.2011.
57. AdAstra Research Group, Ltd. Официальный сайт. URL: <http://www.adastra.ru>. Дата обращения: 01.10.2011.
58. Siemens WinCC. Официальный сайт. URL: <http://www.automation.siemens.com/mcms/human-machine-interface/en/visualization-software/scada/Pages/Default.aspx>. Дата обращения: 01.10.2011.
59. Астахов А. Реалии и мифы кибертерроризма / А. Астахов //

Открытые Системы. – 2003. – №5.

60. Обзор инцидентов информационной безопасности АСУТП зарубежных государств: Аналитический отчет / С.В. Гарбук, А.А. Комаров, Е.И. Салов. – М.: Станкоинформзащита. – 2010. – 27 с.
61. Ионин А.А. Теплоснабжение: Учебник для вузов / А.А. Ионин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.
62. Крутов В.И. Теплотехника / В.И. Крутов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 420 с.
63. Луканин В.Н. Теплотехника: Учебник для вузов/ В.Н. Луканин [и др.]. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.
64. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств/В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
65. Костриков С.В. Автоматизация процесса отопления зданий с применением теплообменников и учетом фасадного регулирования: дис. ... канд. техн. наук / С.В. Костриков. – Белгород, 2005. – 146 с.
66. Миллер У. мл. Симметрия и разделение переменных / У. Миллер мл, пер. с англ. Г.П. Бабенко. – М.: Мир, 1981.
67. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: УРСС, 2003. – 784 с.
68. Алифанов О.М. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: учебное пособие / О.М. Алифанов, П.Н. Вабищевич, В.В. Михайлов и др. – М.: Логос, 2001. – 400 с.
69. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха/ В.М. Гусев, Н.И. Ковалев, В.П. Попов, В.А. Потрошков. – Л.: Стройиздат, 1981.– 343 с.
70. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную динамику / Р.П. Федоренко. – М.: Изд-во МФТИ, 1994. – 528 с.
71. Оран Э. Численное моделирование реагирующих потоков / Э. Оран, Дж. Борис. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
72. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином, 2001 – 630 с.
73. Тихомиров К.В. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция / К.В. Тихомиров, Э.С. Сергеенко. – М.: Стройиздат, 1991. – 480 с.
74. Табунщиков Ю.А. Минимизация затрат энергии при прерывистом

- режиме отопления / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач // АВОК. – 2001. – №1/2. – с. 14–20.
75. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК–ПРЕСС, 2002. – 194 с.
 76. Добротин С.А. Применение имитационного моделирования на этапе синтеза системы автоматического регулирования подачи тепла на отопление здания / С.А. Добротин, Е.Л. Прокопчук // Успехи современного естествознания. – 2008. – № 3 – с. 50-51.
 77. Дэбни Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж.Дэбни, Т.Харман. Изд-во: Бином. Лаборатория знаний, 2003. – 404 с.
 78. Алексеев Е.Р. MATLAB 7. Самоучитель / Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова. Изд-во: НТ Пресс, 2006. – 464 с.
 79. Махов Л.М. Влияние автоматических регуляторов на гидравлический режим систем водяного отопления / Л.М. Махов, С.М. Усиков // Сантехника. – 2012. – №2.
 80. Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н.М. Зигнер. – 2-е изд, перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
 81. Потапенко Е.А. Особенности управления процессом отопления распределенного комплекса зданий: монография / Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 163 с.
 82. Потапенко Е.А. Исследование алгоритмов управления процессом отопления здания с зависимым теплоснабжением / Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. – 2011. – №2 – с. 74-78.
 83. Гридчин А.М. Опыт внедрения современных энергоэффективных технологий на основе автоматизации распределенных энергосистем зданий вуза / А.М. Гридчин [и др.] // Строительные материалы. Приложение "Строительные материалы: бизнес". – 2005. – №2. – с. 2-5.
 84. Потапенко Е.А. Возможности исследования процессов отопления распределенного комплекса зданий на основе стратифицированной модели теплоснабжения / Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков // Известия Самарского научного центра

- Российской академии наук. – 2011. – Т13. №1 (2). – с. 467-471.
85. Оборудование для автоматизации: каталог продукции. – М.: ООО ОВЕН, 2010. – 384 с.
 86. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – 4-е изд. – М.: Профессия, 2003. – 752 с.
 87. Лазарева Т.Я. Основы теории автоматического управления: учебное пособие/ Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 352 с.
 88. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / А.С. Ключев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
 89. Варламов И.Г. Чем руководствоваться при принятии решения по выбору закона регулирования (ПИ или ПИД) в процессе наладки САР на предприятии? / И.Г. Варламов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – №11. – с. 59-60.
 90. Каталог продукции МОХА. Компьютеры на базе RISC-процессора. URL: <http://www.moxa.ru/group/listAll/1820371>. Дата обращения: 02.03.2012.
 91. ICP DAS μ PAC I-7188 and μ PAC I-7186 series. URL: http://www.icpdas.com/products/PAC/i-7188_7186/i-7188_introduction.htm. Дата обращения: 02.03.2012.
 92. Шампайн Л.Ф. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием MATLAB: Учебное пособие / Л.Ф. Шампайн, И. Гладвел, С. Томпсон, 2009. – 304 с.
 93. Hairer E. Solving ordinary differential equations I: nonstiff problems / E. Hairer, S.P. Norsett, G. Wanner. – 2nd revised edition. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
 94. Официальный сайт ЗАО "НПФ "Агрострой". URL: <http://www.agrostroy.ru/index.php?page=1>. Дата обращения: 02.08.2012.
 95. Официальный сайт ООО "Вексон". URL: <http://www.wexon.ru>. Дата обращения: 02.08.2012.
 96. Солдатенков А.С. Разработка и исследование математической модели управления автоматизированным индивидуальным

- тепловым пунктом / А.С. Солдатенков, А.Н. Потапенко, С.Н. Глаголев // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. – 2012. – №1 (140) – с. 41-48.
97. Баранчук Е.И. Проектирование и настройка электронных регуляторов / Е.И. Баранчук. - М.-Л.: Машгиз, 1963. - 372 с.
 98. Щеклейн П.С. Опыт эксплуатации автоматизированных систем отопления / П.С. Щеклейн // АВОК. – 2003. – № 4. – с. 46-47.
 99. Панферов С.В. Некоторые проблемы энергосбережения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий / С.В. Панферов, А.И. Телегин, В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия "Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника". – 2010. – № 22. – с. 79-86.
 100. Датчики температуры ESMT, ESM-10, ESM-11, ESMB-12, ESMC, ESMU, AKS. Техническое описание. URL: http://www.danfoss-rus.ru/catalog/sections_files/pt_100012.pdf. Дата обращения: 03.08.2012.
 101. Клапаны регулирующие седельные. VF2 – проходной, VF3 – трехходовой. Техническое описание. URL: http://www.danfoss-rus.ru/catalog/sections_files/VF2,_VF3_2008.pdf. Дата обращения: 05.08.2012.
 102. РТМ 108.711.02-79. Арматура энергетическая. Методы определения пропускной способности регулирующих органов и выбор оптимальной расходной характеристики. – Утвержден 24.12.1979. – М., 1979. – 137 с.
 103. Клапаны регулирующие седельные проходные VM2, VB2. Техническое описание. URL: http://www.danfoss-rus.ru/catalog/sections_files/VM2,_VB2_20081.pdf. Дата обращения: 05.08.2012.
 104. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
 105. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. Учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – Изд. 4-е, перераб. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.
 106. Волков Е.А. Численные методы / Е.А. Волков. – Изд. 5, стер. – М.: Букинист, 2008. – 256 с.
 107. Официальный сайт ООО "ВИЛО РУС". URL: <http://www.wilo.ru/cps/rde/xchg/ru-ru/layout.xsl/index.htm>. Дата

обращения: 18.08.2012.

108. Установки повышения давления Hydro MPC, Hydro Multy E/S. Техническое описание. URL: <http://net.grundfos.com/Appl/WebCAPS/litctrl?cmd=com.grundfos.webcaps.literature.commands.LiteratureDetail&documentid=70709&litlanguage=RUS&typecode=HYMPC&appcode=PRESBOOS&pdfid=829844#>. Дата обращения: 18.08.2012.
109. Потапенко А.Н. Автоматизированное управление процессом централизованного теплоснабжения распределенного комплекса зданий с учетом моделирования этих процессов / А.Н. Потапенко, Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2007. – № 7-8. – с. 120-134.
110. Солдатенков А.С. Инновации в автоматизированных системах централизованного и децентрализованного теплоснабжения зданий образовательного назначения / А.С. Солдатенков, Е.А. Потапенко, А.О. Яковлев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т.12. №4 (3). – с. 618-622.
111. Потапенко А.Н. Математическое моделирование процессов отопления распределенного комплекса зданий при различных схемах теплопотребления / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, Е.А. Потапенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – Т13, №4(4) – 2011 г.– с. 998-1002.
112. Потапенко А.Н. Математическое моделирование управления процессом теплопотребления комплекса зданий / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, С.Н. Глаголев // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. – 2012. – №2 (145) – с. 71-80.
113. Потапенко А.Н. Особенности математической модели управления комплексом зданий с распределёнными энергосистемами / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, Е.А. Потапенко, С.Н. Глаголев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012.– Т14. №1 (2). – с. 672-678.
114. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг; пер. с англ.; под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
115. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления: учеб.

- пособие / А.Н. Дилигенская. – Самара: Изд-во Самарского гос.техн. ун-та, 2009. – 136 с.
116. Киричков В.Н. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами / В.Н. Киричков. – Киев: Вища школа, 1990. – 187 с.
 117. Дьяконов В.П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 448 с.
 118. Поляков К.Ю. Основы теории цифровых систем управления: учеб. пособие / К.Ю. Поляков. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2006. – 161 с.
 119. Алексеев А.А. Теория управления / А.А. Алексеев [и др.] – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 1999. – 435 с.
 120. Солдатенков А.С. Математическое моделирование процесса отопления здания на базе автоматизированного теплового пункта / А.С. Солдатенков // Сб. материалов международной научно-технической конференции: Современные сложные системы управления X – Старый Оскол: СТИ МИСиС. – 2012. – с. 57-61.
 121. Потапенко Е.А. Исследование математической модели управления автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом с типовыми регуляторами / Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.Н. Потапенко, С.Н. Глаголев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т14. №1 (2). – с. 679-684.
 122. Онлайн каталог Wilo-CronoBloc-BL. URL: http://productfinder.wilo.com/ru/RU/productrange/0000002300000e4d00010023/fc_range_description. Дата обращения: 27.08.2013.
 123. Белоусов А.В. Автоматизация и управление вентиляционными процессами на базе электростатической фильтрации газовоздушных сред: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Белоусов. – Орел, 2003. – 177 с.
 124. Гидравлическое подключение систем отопления при автономном теплоснабжении // Вентиляция. Отопление. Кондиционирование: АВОК. – 2005. – №3. – с. 64-70.
 125. Егоров Ю.Н. Электропривод и автоматика. Электрические приводы технологических машин: Учебное пособие / Ю.Н.

- Егоров, И.М. Семёнов. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2008. – 234 с.
126. Потапенко А.Н. Управление процессом теплоснабжения зданий с возможностью имитационного моделирования / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф.: Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии (XVIII научные чтения). – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2007. – с. 102-106.
127. Потапенко А.Н. Особенности имитационного моделирования управления процессом теплоснабжения зданий с учетом экспериментальных данных / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Сб. докл. междунар. науч.-практич. конф.: Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии (XVIII научные чтения). – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2007. – с. 98-101.
128. Солдатенков А.С. Возможности моделирования управления процессом теплоснабжения зданий // Сб. трудов международной научно-практической конференции: Образование, наука, производство и управление. – Старый Оскол: СТИ МИСиС. – 2007. – Т.3. – с. 95-98.
129. Потапенко А.Н. Особенности управления распределенным комплексом зданий с возможностью энергосбережения / А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Международный научно-технический журнал "Світлотехника та електроенергетика". – 2009. – №1 (17). – с. 36-41.
130. Солдатенков А.С. Исследование процессов перераспределения энергоносителя при частичной автоматизации распределенного комплекса зданий / А.С. Солдатенков, А.Н. Потапенко // Международный научно-технический журнал "Світлотехника та електроенергетика". – 2009. – №2 (18). – с. 4-8.
131. Третьяк Л.Н. Обработка результатов наблюдений: Учебное пособие. / Л.Н. Третьяк. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.

Научное издание

Солдатенков Алексей Сергеевич

Математическое моделирование системы управления
теплопотреблением комплекса зданий

Монография

Подписано в печать 30.11.15. Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 10,2. Уч.-изд. л. 11,0.

Тираж 500 экз. Заказ № Цена договорная

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46