

ТЕПЛОФИКАЦИЯ И ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ТЕНДЕНЦИИ И ЗАДАЧИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ (ОБЗОР)¹

© 2022 г. Н. Н. Новицкий^а, З. И. Шалагинова^а *, А. В. Алексеев^а,
О. А. Гребнева^а, В. В. Токарев^а, А. В. Луценко^а, О. В. Вантеева^а

^аИнститут систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, ул. Лермонтова, д. 130, г. Иркутск, 664033 Россия

*e-mail: shalaginova@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 25.08.2021 г.

Статья посвящена проблемам цифровизации и интеллектуализации систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) и носит обзорно-постановочный характер. Интеллектуализация СЦТ рассматривается как процесс перехода на принципиально новую платформу, в рамках которой становится возможным эффективное согласование интересов, требований и возможностей всех сторон, участвующих в процессах теплоснабжения, и потребителю отводится роль активного равноправного участника. Дается краткая характеристика основных направлений, целей и признаков этого процесса. Рассматриваются отечественный и зарубежный опыт централизации теплоснабжения, в том числе наиболее передовые тенденции его развития в странах Европейского союза. Особое внимание уделяется проблемам интеллектуализации российских СЦТ. Показано, что переход на новую парадигму потребует кардинального пересмотра сложившейся практики проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления СЦТ. Формулируются ключевые направления и задачи, связанные с переходом на новую концепцию управления функционированием СЦТ как киберфизическими объектами. Переход на эту концепцию предполагает широкое применение методов математического и компьютерного моделирования для автоматизации процессов слежения за состоянием СЦТ, его анализа, прогнозирования и оптимизации. Значительный объем статьи посвящен аналитическому обзору современного состояния научно-методических разработок в этой области по четырем основным направлениям: математическое моделирование режимов СЦТ (гидравлических, температурных и теплогидравлических, стационарных и динамических, детерминированных и вероятностных), идентификация фактического состояния СЦТ (характеристик оборудования, параметров режимов и др.) по данным измерений, оптимизация режимов работы СЦТ (для оценки эффективности новых технологий теплоснабжения, эффективной эксплуатации СЦТ и оптимального управления режимами), программное обеспечение для компьютерного моделирования СЦТ. Раскрываются содержательные постановки задач математического и компьютерного моделирования СЦТ, а также имеющиеся в ИСЭМ СО РАН разработки для их решения.

Ключевые слова: интеллектуализация, цифровизация, теплоснабжающие системы, моделирование, оптимизация режимов, идентификация параметров, информационно-вычислительные технологии

DOI: 10.1134/S0040363622040051

В России, как и в большинстве экономически развитых стран, в настоящее время разворачиваются масштабные процессы цифровизации экономики и ее отраслей, включая энергетику [1]. В широком смысле термин “цифровизация” обобщает такие понятия, как компьютеризация, информатизация, автоматизация и др. Конечная цель таких процессов – переход на полностью автоматизированное производство с интеллекту-

альным управлением в реальном времени во взаимодействии со смежными системами и внешней средой с перспективой объединения в глобальную промышленную сеть вещей и услуг. В узком смысле цифровизация – это обеспечение возможностей представления, хранения, передачи и обработки информации в цифровом виде. С этой точки зрения цифровизация – необходимое условие интеллектуализации, связанной с перенесением основных функций управления (анализа, прогнозирования, принятия и реализации решений), которые раньше выполнял человек, на программное обеспечение. Чем больше таких функ-

¹ Работа выполнена в рамках проекта государственного задания программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2025 гг. (№ FWEU-2021-0002, номер государственной регистрации AAAA-A21-121012090012-1).

ций, для реализации которых ранее требовались образование, опыт и квалификация специалистов, возлагается на компьютеры, тем более “интеллектуальной” является техническая система. В свою очередь создание интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения – необходимое условие интеграции энергетических систем разных типов.

Основные тенденции интеллектуализации были сформулированы в начале 2000-х годов в рамках концепции Smart Grid (“умные сети”), принятой в качестве главного направления развития энергетики в экономически развитых странах Запада [2–4]. В настоящее время это направление активно прорабатывается и в российской электроэнергетике [5, 6]. Россия занимает обширную территорию, большая часть которой находится в суровых климатических условиях. Это обусловило создание уникальных по своим масштабам и значению для энергетики, промышленности и социальной сферы СЦТ, проблемы же энерго- и ресурсосбережения здесь являются важнейшими составляющими энергетической политики [7, 8]. Поэтому переход на интеллектуальные СЦТ следует рассматривать как стратегическое направление их инновационного преобразования, которое отражено в стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [9], приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники РФ, критических технологиях РФ [10], технологических платформах РФ [11], федеральном проекте “Цифровые технологии” Национальной программы “Цифровая экономика Российской Федерации” [12].

Научно-методическая база интеллектуализации трубопроводных систем энергетики (включая СЦТ), которая может быть положена в основу практического применения, в настоящее время отсутствует как в нашей стране, так и за рубежом. Авторы данной статьи, проведя анализ мирового опыта и тенденций интеллектуализации СЦТ, а также обзор современных достижений в области их математического моделирования, сформулировали прикладные и научно-методические задачи, возникающие на пути трансформации традиционных СЦТ в киберфизические системы, которые являются носителями не только сведений об основном оборудовании, но и об информационных и о вычислительных ресурсах, напрямую влияющих на их функционирование. Поэтому в статье рассматриваются прежде всего ключевые вопросы анализа и оптимального синтеза кибернетических свойств СЦТ.

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ СЦТ

Понятие и цели интеллектуализации СЦТ

Однозначное понятие Smart Grid до сих пор отсутствует, а имеющиеся представления отражают взгляды и интересы основных участников процессов интеллектуализации систем. Государственные структуры рассматривают Smart Grid как идеологию национальных программ развития экономики, включая энергетику, производители оборудования и технологий – как перспективный рынок сбыта своей продукции, а энергетические компании – как базу обеспечения устойчивого развития, основанного на инновациях. Значительный отпечаток на понятие интеллектуальных энергетических систем и преследуемые цели накладывает и специфика разных стран и регионов.

Анализ обширной литературы, программных документов разных стран, а также практического опыта интеллектуализации энергетических систем позволяет представить следующую достаточно общую авторскую трактовку интеллектуализации, понятия интеллектуальных СЦТ (ИСЦТ) и их отличий от традиционных [13–16], систематизировать ключевые цели и средства ее реализации.

Цели интеллектуализации СЦТ, в принципе, совпадают с традиционными требованиями повышения эффективности, надежности, качества и экологичности их функционирования. Главные перспективы связываются с новыми, во многом уникальными возможностями удовлетворения этим требованиям при совместном применении современных информационных, телекоммуникационных и компьютерных технологий (включая методы математического моделирования и оптимизации), энергоэффективного основного и маневренного управляющего оборудования, рыночных механизмов согласования интересов, спроса и предложения.

Интеллектуальные СЦТ – это принципиально новая платформа, в рамках которой становится возможным эффективное согласование интересов, требований и возможностей всех сторон, участвующих (или заинтересованных) в процессах производства, транспорта и потребления целевого продукта. При этом потребителю отводится роль активного, равноправного участника, влияющего на объемы потребления, качество и цены.

Главными признаками ИСЦТ являются:

наличие единого информационного (цифрового) пространства как основного системообразующего фактора, отвечающего за наблюдаемость процессов выработки, распределения и потребления для всех участников этих процессов;

высокий уровень управляемости как основного способа гармонизации требований потребителей и возможностей производителей (поставщиков);

динамическое ценообразование, стимулирующее потребителей к изменению привычных графиков потребления и энергосбережению;

высокий удельный вес цифровых, информационных, телекоммуникационных технологий, методов математического моделирования и оптимизации в реальных контурах наблюдения, управления и принятия решений.

Краткая характеристика зарубежных СЦТ

Структура и мощность СЦТ в разных странах неоднородны. В сопоставимых с Россией климатических условиях находятся страны Северной Америки (США, Канада), Евросоюза, отдельные страны СНГ (Белоруссия, Украина и др.) и Северо-Восточной Азии (Китай, Монголия). В США и Канаде есть большие перспективы развития центрального теплоснабжения [17], которые пока не реализованы. Так, в энергетическом балансе Канады доля СЦТ в покрытии тепловой нагрузки составляет порядка 0,4%, причем 90% этой энергии идет на промышленное потребление [18]. В последнее время СЦТ интенсивно развиваются в северных районах Китая [19], где в том числе разрабатываются проекты теплоснабжения от атомных источников.

Наиболее интенсивно СЦТ развиваются в странах Евросоюза, где насчитывается порядка 3 тыс. СЦТ в городах и поселках с населением от 5 тыс. чел., годовое производство тепловой энергии составляет более 630 млн ГДж, а общая протяженность тепловых сетей – порядка 200 тыс. км [20]. Признанными лидерами здесь считаются Скандинавские страны, в особенности Дания [21], где с 70-х годов прошлого века осуществляется государственное регулирование технической и тарифной политики в области теплоснабжения, а в настоящее время от СЦТ обеспечиваются порядка 60% потребностей в тепле и производятся все виды современного оборудования для таких систем. В Копенгагене (500 тыс. чел.) СЦТ обеспечивает почти 100% спроса на тепловую энергию. К тепловым сетям (общей протяженностью 1,4 тыс. км в двухтрубном исполнении) подключено более 30 тыс. узлов потребления. Тепловые потери в магистральных сетях составляют 3%, а в распределительных – 15%. Расходы тепла на 1 м² жилой площади за последние 30 лет уменьшились вдвое [22]. Разработанный национальный план Дании “Энергия-21” на период до 2030 г. преду-

сматривает дальнейшее повышение эффективности теплоснабжения [21].

Тенденции развития и интеллектуализации СЦТ в Евросоюзе

Далее представлены ретроспектива и краткая характеристика современных тенденций развития СЦТ в Западной Европе, где по сравнению с другими странами наиболее интенсивно ведется поиск новых принципов и технологий организации централизованного теплоснабжения. Здесь различают уже четыре поколения СЦТ [23–25].

В первом поколении СЦТ в качестве теплоносителя использовался пар. Эти системы впервые появились в США в 80-х годах XIX в., а затем и в Европе (вплоть до 1930 г.) и сегодня считаются устаревшими из-за значительных тепловых потерь, проблем безопасности, коррозии труб обратного конденсата и др. Во многих городах Европы проводится или уже завершена замена теплоносителя.

Во втором поколении СЦТ в качестве теплоносителя использовалась горячая вода с температурой в подающем трубопроводе более 100°C и менее 70°C в обратном. Эти системы, появившись в 30-х годах XX в., доминировали вплоть до 70-х годов. Типичными их компонентами были трубы в бетонных каналах, громоздкие трубчатые теплообменники и регулирующие клапаны. Такие системы были широко распространены в СССР и применяются до сих пор.

Третье поколение начало активно развиваться в 70-х годах прошлого века в связи с двумя нефтяными кризисами. Характерные черты СЦТ этого поколения:

ориентация на энергоэффективность, когенерацию и привлечение альтернативных источников энергии (биомасса, отходы, солнечное, геотермальное тепло и др.);

широкое применение приборов учета потребления тепловой энергии и систем его мониторинга;

пониженные температуры воды как теплоносителя (менее 100°C в подающей линии и менее 45°C в обратной);

использование заводских предварительно изолированных труб, их бесканальная прокладка, компактные тепловые пункты с малогабаритными пластинчатыми теплообменниками из нержавеющей стали, насосы с частотным приводом и др.

Третье поколение иногда называют “скандинавской технологией СЦТ”, поскольку именно в этих странах находятся многие производители

соответствующего оборудования. При создании всех новых систем, а также при реконструкции и расширении старых систем в Китае, Корее, европейских странах, США и Канаде ориентируются на использование технологий этого поколения.

Будущее, четвертое поколение технологий СЦТ (4GDH), планируемое к реализации на период до 2050 г., ориентировано на высокую энергоэффективность и экологичность, для достижения которых необходимо решить следующие задачи:

дальнейшее понижение температуры теплоносителя (менее 70°C в подающей линии и 50–25°C в обратной) для уменьшения тепловых потерь, увеличения срока службы оборудования и интеграции нетрадиционных низкотемпературных источников тепла;

энергоэффективное теплоснабжение, что предполагает утепление зданий, увеличение теплоотдачи обогревательных приборов, применение локальных подстанций, тепловых насосов и др.;

интеллектуализация процессов оптимального взаимодействия производства, распределения и потребления тепловой энергии;

интеграция со смежными энергетическими системами (электроэнергетическими, газовыми, системами хладо- и водоснабжения);

обеспечение надлежащих структур планирования, цен и мотивации, а также стратегических инвестиций, связанных с преобразованием в будущие устойчивые энергетические системы.

Анализ планов развития технологий теплоснабжения в Европе показывает их направленность, с одной стороны, на повышение разнообразия и качества элементной базы СЦТ, а с другой – на применение новых принципов управления их функционированием, называемых интеллектуальными и интегральными. Представляется, что имеет место магистральная тенденция трансформации существующих СЦТ в киберфизические системы. Действительно, для такой трансформации созданы практически все необходимые технические предпосылки, связанные с наличием: систем удаленного централизованного мониторинга потребления как источника обратной связи с СЦТ; маневренного основного, управляющего и регулирующего оборудования; степеней свободы для управления режимами, производства и потребления тепла вследствие применения независимых схем подключения тепловых сетей и узлов потребления разных уровней. В связи с этим на передний план выходят научно-методические проблемы разработки концепций и методов оптимального управления режимами работы СЦТ нового поколения.

Задачи интеллектуализации российских СЦТ

В России сформировались уникальные по масштабам и сложности СЦТ, по многим показателям не имеющие аналогов в других странах [26]. Вместе с тем задачи их интеллектуализации приходится решать на фоне целого ряда унаследованных проблем, таких как общее старение оборудования, низкие управляемость, надежность и техническая оснащенность, повышенная аварийность, непроектные режимы работы, высокие тепловые потери и энергозатраты, организационная разобщенность технологически связанных систем, консервативная нормативно-правовая база и др.

Переход на парадигму ИСЦТ требует решения большого комплекса научных, нормативно-правовых, технических, технологических, экономических, информационных и других вопросов. Необходимо в том числе пересмотр сложившейся практики проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления СЦТ. Анализ этой практики позволяет выделить следующие основные проблемы, возникающие при переходе на новую парадигму.

Проектирование СЦТ традиционно ведется на один так называемый расчетный режим максимальной нагрузки, что вытекает из требования гарантированного снабжения потребителей в любых условиях. Вместе с тем пребывание системы в этом режиме составляет лишь небольшую долю общего времени ее функционирования. При высокой неравномерности потребления (в особенности при активном поведении потребителей) и низкой управляемости СЦТ такой подход ведет к завышению вложений в развитие и затрат на эксплуатацию. Сложившаяся практика проектирования не предусматривает обеспечения управляемости СЦТ в целом, а требования и нормативы по управляемости вовсе отсутствуют. В лучшем случае применяются типовые схемы локальной автоматизации отдельных сооружений (источников, насосных станций, тепловых пунктов и др.). Соответственно, существующая практика проектирования слабо приспособлена к обеспечению эффективного функционирования СЦТ на множестве возможных режимов.

Традиционные нормы эксплуатации СЦТ регламентируют проведение ремонтных работ в соответствии с нормативным сроком службы оборудования (планово-предупредительная система эксплуатации). При этом на фоне прогрессирующих тенденций общего старения этого оборудования, с одной стороны, выполнение таких норм становится нереальным, а с другой – следование им не рационально. Фактический срок службы оборудования в зависимости от конкретных усло-

вий его использования может отличаться от нормативного в несколько раз, причем как в большую, так и в меньшую сторону.

Отсутствие полномасштабных информационно-измерительных систем (ИИС) до настоящего времени являлось основным сдерживающим фактором разработки и внедрения передовых концепций диспетчерского управления, предполагающих наличие обратной связи (наблюдаемость и идентифицируемость СЦТ). В связи с этим до настоящего времени доминирующее положение занимала простейшая концепция управления “по регламенту”, в соответствии с которой решения по управлению принимаются по косвенным признакам (по прогнозу температуры наружного воздуха, по температуре обратной воды на источниках и др.), а последствия управления (степень обеспеченности потребителей, допустимость режима, его оптимальность и др.) остаются частично или полностью ненаблюдаемыми (т. е. принцип обратной связи как основы создания надежного и устойчивого управления не реализуется).

Анализ этих проблем, в свою очередь, позволяет сформулировать следующие основные задачи, возникающие на пути интеллектуализации СЦТ:

при проектировании: обеспечение эксплуатационной эффективности проектируемых (реконструируемых) СЦТ; разработка нормативов и стандартов управляемости и наблюдаемости; синтез управляющих и информационно-измерительных систем;

при эксплуатации: полномасштабный переход на практику планирования ремонтов по фактическому состоянию; широкое применение методов идентификации, технической диагностики, анализа и прогнозирования повреждаемости; оптимизация планов ремонтно-восстановительных работ с учетом фактического состояния оборудования, статистики повреждаемости и ущербов для потребителей;

при управлении режимами: переход на новую концепцию компромиссного адаптивного управления в пространстве состояний с обратной связью [13–16]; оптимальное планирование и управление в основных (эксплуатационных), послеаварийных и “ремонтных” режимах; непрерывное слежение за фактическим состоянием СЦТ; преодоление ведомственной разобщенности технологически связанных частей СЦТ и смежных систем.

Сформулированная концепция предполагает наличие следующих уровней управления режимами: технико-экономических (управления режимами, управления тарифами), календарно-временных (планирования режимов, оперативного управления) и территориально-организационных (уровни

технологической иерархии, межведомственные и межсистемные уровни).

Здесь понятие компромиссного управления означает необходимость динамического согласования спроса и предложения между поставщиками и потребителями, а также со смежными системами при эффективном использовании имеющихся технических мощностей и гибкой ценовой (тарифной) политики. Под пространством состояний понимается пространство параметров режима (давлений, расходов, температур), взаимосвязь между которыми удовлетворяет физическим законам потокораспределения, что предполагает привлечение соответствующих математических и электронных моделей. Под адаптивным управлением с обратной связью понимается возможность адаптации привлекаемых моделей (за счет их идентификации) к изменениям характеристик оборудования СЦТ и внешних воздействий на основе наблюдения и измерения параметров режимов и проявлений внешней среды.

Без преодоления ведомственной разобщенности невозможно создание единого информационного (цифрового) пространства как основы согласования ценовой политики и решений по технологическому управлению СЦТ. Такое пространство, в свою очередь, предполагает: создание единых корпоративных, межведомственных, территориальных (например, городских) информационно-измерительных систем (ИИС); интеграцию систем технологического контроля и коммерческого учета в единые ИИС; информационную обеспеченность потребителей и других участников процессов теплоснабжения; применение новых быстродействующих телекоммуникационных технологий, методов сбора и обработки больших объемов информации.

Резюмируя сказанное, следует констатировать, что ключевое направление разрешения традиционного противоречия между требованиями экономичности и надежности СЦТ на пути их интеллектуализации связано с повышением их управляемости и применением методов математического и компьютерного моделирования в процессе управления. Вопросам разработки таких методов посвящены многочисленные исследования и обширная литература, что свидетельствует об их актуальности, многоплановости, наличии множества новых нерешенных задач. Далее приводится обзор современного состояния научно-методических разработок и программного обеспечения в области ключевых задач анализа, идентификации и оптимизации режимов, возникающих при интеллектуализации процессов управления функционированием СЦТ.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ СЦТ

Моделирование режимов СЦТ

Модели режимов являются основой практически всех классов задач анализа и принятия решений по управлению. Задачи моделирования режимов СЦТ (задачи анализа) состоят в определении расходов, давлений и температур по всем элементам расчетной схемы при заданных топологии схемы, гидравлических и теплофизических характеристиках ее элементов и граничных условиях (к которым относятся параметры режима, зависящие от проявлений внешней среды). Эти задачи возникают практически на всех этапах принятия решений по управлению, но имеют разные цели: при проектировании новых СЦТ – для анализа надежности и допустимости их работы в непроектных режимах; при реконструкции СЦТ [27, 28] – для анализа пропускной способности и выявления “узких мест” при работе на перспективные нагрузки; при планировании режимов на предстоящий отопительный сезон [29, 30] – для разработки и обоснования мероприятий по наладке тепловых сетей; при диспетчерском управлении [31–34] – для анализа и обоснования решений по управлению.

В теории гидравлических цепей [35] в зависимости от типа уравнений, описывающих режим (алгебраических, неявных, дифференциальных и др.), различают модели с сосредоточенными, переменными (регулируемыми) и распределенными параметрами.

Традиционными методами расчета установившихся гидравлических режимов, основанными на применении моделей потокораспределения с сосредоточенными параметрами, являются методы узловых давлений [35–37], контурных расходов [35, 36], глобального градиента [38] и их модификации. Эти методы достаточно хорошо проработаны, получили широкое распространение и занимают базовое положение при расчетах теплогидравлических режимов, так как для СЦТ возможна декомпозиция теплогидравлической модели на модели гидравлического и температурного режимов [29, 39]. Также предлагаются различные способы понижения размерности привлекаемых моделей на уровне упрощения расчетных схем, которые ориентированы на специальные свойства задач проектирования, реконструкции [40, 41] или оперативного управления [31, 42] и свойства привлекаемых моделей стационарных [31, 40–43] или динамических [33, 36, 41, 44] режимов в зависимости от целей моделирования.

Следующая проблема, возникающая при моделировании режимов СЦТ, обусловлена посто-

янно растущим ассортиментом регулирующего оборудования разного назначения и принципа действия. Среди существующих методов расчета потокораспределения в сетях, оснащенных регуляторами, можно выделить два основных подхода. Первый связан с применением достаточно универсальной методики двойных (или вложенных) циклов итераций [35], предназначенной для расчета гидравлических цепей с переменными (регулируемыми) параметрами. В [27, 45] рассматривается методика, также предполагающая реализацию двойных циклов итераций, однако на внутреннем цикле решается задача потокораспределения при фиксированных параметрах режима, поддерживаемых регуляторами, а на внешнем корректируется состав активных регуляторов. На основе второй методики в [46] была разработана методика “свертки-развертки”, которая заключается в корректировке математической модели сети на внешнем цикле итераций в зависимости от состояния регуляторов расхода. В [37] была предложена новая “релейная” методика, позволяющая значительно ускорить вычисления благодаря возможности отказа от внешних циклов итераций. В последнее время предлагаются различные подходы к расчету потокораспределения с отдельными типами регуляторов как в России [45–48], так и за рубежом [49, 50], однако они не охватывают всего перечня типов регулирующего оборудования. В качестве примера таких специфических регуляторов можно назвать регуляторы температуры косвенного действия или смесительные насосные станции [51, 52], которые используются для понижения температурного графика.

При расчетах нестационарных гидравлических режимов (на основе моделей потокораспределения с распределенными параметрами) традиционно используются следующие методы: волн и границ [53–55], характеристик [56–58], схем “бегущего” счета [59, 60], контрольного объема [33].

В последнее время все больше внимания уделяется моделированию динамики температурных режимов в силу их большой инерционности и характерности для СЦТ. Наблюдается значительное разнообразие предлагаемых моделей и методов в целях отыскания рационального сочетания точности результатов и быстродействия расчетов. В роли базовых моделей, как правило, выступают общие уравнения теплообмена в дифференциальной форме [61–65]. В зарубежной литературе для расчета динамики теплообмена предлагаются такие методы, как метод конечных элементов [66], метод “элемента” [67, 68], узловой метод [67–71], метод характеристик [64], метод функ-

ций [72], метод квазидинамического моделирования [68, 72, 73] и др. В ИСЭМ СО РАН разработан квазидинамический метод отслеживания изменения температурного фронта (порождаемого на источниках тепла) по всем узлам расчетной схемы СЦТ [74]. С помощью этого метода можно учитывать тепловые потери при транспорте, аккумулирующую способность зданий, разнообразие схем подключения потребителей [75] и другие факторы [63, 76, 77].

В последнее время наблюдается повышение интереса к задачам вероятностного анализа режимов для получения адекватных решений в условиях реальной стохастики воздействий внешней среды. Применительно к системам водоснабжения (при их проектировании) такие задачи рассматриваются в работах [78, 79], где вероятностные модели потоков распределения представлены в неявном виде, что затрудняет проведение массовых расчетов систем большой размерности. В зарубежных исследованиях вероятностные постановки возникают в задачах расчета ущерба от недопоставок воды [80], учета неопределенности работы аккумулирующих емкостей и насосных станций [81–83], при анализе надежности [84–87]. Во многих случаях задачи вероятностного анализа режимов трубопроводных систем (ТПС) формулируются без указания численных методов решения (например, [88]) либо предлагается применение классического метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) [81–83]. В работах [89–92] предложен подход к получению аналитических вероятностных моделей установившихся гидравлических режимов, который можно применять для систем водо- и теплоснабжения в условиях стохастического характера потребления.

Представленные здесь методы отличаются универсальностью, удовлетворительной точностью и низкими вычислительными затратами по сравнению с методом Монте-Карло. Они позволяют вычислять все вероятностные характеристики режимов, установившихся в сети произвольной конфигурации (многоконтурной, древовидной, смешанной) и любого состава заданных в вероятностной форме граничных условий (узловые давления, узловые расходы, сопротивления ветвей).

Подводя итог обзору данного блока исследований, следует констатировать его ограниченность с точки зрения возможностей применения результатов этих исследований для новых классов задач, связанных с интеллектуализацией СЦТ: математические модели режимов СЦТ как основа для постановки и эффективного решения задач идентификации и оптимального управления (чему посвящены следующие разделы обзора); методы

моделирования режимов как основа создания “цифровых двойников” СЦТ для анализа кибернетических свойств СЦТ (управляемость, идентифицируемость, эффективность и др.), а также отработки новых концепций, правил и алгоритмов оптимального управления. Оба класса задач требуют учета реальных условий работы СЦТ (динамика режимов, стохастика внешних возмущений, неопределенность информации о внутреннем состоянии оборудования). Для совместного учета этих факторов необходимо дальнейшее развитие методов математического моделирования СЦТ.

Идентификация параметров и режимов СЦТ

Основная цель идентификации СЦТ – определение фактического состояния оборудования по результатам измерений. Частные цели идентификации: идентификация характеристик оборудования (параметрическая идентификация), идентификация режимов (оценивание состояния) и идентификация повреждений (техническая диагностика). При этом неизбежно возникает вопрос о возможности достижения этих целей на основе доступной для получения с помощью измерений информации. Таким образом, идентификация СЦТ – комплексная проблема, требующая разработки и развития самостоятельного методического аппарата для решения двух задач: анализа и синтеза информационно-измерительных систем с точки зрения состава и параметров измерительных приборов, темпа их опроса и др.; разработки эффективных методов идентификации, обеспечивающих возможность обработки больших объемов измерительной информации.

Проблема оптимального размещения измерительных приборов отражена в многочисленных литературных источниках, посвященных электроэнергетическим и трубопроводным системам [93–110], в электроэнергетике она проработана главным образом для обеспечения возможности оценивания состояния этих систем (наблюдаемости) [100–104]. В последнее время большое внимание уделяется расстановке средств векторных измерений (PMU, Smart meters) с привлечением методов целочисленного программирования [101, 105]. В системах водоснабжения исследования по проблеме оптимального размещения датчиков для идентификации моделей потоков распределения носят полуэвристический характер [92–98]. Такие исследования проводятся в основном в целях обеспечения возможностей идентификации моделей качества воды [93, 94, 99], слежения за этими параметрами и определения источников загрязнения [95–98], а при реализации предлагае-

мых методов в большинстве случаев предполагается применение генетических алгоритмов [93–99]. В работах [106, 107, 111] впервые исследована возможность обеспечения идентифицируемости ТПС (в том числе СЦТ [109, 110]), предложены методы ее анализа, включая алгоритмы оптимизации состава измерительных приборов, гарантирующие получение глобального решения.

Большое число работ посвящено разработке и применению методов параметрической идентификации трубопроводных систем [77, 112–127]. За рубежом эти задачи получили название “калибровки моделей” систем водо- [99, 119–123] и теплоснабжения [124–127]. Для калибровки моделей водоснабжающих систем [119–121] и СЦТ [124], как правило, предлагается сочетание методов расчета потокораспределения и генетических алгоритмов.

В [122, 123] проводится анализ возможности сокращения требований к числу и размещению измерительных приборов за счет перехода от идентификации индивидуальных коэффициентов каждого элемента системы к идентификации единого коэффициента для группы элементов.

В [126] применительно к радиальным СЦТ исследуется возможность оценивания состояния для установившихся гидравлического и температурного режимов по результатам измерений режимных параметров у потребителей. Предлагаемый в работе метод носит полуэвристический характер и трудно применим для закольцованных сетей. В [127] рассматривается задача калибровки моделей установившегося температурного режима СЦТ, которую также предлагается решать генетическими алгоритмами в сочетании с методами расчета температурных режимов. Появляются работы, посвященные постановкам задач и способам технической диагностики СЦТ с привлечением моделей течения рабочей среды (обнаружения утечек, неисправностей и др.) [128–132].

Существенными ограничениями большинства предлагаемых подходов являются стационарная постановка задач обработки результатов измерений для целей идентификации, полуэвристический характер и (или) высокая трудоемкость предлагаемых методов, решение задач идентификации без учета их разрешимости.

Исследования, направленные на решение перчисленных проблем, описываются в работах [77, 108–110, 116–118]. В [77, 114, 118] рассматриваются аналитические методы параметрической идентификации и оценивания состояния трубопроводных систем произвольной структуры и конфигурации, обладающие рациональным сочетанием формальной строгости и вычислительной

эффективности. В [110, 118] предложена оригинальная методика активной идентификации СЦТ, основанная на последовательном применении методов оптимального планирования эксперимента. Данная методика включает в себя методы расстановки измерений [109] и обработки их результатов [112].

В связи с внедрением современных телекоммуникационных и информационно-измерительных технологий возникают реальные предпосылки для организации процессов слежения за изменением режимов и параметров оборудования по результатам измерений. Однако, как показывает анализ литературных данных, в настоящее время отсутствуют методы, обеспечивающие возможность такого слежения в реальном времени. В работе [16] раскрыты перспективы применения соответствующих методов, а также принципиальная возможность их разработки и реализации на базе существующих теории и методов идентификации, разработанных в ИСЭМ СО РАН [108–110].

Оптимизация режимов СЦТ

Задачи оптимизации режимов СЦТ весьма разветвлены, различаются по назначению, привлекаемым моделям и методам решения и возникают практически на всех уровнях принятия решений для поиска оптимальных управлений.

На этапе развития и реконструкции СЦТ такие задачи нужны для обоснования допустимости и уточнения эксплуатационных затрат на множестве возможных (непроектных) режимов и оценки эффективности новых технологий теплоснабжения, в том числе потенциальных эффектов от реализации следующих мероприятий:

интеграции разных источников тепловой энергии (котельные, ТЭЦ, электро-, солнечная, ветровая энергия и т.д.) [133, 134];

интеграции в СЦТ источников тепловой энергии потребителей (“просьюмеров”) и перехода на взаимовыгодную тарифную политику [135];

использования аккумуляторов разных типов для сглаживания пиков тепловой нагрузки в СЦТ [136–140];

использования теплоаккумулирующей способности зданий и тепловых сетей для согласования пиков выработки и потребления тепла [134, 141, 142];

применения тепловых насосов для учета экологических требований [143];

перехода на управление расходом теплоносителя и многоконтурную (“обезличенную”) схему эксплуатации тепловых сетей [144];

перехода на пониженные температуры теплоносителя в СЦТ [145];

изменения привычных графиков потребления (управления спросом на тепловую энергию) [142, 146, 147].

На этом этапе привлекаются разные:

критерии – дисконтированных затрат [133–135, 145], эксплуатационных затрат (на топливо, электроэнергию, штрафы за выбросы) [133–135], эксергетической удельной стоимости тепла [145], максимума выработки тепловой энергии на ТЭЦ (минимизации загрузки пиковых котельных), минимума максимальной нагрузки [146] и др.;

модели режимов – упрощенные модели баланса энергопотоков [135], агрегированные модели совместной работы ТЭЦ, хранилищ и тепловых сетей (как суммарной нагрузки) [142], стационарных гидравлических режимов [133], стационарных гидравлических и упрощенных динамических моделей температурного режима [146];

методы оптимизации – формальные (например, целочисленно-линейного программирования [133, 134]) и полуэвристические (имитации отжига [148], эволюционные алгоритмы и др. [149, 150]), которые, как правило, выбираются исходя из удобства применения, в том числе с помощью коммерческих пакетов программ: общего назначения (MATLAB/Simulink [135]), имитационного моделирования тепловых сетей (Grades Heating [144]), теплообмена в зданиях (IDA-ICE [142]) и др.

На этапе эксплуатации задачи оптимизации режимов СЦТ возникают при разработке основных режимов и мероприятий по регулировке тепловых сетей, а также рассматриваются как одно из главных направлений энергосбережения [151–154]. Для целей энергосбережения предлагаются различные постановки и методы оптимального планирования режимов в зависимости от особенностей СЦТ (наличие накопителей, разнотипность источников тепловой энергии, масштабность СЦТ) и заданного периода заблаговременности (от годового до суточного) [41, 155–158], в том числе привлекаются:

энергетический, экономический и комбинированные критерии затрат топлива и электроэнергии на поддержание режимов;

модели установившегося теплогидравлического режима;

методы линеаризации (исходно нелинейной задачи, например, для ее сведения к стандартной задаче целочисленного линейного программирования), эволюционные алгоритмы и др.

На уровне диспетчерского управления задачи оптимизации режимов СЦТ требуются для краткосрочного планирования загрузки основного оборудования и принятия решений по оперативному управлению режимами. Решение оптимизационных задач оперативного планирования и управления режимами возможно для СЦТ небольшой размерности (см., например, [155, 159, 160]). В большинстве случаев предлагаются методы оперативного управления на основе формальных кибернетических моделей (“черного ящика”), связывающих спрос на тепловую энергию с параметрами управления (частотой электроприводов насосов [31, 161–163], температурой нагрева воды на источниках [159, 164, 165] и др.), в том числе с применением передаточных функций [164], моделей чувствительности [31, 161, 162], моделей искусственного интеллекта [165] и др. В качестве критериев оптимальности применяются критерии теплового комфорта в зданиях [159, 160, 164], а также энергетические [31, 161, 162], экономические [159, 161] и комбинированные критерии.

Приведенный, далеко не полный обзор литературы позволяет констатировать возрастающую актуальность проблем оптимизации режимов СЦТ и одновременно их сложность, многоплановость, наличие множества нерешенных задач, отсутствие эффективных методов общего назначения, пригодных для широкого практического применения. Это объясняется целым рядом объективных факторов: большой размерностью и нелинейностью моделей режимов СЦТ, множеством технологических требований и ограничений на значения параметров режима, наличием разных способов и сочетаний управления (непрерывного и дискретного характера), ограничений на места их приложения и их значения, многокритериальностью большинства возникающих задач и необходимостью учета динамики, стохастичности внешних условий и др.

В ИСЭМ СО РАН предложен новый иерархический подход к оптимизации гидравлических режимов СЦТ для их планирования на предстоящий отопительный сезон и автоматизации процессов разработки наладочных мероприятий [39]. Этот подход предполагает декомпозицию расчетной схемы СЦТ на магистральные и распределительные тепловые сети и применение самостоятельных эффективных методов [166–171] оптимизации для каждого уровня иерархии. Основные возможности данного подхода:

применимость для СЦТ практически любой размерности;

гарантия получить глобальное решение, не прибегая к итерационному согласованию решений разных уровней;

распределение разных критериев оптимальности (экономических, технологических, экологических и др.), а также типов управления режимами (непрерывных, дискретных, булевых) по разным уровням иерархии;

учет любых технологических ограничений на параметры режима;

учет всех существующих способов управления (состав включенного оборудования, дросселирование, частотное регулирование и др.);

высокое быстродействие благодаря возможности распараллеливания вычислений.

Информационно-вычислительные технологии для компьютерного моделирования СЦТ

Современный рынок программного обеспечения для компьютерного моделирования СЦТ достаточно разветвлен, что свидетельствует о его востребованности на практике. Здесь можно выделить как российские, так и зарубежные разработки: ИВК “АНГАРА-ТС” (Россия, Иркутск, ИСЭМ СО РАН) [172–177], ZuluThermo (Россия, Санкт-Петербург, “Политерм”) [178], ИГС “City Com-ТеплоГраф” (Россия, Москва, “СитиКом”) [179], “Теплоэксперт” (Россия, г. Иваново, “Теплотэкс”) [180], Termis (Schneider Electric) [181], NEPLAN (Neplan AG) [182], NetSim (Vitec) [183], STANET [184], PSIControl [185], WANDA (Deltares) [186], PSS Singal [187], AEM Gestioni Srl (Bentley) [188] и др.

Все представленные программные комплексы (ПК) дают возможность выполнять теплогидравлические расчеты стационарных режимов СЦТ и имеют набор аналитических функций для интерпретации результатов расчетов. Termis и NEPLAN позволяют проводить упрощенное моделирование динамических режимов с заданным шагом по времени, WANDA – расчеты нестационарных гидравлических режимов СЦТ (анализ последствий от включения/выключения насосов, закрытия задвижек и т.п.), NEPLAN, PSS Singal, ТеплоГраф, “Теплоэксперт” и “АНГАРА-ТС” – анализ повреждаемости, основанный на статистике аварий. Termis осуществляет прогнозирование выработки тепла с учетом прогноза нагрузок потребителей, NEPLAN, PSIControl, PSS Singal также имеют модули прогнозирования нагрузок потребителей. Termis, NEPLAN, NetSim, WANDA позволяют выполнять оптимизацию режимов в целях минимизации эксплуатационных затрат,

Termis, STANET – оптимизацию диаметров трубопроводов.

Тем не менее большинство из представленных коммерческих ПК, как правило, закрыты по функциям и данным (не приспособлены для внедрения новых задач, требующих дополнительной информации). Поэтому многие научные школы ведут разработку собственных программ для моделирования тепловых сетей [189–192]. Научных публикаций, раскрывающих архитектуру ПК и заложенные в них методы математического моделирования, практически нет. Из работ обзорного характера следует отметить статью [193], где приводится довольно полный обзор разработанных за рубежом современных компьютерных программ для моделирования тепловых сетей. В последнее время наблюдается тенденция к моделированию СЦТ во взаимодействии со смежными системами (электроснабжение, газоснабжение, классические и возобновляемые источники энергии, локальные и внутридомовые энергосистемы). Программное обеспечение (как и концепции его разработки и наполнения) для моделирования и управления интеллектуальными тепловыми сетями пока находится в стадии формирования.

В ИСЭМ СО РАН разработана оригинальная платформа – Информационно-вычислительная система (ИВС) “АНГАРА” [172–174], которая обеспечивает следующие возможности:

иерархического представления схем СЦТ с автоматической увязкой граничных параметров между уровнями;

многоуровневых и одноуровневых расчетов;

учета физически обоснованных правил поведения потребителей и регулирующих устройств;

расширения пользователем состава параметров для анализа режимов;

возможность выполнения гидравлических и теплогидравлических расчетов и графического анализа их результатов;

использования ИВК для разных типов систем и сфер применения (эксплуатация, проектирование и др.).

На базе этой платформы потенциально может быть реализована концепция единого информационного пространства предприятия [194, 195], основанная на принципе интеграции информационных ресурсов “снизу-вверх”, когда во главу угла ставится не автоматизация документооборота, а информационно-аналитическая поддержка процессов принятия решений по управлению.

ВЫВОДЫ

1. Интеллектуализация российских СЦТ – актуальное и практически безальтернативное направление их инновационного преобразования. Авторами статьи впервые предпринята попытка проанализировать и систематизировать ключевые проблемы, возникающие на пути трансформации традиционных СЦТ в киберфизические системы. Качественное отличие таких систем заключается в том, что они являются носителями сведений не только об основном оборудовании, но и об информационных и вычислительных ресурсах, напрямую определяющих показатели их функционирования.

2. Международный опыт эволюции технологий централизованного теплоснабжения показывает, что в настоящее время имеются все необходимые предпосылки для интеллектуализации процессов технологического управления СЦТ. В результате анализа сложившейся практики проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления российскими СЦТ сформулированы задачи, стоящие на этом пути. Предложена новая концепция оптимального управления СЦТ в пространстве состояний, включающая в себя наличие полномасштабной обратной связи, возможность адаптации к меняющимся внешним и внутренним условиям, компромиссный и многоуровневый во времени и пространстве характер управления режимами.

3. Обозначены главные направления дальнейших исследований в области фундаментальных проблем анализа и синтеза кибернетических свойств СЦТ. Показано, что в основу таких исследований потенциально могут быть положены теоретические и прикладные результаты, полученные в ИСЭМ СО РАН на базе оригинального научного направления – теории гидравлических цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шваб К.** Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо-Пресс, 2020.
2. **Кобец Б.Б., Волкова И.О., Огороков В.Р.** Smart Grid как концепция инновационного развития электроэнергетики за рубежом // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 24–30.
3. **“GRID 2030”** – A national vision for electricity’s second 100 years. Office of electric transmission and distribution of USA Department of Energy, 2003.
4. **European SmartGrids technology platform: Vision and strategy for Europe’s electricity networks of the future.** Belgium: Official publications of the European Communities, 2006.
5. **Кобец Б.Б., Волкова И.О.** Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ “Энергия”, 2010.
6. **Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью** / под ред. В.Е. Фортова, А.А. Макарова. М.: НТЦ ФСК ЕЭС, 2012.
7. **Федеральный закон РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ “Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации”.**
8. **Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г.** Утв. распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р.
9. **Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642 “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”.**
10. **Указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899 “Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники и перечня критических технологий Российской Федерации”.**
11. **Перечень технологических платформ РФ.** Утв. решениями Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 1 апреля 2011 г., протокол № 2, от 5 июля 2011 г., протокол № 3, решением президиума Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 21 февраля 2012 г., протокол № 2.
12. **Национальная программа “Цифровая экономика Российской Федерации”.** Утв. протоколом № 7 заседания президиума Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам от 04.06.2019.
13. **Новицкий Н.Н.** Интеллектуальные трубопроводные системы: аргументы, содержание, перспективы // Коммунальное хозяйство городов. Сер. Технические науки и архитектура. Украина, Харьков, 2011. Вып. 101. С. 456–464.
14. **Новицкий Н.Н.** Интеллектуальные трубопроводные системы как новый объект приложения теории гидравлических цепей // Материалы Всерос. конф. “Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление”. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. С. 378–389.
15. **Новицкий Н.Н.** Методические проблемы интеллектуализации трубопроводных систем и направления развития теории гидравлических цепей для их решения // Трубопроводные системы энергетики: математические и компьютерные технологии интеллектуализации / А.А. Атавин, Н.Н. Новицкий, М.Г. Сухарев, А.М. Чионов, Т.Э. Овчинникова, В.А. Емельянов, Л.Б. Корельштейн, Е.А. Михайловский, О.В. Вантеева, С.А. Коршунов, Р.В. Попов, В.В. Токарев, З.И. Шалагинова, В.В. Тарасевич, А.Н. Серьезнов и др. Новосибирск: Наука, 2017. С. 167–183.
16. **Smarter smart district heating** / N.N. Novitsky, Z.I. Shalaginova, A.A. Alekseev, V.V. Tokarev, O.A. Greb-

- neva, A.V. Lutsenko, O.V. Vanteeva, E.A. Mikhailovsky, R. Pop, P. Vorobev, M. Chertkov // Proc. IEEE. 2020. V. 109. Is. 9. P. 1596–1611.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2990490>
17. **GIS-based** assessment of the district heating potential in the USA / H.C. Gils, J. Cofala, F. Wagner, W. Schöpp // Energy. 2013. V. 58. P. 318–329.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.028>
 18. **Energy** policies of IEA countries: Canada 2009 review. Paris: OECD/IEA, 2010.
 19. **Семенов В.Г.** Зарубежный опыт эксплуатации систем теплоснабжения // Энергосбережение. 2005. № 7. С. 62–65.
 20. **Colmenar-Santos A., Borge-Dies D., Rosales-Asensio E.** District heating and cooling networks in the European Union. Springer International Publishing AG, 2017.
 21. **Кролин А.** Эффективное теплоснабжение: датский опыт // ЭнергоРынок. 2005. № 4.
 22. **Яровой Ю.В.** Об опыте управления системами централизованного теплоснабжения в городах Дании // Экологические системы. 2010. № 9. [Электрон. журн.].
 23. **4th** Generation District Heating (4GDH) integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems / H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J.E. Thorsen, F. Hvelplund, B.V. Mathiesen // Energy. 2014. V. 68. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
 24. **Future** district heating systems and technologies: on the role of smart energy systems and 4th generation district heating / H. Lund, N. Duic, P.A. Ostergaard, B.V. Mathiesen // Energy. 2018. V. 165. Part A. P. 614–619.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>
 25. **Sustainable** and cost-efficient energy supply and utilization through innovative concepts and technologies at regional, urban and single-user scales / A. Piacentino, N. Duic, N. Markovska, B.V. Mathiesen, Z. Guzović, V. Evely, H. Lund // Energy. 2019. V. 182. P. 254–268.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.015>
 26. **Башмаков И.А.** Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения России // Энергетическая политика. 2009. № 2. С. 10–25.
 27. **Сеннова Е.В., Сидлер В.Г.** Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 1987.
 28. **Stennikov V.A., Varakhtenko E.A., Sokolov D.V.** Determination of optimal parameters of heating systems based on advanced information technologies // Energy Syst. Res. 2018. V. 1. Is. 1. С. 84–93.
<https://doi.org/10.25729/esr.2018.01.0010>
 29. **Токарев В.В., Шалагинова З.И.** Методика многоуровневого наладочного расчета теплогидравлического режима крупных систем теплоснабжения с промежуточными ступенями управления // Теплоэнергетика. 2016. № 1. С. 71–80.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616010112>
 30. **Технология** разработки эксплуатационных режимов крупных систем теплоснабжения на базе методов многоуровневого теплогидравлического моделирования / Н.Н. Новицкий, З.И. Шалагинова, В.В. Токарев, О.А. Гребнева // Изв. РАН. Энергетика. 2018. № 1. С. 12–24.
 31. **Optimal** operation of large district heating networks through fast fluid-dynamic simulation / E. Guelpa, C. Toro, A. Sciacovelli, R. Melli, E. Sciubba, V. Verda // Energy. 2016. V. 102. P. 586–595.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.058>
 32. **Vesterlund M., Toffolo A., Dahl J.** Optimization of multi-source complex district heating network, a case study // Energy. 2017. V. 126. P. 53–63.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.018>
 33. **Guelpa E., Sciacovelli A., Verda V.** Thermo-fluid dynamic model of large district heating networks for the analysis of primary energy savings // Energy. 2019. V. 184. P. 34–44.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.177>
 34. **Новицкий Н.Н.** Развитие теории гидравлических цепей для решения задач управления функционированием теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. 2009. № 12. С. 38–43.
 35. **Меренков А.П., Хасилев В.Я.** Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985.
 36. **Gilani B.S., Bachmann M., Kriegel M.** Evaluation of the temperature regimes of multi-level thermal networks in urban areas through exergy analysis // Energy Procedia. 2017. V. 122. P. 385–390.
 37. **Новицкий Н.Н., Токарев В.В.** Релейная методика расчета потокораспределения в гидравлических цепях с регулируемыми параметрами // Изв. РАН. Энергетика. 2001. № 2. С. 88–98.
 38. **Todini E., Pilati S.** A gradient algorithm for the analysis of pipe networks // Computer Applications in Water Supply. L.: John Wiley & Sons, 1988. V. 1. P. 1–20.
 39. **Multilevel** modeling and optimization of large-scale pipeline systems operation / N.N. Novitsky, A.V. Alekseev, O.A. Grebneva, A.V. Lutsenko, V.V. Tokarev, Z.I. Shalaginova // Energy. 2019. V. 184. P. 151–164.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.070>
 40. **Criteria** for the decomposition of energy systems in local/global optimizations / A. Lazzaretto, A. Toffolo, M. Morandin, M.R. von Spakovsky // Energy. 2010. V. 35. Is. 2. P. 1157–1163.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.009>
 41. **Vesterlund M., Dahl J.** A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks // Energy Convers. Manage. 2015. V. 89. P. 555–567.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.002>
 42. **Dynamic** control of water distribution system based on network partitioning / A.D. Nardo, A. Cavallo, M.D. Natale, R. Greco, G. F. Santonastaso // Procedia Eng. 2016. V. 154. P. 1275–1282.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.460>
 43. **Токарев В.В.** Разработка методики секционирования кольцевых тепловых сетей закрытых си-

- стем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2018. № 6. С. 84–94.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618060103>
44. **District heating and cooling systems – framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization** / G. Schweiger, P.-O. Larsson, F. Magnusson, P. Lauenburg, S. Velut // *Energy*. 2017. V. 137. P. 566–578.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.115>
45. **Елифанов С.П., Зоркальцев В.И.** Применение теории двойственности при моделировании гидравлических систем с регуляторами расхода // *Изв. вузов. Математика*. 2010. № 9. С. 76–81.
46. **Монахов Г.В., Войтинская Ю.А.** Моделирование управления режимами тепловых сетей. М.: Энергоатомиздат, 1995.
47. **Елифанов С.П., Зоркальцев В.И., Медвежонков Д.С.** Модель гидравлической сети с регуляторами расхода // *Управление большими системами*. 2010. № 30.1. С. 286–299.
48. **Потокораспределение** в системах подачи и распределения воды с автоматическими регуляторами давления / Н.И. Баранчикова, С.П. Елифанов, В.И. Зоркальцев, А.В. Куртин, С.Ю. Обузин // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2017. № 4. С. 55–62.
49. **Ayad A., Awad H., Yassin A.** Developed hydraulic simulation model for water pipeline networks // *Alexandria Eng. J.* 2013. V. 52. Is. 1. P. 43–49.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.11.005>
50. **Ateş S.** Hydraulic modelling of control devices in loop equations of water distribution networks // *Flow Meas. Instrum.* 2017. V. 53. Part B. P. 243–260.
51. **Токарев В.В., Новицкий Н.Н.** Развитие методов расчета гидравлических режимов тепловых сетей со смешительными насосными станциями // *Труды XIV Всерос. науч. семинара “Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем”*. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. С. 104–118.
52. **Tokarev V.V., Novitsky N.N.** The method of adjustment of heat supply systems with the multistage temperature control at pumping stations // *MATEC Web of Conf.* 2018. V. 212. 02006. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201821202006>
53. **Громов Б.Н.** Волновые процессы в магистральных тепловых сетях при отключении циркуляционных насосов // *Электрические станции*. 1973. № 1. С. 42–44.
54. **Громов Б.Н., Сидлер В.Г.** Расчет нестационарных гидравлических режимов тепловых сетей на ЦЭВМ // *Теплоэнергетика*. 1973. № 3. С. 16–21.
55. **Методы** расчета нестационарных гидравлических режимов в водяных тепловых сетях / Б.Н. Громов, Л.П. Канина, К. Нестке, П. Шнайденбах // *Теплоэнергетика*. 1981. № 7. С. 36–40.
56. **Бержерон Л.** От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети. М.: Машгиз, 1962.
57. **Рождественский Б.И., Яненко Н.Н.** Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. М.: Наука, 1968.
58. **Василенко Е.Г., Косовцев О.В., Павлов Б.И.** Динамика системы “насос–трубопровод–устройства”: алгоритмы анализа и синтеза механизмов. М.: Наука, 1977. С. 89–113.
59. **Тарасевич В.В.** Развитие теории и методов расчета гидродинамических процессов в напорных трубопроводных системах: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Новосибирск: НГАСУ, 2017.
60. **Атавин А.А., Тарасевич В.В.** Моделирование больших трубопроводных систем системами с сосредоточенными и распределенными параметрами // *Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации: сб. науч. тр.* Новосибирск: Наука, 2007. С. 7–17.
61. **Sartor K., Thomas D., Dewallef P.** A comparative study for simulating heat transport in large district heating networks // *Int. J. Heat Technol.* 2018. V. 36. Is. 1. P. 301–308.
<https://doi.org/10.18280/ijht.360140>
62. **Sartor K., Dewallef P.** Experimental validation of heat transport modelling in district heating networks // *Energy*. 2017. V. 137. P. 961–968.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.161>
63. **Modeling** the dynamic characteristics of a district heating network / P. Jie, Z. Tian, S. Yuan, N. Zhu // *Energy*. 2012. V. 39. Is. 1. P. 126–134.
64. **Prediction** of thermal transients in district heating systems / V.D. Stevanovic, B. Zivkovic, S. Prica, B. Maslovacic, V. Karamarkovic, V. Trkulja // *Energy Convers. Manage.* 2009. V. 50. Is. 9. P. 2167–2173.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.034>
65. **Chertkov M., Novitsky N.N.** Thermal transients in district heating systems // *Energy*. 2019. V. 184. P. 22–33.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.049>
66. **Gabrielaitiene I., Kacianauskas R., Sunden B.** Thermo-hydraulic finite element modelling of district heating network by the uncoupled approach // *J. Civil Eng. Manage.* 2003. V. 9. Is. 3. P. 153–162.
<https://doi.org/10.3846/13923730.2003.10531321>
67. **Benonysson A.** Dynamic modelling and operational optimization of district heating systems. Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark, 1991. P. 148–160.
68. **Palsson H.** Analysis of numerical methods for simulating temperature dynamics in district heating pipes // *Proc. of the 6th Intern. Symposium on District Heating and Cooling Simulation*. Reykjavik, Iceland, 28–30 Aug. 1997. P. 1–20.
69. **Gabrielaitiene I., Bøhm B., Sunden B.** Evaluation of approaches for modeling temperature wave propagation in district heating pipelines // *Heat Transfer Eng.* 2008. V. 29. Is. 1. P. 45–56.
<https://doi.org/10.1080/01457630701677130>
70. **Gabrielaitiene I., Bøhm B., Sunden B.** Modelling temperature dynamics of a district heating system in Naestved, Denmark – a case study // *Energy Convers.*

- Manage. 2007. V. 48. Is. 1. P. 78–86.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.05.011>
71. **Gabrielaite I., Bøhm B., Sunden B.** Dynamic temperature simulation in district heating systems in Denmark regarding pronounced transient behavior // *J. Civil Eng. Manage.* 2011. V. 17. Is. 1. P. 79–87.
<https://doi.org/10.3846/13923730.2011.553936>
 72. **Duquette J., Rowe A., Wild P.** Thermal performance of a steady state physical pipe model for simulating district heating grids with variable flow // *Appl. Energy.* 2016. V. 178. P. 383–393.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.092>
 73. **Function** method for dynamic temperature simulation of district heating network / J. Zheng, Z. Zhou, J. Zhao, J. Wang // *Appl. Therm. Eng.* 2017. V. 123. P. 682–688.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083>
 74. **Шалагинова З.И.** Разработка и применение методов расчета теплогидравлических режимов в системах теплоснабжения с многоступенчатым регулированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск: СЭИ СО РАН, 1995.
 75. **Шалагинова З.И.** Математическая модель для расчета теплогидравлических режимов тепловых пунктов теплоснабжающих систем // *Теплоэнергетика.* 2016. № 3. С. 69–80.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616020077>
 76. **Новицкий Н.Н., Токарев В.В.** Учет неоднозначности направлений потоков при моделировании установившегося неизотермического потокораспределения в гидравлических цепях // *Современные методы оптимизации и их приложения к моделям энергетики: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 2003. С. 178–188.*
 77. **Novitsky N.N., Tokarev V.V.** Computation of steady thermohydraulic operation regimes of thermal networks from limited number of measurements // *Thermophysics and Aeromechanics.* 2007. V. 14. Is. 2. P. 277–286.
<https://doi.org/10.1134/S086986430702014X>
 78. **Карамбиров С.Н.** Математическое моделирование систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности. М.: МГУП, 2004.
 79. **Карамбиров С.Н.** Совершенствование методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: Мос. гос. ун-т природообустройства, 2005.
 80. **Filion Y.R., Adams B.J., Karney B.W.** Stochastic design of water distribution systems with expected annual damages // *J. Water Resour. Plann. Manage.* 2007. V. 133. Is. 3. P. 244–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2007\)133:3\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133:3(244))
 81. **Kretzmann H.A., Van Zyl J.E., Haarhoff J.** Stochastic analysis of water supply systems using MOCASIM II // *Proc. of the 2004 Water Institute of Southern Africa (WISA) Biennial Conf. Cape Town, South Africa, 2–6 May 2004. P. 1132–1142.*
 82. **Pasha M.F.K., Lansey K.** Strategies to develop warm solutions for real-time pump scheduling for water distribution systems // *Water Resour. Manage.* 2014. V. 28. Is. 12. P. 3975–3987.
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0721-0>
 83. **Probabilistic** prediction of urban water consumption using the SCEM-UA algorithm / P. Cutore, A. Campisano, Z. Kapelan, C. Modica, D. Savic // *Urban Water J.* 2008. V. 5. Is. 2. P. 125–132.
<https://doi.org/10.1080/15730620701754434>
 84. **Least-cost** design of water distribution networks under demand uncertainty / A.V. Babayan, Z. Kapelan, D.A. Savic, G.A. Walters // *J. Water Resour. Plann. Manage.* 2005. V. 131. Is. 5. P. 375–382.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:5\(375\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:5(375))
 85. **Water** distribution system design under uncertainties / K.E. Lansey, N. Duan, L.W. Mays, Y.K. Tung // *J. Water Resour. Plann. Manage.* 1989. V. 115. Is. 5. P. 630–645.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1989\)115:5\(630\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1989)115:5(630))
 86. **Xu C., Goulter I.C.** Reliability-based optimal design of water distribution networks // *J. Water Resour. Plann. Manage.* 1999. V. 125. Is. 6. P. 352–362.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1999\)125:6\(352\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:6(352))
 87. **Two** new approaches for the stochastic least cost design of water distribution systems / Z. Kapelan, A.V. Babayan, D. Savic, G.A. Walters, S.-T. Khu // *Water Sci. Technol. Water Supply.* 2004. V. 4. Is. 5. P. 355–363.
<https://doi.org/10.2166/ws.2004.0126>
 88. **Alcocer-Yamanaka V.H., Tzatchkov V.G., Arreguin-Cortes F.I.** Modeling of drinking water distribution networks using stochastic demand // *Water Resour. Manage.* 2012. V. 26. P. 1779–1792.
 89. **Новицкий Н.Н., Вантеева О.В.** Задачи и методы вероятностного моделирования гидравлических режимов трубопроводных систем // *Науч.-техн. ведомости СПбГТУ.* 2008. № 1. С. 68–75.
 90. **Новицкий Н.Н., Вантеева О.В.** Моделирование стохастичности потокораспределения в гидравлических цепях // *Изв. РАН. Энергетика.* 2011. № 2. С. 122–131.
 91. **Вантеева О.В.** Вероятностные модели и методы анализа режимов функционирования трубопроводных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011.
 92. **Novitsky N.N., Vanteyeva O.V.** Modeling of stochastic hydraulic conditions of pipeline systems // *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM).* 2014. Is. 1. P. 95–108.
 93. **Lee B.H., Deininger R.A.** Optimal locations of monitoring stations in water distribution system // *J. Environ. Eng.* 1992. V. 118. Is. 1. P. 4–16.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1992\)118:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1992)118:1(4))
 94. **The battle** of the water sensor networks (BWSN): A design challenge for engineers and algorithms / A. Ostfeld, J.G. Uber, E. Salomons, J.W. Berry, W.E. Hart, C.A. Phillips, J.-P. Watson, G. Dorini, P. Jonker-

- gouw, Z. Kapelan, F. di Pierro, S.-T. Khu, D. Savic, D. Eliades, M. Polycarpou et al. // *J. Water Resour. Plann. Manage.* 2008. V. 134. Is. 6. P. 556–568.
95. **Preis A., Ostfeld A.** Optimal sensors layout for contamination source identification in water distribution systems // *Proc. of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium.* Cincinnati, Ohio, USA, 27–30 Aug. 2006.
[https://doi.org/10.1061/40941\(247\)127](https://doi.org/10.1061/40941(247)127)
96. **Tryby M.E., Propato M., Ranjithan S.** Monitoring design for source identification in water distribution systems // *J. Water Resour. Plann. Manage.* 2010. V. 136. Is. 6.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000080](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000080)
97. **Liu S., Auckenthaler P.** Optimal sensor placement for event detection and source identification in water distribution networks // *J. Water Supply: Res. Technol.-Aqua.* 2014. V. 63. Is. 1. P. 51–57.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2013.106>
98. **Stochastic** approaches for sensors placement against intentional contaminations in water distribution systems / L. Cozzolino, R. Della Morte, A. Palumbo, D. Pianese // *Civil Eng. Environ. Syst.* 2011. V. 28. Is. 1. P. 75–98.
99. **Kapelan Z.S., Savic D.A., Walters G.A.** Multiobjective sampling design for water distribution model calibration // *J. Water Resour. Plann. Manage.* 2003. V. 129. Is. 6. P. 466–479
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:6\(466\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:6(466))
100. **Оценивание** состояния в электроэнергетике / А.З. Гамм, Л.Н. Герасимов, И.И. Голуб, Ю.А. Гришин, И.Н. Колосок. М.: Наука, 1983.
101. **Golub I.I., Kuzkina Y.I.** Solving the problem of distribution network observability with smart meters // *Acta energetica.* 2017. V. 4. Is. 33. P. 4–9.
102. **Гамм А.З., Голуб И.И.** Наблюдаемость электроэнергетических систем. М.: Наука, 1990.
103. **Schweppe F.C.** Power system static-state estimation. Part III: Implementation // *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1970. V. PAS-89. Is. 1. P. 130–135.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292680>
104. **Debs A.S., Larson R.** A dynamic estimator for tracking the state of a power system // *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 1970. V. PAS-89. Is. 7. P. 1670–1678.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292822>
105. **Xu B., Abur A.** Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs // *Proc. of the Power Systems Conf. and Exposition.* IEEE PES. New York, USA, 10–13 Oct. 2004.
<https://doi.org/10.1109/PSCE.2004.1397683>
106. **Новицкий Н.Н., Гребнева О.А.** Методы анализа и обеспечения идентифицируемости трубопроводных систем // *Трубопроводные системы энергетики: модели, приложения, информационные технологии.* М.: Изд-во “Нефть и газ” РГУ нефти и газа, 2000. С. 90–105.
107. **Новицкий Н.Н.** Идентифицируемость трубопроводных систем // *Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ.* Новосибирск: Наука, 2010. С. 279–291.
108. **Novitsky N.N., Grebneva O.A.** Quantitative assessment of the identifiability of pipeline systems // *E3S Web Conf.* 2018. V. 39. 03004.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183903004>
109. **Гребнева О.А., Новицкий Н.Н.** Оптимизация состава измерений для идентификации трубопроводных систем // *Теплоэнергетика.* 2014. № 9. С. 70–75.
<https://doi.org/10.1134/S0040363614090069>
110. **Гребнева О.А., Новицкий Н.Н.** Оптимальное планирование и обработка результатов испытаний тепловых сетей на гидравлические и тепловые потери // *Теплоэнергетика.* 2014. № 10. С. 62–67.
<https://doi.org/10.1134/S0040363614100051>
111. **Математическое** моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения / А.П. Меренков, Е.В. Сеннова, С.В. Сумароков, В.Г. Сидлер. Новосибирск: Наука, 1992.
112. **Новицкий Н.Н.** Оценивание параметров гидравлических цепей. Новосибирск: Наука, 1998.
113. **Новицкий Н.Н.** Развитие теории и методов сетевой идентификации трубопроводных систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Иркутск, 1999.
114. **Новицкий Н.Н.** Элементы теории и методов сетевой идентификации трубопроводных систем // *Изв. РАН. Энергетика.* 2000. № 6. С. 87–97.
115. **Новицкий Н.Н.** Идентификация трубопроводных систем // *Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ.* Новосибирск: Наука, 2010. С. 314–324.
116. **Сухарев М.Г., Самойлов Р.В.** Анализ и управление стационарными и нестационарными режимами транспорта газа. М.: РГУ нефти и газа, 2016.
117. **Sukharev M. G., Kosova K.O.** A parameter identification method for natural gas supply systems under unsteady gas flow // *Autom. Remote Control.* 2017. V. 78. № 5. P. 882–890.
<https://doi.org/10.1134/S0005117917050101>
118. **Новицкий Н.Н., Гребнева О.А., Токарев В.В.** Исследование эффективности методов активной идентификации для теплогидравлических испытаний тепловых сетей // *Теплоэнергетика.* 2018. № 7. С. 54–63.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618070068>
119. **Lingireddy S., Ormsbee L.E.** Hydraulic network calibration using genetic optimization // *Civil Eng. Environ. Syst.* 2000. V. 19. Is. 1. P. 13–39.
<https://doi.org/10.1080/10286600212161>
120. **Calibrating** water distribution model via genetic algorithms / Z.Y. Wu, T. Walski, R. Mankowski, G. Herrin, R. Gurreri, M. Tryby // *AWWA IMTech. Conf.* Kansas City, Missouri, USA, 14–17 April 2002.
121. **Wu Z.Y.** Optimal calibration method for water distribution water quality model // *J. Environ. Sci. Health. Part A.* 2006. V. 41. Is. 7. P. 1363–1378.
<https://doi.org/10.1080/10934520600657115>

122. **Wu Z.Y., Walski T.M.** Diagnosing error phone application of optimal model calibration // Proc. of the Intern. Conf. on Computing and Control in the Water Industry. Exeter, UK, 5–7 Sept. 2005. P. 1–7.
123. **Kumar S.M., Narasimhan S., Bhallamudi S.M.** Parameter estimation in water distribution networks // Water Resour. Manage. 2010. V. 24. Is. 6. P. 1251–1272.
<https://doi.org/10.1007/s11269-009-9495-1>
124. **Liu Y., Zou P., Kang Y.** Study on impedance identification of pipes in heat-supply networks // Proc. of the Intern. Conf. on Information Engineering and Computer Science (ICIECS). IEEE. Wuhan, China, 19–20 Dec. 2009.
<https://doi.org/10.1109/ICIECS.2009.5365891>
125. **An integral** identification method of characteristic parameters and optimization of parallel connection heat transfer systems based on the power flow method / M.-Q. Zhang, Q. Chen, W. Shao, X. Chen, J.-H. Hao // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 143. P. 1057–1067.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.016>
126. **Fang T., Lahdelma R.** State estimation of district heating network based on customer measurements // Appl. Therm. Eng. 2014. V. 73. Is. 1. P. 1211–1221.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.003>
127. **Wang J., Zhou Z., Zhao J.** A method for the steady-state thermal simulation of district heating systems and model parameters calibration // Energy Convers. Manage. 2016. V. 120. P. 294–305.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.074>
128. **Кублановский Л.Б.** Определение мест поврежденный напорных трубопроводов. М.: Недра, 1971.
129. **Valincius M., Vaisnoras M., Kaliatka A.** Study and demonstration of pressure wave-based leak detection in a district heating network // Structure and Infrastructure Eng. 2018. V. 14. Is. 2. P. 151–162.
<https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1330892>
130. **Zhou S., O'Neill Z., O'Neill C.** A review of leakage detection methods for district heating networks // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 137. P. 567–574.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.010>
131. **Henrie M., Carpenter P., Nicholas R.E.** Real-time transient model-based leak detection // Pipeline Leak Detection Handbook. 2016. P. 57–89.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802240-5.00004-2>
132. **Zimmerman N., Dahlquist E., Kyprianidis K.** Towards on-line fault detection and diagnostics in district heating systems // Energy Procedia. 2017. V. 105. P. 1960–1966.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.567>
133. **Buoro D., Pinamonti P., Reini M.** Optimization of a distributed cogeneration system with solar district heating // Appl. Energy. 2014. V. 124. P. 298–308.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.062>
134. **Optimal** operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings / W. Gu, J. Wang, S. Lu, Z. Luo, C. Wu // Appl. Energy. 2017. V. 199. P. 234–246.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.004>
135. **Intelligent** heat networks: First results of an energy-information-cost model / K. Lichtenegger, D. Wöss, C. Halmdienst, E. Höftberger, C. Schmidl, T. Pröll // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2017. V. 11. P. 1–12.
136. **Energy**, exergy and economic viability of a heat storage system used for domestic hot water supply in urban and isolated households / M. Hazami, S. Kooli, N. Naili, F. Mehdaoui, A. Guizani // Appl. Therm. Eng. 2017. V. 124. P. 442–453.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.049>
137. **Pre-feasibility** of building cooling heating and power system with thermal energy storage considering energy supply-demand mismatch / Y. Zhang, X. Wang, S. Zhuo, Y. Zhang // Appl. Energy. 2016. V. 167. P. 125–134.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.040>
138. **Verda V., Colella F.** Primary energy savings through thermal storage in district heating networks // Energy. 2011. V. 36. Is. 7. P. 4278–4286.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.015>
139. **Xu J., Wang R.Z., Li Y.** A review of available technologies for seasonal thermal energy storage // Sol. Energy. 2014. V. 103. P. 610–638.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.006>
140. **Flexibility** of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating / T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis, J. Van Bael, D. Six // Appl. Energy. 2013. V. 104. P. 583–591.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.029>
141. **Reduction** of primary energy consumption through distributed thermal storage in buildings connected with a district heating network / G. Baccino, S. Cosentino, E. Guelpa, A. Sciacovelli, V. Verda // Proc. of IMECE 2014: 2014 ASME Intern. Mechanical Engineering Congress & Exposition. Montreal, Canada, 2014. V. 6A: Energy.
142. **Demand** side management in district heating buildings to optimize the heat production / E. Jokinen, K. Kontu, S. Rinne, R. Lahdelma // Proc. of ECOS 2014. Turku, Finland, 15–19 June 2014.
143. **Molyneaux A., Leyland G., Favrat D.** Environomic multi-objective optimisation of a district heating network considering centralized and decentralized heat pumps // Energy. 2010. V. 35. Is. 2. P. 751–758.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.028>
144. **Energy** efficiency improvements utilizing mass flow control and a ring topology in a district heating network / T. Laajalehto, M. Kuosa, T. Mäkilä, M. Lampinen, R. Lahdelma // Appl. Therm. Eng. 2014. V. 69. Is. 1–2. P. 86–95.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.041>
145. **Verda V., Kona A.** Thermoeconomic approach for the analysis of low temperature district heating systems // Proc. of ECOS 2012. Perugia, Italy, 26–29 June 2012.
146. **Peak-shaving** in district heating systems through optimal management of the thermal request of buildings / E. Guelpa, G. Barbero, A. Sciacovelli, V. Verda // Energy. 2017. V. 137. P. 706–714.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.107>

147. **Verda V., Baccino G.** Primary energy reductions in district heating networks through variation of the thermal load profile of the users // Proc. of ECOS 2014. Turku, Finland, 15–19 June 2014.
148. **Kirkpatrick S., Gellat C.D., Vecchi M.P.** Optimization by simulated annealing // Science. 1983. V. 220. Is. 4598. P. 671–680.
<https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
149. **Глухов С.В., Чичерин С.В.** Методика оптимизации распределительной тепловой сети // Вестник Чуваш. ун-та. 2017. № 3.
150. **Соломин И.Н., Даминов А.З., Садыков Р.А.** Оптимизация режимов эксплуатации и параметров систем централизованного коммунального теплоснабжения // Изв. КГАСУ. 2018. Т. 44. № 2. С. 184–192.
151. **Ибрашева Л.Р.** Энергосберегающие технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве России // Вестник Казан. технол. ун-та. 2012. Т. 15. № 7. С. 224–229.
152. **Ахметова И.Г., Мухаметова Л.Р.** Актуальные вопросы повышения энергоэффективности теплоснабжающих организаций // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11–12. С. 108–113.
153. **Скляниченко А.И.** Влияние регуляторов температуры на качество централизованного теплоснабжения // Труды Одес. политехн. ун-та. 2010. Вып. 1–2 (33–34).
154. **Соломин И.Н., Даминов А.З.** Влияние механизма тарифообразования на энергосберегающие мероприятия и оптимизацию системы теплоснабжения // Труды Академэнерго. 2013. № 4. С. 51–60.
155. **Yokoyma R., Kitano H., Wakui T.** Optimal operation of heat supply systems with piping network // Energy. 2017. V. 137. P. 888–897.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.146>
156. **Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system / X.S. Jiang, Z.X. Jing, Y.Z. Li, Q.H. Wu, W.H. Tang // Energy. 2014. V. 64. P. 375–388.**
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.067>
157. **Franco A., Versace M.** Multi-objective optimization for the maximization of the operating share of cogeneration system in district heating network // Energy Convers. Manage. 2017. V. 139. P. 33–44.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.029>
158. **Вологдин С.В., Якимович Б.А.** Методы и алгоритмы повышения энергоэффективности многоуровневой системы централизованного теплоснабжения: монография. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2015.
159. **Михайленко И.М.** Оптимальное управление системами центрального теплоснабжения. СПб.: Стройиздат, 2003.
160. **Шуравин А.П., Вологдин С.В.** Исследование характеристик генетического алгоритма, применяемого для оптимизации температурного режима отапливаемых помещений // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 4. С. 49–61.
161. **Sciacovelli A., Guelpa E., Verda V.** Pumping cost minimization in an existing district heating network // Proc. of the ASME 2013 Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE 2013. San Diego, California, 15–21 Nov. 2013. USA IMECE2013-65169.
162. **Optimal operation and sensitivity analysis of a large district heating network through POD modeling / S. Cosentino, E. Guelpa, R. Melli, A. Sciacovelli, E. Sciubba, C. Toro, V. Verda // Proc. of the ASME 2014 Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE 2014. Montreal, Quebec, Canada, 14–20 Nov. 2014.**
<https://doi.org/10.1115/IMECE2014-39509>
163. **Крицкий А.Б., Дементьев Ю.Н.** Критерии энергоэффективности в теплоснабжающих комплексах мегаполисов // Фундаментальные исследования. 2014. № 9. Часть 12. С. 2639–2643.
164. **Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.К. Аверьянов, Ю.Я. Темпель, С.И. Быков. Л.: Стройиздат, 1987.**
165. **Вороновский Г.К.** Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях. Харьков: Изд-во “Харьков”, 2002.
166. **Novitsky N.N., Lucenko A.V.** Discrete-continuous optimization of heat network operating conditions in parallel operation of similar pumps at pumping stations // J. Global Optimization. 2016. V. 66. Is. 1. P. 83–94.
<https://doi.org/10.1007/s10898-016-0403-y>
167. **Новицкий Н.Н., Луценко А.В.** Исследование задач и методов многокритериальной оптимизации гидравлических режимов распределительных тепловых сетей // Науч. вестник НГТУ. 2016. Т. 64. № 3. С. 131–145
<https://doi.org/10.17212/1814-1196-2016-3-131-145>
168. **Lutsenko A.V., Novitsky N.N.** Aggregation of distribution heating networks in the problems of hierarchical optimization of large heat supply systems: Report on the 2020 Conf. on Mathematical Models and Methods of the Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems // E3S Web Conf. 2020. V. 219. Online, 16–22 Oct. 2020.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021903003>
169. **Lucenko A.V.** Optimization of hydraulic modes of distribution heat networks by dynamic programming: Report on the Conf. on Mathematical Models and Methods of the Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems Irkutsk, Lake Baikal, Russia, 26 June–2 July 2018 // E3S Web of Conf. 2018. V. 39. ID 03003.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183903003>
170. **Луценко А.В., Новицкий Н.Н.** Модифицированный метод динамического программирования для оптимизации гидравлических режимов распределительных тепловых сетей // Вычислитель-

- ные технологии. 2018. Т. 23. № 6. С. 48–64.
<https://doi.org/10.25743/ICT.2018.23.6.006>
171. **Lucenko A.V., Novitsky N.N.** Optimization of hydraulic conditions of radial district heating systems with pumping stations // *Energy Syst. Res.* 2019. V. 2. Is. 1. P. 34–41.
<https://doi.org/10.25729/esr.2019.01.0005>
 172. **Принципы** разработки и программная реализация информационно-вычислительной среды для компьютерного моделирования трубопроводных и гидравлических систем / А.В. Алексеев, Н.Н. Новицкий, В.В. Токарев, З.И. Шалагинова // *Трубопроводные системы энергетики*. Новосибирск: Наука, 2007. С. 221–229.
 173. **Алексеев А.В., Новицкий Н.Н.** Компьютерная технология “АНГАРА” для интеграции информационного и вычислительного пространства при моделировании трубопроводных систем // *Науч. вестник НГТУ*. 2017. № 2. С. 26–41.
<https://doi.org/10.17212/1814-1196-2017-2-26-41>
 174. **Информационно-вычислительный** комплекс “АНГАРА-ТС” для автоматизации расчета и анализа эксплуатационных режимов при управлении крупными многоконтурными системами теплоснабжения / Н.Н. Новицкий, В.В. Токарев, З.И. Шалагинова, А.В. Алексеев, О.А. Гребнева, С.Ю. Баринава // *Вестник ИрГТУ*. 2018. Т. 22. № 11. С. 126–144.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-126-144>
 175. **Токарев В.В., Шалагинова З.И.** Методика многоуровневого наладочного расчета теплогидравлического режима крупных систем теплоснабжения с промежуточными ступенями управления // *Теплоэнергетика*. 2016. № 1. С. 71–80.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616010112>
 176. **Новицкий Н.Н., Алексеев А.В., Токарев В.В.** Комплексное развитие и применение информационных технологий для автоматизации процессов анализа и разработки эксплуатационных режимов инженерных систем тепло- и водоснабжения // *Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2018. Т. 8. № 4. С. 139–161.
 177. **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>
 178. **ZuluThermo**. Сайт компании “Политерм”. [Электрон. ресурс.] <https://www.politerm.com/products/thermo/zuluthermo/>
 179. **ИГС “CityCom-ТеплоГраф”**. [Электрон. ресурс.] <https://www.citycom.ru/citycom/heatgraph/>
 180. **ГИРК “Теплоэксперт”**. [Электрон. ресурс.] <https://teploexpert.ru/produktu/girk-teploekspert>
 181. **Termis Engineering**. [Электрон. ресурс.] <https://www.se.com/ru/ru/product-range-presentation/61613-termis-engineering/#tabs-top>
 182. **NEPLAN Gas/Water/Heating/Cooling**. [Электрон. ресурс.] <https://www.neplan.ch/neplanproduct/gas-water-heating-4/>
 183. **Netsim Grid Simulation**. [Электрон. ресурс.] <https://www.vitecsoftware.com/en/product-areas/energy/products/netsim-grid-simulation/>
 184. **Stanet network analysis**. [Электрон. ресурс.] <http://www.stafu.de/en/home.html>
 185. **PSIcontrol**. [Электрон. ресурс.] <https://www.psie-nergy.de/en/solutions/network-control/network-calculations/gas-district-heating-water-networks/>
 186. **Wanda**. [Электрон. ресурс.] <https://www.deltares.nl/en/software/wanda/>
 187. **PSS@SINCAL – simulation software for analysis and planning of electric and pipe networks**. [Электрон. ресурс.] <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/pss-software/pss-sincal.html>
 188. **AEM Gestioni Srl, Bentley**. [Электрон. ресурс.] https://www.bentley.com/en/project-profiles/aem-gestioni-srl_district-heating-gis-system
 189. **A tool for thermal-dynamic modeling of district heating networks**. [Электрон. ресурс.] <http://www.4dh.eu/news/105-software-simulates-district-heating-networks>
 190. **District heating network design and analysis** / M.A. Ancona, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino // *Energy Procedia*. 2014. V. 45. P. 1225–1234.
 191. **Models for fast modelling of district heating and cooling networks** / I. del H. Arce, S.H. López, S.L. Perez, M. Rämä, K. Klobut, J.A. Febres // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2018. V. 82. Part 2. P. 1863–1873.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.109>
 192. **Pizzolato A., Sciacovelli A., Verda V.** Centralized control of district heating networks during failure event using discrete adjoint sensitivities // *Energy*. 2019. V. 184. P. 58–72.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.102>
 193. **A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems** / J. Allegri, K. Orehounig, G. Mavromatidis, F. Ruesch, V. Dorer, R. Evins // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2015. V. 52. P. 1391–1404.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.123>
 194. **Алексеев А.В., Новицкий Н.Н., Обуздин С.Ю.** Создание единого информационного пространства предприятия МУП “Водоканал” г. Иркутска на основе информационно-вычислительной среды “Ангара” // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2017. № 11. С. 54–63.
 195. **Alekseev A.V., Novitskiy N.N.** The concept and technology of a unified digital space organizing of an operational enterprise as a necessary condition for the intelligent automation of pipeline systems // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. V. 667. Is. 1. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/667/1/012003>

Intellectualization of Heat-Supply Systems: Current State, Trends and Tasks (a Review)

N. N. Novitskii^a, Z. I. Shalaginova^{a, *}, A. V. Alekseev^a, O. A. Grebneva^a,
V. V. Tokarev^a, A. V. Lutsenko^a, and O. V. Vanteeva^a

^a Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS), Irkutsk, 664033 Russia

*e-mail: shalaginova@isem.irk.ru

Abstract—The article addresses matters concerned with digitalization and intellectualization of district heating systems (DHS) and is of a reviewing and problem-stating nature. Intellectualization of DHSs is viewed as a process of transition for a fundamentally new platform, within which it becomes possible to efficiently coordinate the interests, requirements, and capacities of all stakeholders participating in the heat-supply processes, and the consumer is given the role of an active full-fledged participant. The main lines, aims, and features of this process are briefly characterized. Both domestic and foreign experience gained from setting up centralized (district) heat-supply systems, including the most advanced development trends of these systems in EU member states. Special attention is paid to matters concerned with intellectualization of Russian DHSs. It is shown that the transition for a new paradigm will generate the need to cardinally revise the existing practices of DHS design, operation, and supervisory (dispatch) control. The key lines and tasks connected with transition to the new concept of managing the operation of DHSs as cyberphysical objects are formulated. The transition to this concept implies a wide use of mathematical and computer modeling methods for automating the DHS state monitoring processes, its analysis, prediction, and optimization. A significant part of the article is devoted to an analytical review of the current state of scientific-methodical developments in this field in four basic lines: mathematical modeling of DHS operation modes (hydraulic, temperature and thermal-hydraulic, stationary and dynamic, deterministic and probabilistic), identification of the DHS's actual state (equipment characteristics, operating parameters, etc.) based on measurement data, optimization of DHS operation modes (for estimating the effectiveness of new heat-supply technologies, efficient DHS operation, and optimal control of DHS operation modes), and software for computer modeling of DHSs. Informative statements of DHS mathematical and computer modeling tasks are described along with the background developments for solving them available at ESI SB (Russian Academy of Sciences) are described.

Keywords: intellectualization, digitalization, heat-supply systems, modeling, operation mode optimization, parameter identification, information and computation technologies