



## CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 1, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.02

УДК 697.31; 004.94

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ СЕТЕЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

**А.М. Петров, А.Н. Попов**

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

#### О СТАТЬЕ

Получена: 18.11.2020

Принята: 22.01.2021

Опубликована: 21.04.2021

#### Ключевые слова:

теплоснабжение, информационные системы, анализ данных, исследование, нейронные сети.

#### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены существующие способы и основные современные технические решения, которые в настоящий момент реализованы в разных странах при диагностике сетей теплоснабжения.

Выделены основные направления в области развития и проектирования сетей теплоснабжения, которые уже реализованы или поддерживаются научными коллективами разных стран. Проанализированы различные способы и технические особенности диагностики, определены сильные и слабые стороны представленных решений. Рассмотренные работы были подвержены детальному анализу, который позволил выявить наличие высокого интереса научного и индустриального сообщества к интеграции и усовершенствованию имеющихся цифровых технологий в развитии систем теплоснабжения, которые были бы тесно связаны с прогнозированием и моделированием процессов в данной отрасли.

Выявлены основные векторы развития данного сектора, приведен пример значительного роста степени цифровизации конечных продуктов, что позволяет применять аналитику данных для получения эффективных технических решений относительно сетей теплоснабжения. Отдельно отмечен положительный опыт разных стран в данной отрасли при использовании нейронных сетей не только в области проектирования сетей теплоснабжения, но и как целевой отрасли в целом.

Выдвинуты предположения о необходимости детального анализа существующего зарубежного и отечественного опыта, а также научных разработок в данной сфере для определения наиболее подходящих технических решений на территории Российской Федерации, которые позволят учитывать климатические особенности страны и базироваться на методах большого анализа данных, компьютерного зрения и имитационного моделирования.

© ПНИПУ

© Петров Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: darker2012@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-3265-520X  
Попов Антон Николаевич – ассистент, e-mail: 264241@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0774-411X

Alexey M. Petrov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: darker2012@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-3265-520X  
Anton N. Popov – Assistant, e-mail: 264241@mail.ru. ORCID: 0000-0003-0774-411X

## **ANALYSIS OF EXISTING SOLUTIONS FOR IMPROVING THE MEASURING AND COMPUTING COMPLEXES OF HEAT SUPPLY NETWORKS**

**A.M. Petrov, A.N. Popov**

Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 18.11.2020

Accepted: 22.01.2021

Published: 21.04.2021

#### *Keywords:*

heat supply, information systems, data analysis, research, neural networks.

### ABSTRACT

In the presented article, the team of authors considers the existing methods and the main modern technical solutions that are currently implemented in different countries in the diagnosis of heat supply networks.

There is a selection of the main directions in the development and design of heat supply networks, which have already been implemented or supported by scientific teams from different countries. Various methods and technical features of diagnostics are reviewed, strengths and weaknesses of the presented solutions are highlighted. The reviewed works were subjected to detailed analysis, which revealed the presence of a high interest of the scientific and industrial community in the integration and improvement of existing digital technologies in the development of heat supply systems, which would be closely related to forecasting and modeling processes in this industry.

The team of authors highlights the main vectors for the development of this sector, citing an example of a significant increase in the degree of digitalization of final products, which makes it possible to use data analytics to obtain effective technical solutions regarding heat supply networks. Separately, the positive experience of different countries in this industry is noted when using neural networks not only in the design of heat supply networks, but also as a target industry as a whole.

Assumptions are put forward about the need for a detailed analysis of the existing foreign and domestic experience, as well as scientific developments in this area, in order to determine the most suitable technical solutions on the territory of the Russian Federation, which will take into account the climatic characteristics of the country and be based on methods of large data analysis, computer vision and simulation. modeling.

© PNRPU

---

## **Введение**

В настоящее время Россия обладает самой протяженной в Европе системой тепловых сетей (суммарно около 125 тыс. км), и с учетом постоянного роста объема строительных площадей ее протяженность также будет увеличиваться. Помимо этого, существуют магистральные трубопроводы (суммарная протяженность около 230 тыс. км.), постоянно требующие обслуживания. Логично, что при постоянном росте количества вышеуказанных объектов увеличивается число аварий и, как следствие, их остановок.

В связи с этим появляется необходимость повышения уровня надежности работы сетей теплоснабжения. Удовлетворить подобный запрос возможно только с помощью увеличения объемов и качества комплексного диагностирования сетей теплоснабжения с одновременным сокращением временных затрат. Это, в свою очередь, возможно только при условии разработки нового поколения измерительно-вычислительных комплексов для диагностики сетей теплоснабжения.

## **Обзор существующих решений сетей теплоснабжения**

Проведем обзор существующих способов и современных технических решений, которые применяются при диагностике сетей теплоснабжения, их устройств и оборудования, как в России, так и за рубежом.

В статье [1] коллектив авторов поставил перед собой проблему определения расположения скрытых трубопроводов и их диагностики на целостность. Для решения данной проблемы был сконструирован измерительно-диагностический комплекс, принцип действия которого основывался на вычислении разности акустических сигналов, причем авторы делают акцент на том, что для разного диаметра труб характерен разный тип сигналов. Были произведены лабораторные испытания данного комплекса, которые подтвердили эффективность его работы. Если развить данную мысль, то усовершенствования данного комплекса можно добиться путем сбора базы данных по зависимости разности акустического сигнала относительно диаметра трубы и последующего написания компьютерной программы по соотношению акустического сигнала с информацией в базе данных.

В любом случае подобная установка способна производить диагностику бесконтактно, не осуществляя каких-либо манипуляций с трубами системы теплоснабжения.

Развивая мысль об использовании специализированного программного обеспечения для мониторинга и диагностики системы теплоснабжения, необходимо рассмотреть статью [2]. В данной статье автор разработал компьютерную программу для работы с контроллером ECL 210, который исполнял функцию регулятора системы. Однако, что необходимо отметить отдельно, особенности работы компьютерной программы заключались в использовании выведенных автором зависимостей между тепловой энергией, температурой теплоносителя и его расходом. В результате, при использовании данной разработки в лабораторных условиях было зафиксировано увеличение общей эффективности системы теплоснабжения. По итогу данное программное обеспечение было введено в промышленную эксплуатацию завода «Радиоприбор» (г. Владивосток).

В дальнейшем в программное обеспечение, в качестве улучшения, основывающегося на данных, полученных в ходе промышленного испытания, был введен блок «экспресс-диагностика системы», позволяющий на основе собранных данных за время работы системы теплоснабжения производить не только ее фактическую диагностику, но и спрогнозировать ее работу в будущем. Если развить подобную идею, то повышение количества снимаемых датчиками параметров, как следствие, увеличит количество баз данных (отдельная база данных для каждого параметра системы теплоснабжения), в этом случае вполне можно создать полноценную технологию разработки Digital Shadow систем теплоснабжения.

Углубившись в разработку специализированного программного обеспечения для диагностики систем теплоснабжения, необходимо рассмотреть статью [3]. В данной статье коллектив авторов представил алгоритмы технической диагностики для всех инженерных систем централизованного снабжения, которые входят в состав топливно-энергетического комплекса. Логика авторов статьи заключалась в том, что поскольку конструкция и особенности построения систем электроэнергетики, тепло-, водо- и газоснабжения, а также систем отопления, вентиляции и кондиционирования одинаковы, то существуют некие принципы универсальности в их исследовании, которые описываются такими понятиями, как *унификация* и *однородность*. Следовательно, при условии соблюдения обобщенной универсальности можно разработать компьютерные алгоритмы технической диагностики, которые могут быть применены к каждой из перечисленных систем.

В основу подобного алгоритма был заложен «принцип функционального эквивалентирования абонентской подсистемы», который заключался в сравнении сбора данных с датчиков состояния системы с фактическим состоянием системы. В итоге получились корректирующие алгоритмы, позволяющие при использовании методик компьютерного имита-

ционного моделирования проектировать более точные инженерные системы, а также получать более точную информацию о текущем состоянии существующей системы в любой момент времени.

При этом авторы отмечали, что среди анализируемых систем особенными являются трубопроводные системы тепло-, водо-, газоснабжения. Ввиду их многообразия и динамики развития собирать данные для создания корректирующих алгоритмов затруднительно, а получающаяся точность мала. Стоит отметить, что научный коллектив в данном исследовании не применял искусственные нейронные сети и технологии компьютерного зрения, использование которых теоретически может повысить эффективность представленных алгоритмов и позволит не только осуществлять диагностику системы, но и прогнозировать ее развитие, в зависимости от моделируемых (поставленных) условий.

В связи с этим стоит подробнее рассмотреть работу [4], где авторы поставили перед собой задачу обучить нейронную сеть поиску дефектов трубопровода с помощью глубокого анализа акустического сигнала. Побочным результатом исследования стала также возможность определения размеров дефекта трубы акустическим методом.

Разработанный диагностический комплекс напоминает рассмотренный нами ранее комплекс для определения скрытых трубопроводов. В его основу также заложены датчики для приема акустических сигналов и аналого-цифровой преобразователь, но данный комплекс отличает наличие персонального компьютера с программным обеспечением для записи и обработки акустических сигналов, а также компьютерная программа искусственной нейронной сети, обученная на акустической базе данных. Авторы статьи разработали общий интерфейс для перечисленных программ с условным названием Inspector. Разность сходимости теоретических и экспериментальных результатов получившегося моделирования дефектов труб с помощью программного комплекса ANSYS составила не более 10 %, что является приемлемым. Однако данная научная работа была проведена исключительно на лабораторном стенде, т.е. база данных для обучения нейронной сети была взята прежде всего из искусственно созданных условий.

На основе этого можно сделать вывод о том, что обучение искусственной нейронной сети прежде всего должно осуществляться на собранной в промышленных условиях базе данных исследуемого параметра либо следует использовать подобную базу данных для корректировочных коэффициентов приходящего сигнала.

Как можно заметить, наличие корректной базы данных, взятой непосредственно из результатов производственного, а не лабораторного испытания, позволит значительно эффективнее распорядиться имеющимися данными.

В научной работе [5] были получены результаты о возможности прогнозирования предаварийных ситуаций в системах теплоснабжения. В настоящее время при прогнозировании систем теплоснабжения используются экспертные системы, которые построены на субъективном опыте экспертов и переведены в программный код. Подобное технологическое решение не лишено субъективации получаемых данных и, как следствие, сложности понимания результатов отчета. В итоге авторы работы предположили, что заложенный в основе подобных систем субъективный опыт экспертов может быть заменен статистически собранной базой данных и машинным обучением, таким образом, исключая субъективации из итогового отчета о прогнозировании развития системы теплоснабжения.

Рассмотрим исследования научных коллективов, сделанных за рубежом, в частности в Европе, США и странах Азии. В рамках работы наибольший интерес представляют те

страны, климатические условия которых способствуют повышению запроса на реализацию эффективной работы систем теплоснабжения.

Начнем со статьи [6], авторы которой поставили задачу прежде всего оптимизации прокладки тепловых сетей. Логика авторов была вполне ясна: чем более оптимальной будет прокладка сети теплоснабжения, тем больше будет экономия материала. И на первый взгляд кажется, что подобная статья не соотносится с общим направлением работы, однако авторы применили оптимизацию проектирования сетей теплоснабжения с помощью генетического алгоритма, что, в свою очередь, привело их к пониманию оптимизации работы тепловой сети с учетом условий неопределенности.

Поскольку в настоящее время сети теплоснабжения проектируются исходя из составленных вручную оценок топологий, то существует различное множество вариаций конструктивного исполнения сетей, что, в свою очередь, порождает прежде всего отклонения и неточности в различных их параметрах, что приводит к неоптимальным проектам и, как следствие, к затратам. Как и в вышерассмотренной работе по усовершенствованию экспертных систем, в данном исследовании уже иной научный коллектив из Нидерландов предлагает заменить субъектные оценки топологий на численную оптимизацию систем. Поэтому невидимая ранее принадлежность работ коллектива из Нидерландов к общему направлению работы становится очевидной. Таким образом, предлагается конструирование сетей теплоснабжения и косвенных устройств и оборудования с помощью поиска оптимума, при этом без опоры на человеческий фактор. Результатом такой работы стала компьютерная программа, позволяющая моделировать оптимальную конструкцию тепловых сетей на топологической карте.

Данный коллектив опирался на работу [7], авторы которой включали в себя представителей таких стран, как Дания, Швеция и Великобритания. Еще в 2014 г. они сформировали концепцию сетей теплоснабжения четвертого поколения (4GDH) и рассмотрели особенности интеграции интеллектуальных тепловых сетей в энергетические системы Северной Европы (рисунок). В своей работе они не только определили саму концепцию интеллектуальных тепловых сетей и видение теплоснабжения четвертого поколения, но и предположили будущие проблемы подобных технологий.



Рис. Иллюстрация концепции централизованного теплоснабжения 4-го поколения, включая интеллектуальные тепловые сети  
Fig. Illustration of the concept of 4th Generation District Heating including smart thermal grids

По их мнению, энергоэффективность зданий невозможна без прямой интеллектуализации электрических, газовых и тепловых сетей. Они ссылаются прежде всего на проведенные исследования [8–16], которые приводят их к выводу, что интеллектуальная энергетическая система – это такая энергетическая система, в которой все интеллектуальные виды систем (теплоснабжения, газоснабжения, электроснабжения) объединены посредством информационных технологий для увеличения синергии между ними с целью достигнуть оптимального решения для каждого потребителя в частности и энергетической системы в целом.

Таким образом, для успешной реализации концепции интеллектуальной энергетической системы нужно такое решение, которое позволило бы координировать деятельность между рядом перечисленных выше инфраструктур. Более того, подобное решение должно координировать их работу в соответствии с прогнозом погоды (учитывать изменение наружной температуры) и рассчитывать потребность отопления в каждой комнате, опираясь на долгосрочные перспективы и собранные базы данных. Таким образом, формируется основа интеллектуального программного обеспечения, которое выносит решение на основе баз данных, собранных с систем контроля и измерения производительности сети.

Как можно заметить, здесь применяются технологии классического анализа данных и глубокого анализа данных (Data mining).

Однако ключевая разница заключается в том, что в российском направлении совершенствования систем теплоснабжения происходит разработка инноваций от частного потребителя к модернизации системы регионального или федерального уровня. В случае же со странами Европы, как мы можем видеть, разработки идут от крупных кластеров систем к частному потребителю. Подобный путь развития приведет прежде всего к децентрализации интеллектуального измерения. В итоге система платежей за потребление энергии будет гибкой [17, 18] и ключевым свойством построения интеллектуальных систем теплоснабжения нового поколения будет *когерентность*.

Рассмотрим подобное свойство на частном примере исследования [19], посвященного сравнению алгоритмов реагирования на спрос здания в потреблении энергии, проведенного в Ирландии.

Было взято классическое для Ирландии жилое здание, которое оснастили «умными» приборами учета и контроля тепловой энергии. Затем были разработаны два алгоритма реагирования на спрос тепловой энергии:

- Первый алгоритм был основан на правилах потребления энергии (выявленная статистическая закономерность).
- Второй алгоритм основывался на прогнозировании (с применением машинного обучения).

В итоге получилось, что в случае с первым алгоритмом потребление тепловой энергии зданием основывалось на заложенной программе с регулированием по времени, а во втором алгоритме потребление зависело от принятых интеллектуальной системой решений, которые корректировались на основе собираемых в режиме онлайн данных.

В результате получилось, что интеллектуальное прогнозирование, основанное на методах машинного обучения, сократило затраты на отопительные системы на 40 % относительно первого алгоритма. Тем самым научный коллектив подтвердил адекватность их применения при создании интеллектуальных систем теплоснабжения на уровне потребителя (здания).

Авторы из Гонконгского политехнического университета развили данное исследование, но уже на примере ряда коммерческих зданий [20], разработав систему оптимального управления накопления тепловой энергии в здании, применив уже известные технологии машинного обучения, подкорректировав их под функцию скоростного реагирования на спрос (DR).

Под реагированием на спрос (DR) подразумевался набор действий, выполняемых системой, направленных на сокращение или изменение потребления энергии с целью увеличения степени эффективности и/или надежности сети теплоснабжения. Суть разработанной стратегии заключалась в мгновенном реагировании контроллера MPC на объем потребляемой мощности относительно указанного диапазона температуры внутри помещения, на основе теплового отклика здания в пространстве состояний (метод описания динамической системы в теории управления) с дискретным временем (время, образованное выдачей через принятые промежутки астрономического времени импульсов сигналов от измерительных устройств). В результате исследований разработана и апробирована технология регулирования тепловой сети с максимально возможным снижением мощности при поддержке температуры в допустимых пределах.

Инициативу развития данной технологии переняла [21] научная команда из Технологического университета Наньян в Сингапуре. Здесь было проведено исследование по разработке и применению полноценной интерактивной сети управления рядом интеллектуальных зданий.

Для того чтобы добавить в систему управления рядом стоящих зданий такое свойство, как *интерактивность* (свойство, определяющее степень и характер взаимодействия элементов рассматриваемой системы друг на друга), необходимо было представить их прежде всего в виде виртуальной системы хранения тепловой энергии с ее последующим рассеиванием, а также с возможностью предоставления дополнительных (косвенных) услуг.

Главным управляющим элементом был сервер с компьютерной программой, вторичным управляющим элементом была компьютерная система (одна на каждое здание), а управляемыми элементами – терморегуляторы системы теплоснабжения. Также стоит отметить, что для сервера была написана компьютерная программа, константами в которой были эталонные значения мощности и комфорта/энергии для интеллектуального здания.

В итоге был выведен новый метод управления распределенной агрегацией для ряда интеллектуальных зданий, который реализован по схеме связи «лидер – ведомый» и основан на скользящем режиме управления. Устойчивость получившейся системы была доказана методом Ляпунова.

Представленный научным коллективом метод управления интерактивной сетью интеллектуальных зданий позволил осуществить распределение мощности на здания в зависимости от их потребностей, отслеживания и восстановления тепловой энергии зданий в случае аварийного отключения.

Логично, что подобный комплекс исследований, касающихся усовершенствования систем энергоснабжения в юго-восточном регионе планеты, сформировал общее представление о глобальной системе 4GDH, фундаментом для которого будет полноценный Energy Hub, описанный в [22]. В исследовании научный коллектив сформировал полноценное интеллектуальное управление системой распределения энергии, которая учитывает реакцию энергетических узлов на тепловую и электрическую нагрузки. Таким образом, многократно увеличивается срок службы энергетического узла и параллельно производится диагностика его систем.

Авторы ввели термин «гибкость энергетических узлов», взятый из энергоменеджмента, и преобразовали его в элемент программного модуля системы управления Energy Hub. В итоге этот элемент использует оператор распределительной системы (DSO) для взаимодействия с частью энергетического узла, ответственной за концентрацию энергии. Таким образом, сформированная интеллектуальная система управления является рекурсивной двухуровневой с выставленными тепловыми ограничениями. В результате моделирования работы такого Energy Hub пиковые нагрузки энергоузлов снизились на 29 %, а эксплуатационные расходы – на 14 %.

## **Выводы**

Рассмотренные процессы происходят и в других сферах. Использование современных решений с применением интеллектуальных систем позволяет создавать совершенно новые продукты, решать прикладные задачи, недоступные ранее. Одна из таких сфер представлена в области рыбоводства [23, 24].

Работы, подвергнутые анализу, показали прежде всего высокий интерес научного общества к интеграции и усовершенствованию имеющихся цифровых технологий, которые связаны с моделированием и прогнозированием развития систем теплоснабжения. Из этого мы можем сделать вывод о том, что подобные технологии будут только совершенствоваться и предположительно обозначат следующие векторы развития:

1. Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения и отопления.
2. Создание новых или корректировка уже существующих методов расчета и проектирования систем теплогазоснабжения и отопления.
3. Решение технологических вопросов, которые затрагивают область взаимодействия технических систем и цифровых технологий в теплогазоснабжении.
4. Развитие эффективных методов расчета систем теплоснабжения, а также способов сбора данных о работе перечисленных систем в режиме реального времени.

Подобные векторы не могут эффективно развиваться без проведения экспериментальных исследований систем теплоснабжения в лабораторных условиях, которые в дальнейшем будут перенесены и апробированы на производстве [25].

Можно сделать вывод, что прежде всего научные коллективы, связанные с исследованием и разработкой новых технических устройств для сетей теплоснабжения, пытаются значительно увеличить степень их цифровизации, параллельно увеличивая поток получаемых данных от сети.

Аналитика данных, которые получены с интересных для научных коллективов элементов сетей теплоснабжения, приводит к получению эффективных технических решений. Таким образом, можно предположить, что отвечающие современным запросам измерительно-вычислительные комплексы для диагностики внутренних процессов наружных сетей теплоснабжения должны базироваться прежде всего на методах большого анализа данных, компьютерного зрения и имитационного моделирования.

Для того чтобы выбрать наиболее подходящий для Российской Федерации способ, который бы при этом учитывал климатические особенности, описанные свойства для измерительно-вычислительного комплекса, и рассмотреть применение алгоритмов нейронных сетей, необходимо создать инженерную онтологию по важным для анализа объектам, по-



сколькo главная особенность инженерных онтологий как продукта системной инженерии заключается в создании формального языка описания элементов системы, позволяющей исправить ошибки в создаваемой системе еще на стадиях ее определения.

## **Библиографический список**

1. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Политова Т.О. Измерительно-диагностический комплекс для определения расположения скрытых трубопроводов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 3–4. – С. 138–141.
2. Кузнецов Р.С. Средства мониторинга, управления и диагностики систем автоматического погодного регулирования теплоснабжения // НиКа. 2016. – С. 16–21.
3. Сазонова С.А., Сушко Е.А. Разработка методов и алгоритмов технической диагностики и обеспечение безопасности систем пожаротушения, тепло-, водо-, газоснабжения и промышленных технологических трубопроводов // Современные проблемы гражданской защиты. – 2017. – № 2 (23). – С. 40–46.
4. Виброакустический способ и диагностический комплекс для определения дефектов трубопроводов с использованием нейронной сети / Ю.Я. Петрушенко, Ю.В. Ваньков, Ш.Г. Зиганшин, В.Н. Тырышкин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2009. – № 9–10. – С. 1–5.
5. Ахваев А.А., Шуршев В.Ф. Применение машинного обучения в прогнозировании предаварийных ситуаций в системах теплоснабжения // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 3. – С. 74–80.
6. Challenges in heat network design optimization / P. Egberts, C. Tümer, K. Loh, R. Octaviano // Energy. – 2020. – Vol. 203, 117688. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117688
7. 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. – Vol. 68. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089
8. CEESA 100 % renewable energy transport scenarios towards 2050 / B.V. Mathiesen, D. Connolly, H. Lund, M.P. Nielsen, E. Schaltz, H. Wenzel [et al.]. – 2013. – P. 120–123.
9. Coherent Energy and Environmental System Analysis (CEESA) / H. Lund, F. Hvelplund, B.V. Mathiesen, P.A. Østergaard, P. Christensen, D. Connolly [et al.]. – November, 2011. – P. 1–88.
10. A renewable energy scenario for Aalborg municipality based on low-temperature geothermal heat, wind power and biomass / P.A. Østergaard, B.V. Mathiesen, B. Möller, H. Lund // Energy. – 2010. – Vol. 35, No. 12. – P. 4892–4901. DOI: 10.1016/j.energy.2010.08.041
11. Østergaard P.A., Lund H. A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88, No. 2. – P. 479–487. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.03.018
12. Lund H., Energiplan M.B.I. 2030-Tekniske energisystemanalyser, samfundsøkonomisk konsekvensvurdering og kvantificering af erhvervspotentialer // Baggrundsrapport (Danish Society of Engineers' Energy Plan 2030). – 2006. – P. 1–88.
13. Lund H. Renewable energy strategies for sustainable development // Energy. – 2007. – Vol. 32, No. 6. – P. 912–919. DOI: 10.1016/j.energy.2006.10.017
14. Ericsson K., Nilsson L.J. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach // Biomass and Bioenergy. – 2006. – Vol. 30, No. 1. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.09.001

15. Gebremedhin A. Optimal utilisation of heat demand in district heating system—a case study // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 30. – P. 230–236. DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.009
16. Morandin M., Hackl R., Harvey S. Economic feasibility of district heating delivery from industrial excess heat: a case study of a Swedish petrochemical cluster // *Energy*. – 2014. – Vol. 65. – P. 209–220. DOI: 10.1016/j.energy.2013.11.064
17. Nielsen S., Möller B. GIS based analysis of future district heating potential in Denmark // *Energy*. – 2013. – Vol. 57. – P. 458–468. DOI: 10.1016/j.energy.2013.05.041
18. GIS-based assessment of the district heating potential in the USA / H.C. Gils, J. Cofala, F. Wagner, W. Schöpp // *Energy*. – 2013. – Vol. 58. – P. 318–329. DOI: 10.1016/j.energy.2013.06.028
19. Demand response algorithms for smart-grid ready residential buildings using machine learning models / F. Pallonetto, M. Rosa, F. Milano, D.P. Finn // *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 239. – P. 1265–1282. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.020
20. Tang R., Wang S., Xu L. An MPC-Based Optimal Control Strategy of Active Thermal Storage in Commercial Buildings during Fast Demand Response Events in Smart Grids // *Energy Procedia*. – 2019. – Vol. 158. – P. 2506–2511. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.395
21. Wang Y., Xu Y., Tang Y. Distributed aggregation control of grid-interactive smart buildings for power system frequency support // *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 251. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113371
22. Davatgaran V., Saniei M., Mortazavi S. Smart distribution system management considering electrical and thermal demand response of energy hubs // *Energy*. – 2019. – Vol. 169. – P. 38–49. DOI: 10.1016/j.energy.2018.12.005
23. Petrov A., Popov A. Application of computer vision technology in the development of ultrasonic repeller // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 164. – P. 2–8. DOI: 10.1051/e3sconf/202016406013
24. Petrov A., Popov A. Overview of the application of computer vision technology in fish farming // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 175. – P. 1–11. DOI: 10.1051/e3sconf/202017502015
25. Petrov A., Popov A., Molotok A. Development of a laboratory installation of a digital measuring system for visualization of internal pipeline processes // *Journal of Physics CS*. – 2020. – Vol. 1614. – P. 2–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012036

## References

1. Gaponenko S.O., Kondrat'ev A.E., Politova T.O. Izmeritel'no–diagnosticheskij kompleks dlya opredeleniya raspolozheniya skrytyh truboprovodov // *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2013. № 3–4.
2. Kuznecov R.S. Sredstva monitoringa, upravleniya i diagnostiki sistem avtomaticheskogo pogodnogo regulirovaniya teplosnabzheniya // *NiKa*. 2016.
3. Sazonova S.A., Sushko E.A. Razrabotka metodov i algoritmov tekhnicheskoy diagnostiki i obespechenie bezopasnosti sistem pozharotusheniya, teplo-, vodo-, gazosnabzheniya i promyshlennyh tekhnologicheskikh truboprovodov // *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2017. № 2 (23).

4. Petrushenko YU.YA., Van'kov YU.V., Ziganshin SH.G., Tyryshkin V.N. Vibroakusticheskij sposob i diagnosticheskij kompleks dlya opredeleniya defektov truboprovodov s ispol'zovaniem nejronnoj seti // *Izvestiya VUZov. Problemy energetiki*. 2009. № 9-10.
5. Ahvaev A.A., SHurshev V.F. Primenenie mashinnogo obucheniya v prognozirovanii predavarijnyh situacij v sistemah teplosnabzheniya // *Vestnik AGTU. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2020. № 3.
6. Egberts P., Tümer C., Loh K., Octaviano R., Challenges in heat network design optimization // *Energy*. –2020. – V. 203, 117688. doi: 10.1016/j.energy.2020.117688.
7. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems // *Energy*. – 2014. – V. 68, pp. 1-11. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
8. Mathiesen B.V., Connolly D., Lund H., Nielsen M.P., Schaltz E., Wenzel H., et al. CEESA 100 % renewable energy transport scenarios towards 2050 (2013).
9. Lund H., Hvelplund F., Mathiesen B.V., Østergaard P.A., Christensen P., Connolly D., et al. Coherent Energy and Environmental System Analysis (CEESA), November, 2011.
10. Østergaard P. A., Mathiesen B.V., Möller B., Lund H. A renewable energy scenario for Aalborg municipality based on low-temperature geothermal heat, wind power and biomass // *Energy*. – 2010. – V. 35, No. 12. – pp. 4892-4901. doi: 10.1016/j.energy.2010.08.041.
11. Østergaard P.A., Lund H. A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating // *Applied Energy*. – 2011. – V. 88, No. 2. – pp. 479-487. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.03.018.
12. Lund H., Energiplan M. B. I. 2030-Tekniske energisystemanalyser, samfundsøkonomisk konsekvensvurdering og kvantificering af erhvervspotentialer // *Baggrundsrapport (Danish Society of Engineers' Energy Plan 2030)*. – 2006. – pp. 1-84. ISBN: 87-87254-63-8.
13. Lund H. Renewable energy strategies for sustainable development // *Energy*. – 2007. – V. 32, No. 6. – pp. 912-919. doi: 10.1016/j.energy.2006.10.017.
14. Ericsson K., Nilsson L.J. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach // *Biomass and Bioenergy*. – 2006. – V. 30, No. 1. – pp. 1-15. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.09.001.
15. Gebremedhin A. Optimal utilisation of heat demand in district heating system—a case study // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 30. – pp. 230-236. DOI: 10.1016/j.rser.2013.10.009.
16. Morandin M., Hackl R., Harvey S. Economic feasibility of district heating delivery from industrial excess heat: a case study of a Swedish petrochemical cluster // *Energy*. – 2014. – V. 65. – pp. 209-220. doi: 10.1016/j.energy.2013.11.064.
17. Nielsen S., Möller B. GIS based analysis of future district heating potential in Denmark // *Energy*. – 2013. V. 57. – pp. 458-468. doi: 10.1016/j.energy.2013.05.041.
18. Gils H.C., Cofala J., Wagner F., Schöpp W. GIS-based assessment of the district heating potential in the USA // *Energy*. – 2013. – V. 58. – pp. 318-329. DOI: 10.1016/j.energy.2013.06.028.
19. Pallonetto F., Rosa M., Milano F., Finn D. P. Demand response algorithms for smart-grid ready residential buildings using machine learning models // *Applied Energy*. – 2019. – V. 239. – pp. 1265-1282. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.02.020.

20. Tang R., Wang S., Xu L. An MPC-Based Optimal Control Strategy of Active Thermal Storage in Commercial Buildings during Fast Demand Response Events in Smart Grids // *Energy Procedia*. – 2019. – V. 158. – pp. 2506-2511. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.395.
21. Wang Y., Xu Y., Tang Y. // Distributed aggregation control of grid-interactive smart buildings for power system frequency support // *Applied Energy*. – 2019. – V. 251. – pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113371.
22. Davatgaran V., Saniei M., Mortazavi S. Smart distribution system management considering electrical and thermal demand response of energy hubs // *Energy*. – 2019. – V. 169. – pp. 38-49. doi: 10.1016/j.energy.2018.12.005.
23. Petrov A., Popov A. Application of computer vision technology in the development of ultrasonic repeller // *E3S Web of Conferences*. – 2020. V. 164. – pp. 1-11. DOI: 10.1051/e3sconf/202016406013.
24. Petrov A., Popov A. Overview of the application of computer vision technology in fish farming // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – V. 175. – pp. 1-9. DOI: 10.1051/e3sconf/202017502015.
25. Petrov A., Popov A., Molotok A. Development of a laboratory installation of a digital measuring system for visualization of internal pipeline processes // *Journal of Physics CS*. – 2020. – V. 1614. – pp. 2-5. doi: 10.1088/1742-6596/1614/1/012036.