

Оптимизация мультиагентной архитектуры для цифровых двойников систем теплоснабжения при обеспечении их живучести

Рецензия эксперта на статью получена 17.09.2025 [The expert review of the article was received on September 17, 2025]

Федеральным законом от 27 июля 2010 года №190 «О теплоснабжении» определены следующие аспекты, касающиеся живучести систем теплоснабжения:

- «живучесть» определяется как способность источников тепловой энергии, тепловых сетей и системы теплоснабжения в целом сохранять свою работоспособность в аварийных ситуациях, а также после длительных остановок (более 54 ч);
- упоминается обязанность лиц, осуществляющих деятельность в сфере теплоснабжения, составлять план обеспечения надёжности теплоснабжения в условиях отсутствия свидетельства о допуске (предусматривает планирование мер для поддержания функционирования системы в экстренных случаях);
- в контексте управления инвестиционными программами и регулирования тарифов в фокусе находятся показатели надёжности и энергетической эффективности объектов теплоснабжения (косвенно связано с обеспечением их живучести, так как энергетическая эффективность и надёжность являются ключевыми компонентами устойчивой работы систем);
- упоминается плата за услуги по поддержанию резервной тепловой мощности для отдельных категорий потребителей (гарантирует, что даже при отключении основного источника будет обеспечена возможность возобновления теплоснабжения).

Таким образом, закон уделяет внимание обеспечению живучести и надёжности в работе теплоснабжения через ряд требований и мер, направленных на поддержание функционирования системы

в чрезвычайных ситуациях и восстановление после длительных остановок.

В «Правилах технической эксплуатации тепловых энергоустановок» информация, касающаяся обеспечения надёжности и безопасности эксплуатации систем теплоснабжения и теплопотребления, включает в себя:

- обеспечение расчётных температур в помещениях и надёжности работы системы через наладку и регулировку элементов системы;
- выполнение комплекса мероприятий перед началом отопительного сезона для гарантирования надёжности теплоснабжения (включает устранение нарушений, испытание оборудования на плотность и прочность, а также шурфовку сетей);
- согласование технических решений и строительно-монтажных работ на системах теплопотребления с требованиями действующих норм и стандартов;
- установка запорной арматуры и контрольно-измерительных приборов для регулирования и защиты систем теплопотребления;
- обеспечение наличия и актуальности паспортов, схем и инструкций для обслуживающего персонала, соответствие условий работе с нормами безопасности;
- разработка и ведение режимов работы тепловых установок и сетей, планирование ремонтных работ для обеспечения устойчивости систем, а также рационального использования ресурсов;
- ведение учёта и анализ технико-экономических показателей работы тепловых энергоустановок.

УДК 697.34 (004.942). Научная специальность: 2.1.3.

Оптимизация мультиагентной архитектуры для цифровых двойников систем теплоснабжения при обеспечении их живучести

Сергей Алексеевич Тихомиров, к.т.н., доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); **Екатерина Григорьевна Тихомирова**, д.ф.н., доцент, кафедра философии, онтологии и теории познания, Институт фундаментальных проблем социо-гуманитарных наук (ИФП СГН) Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт» (НИЯУ «МИФИ»)

Массовые отказы систем транспорта тепла и источников теплоснабжения в отопительный период 2023–2024 годов выявили проблемы живучести систем теплоснабжения России. Документальные подтверждения этому, приведённые в материалах Ростехнадзора, свидетельствуют о необходимости внедрения современных мультиагентных систем управления. В статье исследуется проблематика оптимизации архитектуры киберфизических систем на основе мультиагентных технологий для управления системами теплоснабжения с целью повышения их отказоустойчивости. Предложена иерархическая модель мультиагентной системы, интегрированной с цифровыми двойниками, учитывающая динамические нагрузки, циклические режимы работы и потенциальные аварийные сценарии. Представлены результаты моделирования, демонстрирующие взаимосвязь между архитектурой мультиагентной системы, надёжностью теплоснабжения и эффективностью реагирования на нештатные ситуации.

Ключевые слова: надёжность теплоснабжения, живучесть систем теплоснабжения, мультиагентные системы, цифровые двойники, киберфизические системы, интеллектуальное управление теплоснабжением.

UDC 697.34 (004.942). Scientific specialty number: 2.1.3.

Optimization of multi-agent architecture for digital twins of heating supply systems to ensure their survivability

Sergey A. Tikhomirov, PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU); **Ekaterina G. Tikhomirova**, Doctor of Philosophical Sciences, Associate Professor, the Department of Philosophy, Ontology and Theory of Knowledge, Institute of Fundamental Problems of Socio-Humanitarian Sciences (IFP SGN) National Research University Moscow Engineering Physics Institute Nuclear University (NRU "MEPhI")

Massive failures of heat transport systems and heat supply sources during the heating period of 2023–2024 revealed problems with the survivability of Russian heat supply systems. Documentary evidence of this fact provided in the materials of the Federal Environmental, Technological and Nuclear Supervision Service of the Russia Federation (Rostekhnadzor), indicates the need to introduce modern multi-agent management systems. The article examines the problems of optimizing the architecture of cyber-physical systems based on multi-agent technologies for managing heat supply systems in order to increase their fault tolerance. The authors propose a hierarchical model of a multi-agent system integrated with digital twins, taking into account dynamic loads, cyclic operating modes and potential emergency scenarios. The simulation results are presented, demonstrating the relationship between the architecture of a multi-agent system, the reliability of heat supply and the effectiveness of responding to emergency situations.

Key words: reliability of heat supply, survivability of heat supply systems, multi-agent systems, digital twins, cyber-physical systems, intelligent heat supply management.

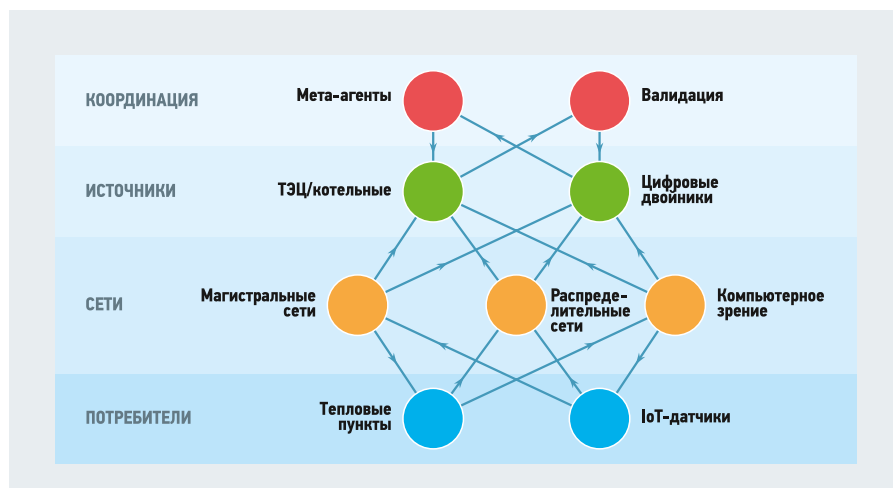


Рис. 1. Схема мультиагентной архитектуры системы теплоснабжения с интеграцией цифровых двойников

Эти меры направлены на увеличение эффективности, обеспечение безопасности и предотвращение отказов систем теплоснабжения и энергоустановок потребителей, что в свою очередь содействует живучести этих систем [1]. Но современное состояние систем теплоснабжения характеризуется их высокой изношенностью, аварийностью и потерями через теплоизоляцию и с утечками теплоносителя [2].

Архитектура мультиагентной системы управления теплоснабжением

Прогресс в области централизованного теплоснабжения невозможен без усовершенствования существующих методов генерации, распределения и использования тепловой энергии, направленного на достижение новых стандартов эффективности — энергетической, экологической и экономической. В приоритете теплоэнергетической отрасли стоит задача оптимизации функционирования теплоснабжающих систем на протяжении всех фаз их эксплуатации и в каждом из её элементов [3]. Централизованные системы теплоснабжения, состоящие из источников энергии, теплопроводных сетей — системы труб и сооружений для перемещения теплоносителя, а также конечных получателей тепла, представляют собой комплексные технические конструкции. Для их эффективного управления с помощью мультиагентной системы необходима цифровая модель [4] каждого компонента на всех этапах его функционирования — интегрированных наборов данных о зданиях и сооружениях в их объёмно-пространственном представлении в электронном формате [5, 6]. Мультиагентная система для теплоснабжения представляет собой распределённую киберфизическую архитектуру, состоящую из множества взаимодействующих интеллектуальных агентов.

Мультиагентная архитектура для систем теплоснабжения строится по четырёх-уровневой иерархии. Первый уровень — это источники тепловой энергии, сюда входят агенты управления ТЭЦ или котельными (оптимизация топливных режимов, мониторинг генерации тепла) и агенты цифровых двойников источников (виртуальные реплики генерирующего оборудования для предиктивной аналитики).

Второй уровень — это магистральные и распределительные сети, сюда входят агенты магистральных сетей (контроль давления и температуры в сетях), агенты распределительных сетей (управление локальными участками тепловых сетей) и агенты компьютерного зрения (визуальный контроль состояния трубопроводов с точностью обнаружения дефектов свыше 95 %).

Мультиагентная архитектура для систем теплоснабжения строится по четырёхуровневой иерархии. Первый уровень — это источники тепловой энергии, сюда входят агенты управления ТЭЦ или котельными и агенты цифровых двойников источников



Третий уровень — это потребители тепловой энергии. Сюда входят агенты тепловых пунктов, осуществляющие регулирование подачи тепла в зданиях и сооружениях на отопление, вентиляцию и ГВС, и агенты узлов учёта тепловой энергии (УУТЭ), осуществляющие непрерывный сбор данных о параметрах потребления (температуры, давления, расходы).

Четвёртый уровень — это координационное управление. Сюда входят мета-агенты принятия решений (глобальная оптимизация работы системы и координация аварийного реагирования) и агенты валидации и верификации (многоуровневая проверка качества данных и соответствия эксплуатационных параметров нормам). Схема мультиагентной архитектуры системы теплоснабжения с интеграцией цифровых двойников приведена на рис. 1.

Интеграция с цифровыми двойниками и киберфизическими системами выполняется по следующему алгоритму. Цифровые двойники создают виртуальные реплики физических компонентов системы теплоснабжения, обеспечивающие режим реального времени для мониторинга и прогнозирования. Киберфизические системы (Cyber-physical System, CPS) формируют интеллектуальный мост между физической инфраструктурой и цифровым пространством управления. Такой подход приводит к снижению времени простоя оборудования на 30–50 % благодаря предиктивному техническому обслуживанию, повышению энергетической эффективности на 15 % за счёт оптимизации режимов работы, сокращению количества аварий на 20–30 % и существенному продлению ресурса оборудования.

Мультимодальные ИИ-системы обеспечивают одновременную обработку разнородных потоков данных, таких как числовые показатели датчиков, видеоизображений, аудиосигналов и текстовой документации. Их ключевые технологические компоненты — это датчики для непрерывного мониторинга физических параметров и системы компьютерного зрения на базе свёрточных нейронных сетей для анализа состояния оборудования.

Обучение алгоритмов предиктивной аналитики выполняется на ML-моделях — LSTM (Long Short-Term Memory, модель с использованием «долгой краткосрочной памяти») и RNN (Recurrent Neural Network, стандартная «рекуррентная нейронная сеть», в которой связи между элементами образуют направленную последовательность) с погрешностью 3,1–3,3 %. Валидация данных выполняется автоматически.



Рис. 2. Схема сетей теплоснабжения микрорайона города

Характеристики сетей

табл. 1

Характеристика	«Нива-1»	«Нива-2»	«Нива-ГВС»
Отопление, Гкал/ч	29,365	16,538	—
Вентиляция, Гкал/ч	1,102	0,286	—
ГВС, Гкал/ч	0,766	0,021	13,835
p_1/p_2 , кгс/см ²	7/3	5,8/2,5	3,8/2,4
Диаметр выводов, мм	426	426	325
Протяжённость, м	13111,5	8424	5312



Рис. 3. Расчётная схема сетей теплоснабжения «Нива-1»

Выбор системы для обучения на примере переноса источника для тепловых сетей микрорайона города

В качестве примера использования данных [7] для обучения нейросотрудников представлена схема сетей микрорайона Сельмаш в городе Ростове-на-Дону (рис. 2–5) по состоянию на декабрь 2016 года. Общая нагрузка на отопление составляет 45,903 Гкал/ч, на вентиляцию — 1,388 Гкал/ч, на ГВС — 14,622 Гкал/ч.

На территории микрорайона в разное время были введены в эксплуатацию три системы: «Нива-1», «Нива-2» и «Нива-ГВС». Характеристики данных сетей приведены в табл. 1. Схема присоединения системы отопления — элеваторная, системы ГВС — закрытая.

Мультиагентное решение предусматривает: создание цифровых двойников каждого участка сети, развёртывание агентов мониторинга для каждой системы, интеграцию агентов компьютерного зрения для контроля состояния трубопроводов, координацию мета-агентов для оптимизации работы

Источник теплоснабжения — ТЭЦ на отметке 78,9 м. При переходе на другой источник — районную котельную на отметке 70,8 м — три вывода разного диаметра заменили одним — 610 мм. При этом достоверные данные о системах теплоснабжения собраны не были, цифровые двойники сетей не создавались, а изношенность трубопроводов привела к потере живучести (рис. 7).

Оптимизация архитектуры мультиагентной системы

Мультиагентное решение предусматривает: создание цифровых двойников каждого участка сети, развёртывание агентов мониторинга для каждой системы («Нива-1», «Нива-2», «Нива-ГВС»), интеграцию агентов компьютерного зрения для контроля состояния трубопроводов, координацию мета-агентов для оптимизации работы всего комплекса. Оптимизация архитектуры в части параметров её живучести будет зависеть от следующих факторов [8, 9]:

1. Технологического — учёта интенсивности аварий в год, удельных расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку 1 Гкал тепла, отклонения фактических потерь тепла от нормативных в долях единицы, потерь тепла через изоляцию на кило-

метре длины сети, параметра замены сетей по протяжённости заменённых относительно нуждающихся в замене, параметра замены источников по числу введённых источников тепла относительно нуждающихся в замене, обеспеченности узлами учёта отпущенной и потребляемой тепловой энергии, параметров уровня загрузки котельных по присоединённой мощности относительно установленной.

Оптимизация архитектуры мультиагентной системы зависит от технологического, экономического, финансового, социального и технического факторов

2. Экономического — учитывающего расходы на топливо, энергию, воду, заработную плату, текущий и капитальный ремонт в структуре себестоимости продукта, долю амортизации, коэффициенты прироста и обновления основных средств и их износ, трудоёмкость и фондёмкость на выработку 1 Гкал тепла.

3. Финансового — учитывающего период и уровень сбора платежей, собственный и заёмный капитал, долгосрочные обязательства, оборотные средства, кратковременную задолженность и прибыль.

4. Социального — учитывающего долю потребителей, обеспеченных доступом к коммунальной инфраструктуре, долю расходов на оплату услуг в совокупном доходе населения, удельное потребление тепла на одного жителя, индекс роста тарифов.

5. Технического — учитывающего характеристики и состав оборудования источников, участков тепловых сетей, потребителей тепла, центральных тепловых пунктов и насосных.

Принцип включения в архитектуру цифровых агентов обусловлен особой важностью технического, технологического, экономического, финансового и социального факторов, поэтому для каждого из них предлагается иметь минимум основного и резервного агента.

На втором этапе выбора числа агентов должна решаться задача связи баз данных и их обновления в режиме реального времени для анализа. Технический фактор определяется сложностью устройства системы, поэтому при наличии более чем одного источника или включения в работу пиковых котельных, сложной инфраструктуры системы теплоснабжения, высокого уровня надёжности, большого числа потребителей увеличивается число агентов пропорционально числу событий в системе.

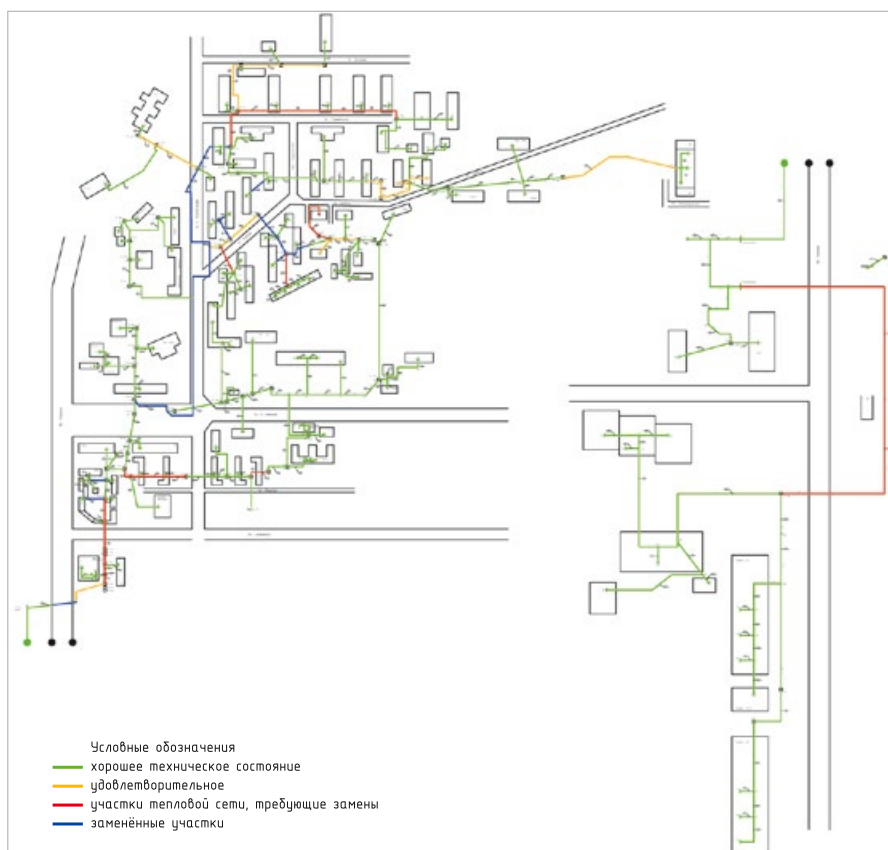


Рис. 4. Расчётная схема сетей теплоснабжения «Нива-2»

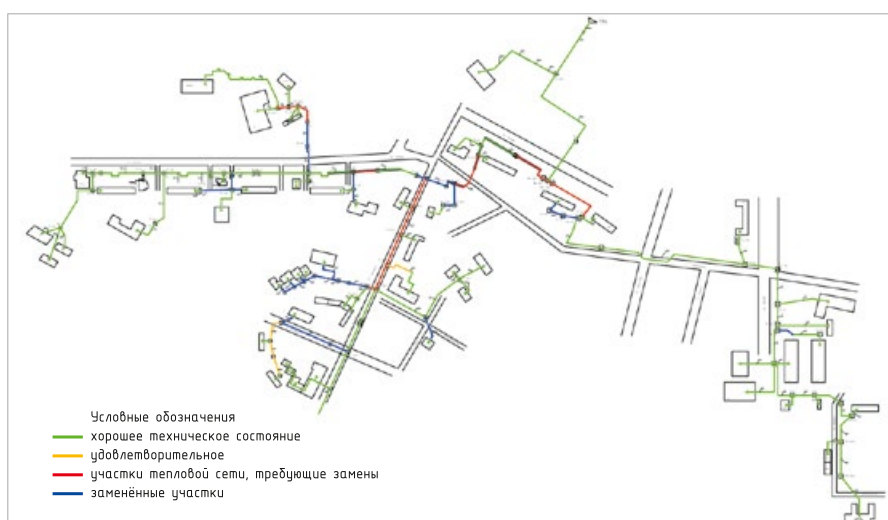


Рис. 5. Расчётная схема сетей горячего водоснабжения «Нива-ГВС»

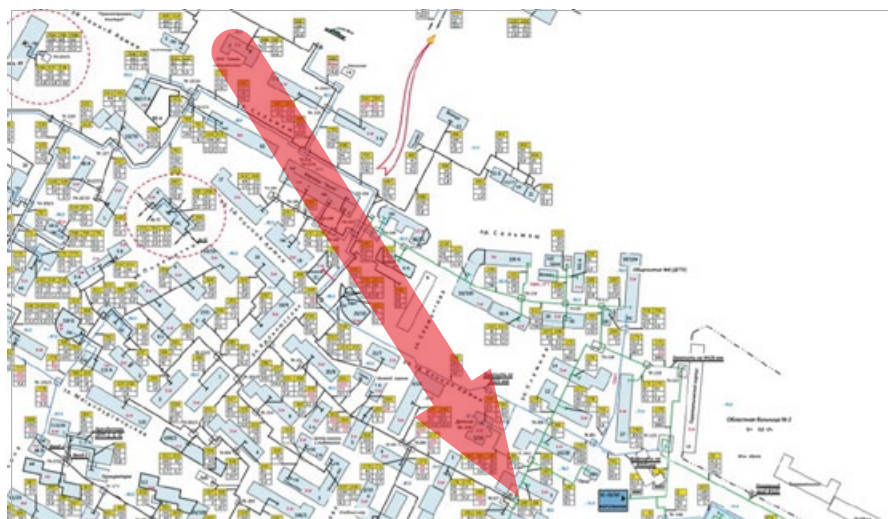


Рис. 6. Перенос источника теплоснабжения

Оптимальная численность агентов рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{ар}} = N_{\text{баз}} + k \lg(N_{\text{соб}}),$$

где $N_{\text{баз}}$ — минимальное количество агентов для каждого функционального направления; k — коэффициент масштабирования; $N_{\text{соб}}$ — интенсивность событий в системе.

Количество событий определяется исходя из необходимости обновления баз данных, включённых в базы знаний: так для базы мониторинга и проверки соответствия финансовых и экономических показателей — ежегодно, а для технического анализа теплогидравлических режимов работы системы — ежечасно по данным мониторинга узлов учёта тепла, мониторинга параметров выработки тепла котельными, потребления электроэнергии, топлива и воды.

Повышение скорости реакции на нештатные ситуации в системе теплоснаб-



Рис. 7. Характерные признаки дефектов магистральных трубопроводов

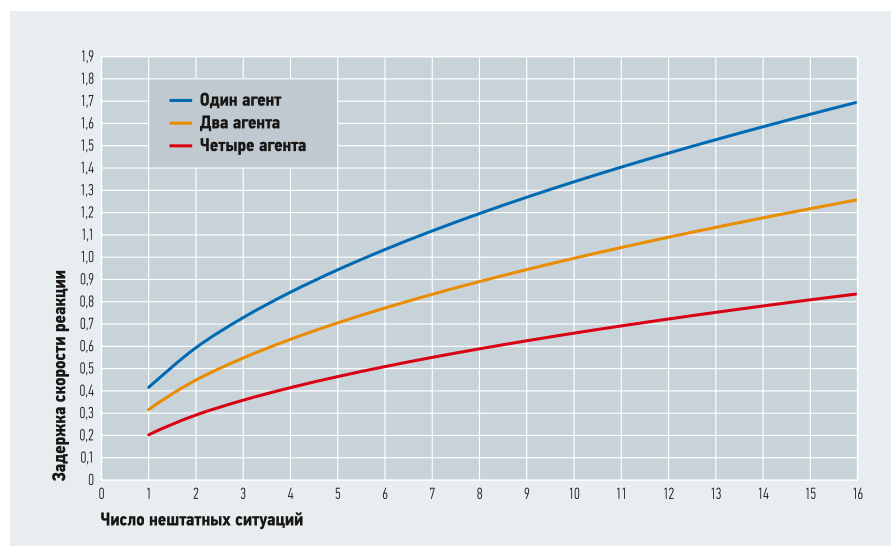


Рис. 8. Задержка скорости реакции на нештатные ситуации в системе теплоснабжения

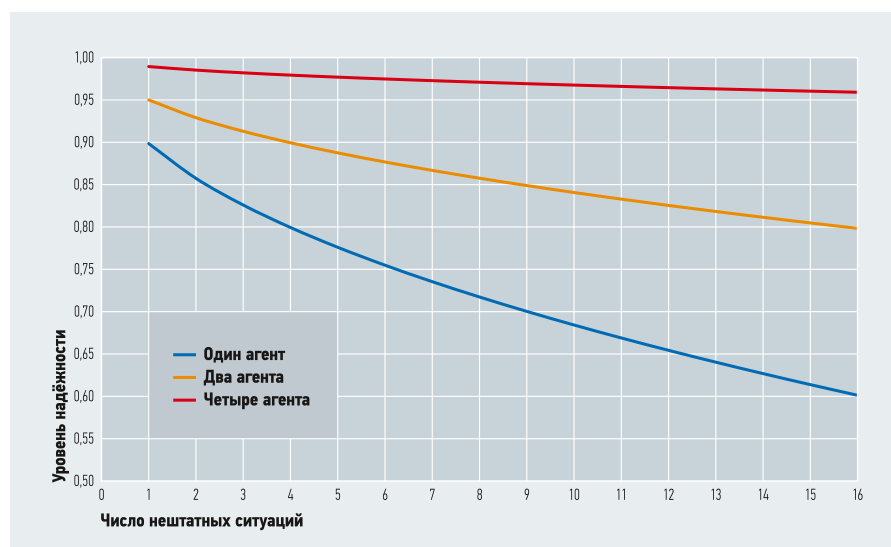


Рис. 9. Обеспечение заданного уровня надёжности при использовании числа агентов, реагирующих на нештатные ситуации в системе теплоснабжения

жения можно добиться сравнительно простым путём разделения зон ответственности между агентами (рис. 8 и 9), что повышает надёжность системы до заданного уровня, определяемого требованиями законодательства. ●

1. Горбунова Т.Г., Ваньков Ю.В., Медяков А.А. Надёжность тепловых сетей: теория и практика // Надёжность и безопасность энергетики, 2017. Т. 10. №4. С. 275–279.
2. Пасичко С.И., Халецкая Е.А., Коленко А.Г. Системы теплоснабжения. Выбор оптимальных направлений развития // Новости теплоснабжения, 2002. №24.
3. Соловьёв В.И. Цифровая трансформация систем теплоснабжения муниципального образования // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. №2. С. 52–61.
4. Красильникова К.В., Соловьёв В.И. Модели интеграции информационных ресурсов региональной системы жилищно-коммунального хозяйства // Инновации в жизнь, 2016. №1. С. 69–80.
5. Тихомиров А.Л., Пирожникова А.П. Разработка информационной модели системы теплоснабжения на различных этапах её жизненного цикла // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий, 2022. Т. 1. №3. С. 35–42.
6. Тихомиров А.Л., Пирожникова А.П. Формирование принципов количественного регулирования параметров системы теплоснабжения на основе анализа её жизненного цикла // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий, 2023. Т. 2. №2. С. 29–35.
7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2016620798 РФ. Справочно-информационная система источников теплоснабжения с присоединёнными многоквартирными жилыми домами города Ростова-на-Дону / С.Г. Шеина, Е.В. Мартынова, Р.Б. Матвейко [и др.]. Заявит.: ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет». №2016620493. Заявл.: 19.04.2016; опубл. 15.06.2016.
8. Zheng X., Sun Q., Wang Y., Zheng L., Gao X., You S., Zhang H., Shi K. Thermo-hydraulic coupled simulation and analysis of a real large-scale complex district heating network in Tianjin. Energy. 2021. Vol. 236. No. 121389.
9. Zheng J., Zhou Z., Zhao J., Wang J. Function method for dynamic temperature simulation of district heating network. Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 123. Pp. 682–688.

References — see page 80.

Optimization of multi-agent architecture for digital twins of heating supply systems to ensure their survivability. Pp. 40–45.

Sergey A. Tikhomirov, PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU); **Ekaterina G. Tikhomirova**, Doctor of Philosophical Sciences, Associate Professor, the Department of Philosophy, Ontology and Theory of Knowledge, Institute of Fundamental Problems of Socio-Humanitarian Sciences (IFP SGN) National Research University Moscow Engineering Physics Institute Nuclear University (NRU "MEPhI")

1. T.G. Gorbunova, Yu.V. Vankov, A.A. Medyakov. *Nadezhnost' teplovykh setej: teoriya i praktika* [Reliability of heating networks: A theory and a practice]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* ["Reliability and Safety of Energy" Magazine]. 2017. Vol. 10. No. 4. Pp. 275–279. [In Russian]
2. S.I. Pasichko, E.A. Khaletskaya, A.G. Kolienko. *Sistemy teplosnabzheniya. Vybór optimal'nykh napravlenij razvitiya* [Heat supply systems. Selecting optimal development directions]. *Novosti teplosnabzheniya* ["Heat Supply News" Magazine]. 2002. No. 24. [In Russian]
3. V.I. Solovov. *Tsifrovaya transformatsiya sistem teplosnabzheniya munitsipal'nogo obrazovaniya* [Digital transformation of municipal heat supply systems]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* ["Information and Mathematical Technologies in Science and Management" Magazine]. 2019. No. 2. Pp. 52–61. [In Russian]
4. K.V. Krasilnikova, V.I. Solovov. *Modeli integratsii informatsionnykh resursov regional'noj sistemy zhilishchno-kommunal'nogo khozyajstva* [Models for integrating information resources of the regional housing and public utilities system]. *Innovatsii v zhizni* ["Innovations in Life" Magazine]. 2016. No. 1. Pp. 69–80. [In Russian]
5. A.L. Tikhomirov, A.P. Pirozhnikova. *Razrabotka informatsionnoj modeli sistemy teplosnabzheniya na razlichnykh etapakh ee zhiznennogo tsikla* [Development of an information model of a heat supply system at various stages of its life cycle]. *Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territorij* ["Modern Trends in Construction, Urban Planning and Territorial Planning" Magazine]. 2022. Vol. 1. No. 3. Pp. 35–42. [In Russian]
6. A.L. Tikhomirov, A.P. Pirozhnikova. *Formirovanie printsipov kolichestvennogo regulirovaniya parametrov sistemy teplosnabzheniya na osnove analiza ee zhiznennogo tsikla* [Formation of principles of quantitative regulation of heat supply system parameters based on the analysis of its life cycle]. *Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territorij* ["Modern Trends in Construction, Urban Planning and Territorial Planning" Magazine]. 2023. Vol. 2. No. 2. Pp. 29–35. [In Russian]
7. *Svidetel'stvo o gosregistratsii bazy dannykh №2016620798 RF* [Certificate of state registration of database No. 2016620798 of the Russia Federation]. *Spravochno-informatsionnaya sistema istochnikov teplosnabzheniya s prisoedinennymi mnogokvartirnymi zhilyimi domami goroda Rostova-na-Donu* [Reference and information system of heat supply sources with connected multi-apartment residential buildings in the city of Rostov-on-Don]. S.G. Sheina, E.V. Martynova, R.B. Matveyko et al. Appl.: FGBOU VPO "Rostovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet" (RGSU) [Rostov State University of Civil Engineering]. No. 2016620493. Applied: April 19, 2016. Publ.: June 15, 2016. [In Russian]
8. X. Zheng, Q. Sun, Y. Wang, L. Zheng, X. Gao, S. You, H. Zhang, K. Shi. Thermo-hydraulic coupled simulation and analysis of a real large-scale complex district heating network in Tianjin. *Energy*. 2021. Vol. 236. No. 121389.
9. J. Zheng, Z. Zhou, J. Zhao, J. Wang. Function method for dynamic temperature simulation of district heating network. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 123. Pp. 682–688.