Оригинальная статья / Original article
УДК 697.343
DOI: http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-44-56

Компьютерное моделирование и натурные замеры потокораспределения действующей тепловой сети

© Д.А. Калабин, А.Ю. Липовка, Ю.Л. Липовка
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: Цель – выявить закономерности распределения тепловой энергии по потребителям с различной степенью оснащенности средствами регулирования в реальных условиях работы сети централизованного теплоснабжения и сопоставить результаты компьютерного моделирования с натурными замерами. Для проведения компьютерного моделирования использованы известные математические методы расчета потокораспределения в гидравлических цепях. Экспериментальные исследования режимов работы системы теплоснабжения проведены с использованием массивов сохраненных данных системы управления и мониторинга тепловых энергоустановок на базе программно-логистического комплекса Siemens Simatic PCS7, ультразвукового расходомера Portaflow 300, стационарных электромагнитных преобразователей расхода, поверенных и аттестованных манометров и термометров. Получены графики фактических гидродинамических режимов тепловой сети при температурах наружного воздуха от +8 до −37°C, а также в условиях нештатных режимов (снижения температуры в подающем трубопроводе и перепада давлений на вводе тепловой сети). Предложено совместное использование моделирования с помощью компьютерной программы JA_Net и натурных замеров теплогидравлических режимов работы сетей системы централизованного теплоснабжения с абонентами, имеющими различную степень оснащенности средствами автоматизации. Показано, что предложенный комплексный метод качественной и количественной оценки работоспособности сетей централизованного теплоснабжения позволяет выявлять особенности управления гидравлическими режимами сетей при подключении новых потребителей с различной степенью автоматизации. Экспериментально подтверждено отсутствие реакции на нештатные ситуации абонентов, системы теплоснабжения которых оснащены средствами регулирования тепловой нагрузки. Установлено, что стабильность расхода теплоносителя в системах потребителей обусловлена автоматической корректировкой степени открытия регулирующих клапанов в индивидуальных пунктах. В дальнейшем планируется разработка методических рекомендаций по нивелированию разбалансированности тепловой сети в условиях неравномерной оснащенности объектов средствами автоматизации при реализации проектов комплексной модернизации потребителей тепла или подключения новых объектов к существующим сетям теплоснабжения.

Ключевые слова: тепловая сеть, гидравлические режимы, экспериментальные замеры, математическое моделирование, компьютерная модель, централизованное теплоснабжение

Для цитирования: Калабин Д.А., Липовка А.Ю., Липовка Ю.Л. Компьютерное моделирование и натурные замеры потокораспределения действующей тепловой сети. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 44–56. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-44-56

Computer simulation and full-scale measurements of the load flow in a functioning heating network

Dmitry A. Kalabin, Aleksey Yu. Lipovka, Yuri L. Lipovka
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The article aims to identify patterns in the distribution of heating energy to consumers with a varying availability of regulation equipment under real conditions of a central heating network, as well as to compare the results of computer simulation with full-scale measurements. For computer simulation, well-known mathematical methods for calculating the load flow in hydraulic circuits were used. Experimental studies of the operation modes of heat supply systems were carried out using the data of the control and monitoring systems of thermal power plants using the Siemens Simatic PCS7 software, a Portaflow 300 ultrasonic flow meter, stationary electromagnetic flow transducers, verified and certified manometers and thermometers. The graphs of the actual hydrodynamic modes of the heating network under study were obtained at outdoor air temperatures from +8 to -37°C, as well as under abnormal conditions (temperature drop in the supply pipeline and pressure drop at the heating network input). It was proposed to use jointly the simulation by means of the JA_Net software and full-scale measurements of the thermohydraulic operating modes of a centralised heat supply

system, whose consumers have a various degree of regulation equipment. It was shown that the proposed complex method of qualitative and quantitative assessment of the efficiency of district heating networks makes it possible to identify the features of control of their hydraulic modes when connecting new consumers with a varying degree of automation. According to the obtained characteristics of changes in the flow rate of the coolant in the consumers' internal systems depending on the pressure drop at the tie-in point, the lack of response to emergency situations on part of the consumers whose heat supply systems are equipped with the means of qualitative and quantitative regulation of the heat load, is associated with the process of automatic adjustment of the degree of opening of flow controllers and control valves at individual points. In future work, we will develop guidelines for levelling the imbalance of the heating network under the conditions of uneven provision of facilities with automation equipment when implementing projects for the complex modernisation of heat consumers or connecting new facilities to existing heat supply networks.

Keywords: heating network, hydraulic modes, experimental measurements, mathematical simulation, computer model, district heating

For citation: Kalabin DA, Lipovka AYu, Lipovka YL. Computer simulation and full-scale measurements of the load flow in a functioning heating network. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):44–56. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-44-56

ВВЕДЕНИЕ

Для анализа потокораспределения и управления теплогидравлическими режимами тепловых сетей у инженеров по режимам должен быть надежный инструмент, которым является компьютерная модель эксплуатируемой системы теплоснабжения. Такая модель дает возможность выполнять предварительные гидравлические расчеты и позволяет оценить работоспособность системы, т.е. проверять – находятся ли давления в подающем и обратном трубопроводах магистралей, распределительных сетей и ответвлений к потребителям в допустимых пределах в расчетных условиях, а также оценить живучесть системы в аварийных ситуациях.

В настоящее время одним из известных является информационно-вычислительный комплекс (ИВК) Ангара-ТС [1, 2], созданный на базе системы математических моделей и методов Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, предназначенный для расчета и анализа теплогидравлических режимов теплоснабжающих систем. Разработанные с помощью ИВК Ангара-ТС эксплуатационные режимы и наладочные мероприятия позволяют обеспечить требуемый уровень теплоснабжения. Известно, что, несмотря на бóльшую надежность кольцевой структуры тепловых сетей по сравнению с радиальной, эксплуатируют тепловые сети в нормальных режимах по схеме без перетоков теплоносителя между тепловыми магистралями, что упрощает процессы регулировки сетей, обнаружения и локализации мест аварий. В статье [3] предложена апробированная методика расчета подобных непростых сетей на базе оптимизационной постановки задачи секционирования тепловой сети с любопытным выбором в качестве критерия – значения избыточной гидравлической мощности системы теплоснабжения. Аналитическое решение задачи потокораспределения многоконтурной тепловой сети крайне сложно, в статье [4] описано использование этого решения при оптимизации параметров тепловой сети, предложен метод расщепления графа, позволяющий свести задачу потокораспределения к алгебраическому уравнению и получить его аналитическое решение, что существенно снизило объем вычислительной работы при моделировании и оптимизации гидравлической цепи. Крайне важным в централизованном теплоснабжении представляется определение эффективного радиуса теплоснабжения. Этот вопрос рассмотрен в [5]. Еще одним широко используемым программным продуктом для моделирования теплогидравлического режима работы тепловой сети является ИВК Zulu, с помощью набора инструментов которого решаются задачи конструкторского расчета тепловых сетей при проектировании новой или реконструкции существующей сети. В арсенале ИВК Zulu представлены функции моделирования аварийных ситуаций на тепловой сети, а также реализуется расчет нормативных и фактических тепловых потерь [6]. Развитие цифрового моделирования режимов работы сетей является ключевым направлением

развития и совершенствования управления инженерными системами жизнеобеспечения городов [6].

РАЗНОВИДНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Среди других специализированных ИВК можно выделить ИГС CityCom-ТеплоГраф от ИВЦ Поток, а также ИВК Гидросистема от НТП Трубопровод. Эти системы адаптированы для выполнения разнообразных теплогидравлических расчетов систем теплоснабжения. Можно заметить, что в то время, когда на моделировании тепловых сетей специализируются отечественные ИВК, на рынке представлено множество иностранных ИВК, разработанных для моделирования систем водоснабжения обобщенных гидравлических систем, например широко известный ИВК EPANET от EPA, FluidFlow от Piping Systems, gPROMS от PSE, PIPENET от Sunrise, TNflow от UKTN, Flownex от CADFEM.

Высокие требования к технико-экономическим критериям и надежности централизованных систем теплоснабжения объектов всех назначений (промышленные, административные и т.д.) требуют постоянного поиска новейших конструкторских и проектных решений при производстве пусковых и наладочных работ на тепловых сетях, применения новых образцов дросселирующей и регулирующей арматуры для создания необходимых динамических характеристик. В исследовании [7] сделан акцент на техническое улучшение систем централизованного теплоснабжения и на одновременное использование географических баз данных с целью учета особенностей городского и промышленного теплопотребления. Экспериментально проверенная компьютерная модель [8] позволяет выбирать оптимальную рабочую точку, способствующую минимизации энергопотребления систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. В статье [9], посвященной в целом проблеме декарбонизации отопления, представлена пространственно-временная модель электротеплоснабжения, способствующая оценить влияние вариантов отопления на энерготранспортные сети с учетом потребности на тепловую энергию. Авторы [10] предложили довольно простой подход к моделированию тепловых сетей централизованного теплоснабжения, но только для радиальных сетей сельских населенных пунктов. Имитационная динамическая модель сетей централизованного теплоснабжения рассмотрена в статье [11]. В работе [12] приведена методика оптимального долговременного планирования развития городских сетей отопления, основанная на выборе различных сценариев сочетания сетей централизованного теплоснабжения с индивидуальными источниками энергии. При этом анализируются варианты использования различных технологий экономии энергии для различных групп зданий, расположенных в разных частях города. Предложения, высказанные в статье [13], предлагают эффективные решения по повышению эффективности принимаемых решений в сфере теплоснабжения. В связи с переходом централизованного теплоснабжения ряда европейских стран на низкоуглеродную энергетическую систему возникает необходимость коррекции существующей бизнес-модели, учитывающей новые внешние вызовы, которые дадут основание сделать вывод, будет ли в дальнейшем централизованное теплоснабжение играть существенную роль в будущей энергетической системе [14]. В статье [15] отмечается большой процент спроса на тепловую энергию от сетей централизованного теплоснабжения, которые имеют сложную, зачастую закольцованную, структуру для прогнозирования распределения теплоты, в которой разработана модель сети с использованием Matlab. В статье [16] авторами рассматривается вопрос управления протяженными системами централизованного теплоснабжения при помощи модели динамического моделирования тепловых волн в сети для определения температуры и массового расхода в ключевых точках с учетом потерь окружающей среды и тепловой инерции труб. Данный метод [16] позволяет уйти от устройства дорогостоящей системы мониторинга массового расхода и температуры теплоносителя в узловых точках системы тепло-

снабжения. В статье [17] авторами была проведена экспериментальная проверка модели, предложенная в [16] в условиях действующей системы теплоснабжения и на базе испытательного стенда. Для обеих экспериментальных установок текущая модель [16] показывает хорошее согласие между натурными замерами и результатами моделирования для большого диапазона скоростей воды. В статье [18] выполнен анализ динамики сети при моделировании систем централизованного теплоснабжения. Разработана математическая модель монопольного рынка тепла [19], основанная на классической модели монополии и базовых моделях теории гидравлических цепей. На основе модели [20], основанной на методе конечных объемов, авторы решают задачу определения задержек (инерцию системы) между точками генерации тепловой энергии и точками ее потребления. Результаты применения модели, описанные в [20], проливают свет на потребности и возможности в центральном теплоснабжении крупных городов и регионов в основном для внедрения интеллектуальных энергетических систем, размещения аккумуляторов энергии. В статье [21] авторами предложена компактная физическая модель, сохраняющая приемлемую точность вычислений, при этом значительно снижаются вычислительные итерации по сравнению с полной физической моделью. Компактная модель, описанная в [21], подходит для применения в сочетании с сетевыми моделями и моделями энергетических инфраструктур. Для определения потребления тепловой энергии из-за временной задержки при транспортировке теплоносителя в сетях централизованного теплоснабжения крупных городов авторами в статье [22] предлагается модель CFD (от англ. Computational Fluid Dynamics modeling), также известная как 3-мерное (3D) гидравлическое моделирование. Авторами [22] на основании анализа данных, полученных с помощью модели CFD, доказано, что такие физические параметры как расход теплоносителя, протяженность и диаметр трубопроводов тепловой сети имеют определяющую роль на время задержки в сети ЦТ, влияние температуры теплоносителя оказалось незначительным [22].

Цель работы – сопоставить рассчитанные на компьютерной программе JA_Net (автор А.Ю. Липовка) результаты потокораспределения с натурными замерами на действующей тепловой сети и выявить особенности управления гидравлическим режимом тепловых сетей при подключении новых потребителей с различной степенью автоматизации.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТОЯННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время в системах теплоснабжения основными дросселирующими устройствами, применяемыми для изменения перепада давлений в тепловой сети на вводе к потребителю, остаются постоянные гидравлические сопротивления. Применение дросселирующих шайб для проведения наладки системы теплоснабжения и гидравлической увязки всех абонентов системы централизованного теплоснабжения приводит к необеспеченности отдельных потребителей расчетным количеством тепловой энергии при работе устройств, обеспечивающих погодозависимое регулирование в автоматизированных индивидуальных тепловых пунктах других потребителей, подключенных к одной и той же рассматриваемой тепловой сети. Для нивелирования сложившейся ситуации требуется на протяжении всего отопительного сезона поддерживать постоянный гидравлический режим в системах теплоснабжения всех потребителей по средствам устройства систем качественно-количественного регулирования тепловой энергии, например автоматических регуляторов перепада давления на трубопроводах теплоснабжения в тепловых камерах (ТК), в индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) и узловых точках (УТ) тепловой сети.

В работе использованы известные математические методы расчета потокораспределения в гидравлических цепях, в том числе метод Тодини и экспериментальные исследования режимов работы системы теплоснабжения. Для проверки корректности работы компьютерной программы JA_Net, первоначально созданной на основе идеологии [23] и в дальнейшем использующей метод

[24], проведены экспериментальные замеры.

Для экспериментального исследования, первые результаты которого были опубликованы в [25], был выбран участок тепловой сети, потребители № 1–4 которого неравномерно оборудованы устройствами для выполнения автоматического качественно-количественного регулирования тепловой нагрузкой (рис. 1). В ИТП потребителя № 1 смонтирован регулятор перепада давления на ответвлениях к тепловым энергоустановкам (отопление, горячее водоснабжение, теплоснабжение калориферов приточных вентиляционных систем). В ИТП потребителей № 1, 4 установлены автоматические устройства для качественного регулирования тепловой нагрузки в зависимости от скорости ветра и температуры наружного воздуха, а также автоматические регуляторы перепада давления на вводе в здания.

В индивидуальных тепловых пунктах потребителей № 2, 3 с целью снижения перепада давлений установлены дросселирующие шайбы, системы теплоснабжения не оборудованы тепломеханической автоматикой для качественно-количественного регулирования теплоносителем.

Объем тепловой энергии, потребляемой объектами, подключенными к исследуемой тепловой сети, складывается из тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение, а также из нагрузки на теплоснабжение калориферов вентиляционных систем потребителей № 1, 4 (рис. 2).

В ходе первых экспериментов, описанных в [25], была поставлена задача – выявить взаимосвязь изменения располагаемого перепада давлений и расхода теплоносителя у потребителей в зависимости от перепада давления на вводе тепловой сети, а также при значительном (экстремальном) его уменьшении вследствие нештатной работы централизованной системы теплоснабжения населенного пункта.

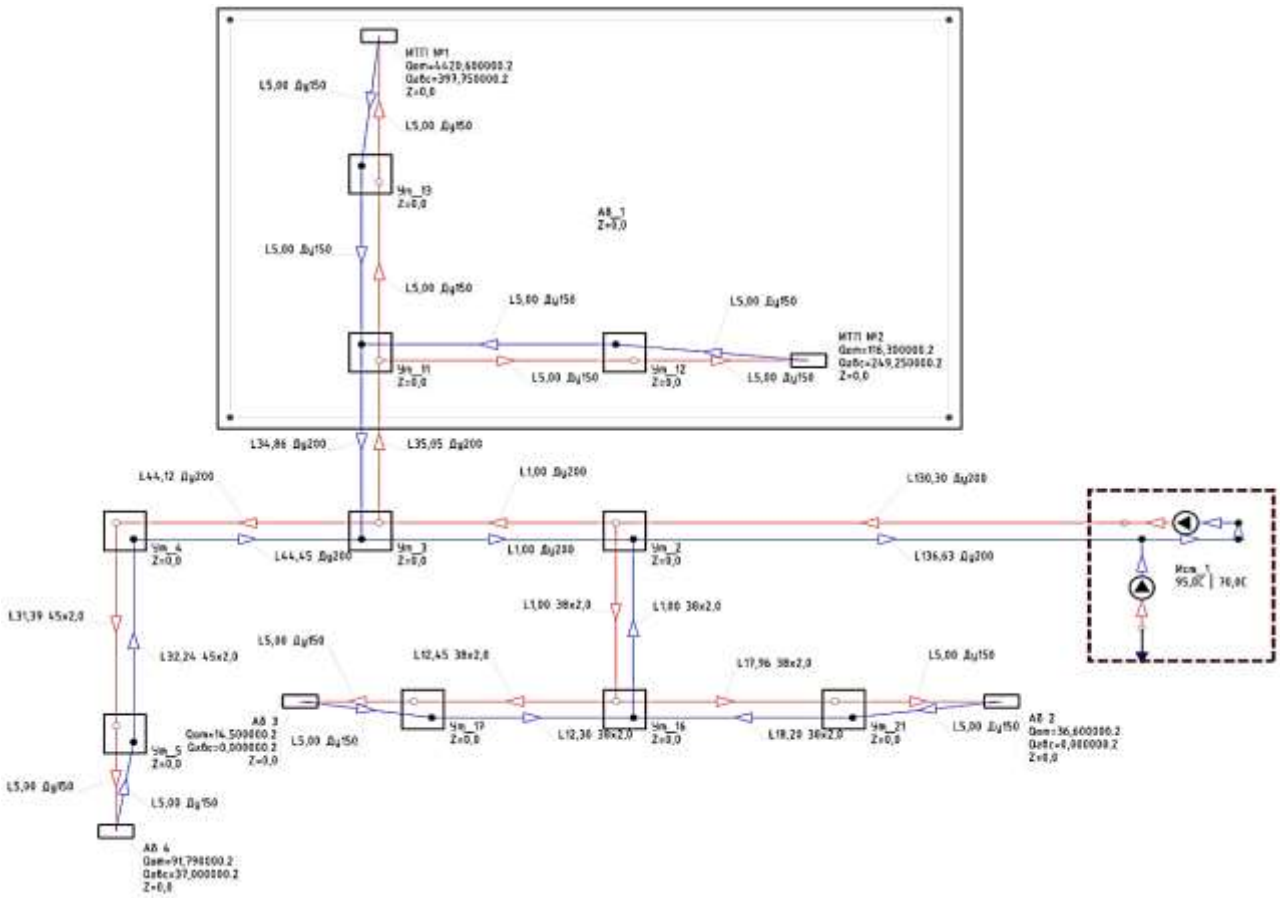

Рис. 1. Расчетная схема тепловой сети (топологическая модель)
Fig. 1. Design diagram of the heat network (topological model)

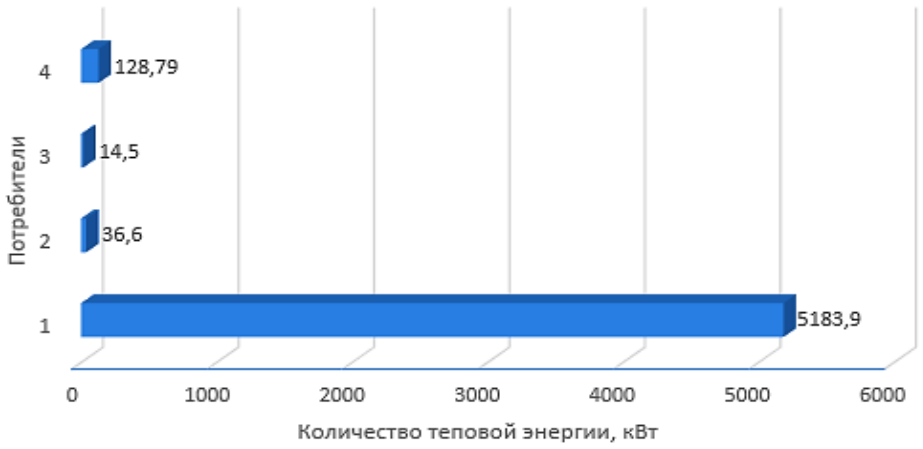

Рис. 2. Расчетные тепловые нагрузки потребителей, подключенных к исследуемой тепловой сети
Fig. 2. Estimated heat loads of consumers connected to the investigated heat network

Результатом эксперимента стала наглядная визуализация факта невосприимчивости расходов теплоносителя во внутренних системах теплоснабжения от изменения располагаемого перепада давлений на вводе тепловой сети у потребителей № 1 и 4, оборудованных устройствами качественно-количественного регулирования тепловой нагрузкой. Совершенно иначе протекает реакция на изменение располагаемого перепада давлений на вводе тепловой сети у неавтоматизированных потребителей. Во внутренних системах теплоснабжения неавтоматизированных потребителей происходит резкое снижение расхода теплоносителя – на 29,3% у потребителя № 2 и на 37,5% у потребителя № 3.

Кривые зависимости расхода теплоносителя от перепада давлений на вводе тепловой сети показаны на рис. 3.

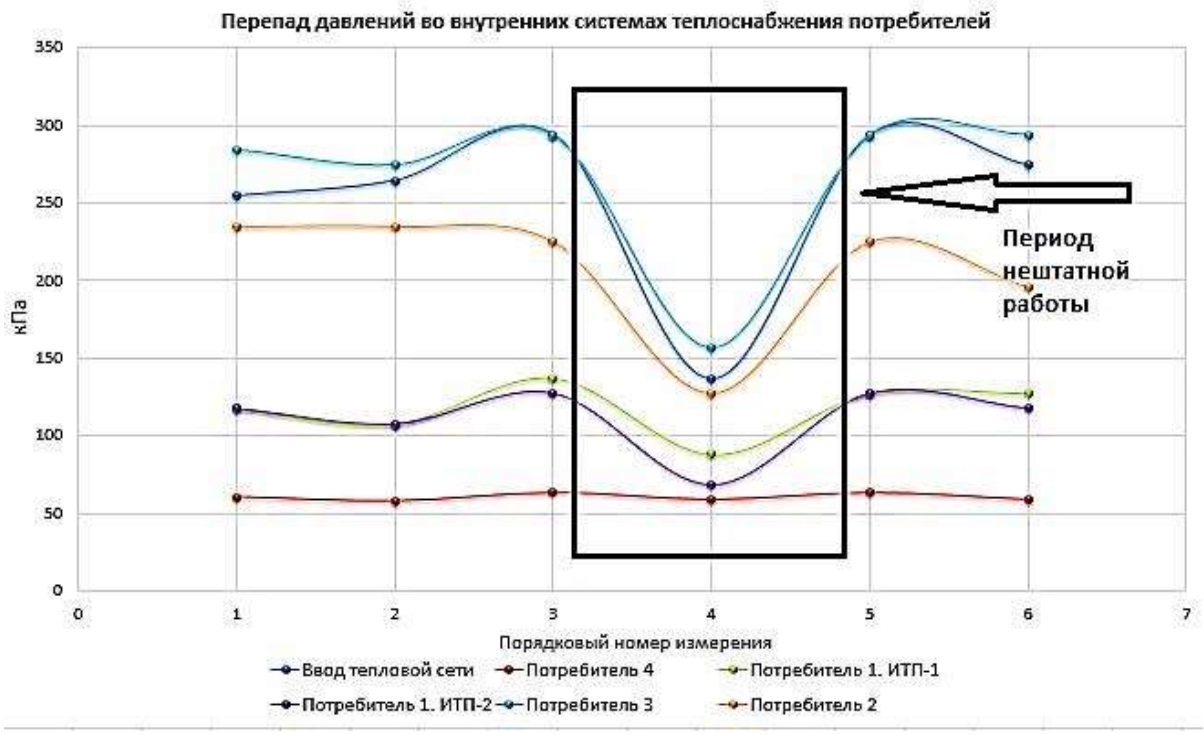

Рис. 3. Перепад давлений на вводе в индивидуальном тепловом пункте потребителей в условиях нештатной работы тепловой сети
Fig. 3. Differential pressure at the input of the consumer individual heating point at abnormal operation of the heating network

При проведении повторных экспериментов ставилась цель – выявление закономерности распределения поступающей тепловой энергии на нужды теплоснабжения объектов, степень оснащенности которых средствами регулирования тепловой нагрузки неравномерна в реальных условиях «недогрева» теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети.

В ходе проведения эксперимента применялись ультразвуковой расходомер Portoflow 300, стационарные расходомеры просвечивающего растрового электронного микроскопа, поверенные и аттестованные манометры и термометры на всех точках проведения замеров.

Принципом для выбора значений из массива натурных данных был определен нештатный режим работы централизованной системы теплоснабжения, то есть отклонение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе относительно утвержденного температурного графика, следовательно – отклонение от значений температур, принятых при расчетах на этапе разработки проектной документации систем теплоснабжения объектов. В нашем случае для препарирования были взяты значения температур и расходов теплоносителя на входе/выходе систем теплоснабжения потребителей при температурах наружного воздуха -21°С и -37°С. Температура в подающем трубопроводе тепловой сети при этом была одинаковой и составляла 105°С. Очевидно, что «недогрев» теплоносителя в подающем трубопроводе составил 39°С (согласно температурному графику при -37°С Т1 = 144°С), при этом второй массив замеров производился в условиях штатной работы централизованной системы теплоснабжения – при -21°С температура теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети должна составлять 112°С.

Для анализа распределения тепловой нагрузки в ситуации нештатной работы тепловой сети для каждого потребителя были определены проектные нагрузки при температурах наружного воздуха -21°С и -37°С (см. верхние прямые линии на рис. 4).

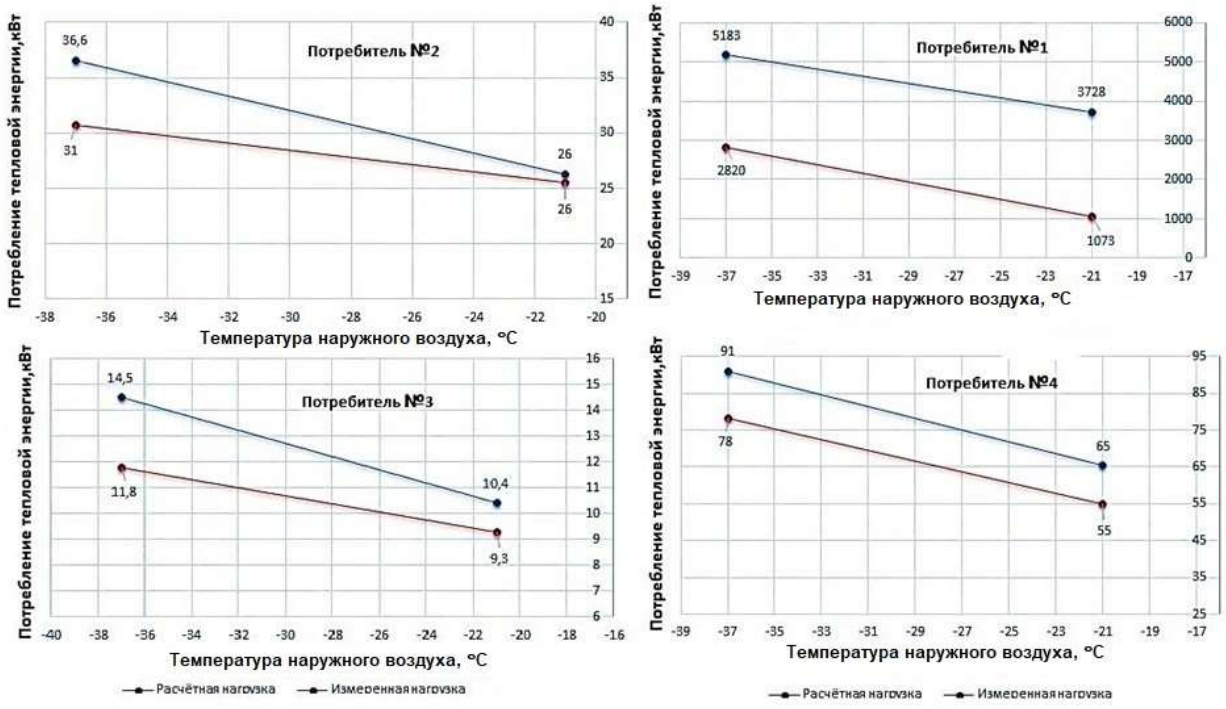

Рис. 4. Изменение тепловой нагрузки потребителей № 1–4
Fig. 4. Heat load variations of consumers no. 1–4

Из графиков видно, что при штатной работе тепловой сети измеренная в ходе эксперимента тепловая нагрузка потребителей, в независимости от степени автоматизации, соответствует с допустимой погрешностью проектным значениям. Из общей картины в режиме штатной работы выбивается лишь потребитель № 1, его измеренная тепловая нагрузка значительно ниже проектной. Данный факт связан с тем, что при проведении измерений не все тепловые энергоустановки потребителя № 1 были введены в работу в силу проходящих технологических процессов на объекте (рис. 4).

Однако в случае снижения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети при нештатных режимах работы системы теплоснабжения города у оборудованных дросселирующими шайбами потребителей № 2, 3 происходит снижение поступающей тепловой энергии относительно проектных нагрузок (см. нижние линии на рис. 4). Прямые, соответствующие измеренным нагрузкам, не параллельны прямым, определяющим расчетные нагрузки.

В аналогичном случае у потребителей № 1, 4, оборудованных автоматическими средствами регулирования тепловой нагрузкой, происходит компенсация снижения температуры в подающем трубопроводе за счет увеличения расхода теплоносителя путем открытия регуляторов перепада давления и регулирующих клапанов температуры во внутренних системах теплоснабжения (рис. 5).

Стоит отметить, что у оборудованных средствами автоматической регулировки тепловой нагрузки потребителей восстановление параметров во внутренних системах теплоснабжения происходит не в полной мере и прямо пропорционально зависит от степени снижения параметров централизованной системы теплоснабжения населенного пункта.

В ходе проведения измерений и сопоставления с результатами компьютерного моделирования (рис. 6, 7) при удовлетворительной сходимости результатов в условиях снижения пьезометрического перепада и/или температуры в подающем трубопроводе тепловой сети авторами была замечена тенденция, при которой в период компенсации недостающей тепловой энергии автоматизированными потребителями происходит дополнительное снижение расхода теплоносителя в системах теплоснабжения потребителей, оборудованных дроссельными диафрагмами. Основываясь на этом наблюдении, необходимо проработать рекомендации при подключении новых потребителей, как правило, автоматизированных, к централизованным системам городов и населенных пунктов с целью повышения их надежности и живучести.

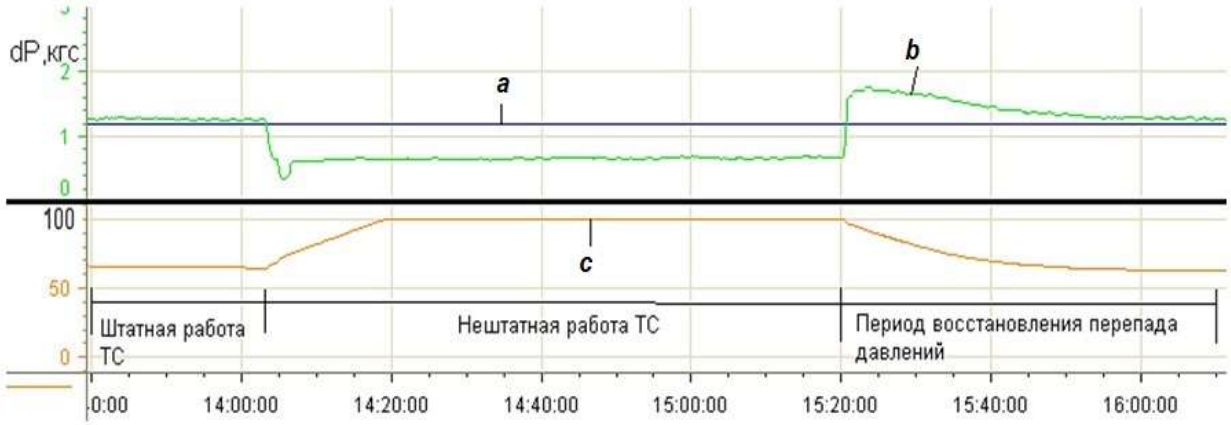

Рис. 5. Функционирование регулятора перепада давления в индивидуальном тепловом пункте № 2 потребителя № 1: a – установка по перепаду давлений; b – кривая изменения перепада давлений на вводе в индивидуальных тепловых пунктах; c – кривая работы автоматического регулятора

Fig. 5. Operation of the differential pressure controller in the no.2 individual heating station of no. 1 consumer: a – setting by pressure difference; b – curve of the pressure drop at the input of the individual heating stations; c – automatic controller curve

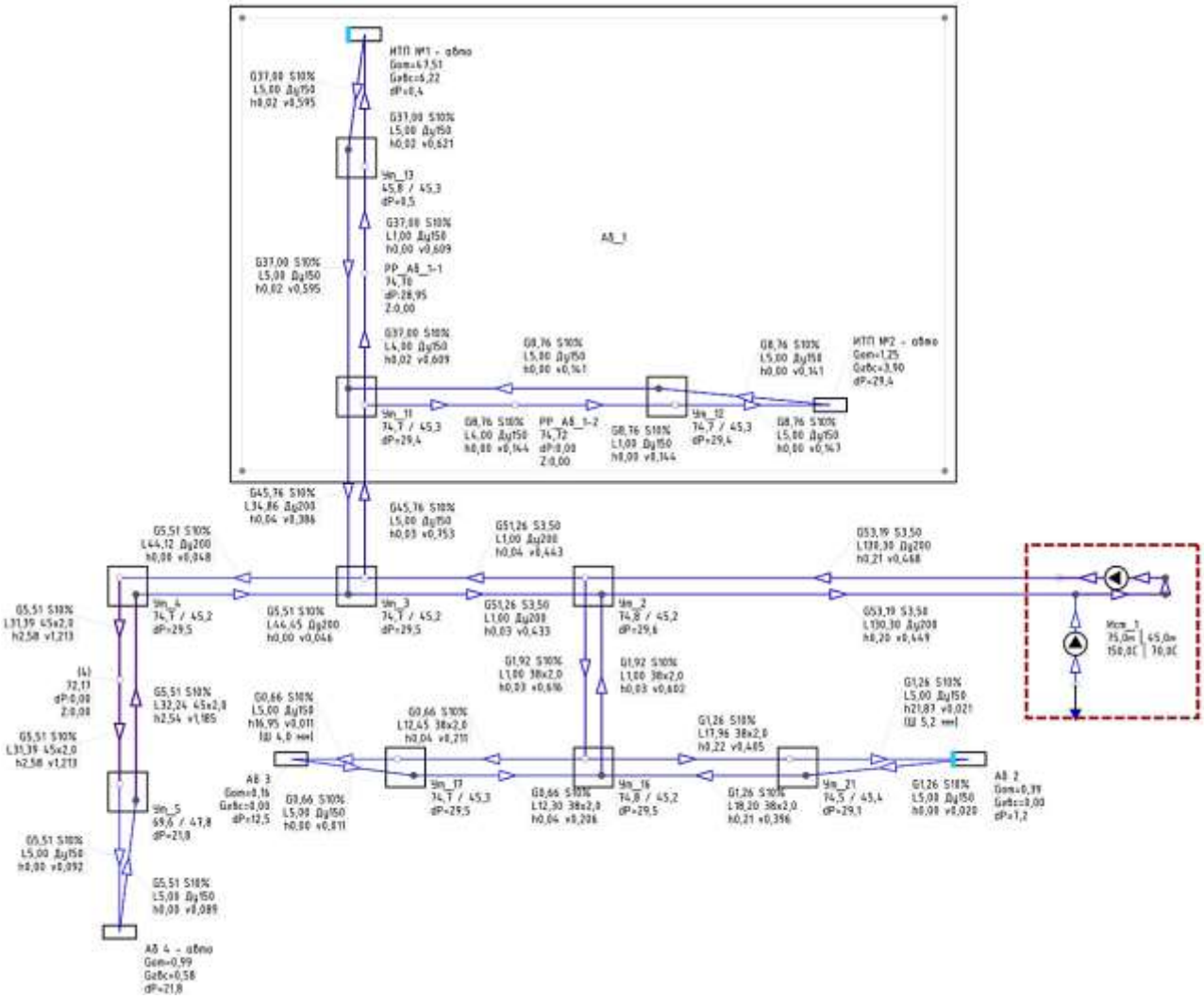

Рис. 6. Визуализация отдельного режима
Fig. 6. Single mode visualization

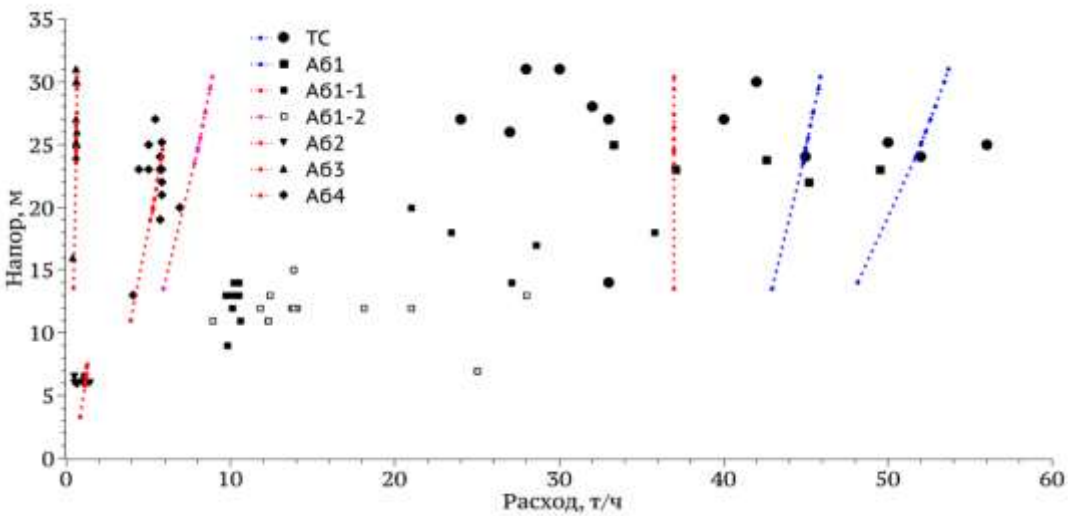

Рис. 7. Сопоставление результатов натурных замеров и математического моделирования
Fig. 7. Comparison of results of field measurements and mathematical modeling

Математическое моделирование показывает, что каждый элемент гидравлической системы оказывает влияние на нее. Проведен сравнительный численный эксперимент по моделированию приведенной тепловой сети активными (рис. 8) и пассивными (рис. 9) сопротивлениями. В обоих вариантах гидравлическая характеристика описывается квадратичным законом, но в случае активных сопротивлений парабола смещена (см. рис. 8).

По результатам выполнения наладочного расчета фиксируются целевые гидравлические характеристики узлов ввода, которые реализуются в виде дроссельных шайб. Подобные пассивные сопротивления элементов гидравлической сети делают ее предсказуемой. Наличие же автоматизированных пунктов приводит к тому, что часть системы непрерывно изменяется в форме адаптации гидравлических сопротивлений, что приводит к совершенно новым пропорциям гидравлических сопротивлений в сети и сводит на нет результаты предварительного наладочного расчета.

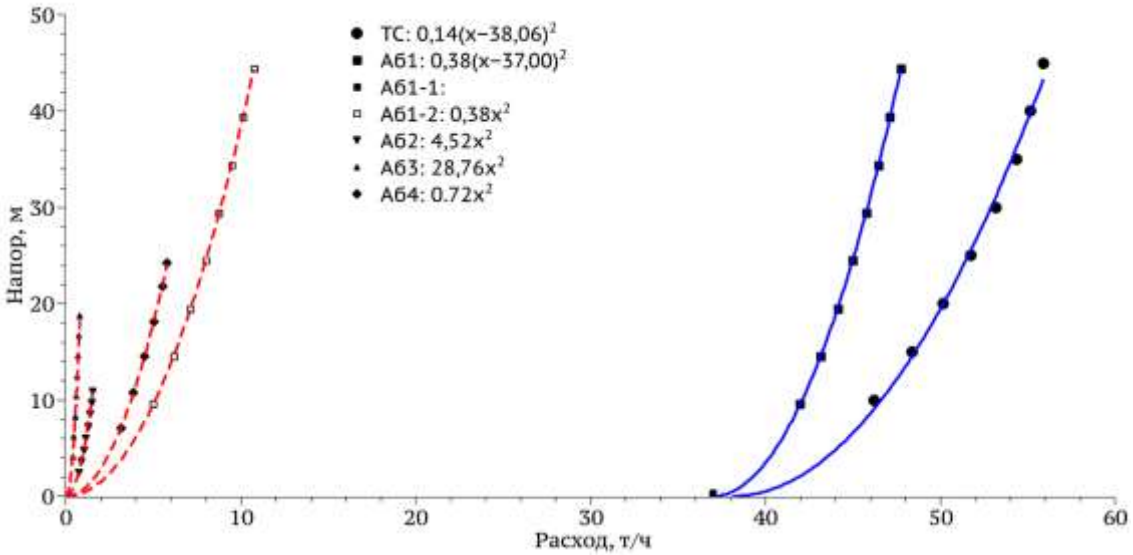

Рис. 8. Численный эксперимент по гидравлическому расчету системы с активными элементами
Fig. 8. Numerical experiment on hydraulic calculation of a system with active elements

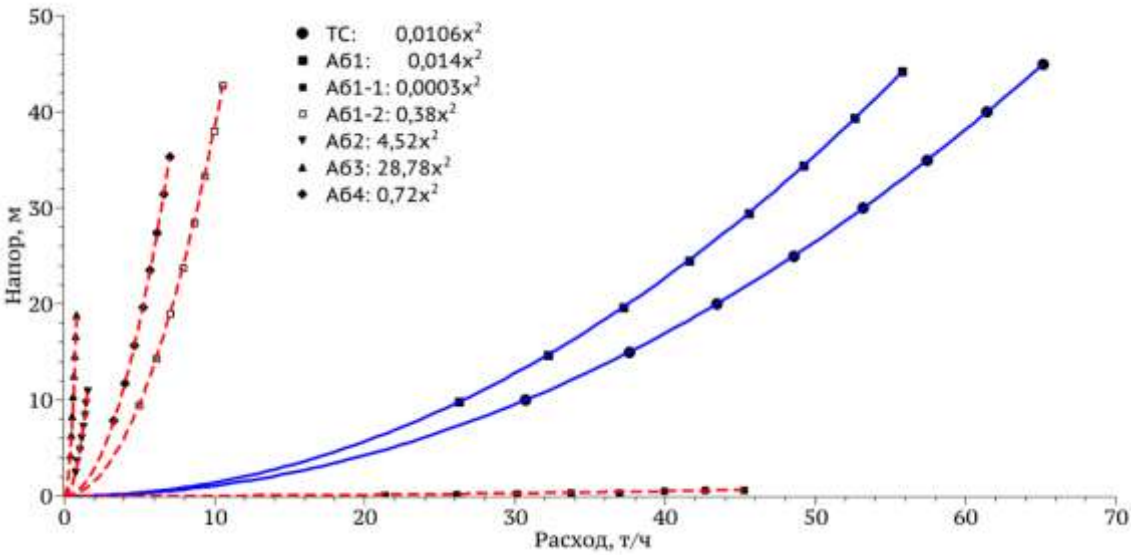

Рис. 9. Численный эксперимент по гидравлическому расчету системы с фиксированными сопротивлениями
Fig. 9. Numerical experiment on hydraulic calculation of a system with fixed resistances

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование сетей централизованного теплоснабжения – необходимый инструмент для анализа и управления их гидравлическими и тепловыми режимами. Для оценки эффективности разработанной компьютерной программы результаты натурных исследований теплогидравлических режимов работы тепловых сетей действующей системы централизованного теплоснабжения с потребителями, имеющими различную степень оснащенности средствами автоматизации, сопоставлены с результатами компьютерного моделирования, что дало возможность оценить степень обоснованности принятия управленческих решений по стабилизации гидравлических режимов. Встроенные средства визуализации потокораспределения способствуют пониманию влияния комбинаций первичных независимых факторов, определяющих работоспособность сети, и позволяют достаточно быстро ориентироваться в вариантах управления гидравлическими режимами протяженных и закольцованных сетей централизованного теплоснабжения. Сопоставление результатов расчета с натурными замерами при имитации нештатного режима демонстрирует некоторое расхождение результатов. Предположительно это происходит из-за наличия переходных процессов в реальной тепловой сети и несинхронного сбора метрики в совокупности с расчетом стационарных режимов в математической модели. Расчет стационарных режимов даже при наличии активных элементов соответствует квадратичному характеру гидравлических характеристик как сети в целом, так и отдельных элементов, пусть и с небольшим смещением, в то же время натурные замеры явно не показывают их. Результатом использования компьютерной программы JA_Net стали проекты наладки и реконструкции тепловых сетей и элементов систем централизованного теплоснабжения населенных пунктов.

Список литературы

1. Шалагинова З.И., Токарев В.В. Прикладные проблемы и методические подходы к организации эксплуатационных режимов теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 33–49. https://doi.org/10.1134/S0040363619100059
2. Шалагинова З.И. Разработка методики расчета узловых цен тепловой энергии на базе моделирования теплогидравлических режимов систем теплоснабжения для решения задач управления и оптимизации // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 96–108. https://doi.org/10.1134/S0040363618100077
3. Токарев В.В. Разработка методики секционирования кольцевых тепловых сетей закрытых систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2018. № 6. С. 84–94. https://doi.org/10.1134/S0040363618060103
4. Якшин С.В. Применение метода расщепления графа при оптимизации параметров тепловой сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 129–140. http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-129-140
5. Stennikov V., Mednikova E., Postnikov I., Penkovskii A. Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019. Vol. 23. Iss. 2. P. 207–221. https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0064
6. Крицкий Г.Г., Игнатчик В.С. Цифровые технологии в инженерной инфраструктуре города // Актуальные проблемы военно-научных исследований. СПб., 2019. № S2. С. 167–184.
7. Dou Y., Togawa T., Dong Liang, Fujii M., Ohnishi S., Tanikawa H., et al. Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: a case in Fukushima, Japan // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 128. P. 406–416. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.006
8. Xiong Wangqi, Wang Jiandong. Minimizing power consumption of an experimental HVAC system based on parallel grid searching // Energies. 2020. Vol. 13. No. 8. https://doi.org/10.3390/en13082083
9. Clegg S., Mancarella P. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part I: High-resolution spatial and temporal heat demand modelling // Energy. 2019. Vol. 184. P. 191–203. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.078
10. Brocklebank I., Beck S.B.M., Styring P. A simple approach to modeling rural and urban district heating // Frontiers in Energy Research. 2018. https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00103
11. Larsen H.V., Pálsson H., Bøhm B., Ravn H.F. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks // Energy Conversion and Management. 2002. Vol. 43. Iss. 8. P. 995–1019. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00093-0
12. Büchele R., Kranzl L., Hummel M. Integrated strategic heating and cooling planning on regional level for the case of Brasov // Energy. 2019. Vol. 171. P. 475–474. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.030
13. Mednikova E., Stennikov V., Postnikov I., Penkovskii A. Development features of heat power industry legislation in Russia // Environmental and Climate Technologies.

2019. Vol. 23. Iss. 2. С. 22–35. https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0052
14. Lygnerud K. Challenges for business change in district heating // Energy, Sustainability and Society. 2018. Vol. 8. No. 20. https://doi.org/10.1186/s13705-018-0161-4
15. Hermansson K., Kos C., Starfelt F., Kyprianidis K., Lindberg C.-F., Zimmerman N., et al. An automated approach to building and simulating dynamic district heating networks // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Iss. 2. P. 855–860. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.04.021
16. Sartor K., Thomas D., Dewallef P. A comparative study for simulating heat transport in large district heating networks // International Journal of Heat and Technology. 2018. Vol. 36. Iss. 1. P. 301–308. https://doi.org/10.18280/ijht.360140
17. Sartor K., Dewalef P. Experimental validation of heat transport modelling in district heating networks // Energy. 2017. Vol. 137. P. 961–968. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.161
18. Guelpa E. Impact of network modelling in the analysis of district heating systems // Energy. 2020. Vol. 213. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118393
19. Penkovskii A., Stennikov V. Mathematical modeling and optimization of the monopoly heating market // International Journal of Energy Economics and Policy. 2020. Vol. 10. No. 4. С. 342–351. https://doi.org/10.32479/ijeep.9284
20. Betancourt Schwarz M., Mabrouk M.T., Santo Silva C., Haurant P., Lacarrière B. Modified finite volumes method for the simulation of dynamic district heating networks // Energy. 2019. Vol. 182. P. 954–964. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.038
21. Guelpa E., Verda V. Compact physical model for simulation of thermal networks // Energy. 2019. Vol. 175. P. 998–1008. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.064
22. Zhao Jing, Shan Yu. An influencing parameters analysis of district heating network time delays based on the CFD method // Energies. 2019. Vol. 12. No. 7. https://doi.org/10.3390/en12071297
23. Хасилев В.Я., Меренков А.П., Каганович Б.М. [и др.]. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / под ред. Хасилева В.Я., Меренкова А.П. М.: Энергия, 1978. 176 с.
24. Lipovka A.Y., Lipovka Yu.L. Application of «Gradient» algorithm to modeling thermal pipeline networks with pumping stations // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2013. Vol. 6. № 1. P. 28–35. [Электронный ресурс]. URL: http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/126983/03_Lipevka.pdf?sequence=1&isAllowed=y (29.05.2020).
25. Липовка Ю.Л., Калабин Д.А. Гидравлическая устойчивость в условиях неравномерной автоматизации систем теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 3. С. 19–24.

References

1. Shalaginova ZI, Tokarev VV. Applied problems and methodological approaches to planning and implementation of operating conditions at district heating systems. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019;10:33–49. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S0040363619100059
2. Shalaginova ZI. The development of a method for calculating the nodal prices of the thermal energy by modeling the thermal and hydraulic regimes of the heat supply systems for solving control and optimization problems. *Teploenergetika = Thermal Engineering.* 2018;10:96–108. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S0040363618100077
3. Tokarev VV. Developing a procedure for segmenting ring heat networks of closed heat supply systems. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;6:84–94. (In Russ.) https://doi.org/10.1134/S0040363618060103
4. Yakshin SV. Application of graph splittance method when optimizing heating network parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(10):129–140. (In Russ.) http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-129-140
5. Stennikov V, Mednikova E, Postnikov I, Penkovskii A. Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(2):207–221. https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0064
6. Krickij GG, Ignatchik VS. Digital technologies in engineering infrastructure of the city. In: *Aktual'nye problemy voenno-nauchnyh issledovanij*. Saint-Petersburg; 2019, no. S2, p. 167–184. (In Russ.)
7. Dou Y, Togawa T, Dong Liang, Fujii M, Ohnishi S, Tanikawa H, et al. Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: a case in Fukushima, Japan. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018;128:406–416. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.006
8. Xiong Wangqi, Wang Jiandong. Minimizing power consumption of an experimental HVAC system based on parallel grid searching. *Energies*. 2020;13(8). https://doi.org/10.3390/en13082083
9. Clegg S, Mancarella P. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part I: High-resolution spatial and temporal heat demand modelling. *Energy*. 2019;184:191–203. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.078
10. Brocklebank I, Beck SBM, Styring P. A simple approach to modeling rural and urban district heating. *Frontiers in Energy Research*. 2018. https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00103
11. Larsen HV, Pálsson H, Bøhm B, Ravn HF. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. *Energy Conversion and Management*. 2002;43(8):995–1019. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00093-0
12. Büchele R, Kranzl L, Hummel M. Integrated strategic heating and cooling planning on regional level for the case of Brasov. *Energy*. 2019;171:475–474. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.030
13. Mednikova E, Stennikov V, Postnikov I, Penkovskii A. Development features of heat power industry legislation in Russia. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(2):22–35.
14. Lygnerud K. Challenges for business change in district

heating. *Energy, Sustainability and Society*. 2018;8(20). https://doi.org/10.1186/s13705-018-0161-4
15. Hermansson K, Kos C, Starfelt F, Kyprianidis K, Lindberg C.-F, Zimmerman N, et al. An automated approach to building and simulating dynamic district heating networks. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(2):855–860. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.04.021
16. Sartor K, Thomas D, Dewallef P. A comparative study for simulating heat transport in large district heating networks. *International Journal of Heat and Technology*. 2018;36(1):301–308. https://doi.org/10.18280/ijht.360140
17. Sartor K, Dewalef P. Experimental validation of heat transport modelling in district heating networks. *Energy*. 2017;137:961–968. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.161
18. Guelpa E. Impact of network modelling in the analysis of district heating systems. *En-ergy*. 2020;213. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118393
19. Penkovskii A, Stennikov V. Mathematical modeling and optimization of the monopoly heating market. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020;10(4):342–351. https://doi.org/10.32479/ijeep.9284
20. Betancourt Schwarz M, Mabrouk MT, Santo Silva C, Haurant P, Lacarrière B. Modified finite volumes method for the simulation of dynamic district heating networks. *Energy*. 2019;182:954–964. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.038
21. Guelpa E, Verda V. Compact physical model for simulation of thermal networks. *Energy.* 2019;175:998–1008. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.064
22. Zhao Jing, Shan Yu. An influencing parameters analysis of district heating network time delays based on the CFD method. *Energies*. 2019;12(7). https://doi.org/10.3390/en12071297
23. Hasilev VYa, Merenkov AP, Kaganovich BM, et al. Methods and algorithms for heat network calculation / eds. VYa Hasilev, AP Merenkov. Moscow: Energiya; 1978, 176 p. (In Russ.)
24. Lipovka AY, Lipovka YuL. Application of «Gradient» algorithm to modeling thermal pipeline networks with pumping stations. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* 2013;6(1):28–35. Available from: http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/126983/03_Lipevka.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed 29th May 2020].
25. Lipovka YuL, Kalabin DA. Hydraulic stability of heat supply systems. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2018;3:19–24. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Калабин Дмитрий Александрович,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;
✉ e-mail: promenergetik@mail.ru

Липовка Алексей Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры градостроительства,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;
e-mail: alex.lipovka@gmail.com

Липовка Юрий Львович,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры инженерных систем зданий и сооружений,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;
e-mail: ylipovka@sfu-kras.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.01.2021; одобрена после рецензирования 05.02.2021; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Kalabin,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
✉ e-mail: promenergetik@mail.ru

Aleksey Yu. Lipovka,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Urban Planning,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
e-mail: alex.lipovka@gmail.com

Yuri L. Lipovka,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Engineering Systems of Buildings and Structures,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
e-mail: ylipovka@sfu-kras.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 11.01.2021; approved after reviewing 05.02.2021; accepted for publication 26.02.2021.