

Научная статья
Original article

Нейроуправление системами теплоснабжения

Тихомиров А.Л., Пирожникова А. П.*

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

**Автор-корреспондент: anastasiapir@mail.ru*

Аннотация:

Введение. Приводятся данные по элементам систем теплоснабжения Российской Федерации (источникам тепла, тепловым сетям), а также их основные энергетические характеристики. Указаны основные проблемы в отрасли. Сделан вывод о необходимости оптимизации работы систем теплоснабжения во всех ее звеньях на основе цифровизации процессов и нейроуправления системой. **Материалы и методы.** Для оптимального управления теплоэнергетическими системами авторы считают целесообразным создание на каждом этапе жизненного цикла цифровой информационной модели каждого элемента системы, в том числе: трехмерную инженерную цифровую модель местности; трехмерную инженерную цифровую модель тепловых сетей, учитывающую смежные коммуникации и сооружения; эксплуатационную цифровую модель системы теплоснабжения на платформе геоинформационного программного комплекса Zulu2021. Приведена технология обмена данными в IFC формате между программными комплексами. Указана необходимость верификации эксплуатационной модели с использованием данных натурных измерений на физической модели системы теплоснабжения. **Результаты исследования.** Создание цифровой информационной 6D модели системы теплоснабжения позволяет перейти на более высокий уровень: интеллектуальное динамическое управление сложной энергетической системой (нейроуправление). Программный пакет SCADA в online режиме собирает необходимую информацию (температура, давление, расход теплоносителя) с датчиков, установленных в характерных точках системы. Вся информация передается на ZuluOPC-программный комплекс со встроенной поддержкой технологии OPC для получения данных со SCADA-системы. Полученные данные поступают в программный комплекс ZuluGis, включающий модуль ZuluThermo, с загруженной цифровой информационной моделью системы теплоснабжения. В модуле происходит расчет фактических тепловых и гидравлических режимов системы. Данные по оптимальному и фактическому теплогидравлическим режимам передаются в блок нейроуправления для сравнения и принятия управленческого решения. Принятое решение поступает на соответствующий контроллер для инициализации действий по изменению того или иного параметра. **Обсуждение и заключение.** Предложена технология разработки цифровой информационной модели для элементов системы теплоснабжения на всех этапах ее жизненного цикла. Создание цифровой информационной 6D модели системы теплоснабжения позволяет перейти на более высокий уровень: интеллектуальное динамическое управление сложной энергетической системой (нейроуправление). Применение интеллектуального управления позволяет повысить качество принимаемых решений, значительно повысить энергетическую эффективность систем теплоснабжения и качество оказания услуг конечному потребителю.

Ключевые слова: система теплоснабжения, теплогидравлический режим, эксплуатационная модель, нейроуправление, цифровая информационная модель, жизненный цикл.

Для цитирования: Тихомиров А.Л., Пирожникова А. П. Нейроуправление системами теплоснабжения. Умная цифровая экономика. 2023. Т.3, №2, с. 112-122



Neurocontrol of heat supply systems

Tikhomirov A.L., Pirozhnikova A.P.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

* *Corresponding author: anastasiapir@mail.ru*

Abstract:

Introduction. The data on the elements of the heat supply systems of the Russian Federation (heat sources, heat networks) are given, as well as their main energy characteristics. The main problems in the industry are indicated. It is concluded that it is necessary to optimize the operation of heat supply systems in all its links based on the digitalization of processes and the neurocontrol of the system. **Materials and methods.** For optimal management of heat and power systems, the authors consider it expedient to create a digital information model of each element of the system at each stage of the life cycle, including: three-dimensional engineering digital terrain model; a three-dimensional engineering digital model of heating networks, taking into account adjacent communications and structures; an operational digital model of the heat supply system on the platform of the Zulu2021 geoinformation software package. The technology of data exchange in IFC format between software systems is given. The necessity of verification of the operational model using the data of full-scale measurements on the physical model of the heat supply system is indicated. **Research results.** Creating a digital information 6D model of a heat supply system allows you to move to a higher level: intelligent dynamic control of a complex energy system (neurocontrol). The SCADA software package collects the necessary information online (temperature, pressure, coolant flow rate) from sensors installed at characteristic points of the system. All information is transmitted to the ZuluOPC software package with built-in support for OPC technology to receive data from the SCADA system. The obtained data are fed into the ZuluGis software package, which includes the ZuluThermo module, with a loaded digital information model of the heat supply system. The module calculates the actual thermal and hydraulic modes of the system. Data on the optimal and actual thermal-hydraulic modes are transmitted to the neurocontrol unit for comparison and management decision making. The decision made is sent to the appropriate controller to initiate actions to change one or another parameter. **Discussion and conclusion.** A technology for developing a digital information model for elements of a heat supply system at all stages of its life cycle is proposed. Creating a digital information 6D model of a heat supply system allows you to move to a higher level: intelligent dynamic control of a complex energy system (neurocontrol). The use of intelligent control makes it possible to improve the quality of decisions made, significantly improve the energy efficiency of heat supply systems and the quality of services provided to the end consumer.

Keywords: heat supply system, thermal-hydraulic regime, operational model, neurocontrol, digital information model, life cycle.

For citation: Tikhomirov A.L., Pirozhnikova A.P. Neurocontrol of heat supply systems. Smart digital economy. 2023. Vol. 3, №2, pp. 112-122

Введение.

Российская система теплоснабжения является самой большой в мире, обеспечивая около 40% мирового централизованного производства тепловой энергии. Согласно докладу Министерства энергетики Российской Федерации «О состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2020 году», в стране работает 572 тепловых электростанций мощностью от 500 кВт и выше и 77,3 тыс. отопительных котельных. В 2020 году источниками тепла в России было произведено 1221,4 млн. Гкал тепловой энергии. Протяженность тепловых сетей в двухтрубном исчислении составляет 167,4 тыс. км. [17, 18].

Ориентация российской энергетики на теплофикацию и централизованное теплоснабжение как основной способ удовлетворения тепловых потребностей населенных пунктов и промышленных центров технически и экономически себя оправдали. Однако в работе систем централизованного теплоснабжения и теплофикации имеется много недостатков, неудачных технических решений, неиспользованных резервов. На конец 2020 года общая протяженность тепловых сетей в РФ, нуждающихся в замене в соответствии со сроками эксплуатации в двухтрубном исчислении, составила 51,5 тыс. км., в том числе протяженность ветхих сетей (т.е. имеющих износ по данным технической инвентаризации более 60%) составила 38,8 тыс. км. [6, 14]

Столь большое количество изношенных тепловых сетей приводит к высокой аварийности, сверхнормативным тепловым потерям через изоляцию и утечкам теплоносителя.[5]

Перспективное развитие централизованного теплоснабжения наряду с эволюционированием традиционных технологий производства, передачи и потребления тепловой энергии предусматривает переход на качественно новый уровень их энергетической, экологической и экономической эффективности. Оптимизация работы систем теплоснабжения во всех ее звеньях и на всех этапах жизненного цикла является первоочередной задачей теплоэнергетики страны. [5, 8]

Материалы и методы

Системы централизованного теплоснабжения, включающие источники тепловой энергии, тепловые сети-системы трубопроводов и сооружений на них, предназначенные для транспортировки теплоносителя, конечные потребители тепловой энергии, являются сложными инженерными системами. Для оптимального управления этими системами авторы считают целесообразным создание на каждом этапе жизненного цикла цифровой информационной модели каждого элемента - совокупности взаимосвязанных инженерно-технических и инженерно-технологических данных об объекте капитального строительства, представленных в цифровом объектно-пространственном виде. [12, 2, 11, 3, 30]

В соответствии с СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла» жизненный цикл здания или сооружения – это период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения.

Первым этапом жизненного цикла являются инженерные изыскания, в том числе – геодезические. Изыскания проводятся электронными геодезическими приборами, в результате получаем трехмерную инженерную цифровую модель местности. [9]

Вторым этапом является проектирование. Трехмерное проектирование тепловых сетей предусматривает учет смежных коммуникаций и сооружений. Проектирование осуществляется в САД программах, при этом топографической подложкой является инженерная цифровая модель местности. Для проектирования линейных инфраструктурных объектов, к которым относятся тепловые сети, широко применялась программа Civil 3D,



компании Autodesk на платформе Autocad. В связи с уходом компании с российского рынка, авторы рекомендуют для проектирования инфраструктурных объектов программу Geoni CS, российского разработчика CS Development, работающей на платформе nanoCAD22. [1, 8]

Третьим этапом является строительство объектов системы, с использованием цифровой рабочей документации. В ходе строительства, по согласованию с проектной организацией, могут быть внесены изменения в проектную документацию. Именно исполнительная документация является основой для создания цифровой эксплуатационной модели. [10]

Следует отметить, каждому типу цифровой информационной модели на каждом этапе жизненного цикла соответствует определенный уровень проработки - минимальный объем геометрических, пространственных, количественных, а также любых атрибутивных данных, необходимых для решения задач информационного моделирования на конкретной стадии жизненного цикла объекта. [4, 19]

Четвертый этап-создание эксплуатационной модели (6D модель) в соответствии с классификацией СП 331.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах». [1, 15, 16]

Авторы предлагают передать геометрическую информацию по объектам тепловых сетей, используя блок-схему, приведенную на рисунке 2.



Рисунок 1 - Блок-схема передачи данных с использованием промежуточного формата обмена

Передача данных должна производиться в IFC-формате, формате отраслевых базовых классов данных с открытой спецификацией для совместного использования их в строительстве и управлении объектами с выполнением требований интероперабельности. В качестве Программного комплекса Б предлагается использовать программный комплекс Zulu2021 с модулем ZuluThermo разработки отечественной компании «Политерм». Комплексом Zulu2021 на базе графической 3D модели тепловой сети будут созданы топологические связи объектов системы теплоснабжения (с использованием теории графов). Последующее создание семантических баз данных по всем элементам системы приведет к созданию полноценной эксплуатационной 6D модели. Важным моментом создания эксплуатационной модели является ее верификация на соответствие физическому аналогу.

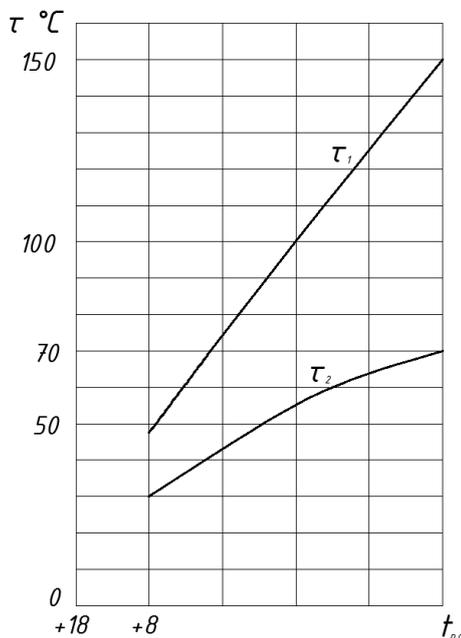
Верификация проводится с использованием данных измерений основных параметров в характерных точках физической системы теплоснабжения. [29, 28, 22, 26, 30, 23, 20, 27].

Результаты исследования

Создание цифровой информационной 6D модели системы теплоснабжения позволяет перейти на более высокий уровень: интеллектуальное динамическое управление сложной энергетической системой (нейроуправление).

Эксплуатация системы теплоснабжения предполагает поддержание оптимальных параметров тепловых и гидравлических режимов. Под оптимальным тепловым режимом понимается поддержание нормативных микроклиматических параметров в отапливаемых (вентилируемых) помещениях, вне зависимости от изменения внешнего климатического воздействия. Обеспечение нормативных параметров достигается регулированием тепловой нагрузки систем отопления и вентиляции централизованными, местными и индивидуальными способами.

Основной вклад в систему регулирования вносит центральное регулирование, осуществляемое на источнике тепла. В настоящее время в нашей стране получил наибольшее распространение качественный метод центрального регулирования - изменение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе в зависимости от температуры наружного воздуха, без изменения его расхода. Данное регулирование осуществляется в соответствии с температурным графиком, рассчитываемым для климатических условий конкретной местности. Принцип организации температурного графика представлен на рисунке 2.

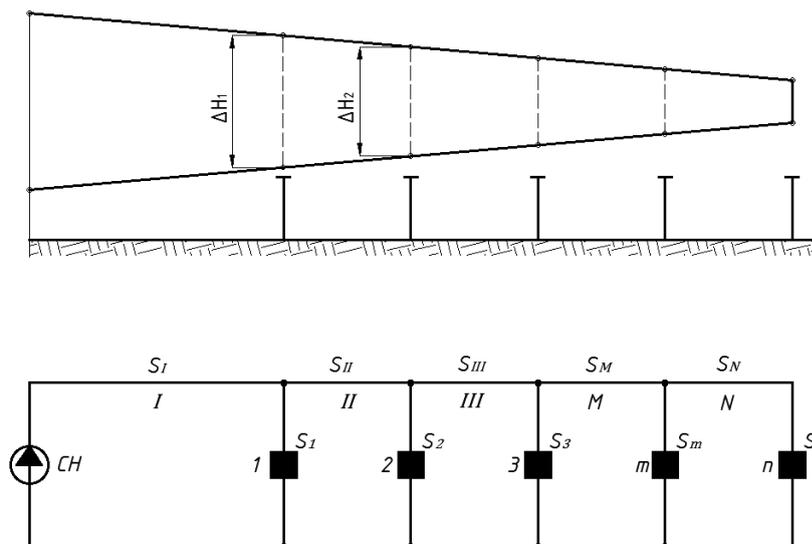


τ -температурам теплоносителя, t -текущая температура наружного воздуха

Рисунок 2 - Температурный график

Центральное регулирование количественным методом предполагает изменение расхода теплоносителя, в зависимости от климатических воздействий, без изменения его температуры. Более гибким является смешанное, качественно-количественное регулирование.

Для обеспечения качественного теплоснабжения требуется постоянное поддержание необходимого располагаемого напора и расхода теплоносителя у всех абонентов системы, вне зависимости от гидравлических изменений в сети. Графически, гидравлический режим изображается пьезометрическим графиком, общий вид которого представлен на рисунке 3.



ΔH -располагаемый напор, S -гидравлическое сопротивление,
CH-сетевой насос

Рисунок 3 - Пьезометрический график

Для постоянного поддержания в автоматическом режиме оптимальных теплогидравлических параметров системы теплоснабжения, предлагается комплекс нейруправления, работающий по следующему алгоритму.

Программный пакет SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition-диспетчерское управление и сбор данных) в online режиме собирает необходимую информацию с датчиков, установленных в характерных точках системы и датчиков температуры наружного воздуха. Вся информация передается в ZuluOPC-программный комплекс со встроенной поддержкой технологии OPC (Open Platform Communications) для получения данных со SCADA-системы. Полученные данные поступают в программный комплекс ZuluGis, включающий модуль ZuluThermo, с загруженной цифровой информационной моделью системы теплоснабжения. На основе получаемых текущих параметров, в модуле происходит постоянный пересчет фактических тепловых и гидравлических режимов. Данные по оптимальному и фактическому режимам передаются в модуль нейруправления для сравнения и принятия управленческого решения. Принятое решение поступает на соответствующий контроллер для инициализации действий по изменению того или иного параметра [24, 25].

В качестве модуля нейроуправления в рассматриваемых системах применимы многослойные нейронные сети типа MLP (Multi Layered Perceptron-многослойный персептрон). MLP имеют один входной слой, один выходной, один или несколько промежуточных слоев. Количество нейронов в каждом из слоев может быть любым и не зависит от количества нейронов в других слоях. Число нейронов входного слоя определяется числом входных факторов задачи, выходного слоя - числом выходных факторов. Принципиальная схема искусственного нейрона приведена на рисунке 4.

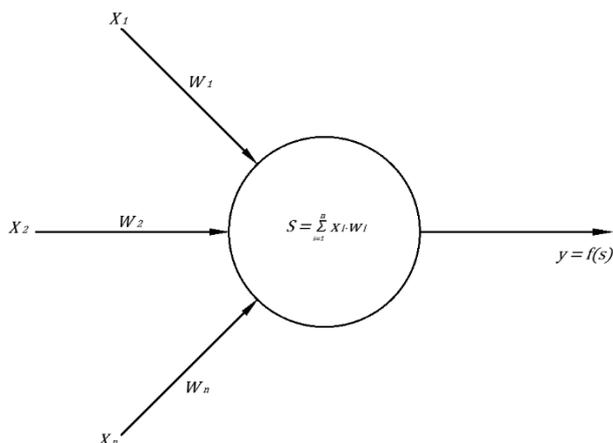


Рисунок 4 - Схема искусственного нейрона

Величина сигнала, поступающего в нейрон умножается на весовой коэффициент сигнала, полученные значения суммируются. Выходной сигнал нейрона формируется как функция от суммы произведений входящих сигналов на величины весовых коэффициентов и называется активационной функцией. Обучение нейрона в данном случае, в основном, основано на коррекции весовых коэффициентов.

Организация системы управления представлена на блок-схеме, приведенной на рисунке 5.

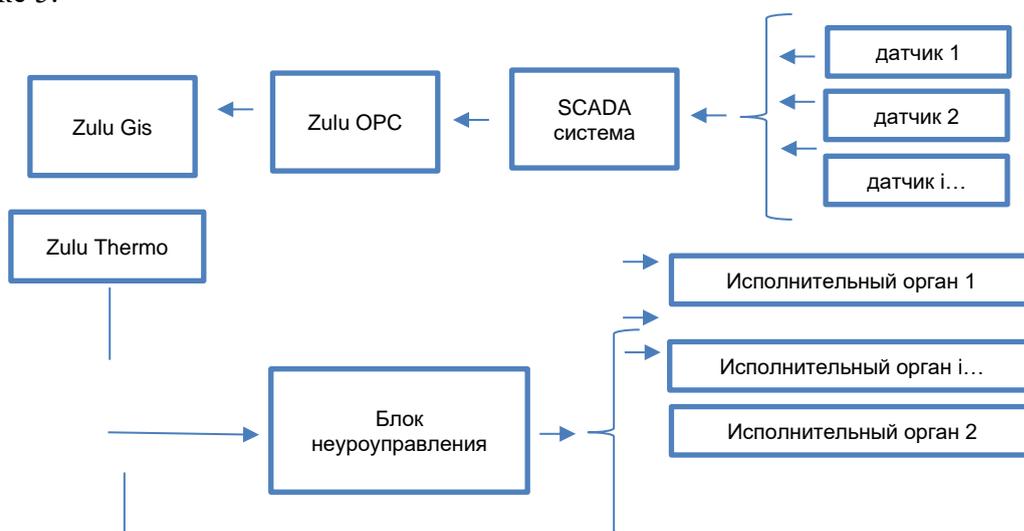


Рисунок 5 - Организация системы управления

Конкретизируем управление параметрами системы теплоснабжения.

При качественном методе регулирования тепловой нагрузки модуль нейроруправления генерирует и передает выходной сигнал на орган, управляющий производительностью теплогенератора. При выработке управляющего сигнала должны быть предусмотрены инерционность тепловых процессов в генераторе тепла, а также время прохождения температурной волны от источника тепла до конечного абонента системы.

При регулировании тепловой нагрузки количественным методом, сгенерированный в блоке нейроруправления выходной сигнал подается на орган управления частотно-регулируемого привода сетевых насосов источника тепла для изменения расхода теплоносителя. Существенным преимуществом данного метода регулирования является практически полное отсутствие инерционности, так как создаваемое воздействие распространяется со скоростью звука в воде.

Реализацию поддержания оптимального гидравлического режима возможно реализовать следующим образом.

Разработанная цифровая информационная модель проходит стадию тщательной калибровки (верификации), в результате чего достигается практически полное совпадение расчетных гидравлических параметров и параметров полученных в результате замеров на реальной (физической) системе. При этом реальная система должна предварительно пройти процесс полной теплогидравлической наладки и регулировки. По этим данным модуль ZuluThermo рассчитывает и строит оптимальный пьезометрический график для данной системы. Далее, в режиме online, ZuluThermo получает динамический поток данных с датчиков давления и расхода системы, по которым строит текущий пьезометрический график. В случае расхождения оптимального и текущего графиков, модулем нейроруправления вырабатывается выходной сигнал на орган управления частотно-регулируемого электропривода сетевых насосов и (или) насосных станций подающей и обратной магистралей. В случае необходимости управляющий сигнал передается на регуляторы расхода, установленные в индивидуальных тепловых пунктах абонентов.

В результате внедрения нейроруправления система централизованного теплоснабжения в каждый момент времени работает в режиме максимальной энергетической эффективности и обеспечивает комфортные условия для потребителей тепловой энергии

Обсуждение и заключения. Предложена технология разработки цифровой информационной модели для элементов системы теплоснабжения на всех этапах ее жизненного цикла. Создание цифровой информационной 6D модели системы теплоснабжения позволит перейти на более высокий уровень: интеллектуального динамического управления сложной энергетической системой (нейроруправление). Применение интеллектуального управления будет способствовать значительному повышению качества принимаемых решений, энергетической эффективности систем теплоснабжения и качеству оказания услуг конечному потребителю.

Список литературы

1. Автоматизированные системы диспетчерского управления. Режим доступа: <https://politer.info/solutions/asdu/> (дата обращения 06.02.2023).
2. Бабушкин А.Ю. Разработка алгоритма автоматизации тепловой сети // Наука молодых – будущее России. – 2021. – С. 214-215.
3. Красильникова К.В., Соловьев В.И. Модели интеграции информационных ресурсов региональной системы жилищно-коммунального хозяйства // Инновации в жизнь. – 2016. – № 1 (16). – С. 69–80.
4. Кислов Д.К., Рябенко М. С., Рафальская Т.А. Разработка системы интеллектуального теплоснабжения на базе информационной сети Zulu. // Энергосбережение и водоподготовка – 2018; – №2 (112). – С.55-59. <https://www.politerm.com/products/thermo/zuluthermo/> (дата обращения: 10.02.2023). EDN: НТКСОС
5. Пасичко С.И., Халецкая Е.А, Колиенко А.Г. Системы теплоснабжения. Выбор оптимальных направлений развития // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 24.08.
6. Состояние сетей и системы теплоснабжения. Режим доступа: <http://nsk.novosibdom.ru/node/2860> (дата обращения 16.01.2023).
7. Сердюков О.В. Программно-технический комплекс «Торнадо-Н» для объектов теплоэнергетики // Новое в российской электроэнергетике. – 2011. – № 9. – С. 24–30.
8. Соловьев В.И. Цифровая трансформация систем теплоснабжения муниципального образования // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – №. 2 (14). – С. 52-61.
9. Рафальская Т.А., Мансуров А.Р., Мансурова И. Р. Исследование переменных режимов работы систем централизованного теплоснабжения при качественно-количественном регулировании. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура – 2019; – №10 (2). – С. 79 - 91. EDN: НХРБГВ
10. Распоряжение Правительства РФ №1632-р от 28.07.2017. Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». Режим доступа: <http://base.garant.ru/71734878/> (дата обращения 06.02.2023).
11. Тихомиров А.Л., Бабушкин А.Ю. Информационное моделирование объектов инженерной инфраструктуры / Материалы Всероссийской(национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники». – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 287-288.
12. Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы» // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71570570/> (дата обращения 27.01.2023).
13. Централизованное теплоснабжение как повод для беспокойства. Режим доступа: <http://academcity.org/content/centralizovannoe-teplosnabzhenie-kak-povod-dlyabespokoystva> (дата обращения: 23.01.2023).



14. Цифровые организации: тенденции и практики применения в России. Режим доступа: <http://www.riarating.ru/infografika/20160127/630007042.html> (дата обращения 30.01.2023).
15. Чурашев В.Н., Маркова В.М. Оценка потенциала теплосбережения: региональные особенности и возможности ТЭБ // Труды IX Международной научной конференции «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» в 4 томах. – Новосибирск. Сибирская государственная геодезическая академия. 2013. Т.1. – С. 114–119.
16. Шишкин А.В. и др. Создание цифрового двойника тепловой сети в различных программных комплексах //Надежность и безопасность энергетики. – 2022. – Т. 15. – №. 3. – С. 166-174.
17. Электронный ресурс // <https://www.politerm.com>: информационно-справочный портал (дата обращения: 16.01.2023).
18. Электронный ресурс // [help.simintech.ru](https://help.simintech.ru/#spravochnaya_sistema_i_ee_nastrojka/DIR_nachalo_raboty_so_spravochnoj_sistemoj.html): информ.-справочный портал https://help.simintech.ru/#spravochnaya_sistema_i_ee_nastrojka/DIR_nachalo_raboty_so_spravochnoj_sistemoj.html (дата обращения: 13.02.2023).
19. Якимчук Я.Ю., Мартемьянов В.С., Аверьяскин С.Г., Соловьев В.И. Электронное правительство и государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства региона // Инновации в жизнь. –2014. – № 1 (8). – С. 56–67.
20. Barone G., Buonomano A., Forzano C., Palombo A. A novel dynamic simulation model for the thermo-economic analysis and optimisation of district heating systems. *Energy Conversion and Management* 2020; 220, 113052.10.1016/j.enconman.2020.113052 (дата обращения: 13.02.2023). DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113052(EDN: XCHBYE
21. Badami M., Fonti A., Carpignano A., Grosso D. Design of district heating networks through an integrated thermo-fluid dynamics and reliability modelling approach. *Energy* 2018; (144): 826 -838.10.1016/j.Energy.2017.12.071 (дата обращения: 14.02.2023). DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.071(
22. Falay B., Schweiger G., O'Donovan K., Leusbrock I. Enabling large-scale dynamic simulations and reducing model complexity of district heating and cooling systems by aggregation. *Energy* 2020; 209, 118410.10.1016/j.Energy.2020.118410 (дата обращения: 13.02.2023). DOI: 10.1016/j.energy.2020.118410(
23. Hussein A., Klein A. Modelling and validation of district heating networks using an urban simulation platform. *Applied Thermal Engineering* 2021; 187, 116529.10.1016/j.applthermaleng.2020.116529 (дата обращения: 14.02.2023). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116529(
24. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mathiesen B. V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable Energy systems. *Energy* 2014, (68): 1 - 11.10.1016/j.Energy.2014.02.089 (дата обращения: 20.02.2023). DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089(
25. Lauenburg P. 11 - Temperature optimization in district heating systems, in: Wiltshire R. (Ed.), *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, Woodhead Publishing Series in

Energy. Woodhead Publishing, Oxford, 2016: 223 - 240.10.1016/B978-1-78242-374-4.00011-2 (дата обращения: 22.02.2023). DOI: 10.1016/B978-1-78242-374-4.00011-2(

26. Larsen H. V., Palsson H., B0hm B., Ravn H. F. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. Energy Conversion and Management 2002; (43): 995-1019.10.1016/S0196-8904(01)00093-0 (дата обращения: 14.02.2023). DOI: 10.1016/S0196-8904(01)00093-0(

27. Schweiger G., Larsson P.-O., Magnusson F., Lauenburg P., Velut S. District heating and cooling systems - Framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization. Energy 2017; (137): 566 - 578.10.1016/j.Energy.2017.05.115 (дата обращения: 20.02.2023). DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.115(

28. Zheng J., Zhou Z., Zhao J., Wang J. Function method for dynamic temperature simulation of district heating network. Applied Thermal Engineering 2017; (123): 682 - 688.10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083 (дата обращения: 13.02.2023). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083(

29. Zheng X., Sun Q., Wang Y., Zheng L., Gao X., You S., Zhang H., Shi K. Thermo-hydraulic coupled simulation and analysis of a real large-scale complex district heating network in Tianjin. Energy 2021; 236, 121389.10.1016/j.Energy.2021.121389 (дата обращения: 13.02.2023). DOI: 10.1016/j.energy.2021.121389

30. Zheng J., Zhou Z., Zhao J., Wang J. Function method for dynamic temperature simulation of district heating network. Applied Thermal Engineering 2017; (123): 682 - 688.10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083 (дата обращения: 14.02.2023). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083

