

ПОВЫШЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ¹

Бойко Е.Е., Илюшин П.В.

Институт энергетических исследований РАН, Москва, Россия

e.boiko1991@yandex.ru, ilyushin.pv@mail.ru

Аннотация. Показано, что основными проблемами в системах централизованного теплоснабжения являются крупные аварии на тепловых сетях и низкое качество теплоснабжения потребителей. Для решения указанных проблем предлагается дополнить систему централизованного теплоснабжения новым объектом – активным тепловым пунктом, оснащенный системой автоматического управления.

Ключевые слова: система централизованного теплоснабжения, активный тепловой пункт, система автоматического управления, бесперебойность теплоснабжения, качество теплоснабжения.

Введение

Система теплоснабжения представляет собой совокупность объектов: источников тепловой энергии, тепловых сетей и теплопотребляющих установок, взаимосвязанных единым технологическим процессом производства, передачи и потребления тепловой энергии. По назначению системы теплоснабжения делятся на централизованные и децентрализованные. К первым относятся групповые, районные и городские, ко вторым – индивидуальные и домовые.

Системы централизованного теплоснабжения (СЦТ) широко применяются в густонаселенных городских и промышленных районах регионов и стран с резко-континентальным климатом. Общее количество СЦТ в мире составляет около 80 тыс. единиц. Большая часть СЦТ приходится на скандинавские страны, так как отопительный период в них длится более 200 дней в году [1-3]. В Австралии, Китае, Монголии, Польше, России, Белоруссии и др. энергетическая политика в области теплоснабжения направлена на развитие и модернизацию СЦТ. Процесс урбанизации в развивающихся странах способствует развитию СЦТ для обеспечения тепловой энергией потребителей коммунально-бытового сектора [4].

Одной из основных проблем СЦТ является большое количество аварий, сопровождающихся длительными отключениями потребителей тепловой энергии. Масштабы последствий аварий в СЦТ существенно больше, чем в системах децентрализованного теплоснабжения (СДТ). Это обусловлено большим количеством теплоприемников, так как СЦТ обеспечивают теплоснабжение на значительных территориях с большим числом потребителей [5, 6].

Показательным является отопительный период 2023-2024 гг. Крупные аварии на тепловых сетях СЦТ произошли в 43 регионах России, что указывает на высокую степень их износа [7]. Примерами являются прорыв магистральной теплотрассы в г. Подольск, где без теплоснабжения остались свыше 170 многоквартирных жилых домов. На ликвидацию последствий ушло больше недели [8]. В Липецке в результате прорыва магистрального трубопровода 282 многоквартирных жилых дома оставались без отопления и горячей воды несколько дней. В некоторых из домов ситуация усугублялась прорывом трубопроводов в подвальных помещениях [9].

Важно отметить, что фиксация аварий во всех случаях производилась в момент прорыва тепловых сетей [10-13], что говорит о низкой их наблюдаемости, в том числе в предаварийных режимах. Восстановление теплоснабжения в ряде случаев происходило с нарушением временных требований, установленных в [14], ввиду серьезных повреждений тепловых сетей из-за неуправляемости гидравлическими режимами в процессе развития аварии.

Кроме того, в СЦТ остро стоит проблема нарушения качества теплоснабжения. В [15] под качеством теплоснабжения понимается совокупность установленных нормативными правовыми актами и/или договором теплоснабжения характеристик теплоснабжения, в том числе термодинамических параметров теплоносителя. Для обеспечения теплового комфорта используют доступные им средства, поэтому при снижении температуры внутри помещения происходит рост электропотребления, за счет включения потребителями электрических нагревателей. При увеличении температуры – возрастают тепловые выбросы в окружающую среду, что наиболее критично с точки зрения энергосбережения, цель которого сохранение и рациональное использование энергетических ресурсов [16, 17].

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30013) в Институте энергетических исследований Российской академии наук

В России системы автоматического управления СЦТ отсутствуют и не разрабатываются в отличие от других стран, например, Китая [18]. Однако в СЦТ имеются системы автоматического управления (САУ) отдельных объектов – источника тепловой энергии и центрального теплового пункта (ЦТП), предназначенные для поддержания нормальных режимов работы этих объектов, а не СЦТ в целом.

В СЦТ Китая в рамках концепции умного города планируется управление различными видами источников: ТЭЦ, котельными, ВИЭ и др. [19, 20]. САУ согласовывает их работу, используя параметры, полученные от тепловых пунктов, через которые осуществляется связь с теплоприемниками. В основу логики положен искусственный интеллект, учитывающий прогноз теплопотребления для принятия решение о распределении тепловой энергии от различных источников между потребителями, с учетом гидравлических режимов работы СЦТ (рис. 1).

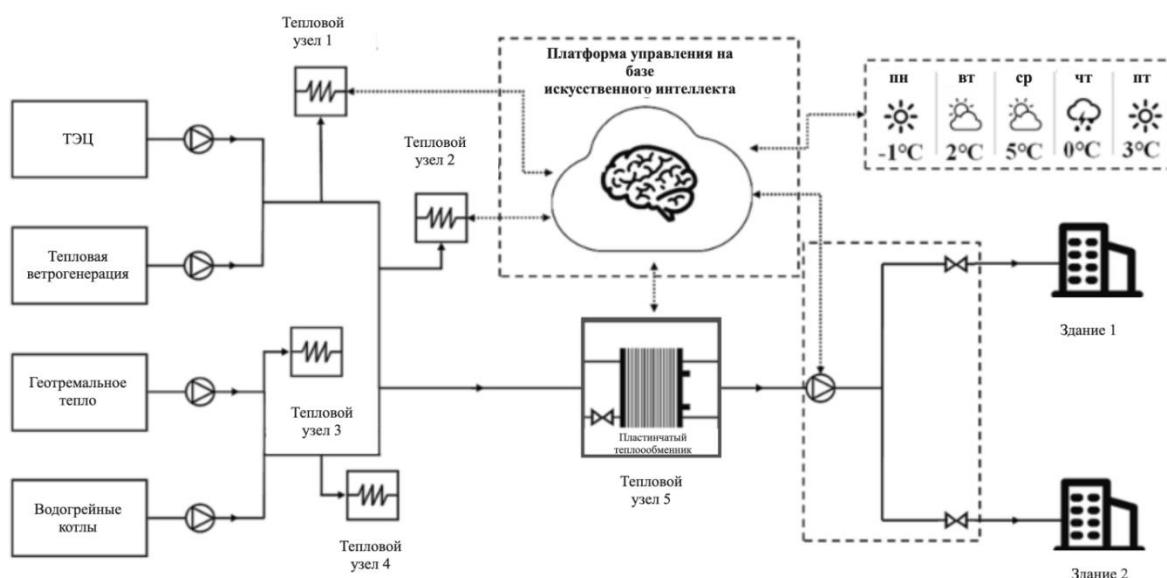


Рис. 1. Система автоматического управления СЦТ Китая

Учитывая вышеперечисленные проблемы для обеспечения качества теплоснабжения и сохранения теплоснабжения при возникновении аварий необходимы новые технические решения. Таким решением может стать активный тепловой пункт (АТП), оснащенный средствами автоматического управления, способными снизить риски аварий в тепловой сети или заблаговременно переходить в послеаварийное схемно-режимное состояние [21, 22]. Законы управления САУ должны учитывать гидродинамические и термодинамические ограничения, а также обеспечить энергосбережение.

Целью исследования является повышение качества и бесперебойности теплоснабжения потребителей. Объектом исследования является САУ АТП, а предметом исследования – АТП в составе системы теплоснабжения здания.

Задачи исследования:

- Анализ особенностей систем управления различных объектов в СДТ и СЦТ.
- Определение способов и средств выявления предаварийных режимов работы в СЦТ.
- Обоснование включения АТП с САУ в состав системы теплоснабжения зданий.

Научная новизна исследования заключается в обосновании включения в состав системы теплоснабжения здания АТП, оснащённого САУ, позволяющего повысить качество и бесперебойность теплоснабжения конечных теплоприемников.

1. Анализ особенностей систем управления различных объектов в системах теплоснабжения

Функцией СДТ является обеспечение теплового комфорта потребителей в отдельных помещениях. Для индивидуальных систем теплоснабжения применяют следящие или стабилизирующие САУ, работающие по принципам управления по отклонению или по возмущению. В домовых – стабилизирующие САУ, работают по принципу управления по отклонению.

В СДТ САУ осуществляет регулирование параметров для поддержания нормальных схемно-режимных состояний системы теплоснабжения, характеризующихся обеспечением теплового комфорта потребителей. При недопустимых отклонениях параметров режима: давления, качества газа,

прерывание или снижение качества электроснабжения, САУ прерывает работу источника тепловой энергии.

Назначение СЦТ – подача потребителям теплоносителя требуемых параметров, которые устанавливаются в соответствии с краткосрочным прогнозом изменения температуры окружающей среды. Прогноз поступает на все источники тепловой энергии и тепловые сети, оператором которых является единая теплоснабжающая организация. В СЦТ находят применение автоматизированные системы управления технологическим процессом, где принятие решений остается за оперативно-диспетчерским персоналом, в том числе выдача управляющих воздействий отдельным объектам системы теплоснабжения [23, 24]. На отдельных объектах, оснащенных средствами автоматизации, возможна корректировка параметров настройки, при этом САУ обрабатывает команды оператора.

На источниках теплоснабжения САУ работают по принципу управления по отклонению, осуществляя качественное регулирование температуры теплоносителя. Аналогичным по функции и принципу управления реализована САУ на ЦТП, где количественное регулирование определяет расход теплоносителя. В индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) стабилизирующие САУ работают по принципу отклонения и обеспечивает только количественное регулирование параметров теплоносителя, подаваемого потребителю. Из-за этого САУ ИТП, учитывая особенности гидравлических и термодинамических режимов тепловой сети внутри здания, не обеспечивает тепловой комфорт в помещениях многоквартирных жилых домов. В этих условиях потребители вынуждены самостоятельно решать проблемы с так называемыми «перетопом» и «недотопом», где первое проявляется наличием тепловых выбросов в атмосферу на одних этажах, второе – ростом электропотребления – на других. В таблице 1 представлены особенности СДТ и СЦТ.

Таблица 1. Особенности систем управления различных объектов в СДТ и СЦТ

Особенность	Система децентрализованного теплоснабжения	Система централизованного теплоснабжения
Функция	Обеспечение теплового комфорта потребителей	Поддержание параметров теплоносителя согласно температурному графику
Система управления	Автоматическая	Автоматизированная
Алгоритм функционирования САУ	Следящий	Стабилизирующий
Принцип управления	По возмущению	По отклонению
Принятие решений	Регулятор	Оперативно-диспетчерский персонал

Контроль за схемно-режимным состоянием СЦТ также осуществляет оперативно-диспетчерский персонал Единой теплоснабжающей организации, основной обязанностью которой является обеспечение надежности теплоснабжения потребителей в конкретной СЦТ [25]. На рис. 2 и рис. 3 представлены упрощённые схемы СДТ и СЦТ, а также организации их систем управления.



Рис. 2. Структура организации систем управления в СДТ

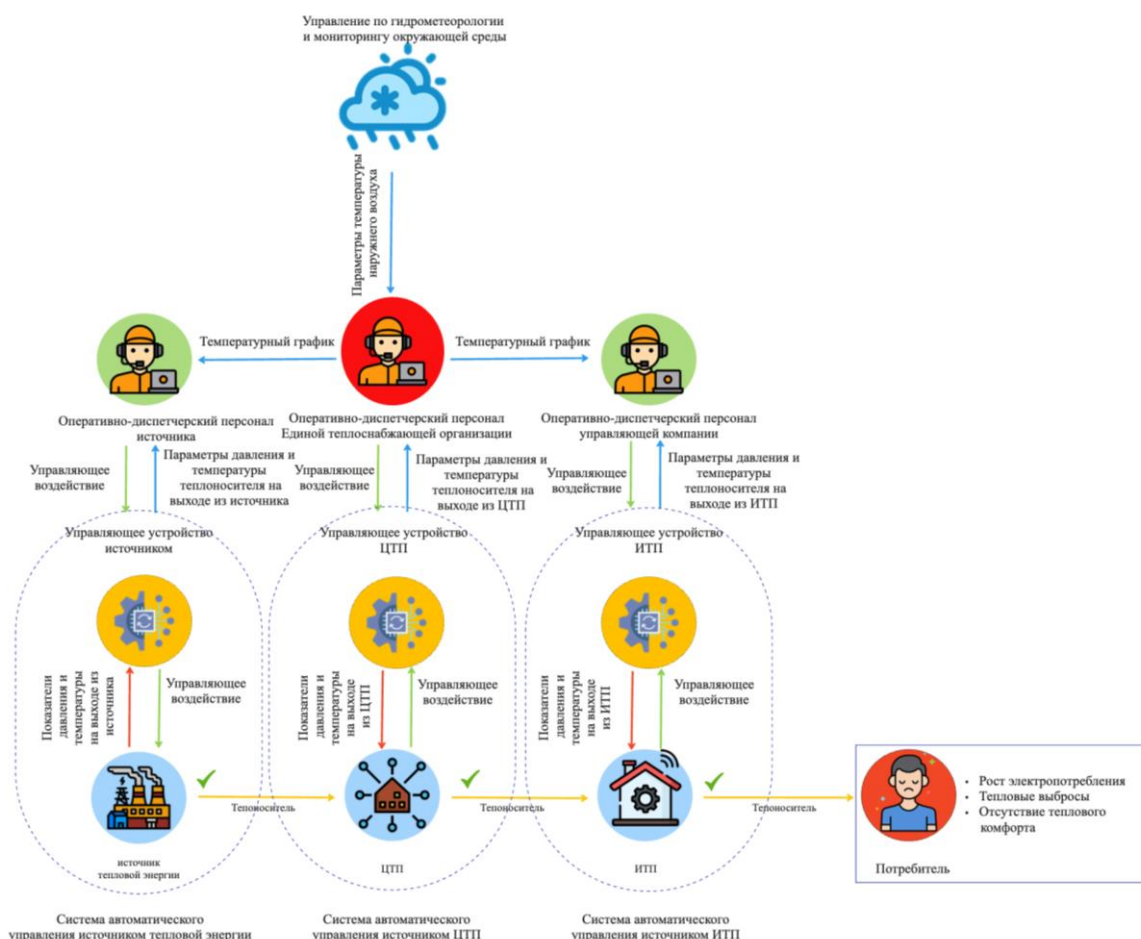


Рис. 3. Структура организации систем управления в СЦТ

При отклонении схемно-режимного состояния от нормального, в силу высокой инерционности тепловых процессов в СЦТ, отражается на теплоприемниках с большой задержкой по времени. За это время оперативно-диспетчерский персонал успевает выдать управляющие воздействия, чтобы не допустить нарушения технологического процесса, даже если это приведет к краткосрочным отклонениям температуры в жилых помещениях. При снижении параметров теплоносителя

принимаются меры по изменению схемно-режимного состояния, например, осуществляются ввод резервных источников тепловой энергии, переключаются переемычки в тепловой сети и др. Как правило при выполнении переключений нарушаются гидравлические и термодинамические режимы, что и является основной причиной аварий, приводящей к отключению теплоприемников.

Другой причиной изменения параметров режима в СЦТ являются аварии на источниках тепловой энергии и в тепловых сетях. Причины этого – высокий износ и физическое старение объектов теплоэнергетики, что требует перехода системы в послеаварийное схемно-режимное состояние. Аварийные нарушения нередко приводят к стремительному развитию аварийной ситуации, оборачивающейся серьезными последствиями для потребителей в масштабах района или города. Например, 11 января 2024 г. в г. Березово Ханты-Мансийского автономного округа в результате прорыва тепловых сетей при температуре наружного воздуха $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ без отопления остались жилые дома и объекты коммунальной инфраструктуры, в том числе больница. 12 января 2024 г., после подачи теплоносителя в СЦТ в нескольких многоквартирных жилых домах произошли прорывы внутридомовых трубопроводов, что привело к затоплению первого этажа и повторному отключению теплоснабжения для проведения ремонтных работ [26].

В силу серьезных последствий от аварий в СЦТ, требуется осуществлять не только мониторинг за параметрами режима, но создать системы мониторинга за их состоянием [27]. Повышение наблюдаемости позволит осуществлять превентивное выявление отклонений от нормальных схемно-режимных состояний с целью диагностирования аварийных нарушений процесса теплоснабжения. Наличие временного запаса позволяет избежать неконтролируемого развития аварий за счет локализации поврежденного оборудования, но требует принятия соответствующих мер со стороны оперативно-диспетчерского персонала, а также внесения изменений в алгоритмы работы САУ объектов СЦТ.

2. Выявление предаварийных режимов работы в системах теплоснабжения

Системы мониторинга параметров режима применяется в СДТ и на отдельных объектах в СЦТ. На основании получаемых данных можно судить о состоянии систем теплоснабжения. Однако в силу отсутствия систем мониторинга параметров в СЦТ выявление отклонения от нормального схемно-режимного состояния СЦТ затруднено. Требуется создание системы мониторинга параметров, включающую измерение, передачу, достоверизацию и хранение информации для последующей обработки и диагностики состояния оборудования СЦТ. Наличие системы мониторинга, охватывающей СЦТ в целом, позволит оперативно-диспетчерскому персоналу превентивно принимать меры по снижению рисков возникновения системных аварий, последствия которых сопоставимы с техногенными катастрофами.

Возможность превентивного выявления отклонений от нормального схемно-режимного состояния обусловлена высокой инерционностью тепловых процессов в СЦТ, благодаря термодинамическим и гидравлическим характеристикам процесса теплоснабжения.

Показательным примером служит авария, произошедшая в г. Новосибирске 11 января 2024 г., результате которой без отопления при температуре наружного воздуха $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ остались около 3000 многоквартирных жилых домов. Сравнение данных двух систем мониторинга, установленных в разных ИТП, показали, что системами мониторинга были зафиксированы отклонения давления за пределы допустимого диапазона за 4 часа до официальной регистрации аварии (рис. 4, рис. 5) [28].

Отклонения давления за пределы допустимого диапазона на разных ИТП в СЦТ позволяет судить о работе СЦТ в предаварийном состоянии. Своевременная фиксация предаварийного состояния СЦТ позволяет заблаговременно принять меры по изменению схемно-режимного состояния для предотвращения аварии либо минимизации ее последствий.

Однако, изменение схемно-режимного состояния СЦТ с целью предотвращения развития аварии может привести к снижению температуры и давления теплоносителя, подаваемого потребителям. Для сохранения качества и бесперебойности теплоснабжения необходимо внедрение технических решений, позволяющих осуществлять как превентивное выявление предаварийных режимов работы СЦТ, так и на контроль и регулирование параметров теплоносителя, поступающего к потребителям.

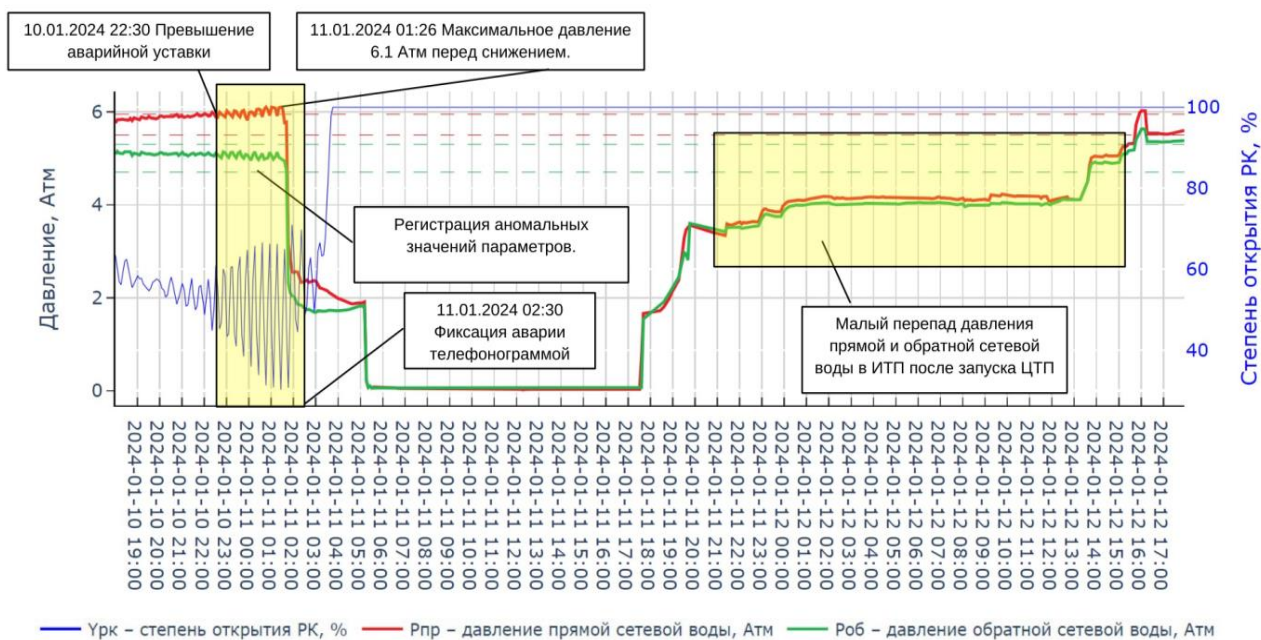


Рис. 4. Показатели давления ИТП детского сада №507 в Кировском районе г. Новосибирска

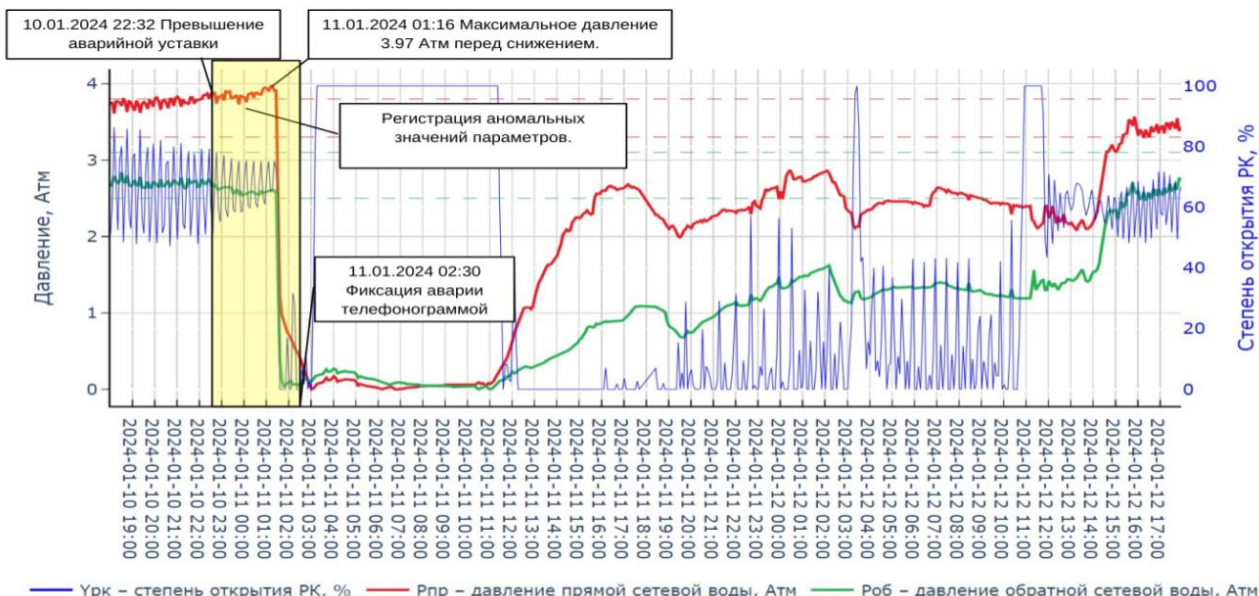


Рис. 5. Показатели давления ИТП Инженерного лицея НГТУ в Ленинском районе г. Новосибирска

Для придания СЦТ достоинств СДТ, связанных с обеспечением теплового комфорта потребителей, необходимо предусмотреть при управлении СЦТ возможность сокращения тепловых выбросов потребителями в атмосферу. Это потребует дополнить систему мониторинга температурными датчиками, регистрирующими температуру у потребителей. Система мониторинга должна обеспечить регистрацию превышения температуры внутри помещения потребителей с целью выдачи соответствующих управляющих воздействий на объекты СЦТ.

3. Система автоматического управления активного теплового пункта

В качестве технического решения, позволяющего осуществлять регулирование параметров теплоносителя, поступающего к потребителям, предлагается в состав СЦТ включить активный тепловой пункт. Активный тепловой пункт (АТП) представляет собой комплекс устройств, предназначенных для подачи теплоносителя потребителям, но в отличие от ИТП осуществляет качественное регулирование. Для этого АТП оснащен источником тепловой энергии – электробойлером, работа которого регулируется следящей САУ, работающей по принципу комбинированного управления.

Источник тепловой энергии, установленный в АТП, позволяет обеспечить облегченный режим работы тепловой сети, а также обеспечить потребителей теплоносителем требуемых параметров при возникновении аварии на тепловой сети.

Обеспечение облегченного режима работы тепловой сети за счет снижения требований к температуре и расходу теплоносителя, поступающего от ЦТП, возможно при условии перехода на АТП всех индивидуальных тепловых пунктов, запитанных от ЦТП. В этом случае следует ожидать разгрузки внутриквартальных тепловых сетей, а изменение режима работы ЦТП скажется на параметрах теплоносителя в магистральных сетях, что приведет к изменению в них гидравлического и термодинамического режима. Это требует обеспечения согласованной работы АТП с другими объектами в составе СЦТ. Функцию координации режимов работы АТП в составе СЦТ следует возложить на оперативно-диспетчерский персонал, что предполагает включение в систему мониторинга информации о состоянии и режимах работы АТП.

Длительное превышение давления в трубопроводе прямой сетевой воды служит признаком наступления предаварийного состояния в СЦТ и предлагает отключение АТП от СЦТ для работы в автономном режиме. В этом случае АТП берет на себя функцию обеспечения потребителей теплоносителем требуемых параметров, используя соответствующие дополнительные ресурсы. Благодаря наличию возможности подпитки тепловой сети от системы холодного водоснабжения, а также источника тепловой энергии АТП способен обеспечить качественное и количественное регулирование параметров теплоносителя, подаваемого потребителям. Наличие АТП в многоквартирных жилых домах позволит снизить частоту и длительность прерываний теплоснабжения, что в определенной степени позволит реализовать достоинства СДТ.

Для управления режимами работы АТП его следует оснастить средствами автоматизации [29, 30]. Это позволит создать полноценную САУ АТП, работающую по отклонению параметров теплоносителя от требуемых. В данном исследовании рассматривается установка АТП вместо ИТП [31, 32]. На рис. 6 и 7 представлены принципиальная схема АТП и функциональная схема САУ.

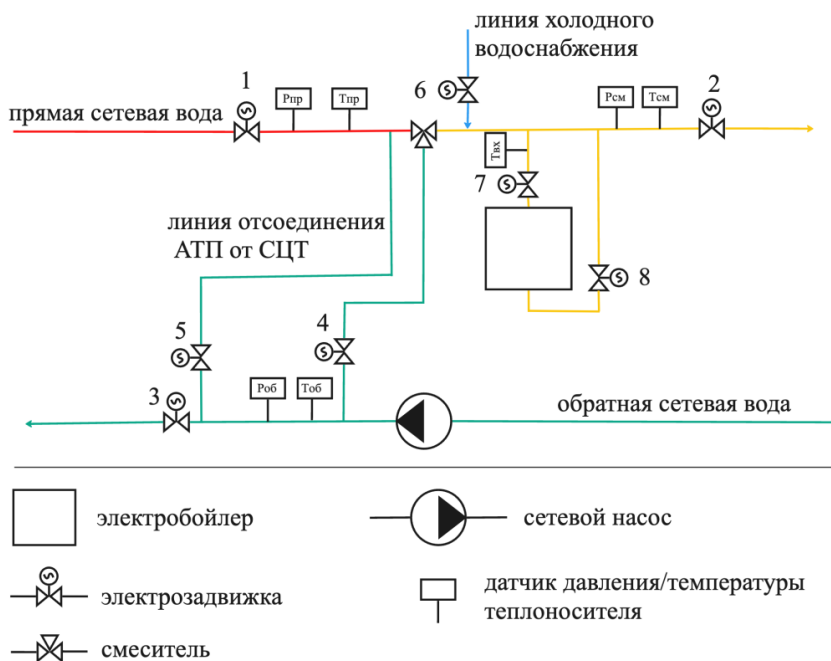


Рис. 6. Принципиальная схема АТП

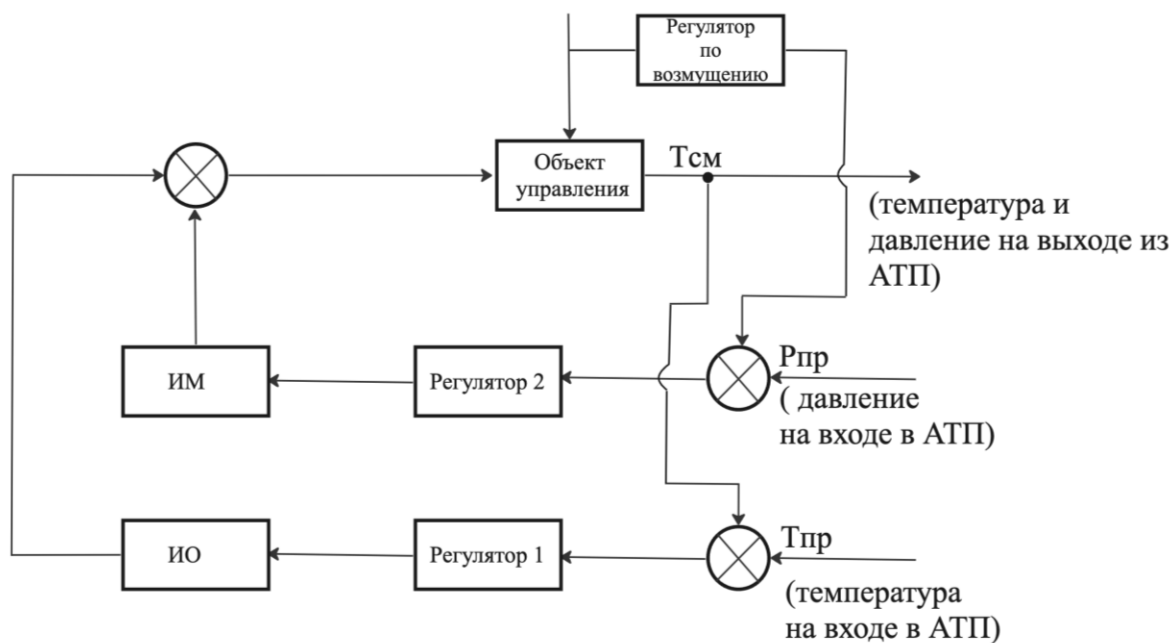


Рис. 7. Функциональная схема САУ

Теплоноситель из трубопровода прямой сетевой воды поступает на АТП, где САУ регистрирует его температуру и давление. При отсутствии отклонений от требуемых значений теплоноситель по трубопроводу прямой сетевой воды подается потребителям, смешиваясь с обратной сетевой водой для частичного охлаждения. От потребителей по трубопроводу обратной сетевой воды теплоноситель возвращается в СЦТ. Регистрация давления и температуры осуществляется датчиками, расположенными в токах, указанных на рис. 6.

Если регулятор 1 получил информацию о том, что температура прямой сетевой воды $T_{пр}$ ниже заданного значения, он выдает сигнал на исполнительный орган о включении собственного теплового источника АТП для подогрева $T_{пр}$ до требуемого значения, а регулятор 2 выдает команду исполнительному механизму об открытии задвижек 7 и 8, как показано на рис. 6.

При регистрации САУ скачков давления в трубопроводе прямой сетевой воды, предусматривается возможность отключения АТП от СЦТ с переходом в автономный режим работы. Для этого регулятор 2 подает сигнал исполнительному механизму для закрытия задвижек 1 и 3. Циркуляция теплоносителя от АТП до потребителей обеспечивается за счет открытия задвижки 5. В автономном режиме работы подпитка системы теплоснабжения обеспечивается от линии холодного водоснабжения посредством открытия задвижки 6. При достижении величины давления требуемого значения, что фиксируется датчиками $P_{см}$, $P_{об}$, подпитка прекращается и исполнительный механизм закрывает задвижку 6.

Описанный выше подход реализован в виде физической модели АТП, оснащенной САУ. Для проведения экспериментов подача прямой сетевой воды осуществляется от внешнего источника. Наличие теплообменника позволяет имитировать тепловые потери в сети. Режим теплоотдачи регулируется вентилятором радиатора, что позволяет изменять температуру обратной сетевой воды. Указанные устройства не включены в состав САУ АТП, но благодаря этому имитируются различные схемно-режимные состояния СЦТ при изменении температуры окружающей среды.

Система автоматического управления АТП реализована на программном комплексе CODESYS V2.3 с применением программируемого логического контроллера ОВЕН 160 (М02). Параметры давления регистрируются датчиками ПД100-ДИ 0,4-371-1,0, температуры – ДТС035М-50М.0.5.60.И. Полученные в результате экспериментов результаты подтвердили возможность осуществления качественного регулирования температурой теплоносителя, в том числе при отключении АТП от СЦТ. Это позволяет обеспечить потребителей теплоносителем с требуемыми параметрами, что особенно актуально при возникновении аварий в СЦТ.

4. Заключение

Для превентивного выявления оперативно-диспетчерским персоналом предаварийных состояний необходимо создание систем мониторинга параметров теплоносителя на объектах СЦТ, где основной является информация о расходе и температуре теплоносителя на входах ИТП.

Переход от ИТП к АТП позволяет решить комплекс задач, направленных на повышение качества и бесперебойности теплоснабжения потребителей, а также сокращение объемов тепловых выбросов для обеспечения энергосбережения, но требует учета гидравлических и термодинамических ограничений.

Создана физическая модель АТП с собственным источником тепловой энергии, оснащенная САУ, позволяющая облегчить режим работы тепловой сети за счет снижения требований к температуре и расходу теплоносителя, что особенно важно при экстремально низких температурах окружающей среды, а также обеспечить автономное теплоснабжение потребителей при авариях в СЦТ.

Создание АТП позволяет в СЦТ реализовать достоинства, которые ранее были свойственны только СДТ, в виде обеспечения теплового комфорта потребителей в нормальных и аварийных состояниях СЦТ за счет реализации качественного регулирования температуры теплоносителя.

Отличительной особенностью САУ СЦТ является наличие высокой инерционности тепловых процессов, что обусловлено законами гидродинамики и термодинамики. Наличие САУ на отдельных объектах СЦТ позволит в перспективе создать САУ СЦТ в целом для минимизации влияния человеческого фактора на режимы работы СЦТ, особенно в предаварийных режимах, а также обеспечить повышение качества и бесперебойности теплоснабжения потребителей.

Литература

1. *Glazkova V.V.* Principles of Ecological and Economic Management of Innovative Development of Heat Supply. In book: Finance, Economics, and Industry for Sustainable Development. – 2023. – P. 211–221.
2. *Берген Д.Н.* Альтернативные варианты модернизации региональных систем теплоснабжения: эколого-экономические аспекты // Bulletin of Baikal State University. – 2021. – Vol. 31, N. 3. – P. 407–415.
3. *Горин Ю.А., Анисимов П.Н.* Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения модернизацией ИТП // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т.24, N 3. – С. 101–111.
4. *Boyko E., Byk F., Ilyushin P., Myshkina L., Filippov, S.* Approach to Modernizing Residential-Dominated District Heating Systems to Enhance Their Flexibility, Energy Efficiency, and Environmental Friendliness // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – 12133.
5. *Huo S., Wang J., Qin Y., Cui Z.* Operation optimization of district heating network under typical modes for improving the economic and flexibility performances of integrated energy system // Energy Conversion and Management. – 2022. – Vol. 267, N. 4. – 115904.
6. *Chen J., Li H., Huang W.* A Study on Urban Heating System Flexibility: Modeling and Evaluation // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. – 2019. – Vol. 142, N. 5. – P. 1–23.
7. Новостной портал konkurent.ru «В конечном итоге за это платит население» <https://konkurent.ru/article/65409> (дата обращения 06.05.2024 г.).
8. Новостной портал газета.ру «В Подольске 170 домов остались без отопления. Владелец котельной скрыл аварию от властей» <https://www.gazeta.ru/social/2024/01/07/18099595.shtml?ysclid=lwdnhfp2ki227127584> (дата обращения 06.05.2024 г.).
9. Новостной портал Санкт-Петербург «В Липецке без горячей воды и отопления остались 282 дома» <https://tvspb.ru/news/2024/01/13/v-lipeczke-bez-goryachej-vody-i-otopleniya-ostalis-282-doma> (дата обращения 07.05.2024 г.).
10. Комсомольская Правда «Это был гидроудар: названы предварительные причины отключения отопления в Подольске» <https://www.mosobl.kp.ru/daily/27550/4875568/> (дата обращения 07.05.2024 г.).
11. Известия iz «Названа причина частых коммунальных аварий в Петербурге» <https://iz.ru/1633476/2024-01-12/nazvana-prichina-chastykh-kommunalnykh-avarii-v-peterburge> (дата обращения 07.05.2024 г.).
12. Телеканал РБК <https://nsk.rbc.ru/nsk/11/01/2024/659f48d29a79477160faa9cf> «Крупная коммунальная авария произошла на левобережье в Новосибирске» (дата обращения 08.05.2024 г.).
13. Телеканал РБК <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/65a24fc39a794777cdc44710> (дата обращения 13.05.2024 г.).
14. ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях». – М. Стандартинформ. 2019. – 15 с.
15. Федеральный закон от 27 июня 2010 г. №190-ФЗ «О теплоснабжении». <http://www.kremlin.ru/acts/bank/31533>. (дата обращения 14.05.2024 г.).
16. *Kikuchi Y., Kanematsu Y., Sato R., Nakagaki T.* Distributed Cogeneration of Power and Heat within an Energy Management Strategy for Mitigating Fossil Fuel Consumption // Journal of Industrial Ecology. – 2015. – Vol. 20, N.2.
17. *Brodny J., Tutak M.* Analysis of the efficiency and structure of energy consumption in the industrial sector in the European Union countries between 1995 and 2019 // Science of The Total Environment. – 2022. – Vol. 808. – 152052.
18. *Lin X.J., Zhang N., Mao Y.H., Chen J.Y., Tian X.T., Zhong W.* A review of the transformation from urban centralized heating system to integrated energy system in smart city // Applied Thermal Engineering. – 2024. Vol. 240. – 122272.
19. *Wang W., Huang S., Zhang G. et al.* Optimal Operation of an Integrated Electricity-heat Energy System Considering Flexible Resources Dispatch for Renewable Integration // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2021. – Vol. 9, N. 4. – P. 699–710.

20. *Chen W., Huang Z., Chua K.J.* Sustainable energy recovery from thermal processes: a review // *Energy, Sustainability and Society*. – 2022. – Vol. 12, N. 1.
21. *Ilyushin P.V.* Emergency and post-emergency control in the formation of micro-grids // *E3S Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 25. – 02002.
22. *Ilyushin P.V., Shepovalova O.V., Filippov S.P., Nekrasov A.A.* Calculating the sequence of stationary modes in power distribution networks of Russia for wide-scale integration of renewable energy-based installations // *Energy Reports*. – 2021. – Vol. 7. – P. 308–327.
23. *Streimikiene D., Strielkowski W., Lisin E., Kurdiukova G.* Pathways for sustainable development of urban heat supply systems // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 208, N. 4. – 04001.
24. *Yuan J., Zhang W., Shen Q.* The impact of electricity-carbon market coupling on system marginal clearing price and power supply cost // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – Vol. 30, N. 35. – P. 1-17.
25. *Samoylenko V.O., Pazderin A.V.* Estimating distributed generation reliability level // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. – 2020. – Vol. 18. – P. 70-75.
26. Новостной портал vtomske.ru «Массовые коммунальные аварии происходят в регионах России. Люди остаются без тепла в мороз» <https://vtomske.ru/news/202265-massovye-kommunalnye-avarii-proishodyat-v-regionah-rossii-lyudi-ostayutsya-bez-tepla-v-moroz> (дата обращения 13.05.2024 г.).
27. *Boesten S., Ivens W., Dekker S.C., Eijdens H.* 5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply // *Advances in Geosciences*. – 2019. – Vol. 49. – P. 129-136.
28. Новостной портал ngs.ru «Новосибирские инженеры заметили аномалию в теплосети прямо перед прорывом» (дата обращения 14.05.2024 г.).
29. *Ilyushin P., Kulikov A., Loskutov A.* Application of the Wald Sequential Procedure in Automatic Network Control with Distributed Generation // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1295. – P. 104–120.
30. *Kulikov A.L., Loskutov A.A.* High-Performance Sequential Analysis in Grid Automated Systems of Distributed-Generation Areas // *Russian Electrical Engineering*. – 2021. – Vol. 92, N. 2. – P. 90-96.
31. *Li G., Kou Y., Jiang J., Lin Y., Bie Z.* Researches on the reliability evaluation of integrated energy system based on Energy Hub // *Proc. of the 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. IEEE 2016. – 2016. – P. 1-9.
32. *Jayasuriya L., Chaudry M., Qadrdan M., Wu J., Jenkins N.* Energy hub modelling for multi-scale and multi-energy supply systems // *Proc. of the 2019 IEEE Milan PowerTech 2019*. – 2019.