

Method of Diagnostics of Operation Modes of Individual Heat Supply Units, Allowing to Detect Pre-Emergency Situations at an Early Stage

Dvortsevov A.I., Borush O.V., Khoreva V.A., Yakovina I.N.

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The use of machine learning methods to control heat supply systems is a pressing issue worldwide. The aim of the work is to develop methods for intellectualizing the operating modes of individual heat supply units (IHU) to improve their efficiency and reliability. To achieve this goal, the following tasks were solved: creating and debugging methods for diagnosing IH operating modes; using the cluster analysis method, in particular the K-means algorithm, to identify pre-emergency situations at an early stage; analyzing the relationship between outdoor air temperature data and the pressures of direct and return network water in IHU operating modes using Novosibirsk as an example. The most important results of the work include dividing the measured parameters into five clusters, each of which characterizes a certain IHS operating mode. This was confirmed by the "Elbow Method", which determined the optimal number, which made it possible to significantly improve the forecasting of emergency modes. Studies have shown that a sharp increase in outdoor temperature leads to an increase in the pressure of direct network water, which can cause accelerated wear of heating networks due to the peculiarities of weather-dependent automation regulation. Introducing additional parameters into the initial data, such as the service life of heating networks and weather conditions, can improve the accuracy of forecasts. The significance of the obtained results lies in the possibility of early detection of emergency and pre-emergency modes of IHU operation, which helps prevent accidents and reduce repair and maintenance costs.

Keywords: heat supply unit, cluster analysis, intellectualization, heat supply, heating networks, weather-dependent regulation, emergence mode.

UDC: 697.34

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.4-64.03>

Metode de diagnosticare a modurilor de funcționare ale punctelor de încălzire individuale, permițând identificarea situațiilor de pre-urgență într-un stadiu incipient

Dvortsevov A.I., Borush O.V., Horeva V.A., Iacovina I.N.

Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk, Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Articolul discută problemele furnizării de căldură în Novosibirsk și modalități de a le rezolva folosind tehnologii moderne și sisteme de control digital. Sunt descrise deficiențele sistemului de alimentare cu căldură existent, cum ar fi fiabilitatea scăzută, echipamentele învechite, investițiile insuficiente și problemele cu izolarea termică a clădirilor. Sunt date exemple de modernizare a sistemelor de alimentare cu căldură, inclusiv înlocuirea echipamentelor, izolarea termică îmbunătățită și introducerea punctelor de încălzire individuale. Se arată că utilizarea diferitelor metode de modelare a rețelelor neuronale în sistemele de alimentare cu căldură este o sarcină presantă atât în Rusia, cât și în industria globală a energiei termice. Scopul studiului este de a dezvolta metode de intelectualizare a modurilor de funcționare ale punctelor de încălzire individuale. Autorii propun să utilizeze analiza cluster cu algoritmul K-means pentru a diagnostica modurile de funcționare ale rețelei de încălzire pentru a identifica situațiile de pre-urgență într-un stadiu incipient. Ca obiect al studiului, au fost selectate trei puncte de încălzire individuale dependente de vreme, care sunt situate la unitățile municipale din Novosibirsk, în acele zone ale orașului în care a avut loc o ruptură a conductei rețelei de încălzire în iarna anului 2024. Semnificația rezultatelor obținute constă în posibilitatea detectării precoce a modurilor de urgență și pre-urgență ale funcționării punctelor de încălzire individuale, ceea ce ajută la prevenirea accidentelor și la reducerea costurilor de reparații și întreținere.

Cuvinte-cheie: punct termic, analiza cluster, intelectualizare, alimentare cu căldură, rețele de căldură, reglare regimului termic al clădirilor, regim de urgență.

© Дворцевой А.И., Боруш О.В.,
Хорева В.А., Яковина И.Н., 2024

Метод диагностики режимов работы индивидуальных тепловых пунктов, позволяющий выявлять предаварийные ситуации на ранней стадии

Дворцовой А.И., Боруш О.В., Хорева В.А., Яковина И.Н.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Применение методов машинного обучения для управления системами теплоснабжения – актуальная задача во всем мире. Целью работы является разработка методов интеллектуализации режимов работы индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) для повышения их эффективности и надежности. Для достижения этой цели были решены следующие задачи: создание и отладка методов диагностики режимов работы ИТП; применение метода кластерного анализа, в частности алгоритма K-средних, для выявления предаварийных ситуаций на ранней стадии; анализ взаимосвязи данных температур наружного воздуха и давлений прямой и обратной сетевой воды в режимах работы ИТП на примере Новосибирска. Наиболее важные результаты работы включают разделение измеренных параметров на пять кластеров, каждый из которых характеризует определённый режим работы ИТП. Это было подтверждено «Методом локтя», который определил оптимальное число кластеров, что позволило значительно улучшить прогнозирование аварийных режимов. Исследования показали, что резкое повышение температуры наружного воздуха приводит к увеличению давления прямой сетевой воды, что может вызвать ускоренный износ теплосетей, из-за особенностей регулирования систем автоматизации, учитывающих изменения погоды. Введение в исходные данные дополнительных параметров, например, срок службы тепловых сетей и погодные условия, может повысить точность прогнозов. Значимость полученных результатов заключается в возможности раннего обнаружения аварийных и предаварийных режимов работы ИТП, что позволяет предотвращать аварии и снижать затраты на ремонт и обслуживание. Оптимизация режимов работы ИТП на основе машинного обучения не только способствует снижению потерь энергии, но и обеспечивает более точное прогнозирование потребления тепла и его распределения. Таким образом, предложенный подход и метод могут быть полезны для дальнейшего улучшения и автоматизации систем теплоснабжения в различных регионах.

Ключевые слова: тепловой пункт, кластерный анализ, интеллектуализация, теплоснабжение, тепловые сети, погодозависимое регулирование, аварийный режим.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение современных технологий и цифровых систем управления для улучшения эффективности, надежности и удобства управления системами отопления и горячего водоснабжения – актуальная задача развития систем теплоснабжения, как в России, так и во всем мире [1-3].

В крупных городах Сибири существует ряд проблем: недостаточная надежность системы теплоснабжения, которая приводит к частым отключениям горячей воды и отопления в зимнее время; устаревшее оборудование и инфраструктура способствуют потерям тепловой энергии; недостаточные инвестиции в развитие и модернизацию системы теплоснабжения; проблемы с отоплением в многоквартирных домах из-за неэффективной теплоизоляции и недостаточной регулировки отопительных систем [1, 4].

Для решения этих проблем необходимо провести комплексную модернизацию системы теплоснабжения, в том числе заменить устаревшее оборудование, улучшить теплоизоляцию зданий, снизить уровень потерь энергии и повысить эффективность работы системы. Одним из

вариантов решения проблемы неравномерного распределения тепла является внедрение индивидуальных тепловых пунктов (ИТП), позволяющих регулировать температуру теплоносителя в каждом отдельном помещении и обеспечивающих равномерное распределение тепла по всему зданию. Кроме того, возможность индивидуального контроля температуры в каждом помещении позволяет уменьшить потери тепла через неотапливаемые зоны или через неиспользуемые помещения. Еще одним преимуществом тепловых пунктов является мониторинг и управление системой отдельно для каждого помещения, что позволяет снижать затраты на обслуживание и ремонт оборудования [5-7]. Однако развитие систем управления ИТП без согласованной их работы с ТЭЦ или котельными – может привести к аварийным режимам работы теплосетей, снижению эффективности выработки и транспортировки тепловой энергии [3, 7-10].

Для анализа данных, оптимизации работы систем отопления и поставки тепла могут быть использованы интеллектуальные тепловые сети. Эти сети могут предсказывать

потребление тепла, оптимизировать распределение тепла между различными потребителями, улучшать энергоэффективность системы и уменьшать расходы на тепло [3, 10-13]. Такие интеллектуальные системы дают возможность более точно настраивать работу тепловых сетей в реальном времени и управлять ими удаленно через централизованную платформу. Точное прогнозирование поведения систем централизованного теплоснабжения имеет решающее значение для повышения энергоэффективности [6, 10, 12-14].

В работе [15] описан новый метод системы регулирования давления теплоносителя в сети с применением систем автоматизации и информационных технологий, включая ГИС, SCADA, облачный сервис и удаленное управление. Авторы предлагают использовать в системе насосы с регулируемой скоростью, внедрение которых позволит избежать гидравлических колебаний теплоносителя в сети, снизить диаметр труб тепловых сетей и энергетические затраты на транспортировку теплоносителя. В ходе исследований принят ряд допущений, требующих дальнейшей проработки и экономического обоснования предлагаемых решений. Проблема развития и модернизации централизованных систем теплоснабжения (ЦСТ) актуальна во всем мире. В Дании, Швеции, Китае, Португалии, Италии и других странах проведен ряд исследований [14-20, 22-25], свидетельствующий о том, что необходимо модернизировать централизованное теплоснабжение и осуществлять переход к системам нового поколения [3, 16, 18, 20], которые позволят снизить рабочие температуры теплоносителя, минимизировать потери тепла, продлить срок службы тепловых сетей и эффективно использовать различные источники энергии, способствующие декарбонизации энергопотребления. Так, например, в Дании, Швеции и Италии предлагается развивать ЦСТ за счет увеличения доли возобновляемых энергоресурсов и низкотемпературных систем теплоснабжения, утилизации теплоты производства, совершенствования критериев оценки параметров энергосбережения отапливаемых зданий [14, 15, 20, 26]. Одним из перспективных направлений развития

теплоснабжения в России [27] рассматривается вариант увеличения доли мини-ТЭЦ на базе когенерационных установок малой мощности, внедрение которых в населенных пунктах с небольшой численностью населения позволит повысить энергоэффективность, бесперебойность энергоснабжения потребителей. Применение различных методов интеллектуализации для оптимизации параметров, регулирования нагрузки теплоснабжения и т.п. представлено в работах [9, 10, 21, 22, 28-31]. Так, например, в [21, 22] авторы предлагают для решения проблемы гидравлического дисбаланса трубопроводной системы теплоснабжения использовать метод распределенной оптимизации на основе алгоритма интеллекта насекомых, что позволит быстрее и эффективнее по сравнению с традиционным централизованным алгоритмом решать проблему минимизации энергопотребления системы. Исследования Li Z., Luo Z., Zhang N. и др. [9] показали, что применение модели XGBoost с 72 шагами ввода и 24 шагами прогнозирования для определения стратегии управления клапанами теплового пункта в зависимости от температуры подачи вторичного контура позволит повысить точность управления тепловым пунктом и снизить зависимость от решений оператора вручную. В [10] исследования направлены на изучение гидравлического режима внутри первичного контура тепловой сети на основе метода распределенных параметров, объединенного с алгоритмом оптимизации роя частиц. В работе [28] авторы использовали регрессионный анализ с данными временных рядов или методы комбинирования нескольких моделей для повышения точности прогнозирования и предложили многошаговую структуру прогнозирования нагрузки тепловых сетей. Различные архитектуры искусственных нейронных сетей для прогнозирования тепловой нагрузки на отопление исследованы в [29], для анализа тепловых режимов теплообменных аппаратов систем теплоснабжения в [30], для практических задач прогнозирования аварий систем солнечного теплоснабжения в [31]. Результаты исследований показывают, что необходимо дополнять и расширять существующие методы. Учитывая вышеизложенное, целью статьи является адаптация существующих методов для

интеллектуализации режимов работы индивидуальных тепловых пунктов.

Новизна работы заключается в разработке метода диагностики режимов работы индивидуальных тепловых пунктов для выявления предаварийных ситуаций на ранней стадии.

МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Развитие современной энергетики предполагает переход к интеллектуальным энергетическим системам в теплоснабжении с плавной интеграцией в них сетей централизованного теплоснабжения и полной автоматизации теплопотребляющих установок. Такой переход неизбежно связан с развитием новых технологий и подходов к регулированию тепловой нагрузки теплофикационных систем.

К применяемым на данный момент способам регулирования относятся [8, 32, 34, 35]:

- регулирование от элеватора (с неизменяемым коэффициентом смешивания);
- прямое погодозависимое регулирование в системе отопления от центрального теплового пункта требует менять коэффициент подмеса при постоянном расходе теплоносителя через систему отопления;
- узел учета тепла;
- индивидуальный тепловой пункт («зависимая» и «независимая» схема присоединения к тепловой сети).

Отпуск теплоты на отопление регулируется тремя методами: качественным, количественным, качественно-количественным [32].

При качественном методе изменяют температуру воды, подаваемую в тепловую сеть (систему отопления) при неизменном расходе теплоносителя.

При количественном изменяют расход теплоносителя при неизменной температуре.

При качественно-количественном одновременно изменяют температуру и расход теплоносителя.

Комбинированное регулирование состоит из нескольких ступеней, взаимно дополняющих друг друга, создаёт наиболее полное соответствие между отпуском тепла и фактическим теплопотреблением [32, 33, 36].

Центральное регулирование выполняют на ТЭЦ или котельной по преобладающей нагрузке, характерной для большинства абонентов.

В городских тепловых сетях такой нагрузкой может быть отопление или совместная нагрузка на отопление и горячее водоснабжение. На ряде технологических предприятий преобладающим является технологическое теплопотребление.

Групповое регулирование производится в центральных тепловых пунктах для группы однородных потребителей. В центральном тепловом пункте (ЦТП) поддерживаются требуемые расход и температура теплоносителя, поступающего в распределительные или во внутриквартальные сети.

Местное регулирование предусматривается на абонентском вводе для дополнительной корректировки параметров теплоносителя с учетом местных факторов.

Индивидуальное регулирование осуществляется непосредственно у теплопотребляющих приборов, например, у нагревательных приборов систем отопления, и дополняет другие виды регулирования.

Тепловая нагрузка многочисленных абонентов современных систем теплоснабжения неоднородна не только по характеру теплопотребления, но и по параметрам теплоносителя. Поэтому центральное регулирование отпуска тепла дополняется групповым, местным и индивидуальным, т.е. осуществляется комбинированное регулирование.

Прерывистое регулирование достигается периодическим отключением систем, т.е. пропусками подачи теплоносителя, в связи с чем, этот метод называется регулирование пропусками. Центральные пропуски возможны лишь в тепловых сетях с однородным потреблением, допускающим одновременные перерывы в подаче тепла. В современных системах теплоснабжения с разнородной тепловой нагрузкой регулирование пропусками используется для местного регулирования.

Выделяют четыре поколения технологий сетей централизованного теплоснабжения. Системы первого и второго поколения в основном созданы до 1980 года и в них циркулирует пар или вода под давлением при температуре более 100 °С. Большинство современных систем относятся к третьему

поколению, в них циркулирует вода при температуре от средней до высокой (80...100 °С), поэтому их называют высокотемпературными сетями централизованного теплоснабжения. Новые системы четвертого поколения, также называемые сетями централизованного теплоснабжения низкой температуры, передают воду температурой от 30 до 70 °С [3]. Согласно [3, 16, 23, 37], в будущем, тепловые сети могут использовать распределительные сети четвертого и пятого поколения со среднегодовой температурой распределения 50 °С прямой сетевой воды и 20 °С обратной сетевой воды для четвертого поколения; для пятого поколения температура теплоносителя составит ниже 25 °С.

Таким образом, использование машинного обучения помогает повысить эффективность тепловых систем за счет точного прогнозирования потребностей, оптимизации работы оборудования и управления распределением тепла, что в свою очередь улучшает общую энергоэффективность зданий и сетей.

Алгоритмы машинного обучения в значительной степени полагаются на высококачественные и обильные данные для точных прогнозов. В некоторых случаях получение всесторонних и надежных данных для обучения может быть сложной задачей, что приводит к потенциальным неточностям в прогнозах. Эффективность алгоритмов машинного обучения может сильно зависеть от выбора и качества входных признаков. Выбор релевантных и информативных признаков имеет решающее значение, а неправильный выбор признаков может привести к неоптимальным прогнозам [38, 29]. Более того, текущий выбор размера шага прогнозирования в первую очередь опирается на ручной опыт для приблизительного выбора или выбора модели с наивысшей точностью из нескольких итераций обучения для прямого использования. Эта практика в некоторой степени влияет на точность прогнозирования.

С каждого индивидуального теплового пункта измеренные параметры передаются на центральный сервер и сохраняются в базе данных. Центральный сервер обеспечивает доступ к историческим данным для сторонних приложений через программный интерфейс API.

Это позволяет использовать данные, собранные со всех ИТП, для различных целей, таких как мониторинг энергопотребления, анализ эффективности системы отопления или создание отчетов, уведомлений о нештатных ситуациях.

Структурная схема передачи данных от индивидуального теплового пункта на центральный сервер представлена на рисунке 1.

ПРИМЕР

В вычислительном центре Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) расположен API сервис, который предоставляет данные с объектов ИТП. Методы API сервиса позволяют получить информацию об объектах в виде массива в формате JSON.

Сбор данных с индивидуальных тепловых пунктов на центральный сервер организован в городе Новосибирске. Передаются следующие параметры: давление прямой и обратной сетевой воды, температура прямой и обратной сетевой воды, температура смеси прямой и обратной сетевой воды, степень открытия регулирующего клапана (РК). Регистрация данных выполняется с частотой 5 минут с 15 объектов г. Новосибирска.

В январе 2024 года в Новосибирске произошли коммунальные аварии на теплосетях в Ленинском и Кировском районах. Это привело к временному отключению от теплоснабжения и горячего водоснабжения. Подача теплоснабжения была ограничена более чем в 2,4 тыс. многоквартирных домах.

В таблице 1 приведена базовая статистика исходного набора данных, который был сформирован в период с 05.01.2024 00:00 по 11.01.2024 18:00 с частотой 5 минут.

Для более удобного отображения данных в таблице 1 применены следующие обозначения используемых параметров: П1 – давление прямой сетевой воды ИТП-1, МПа; П2 – давление прямой сетевой воды ИТП-2, МПа; П3 – давление прямой сетевой воды ИТП-3, МПа; П4 – температура наружного воздуха, °С.

На рисунке 2 представлен характер изменения давлений прямой сетевой воды и температуры наружного воздуха трех индивидуальных тепловых пунктов, попавших в зону аварии.

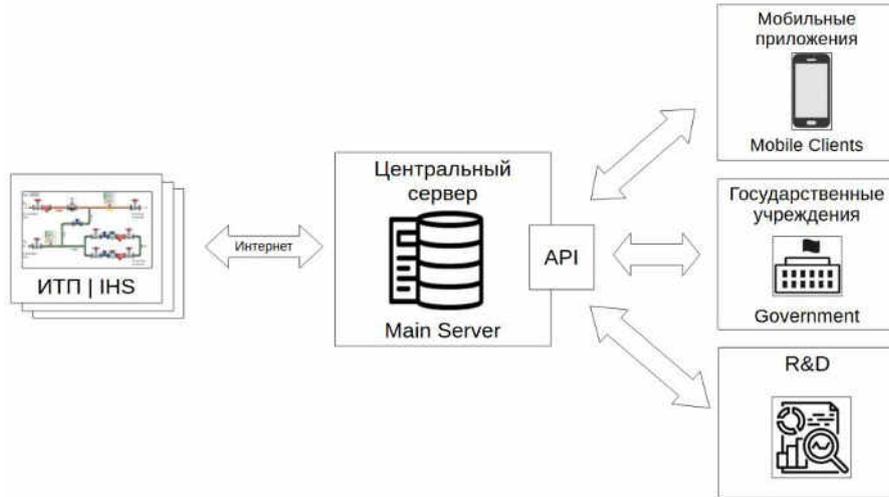


Рис. 1. Структурная схема системы передачи данных. ¹

Таблица 1 ²

Базовая статистика исходного набора данных ³

	П1 / P1	П2 / P2	П3 / P3	П4 / P4
Количество точек / count	1944			
Среднее значение/mean	0.529	0.042	0.332	-1.004
Среднеквадратическое отклонение / std	0.161	0.013	0.088	0.604
min	0.002	-0.004	0.001	-2.086
max	0.621	0.049	0.401	0.089

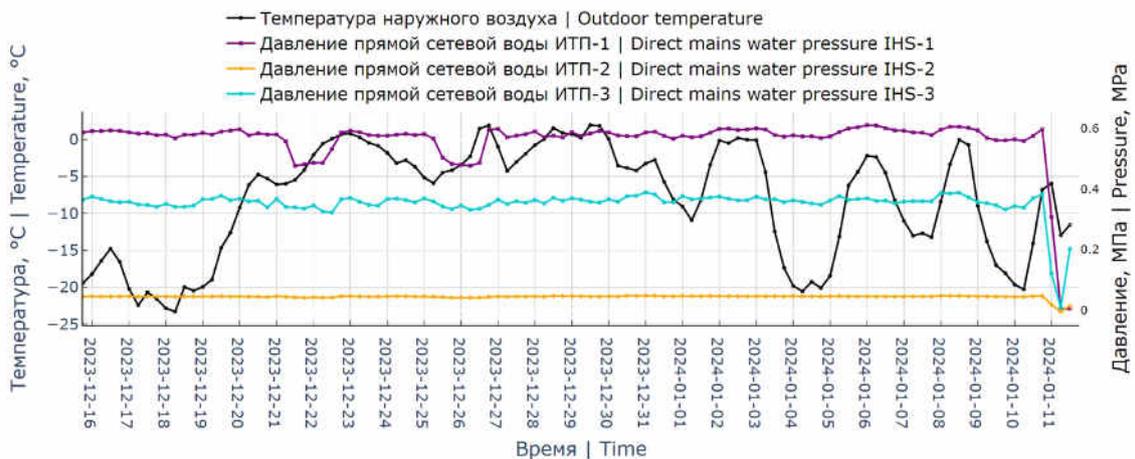


Рис. 2. График изменения прямой сетевой воды трех погодозависимых ИТП. ⁴

Для дальнейшего анализа абсолютные значения были переведены в относительные показатели в диапазоне от 0 до 1. Относительный показатель представляет собой результат деления одного абсолютного показателя на другой и выражает

соотношение между количественными характеристиками процессов. Перевод в относительные показатели выполнен по следующей формуле [39]:

$$X_{scaled} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

где:

- X_{scaled} – относительный показатель;
- X – исходное значение;
- X_{min} – минимальное значение в диапазоне;
- X_{max} – максимальное значение в диапазоне.

Перевод в относительные показатели проведен для наглядного выявления изменений давления на графике с течением времени. При построении зависимостей в абсолютных единицах изменение давления на ИТП-2 не заметно (Рисунок 2). Однако при построении этих же зависимостей в относительных показателях уже позволяет видеть, что давление на ИТП-2 значительно изменяется с течением времени (Рисунок 3).

Из рисунка 3 видно, каким образом изменялось давление прямой сетевой воды для трех погодозависимых индивидуальных тепловых пунктов. Причем после 08.01.2024 резкое повышение температуры наружного воздуха в вечернее время приводило к повышению давления прямой сетевой воды сразу в трех индивидуальных тепловых пунктах, чего в предыдущие периоды не наблюдалось. Одновременное повышение давления в трех территориально распределенных ИТП исключает индивидуальные особенности отдельного взятого ИТП.

Повышение давления прямой сетевой воды может быть вызвано особенностями регулирования погодозависимых индивидуальных тепловых пунктов. При резком повышении температуры окружающей среды, погодозависимая автоматика ИТП быстро реагирует, прикрывая регулирующие клапаны. В то время как насосы центральных тепловых пунктов продолжают работать с прежней производительностью, что приводит к увеличению давления в магистралях. Если этот процесс происходит циклически при резких изменениях температуры, магистральные сети могут быстрее деградировать из-за несогласованных режимов работы центральных тепловых

пунктов и погодозависимых индивидуальных тепловых пунктов.

Гидравлическая система центральных тепловых пунктов и индивидуальных тепловых пунктов общая, однако, автоматика ИТП и ЦТП не согласована и функционирует независимо друг от друга. Одной из причин ускоренного износа тепловых сетей может быть широкое внедрение погодозависимых индивидуальных тепловых пунктов без согласования режимов работы центральных тепловых пунктов на магистральных сетях.

Одним из способов выявления нештатных режимов работы индивидуальных тепловых пунктов с использованием методов машинного обучения может быть применение кластерного анализа, в частности алгоритма К-средних [40].

Кластерный анализ является статистической процедурой, выполняющей сбор данных, содержащих информацию о выборке объектов, и упорядочивающей объекты в сравнительно однородные группы.

Алгоритм К-средних (или K-means) – это один из наиболее популярных методов кластерного анализа, используемый для разделения набора данных на K кластеров. Основная идея алгоритма заключается в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек от центров (центроидов) их кластеров.

Алгоритм выполняет следующие шаги:

1. Инициализация центроидов.

Случайным образом выбираются K точек в пространстве данных, которые будут начальными центроидами кластеров.

2. Присвоение точек кластерам.

Каждая точка данных присваивается тому кластеру, центроид которого ближе к данной точке. Эту близость можно измерять с помощью различных метрик, но наиболее часто используется Евклидово расстояние.

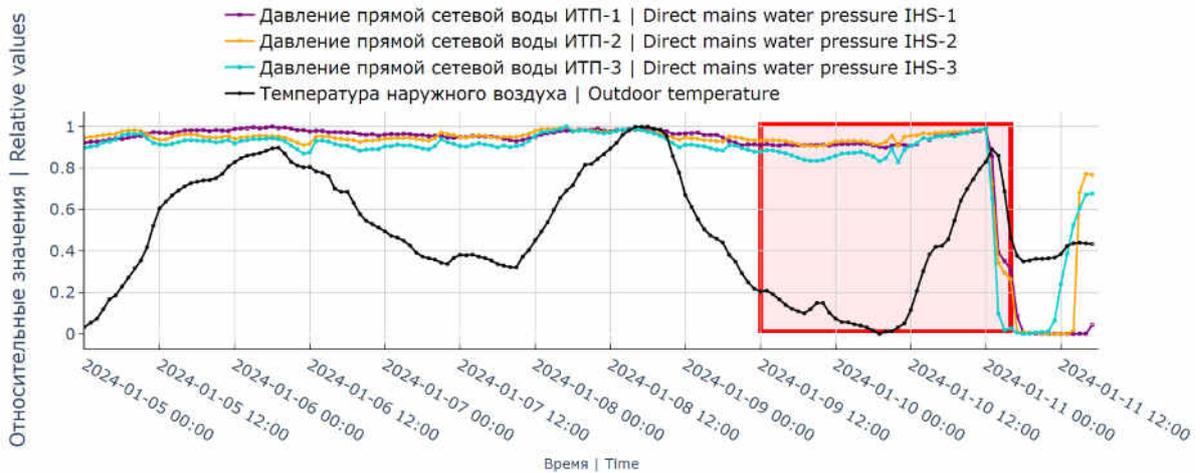
$$C_i = \left\{ x_j \mid \|x_j - \mu_i\|^2 \leq \|x_j - \mu_l\|^2, \forall l, 1 \leq l \leq K \right\} \quad (2)$$

где:

- C_i – кластер;
- x_j – точка данных;
- μ_i – центроид кластера i .



а) весь период



б) предаварийный и аварийный периоды

Рис. 3. Относительные показатели измеряемых параметров. ⁵

3. Обновление центроидов

Для каждого кластера вычисляется новый центроид как среднее всех точек, принадлежащих данному кластеру.

$$\mu_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x_j \in C_i} x_j \quad (3)$$

где:

- μ_i – новый центроид кластера i ;
- C_i – количество точек в кластере i ;
- x_j – точка данных.

Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока центроиды кластеров не перестанут изменяться существенно (определяется сходимостью), или до тех пор, пока не будет достигнуто предварительно заданное количество итераций.

С помощью алгоритма К-средних можно выявить режимы работы для каждого ИТП по измеряемым параметрам, таким как температура наружного воздуха, давление прямой сетевой воды и давление обратной сетевой воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа данных измеренные параметры были разделены на 5 кластеров. Кластерный портрет приведен в таблице 2.

При числе кластеров меньше 5 увеличение числа кластеров приводит к резкому уменьшению количества точек в каждом кластере, как показано на рисунке 4. То есть, меньшее количество кластеров снижает гибкость в выявлении закономерностей. При числе кластеров больше 5 повышается

сложность интерпретации режимов работы. Это говорит о том, что разделение на число кластеров больше 5 не несет в себе никакой дополнительной информации,

способствующей увеличению точности прогноза аварии (Рисунок 4, 5).

Таблица 2 ⁶

Кластерный портрет ⁷

Кластер / Cluster	Давление прямой сетевой воды, МПа / Direct mains water pressure, MPa						Давление обратной сетевой воды, МПа / Return network water pressure, MPa					
	Count	Min	Max	Mean	Median	Std	Count	Min	Max	Mean	Median	Std
1	14.28	0.52	0.61	0.58	0.58	0.012	14.3	0.47	0.53	0.52	0.52	0.008
2	5.57	0.45	0.53	0.48	0.48	0.01	5.57	0.39	0.47	0.41	0.41	0.011
3	1.62	0.002	0.24	0.05	0.004	0.086	1.62	0.007	0.18	0.042	0.007	0.068
4	27.7	0.53	0.62	0.59	0.59	0.013	27.7	0.47	0.53	0.52	0.52	0.007
5	16.3	0.55	0.59	0.58	0.58	0.001	16.3	0.51	0.53	0.52	0.52	0.004
Температура наружного воздуха, °C / Outdoor temperature, °C												
Кластер / Cluster	Count	Min	Max	Mean	Median	Std	<p>Метод локтя Elbow method</p> <p>Сумма квадратов внутрикластерных расстояний WCSS</p> <p>Количество кластеров Number of clusters</p>					
1	141	-13.98	-5.42	-9.29	-9.07	2.77						
2	55	-6.15	1.99	-2.69	-3.32	2.07						
3	16	-13.20	-2.17	-11.15	-12.00	2.97						
4	274	-5.38	2.57	-1.48	-1.10	2.16						
5	161	-24.11	14.40	-19.21	-19.52	2.24						

Рис. 4. Метод локтя. ⁸

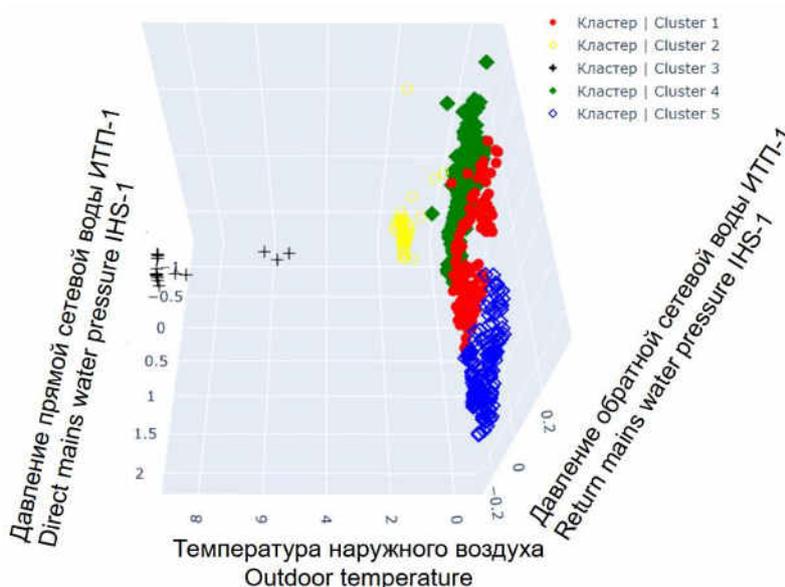


Рис. 5. Разбиение на кластеры в пространстве измеряемых параметров. Значения измеряемых параметров были отцентрированы вокруг среднего значения и масштабированы так, чтобы стандартное отклонение было равно одному. ⁹

Далее значения параметров, соответствующие каждому кластеру, были наложены на график зависимости температуры наружного воздуха, прямой и обратной сетевой воды на ИТП-1 от времени (Рисунок 6).

В соответствии с анализом режима работы ИТП в каждом кластере, дано следующее описание:

Кластер 1. Красные точки.

Этот кластер обозначает работу ИТП в условиях высокого давления прямой сетевой воды (выше 0,5 МПа) и резко меняющейся температуры (более 10°C за 10 часов). Такие условия требуют особого внимания и

контроля, так как оборудование работает в экстремальных режимах.

Кластер 2. Желтые круги

Этот кластер указывает на работу ИТП с пониженным давлением прямой (ниже 0,3 МПа) и обратной сетевой воды (ниже 0,2 МПа). В таких условиях важно следить за режимом работы системы для предотвращения возможных сбоев.

Кластер 3. Черные крестики.

Этот кластер описывает аварийный режим работы ИТП, обусловленный низким давлением (ниже 0,15 МПа). В таких ситуациях необходимо оперативное вмешательство для восстановления нормальной работы системы.

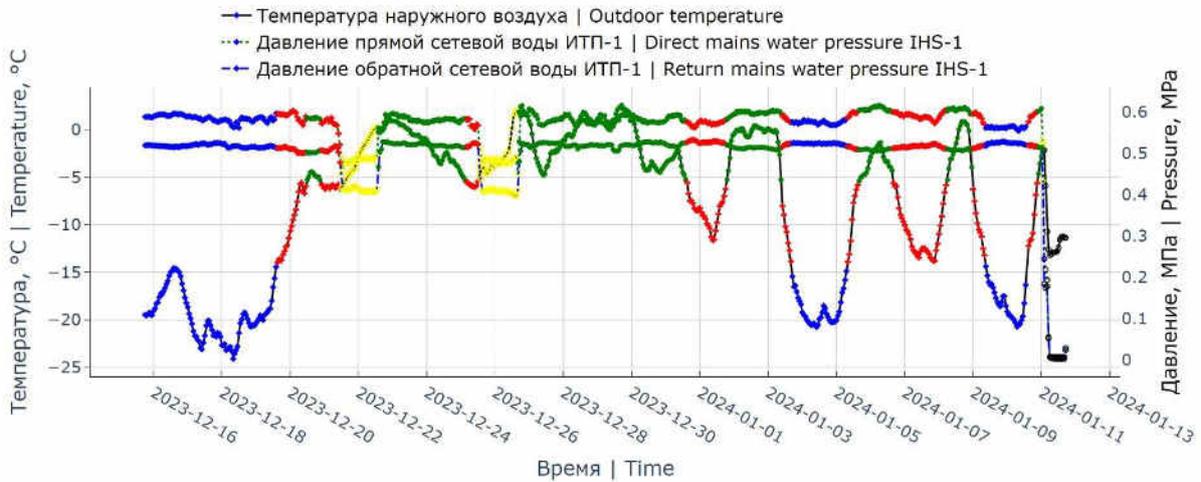


Рис. 6. Разметка измеренных параметров в соответствии с кластерным разбиением. ¹⁰

Кластер 4. Зеленые ромбы.

Этот кластер характеризует штатный режим работы ИТП. Работа системы в этом режиме свидетельствует о стабильном и предсказуемом функционировании оборудования. Давление прямой сетевой воды 0,3-0,5 МПа, давление обратной сетевой воды 0,2-0,4 МПа, температура наружного воздуха в пределах 0°C ± 5 °C.

Кластер 5. Синие ромбы.

Этот кластер обозначает работу ИТП в условиях стабильно высокого давления (давление выше 0,4 МПа) и температуры наружного воздуха ниже -10°C. Данный режим характерен в отопительный сезон, когда системы настроены на обеспечение необходимого уровня тепла.

При работе ИТП в режиме, соответствующем кластеру 1, требуется тщательный контроль. Это связано с

возможностью эксплуатации ИТП в экстремальных условиях. Согласовывая режимы работы ИТП и ЦТП, можно избежать работы в таких условиях, что позволит снизить износ магистральных сетей и повысить надежность системы.

На основании этих наблюдений, каждый кластер соответствует определенному режиму работы ИТП, который определяется температурой наружного воздуха и давлением прямой и обратной сетевой воды. Введение большего количества параметров и признаков позволит более точно характеризовать различные режимы работы ИТП.

Это направление требует дальнейших исследований и анализа, что позволит существенно улучшить эффективность и надежность работы ИТП.

ВЫВОДЫ

Использование метода кластерного анализа позволяет выявить аварийный и предаварийный режим работы, а также анализировать режимы работы, учитывая индивидуальные особенности ИТП, используя исторические данные.

Кластерный анализ позволил определить экстремальный режим работы ИТП (Кластер 1 красного цвета на рис. 6.) при резком изменении температуры наружного воздуха 1 °С в час. Циклическое повторение таких режимов работы могло привести к ускоренной деградации сети, что впоследствии спровоцировало аварию.

Для уточнения режима работы на спорных участках, например, в случае, когда кластерный анализ относит к предаварийному режиму участки графика с повышением температуры наружного воздуха, может потребоваться введение дополнительных исходных данных (срок службы и изношенность тепловых сетей, скорость ветра и т.д.).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы статьи выражают глубокую благодарность Департаменту образования города Новосибирска, инженеринговым компаниям ООО «Экотерм» и ООО «Юнисофт плюс» за поддержку и сотрудничество.

Работа выполнена в рамках программы развития Новосибирского государственного технического университета «Приоритет-2030», проект К-13 «Платформа анализа технологических данных и диагностики оборудования» ОУ-2 «Система трансфера технологий».

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Structural diagram of data transmission.

^{2,3}Table 1. Basic statistics of the original dataset.

⁴Fig. 2. Graph of change in direct network water of three weather-dependent IHS.

⁵Fig. 3. Relative indicators of measured parameters.

^{6,7}Table 2. Cluster portrait.

⁸Fig. 4. Elbow method.

⁹Fig. 5. Clustering of the measured parameter space. The measured parameter values were centered around the mean and scaled so that the standard deviation was equal to one.

¹⁰Fig. 6. C Marking up the measured parameters according to the cluster partitioning.

Литература (References)

- [1] Bojko E.E., Byk F.L., Myshkina L.S., Ilyushin P.V. Effektivnost' teplosnabzheniya municipal'nykh obrazovaniy [Heat Efficiency in Municipalities]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy Industry*, 2023, no.4, pp. 66-78. doi: 10.31857/S0002331023040040. (In Russian).
- [2] Shlapakov V. [Problems of heat supply in the post-reform Russian energy sector]. *Energetika i promyshlennost' Rossii*, 2022, no. 6 (386). (In Russian). Available at: <https://www.eprussia.ru/epr/386/4450194.htm>. (accessed 15.06.2024)
- [3] Boyko E., Byk F., Ilyushin P.V., Myshkina L., Filippov S. Approach to modernizing residential-dominated district heating systems to enhance their flexibility, energy efficiency, and environmental friendliness. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, iss. 22, art. 12133. doi: 10.3390/app132212133.
- [4] Rafalskaya T.A. [Problems of power efficiency of systems of the heat supply according to the current legislation of the Russian Federation]. *Cbornik statey po materialam LV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii «Tehnicheskie nauki – ot teorii k praktike»* [Col. of Art. Based on the Materials of the LV Int. Scient. and Pract. Conf. "Technical sciences – from theory to practice"]. Novosibirsk, 2016, no. 2 (50), pp. 141-151. (In Russian)
- [5] Lissa P., Dean C., Schukat M., Seri F., Kean M., Barrett E. Deep reinforcement learning for home energy management system control. *Energy and AI*, 2021, vol. 3, art. 100043. doi: 10.1016/j.egyai.2020.100043
- [6] Yuan M., Lin X., Zhong W. Model predictive control of distributed adjustable jet pump in district heating system considering renewable energy access. Proc. Int. Conf. "2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)", Chongqing, China, 2023. doi: 10.1109/ICPSAsia58343.2023.10294510
- [7] Sinyukova T.V., Sinyukov A.V. Regulirovanie temperatury individual'nogo teplovogo punkta izmeneniem chastoty vrashheniya asinhronnogo dvigatelya [Regulation of the temperature of an individual heat point by changing the speed of the asynchronous motor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI – Power engineering: research, equipment, technology*, 2021, vol. 23, no 4, pp. 156-165. (In Russian). doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-156-165
- [8] Shkarovskiy A., Kolienko A., Turchenko V. Increasing the efficiency of heat load control in centralized heating networks. *Architecture and*

- Engineering*, 2021, vol. 6, iss. 3, pp. 29-41. doi: 10.23968/2500-0055-2021-6-3-29-41
- [9] Li Z., Luo Z., Zhang N., Lin X., Huang W., Feng E., Zhong W. Investigation of Predictive Regulation Strategy of Secondary Loop in District Heating Systems. *Sustainability*, 2023, vol. 15, art. 3524. doi: 10.3390/su15043524
- [10] Yan J., Zhang H., Wang Y., Zheng L., Gao X., You S. Valve failure detection of the long-distance district heating pipeline by hydraulic oscillation recognition: A numerical approach. *Energy*, 2022, vol. 261, p. A, art. 125291. doi: 10.1016/j.energy.2022.125291
- [11] Siddique M.B., Nielsen P.S., Rosendal M.B., Jensen I.G., Keles D. Impacts of earlier natural gas phase-out & heat-saving policies on district heating and the energy system. *Energy Policy*, 2023, vol. 174, art. 113441. doi: 10.1016/j.enpol.2023.113441
- [12] Che Z., Sun J., Na H., Yuan Y., Qiu Z., Du T. A novel method for intelligent heating: On-demand optimized regulation of hydraulic balance for secondary networks. *Energy*, 2023, vol. 282, art. 128900. doi: 10.1016/j.energy.2023.128900
- [13] Li Z., Zhang J. Data-oriented distributed overall optimization for large-scale HVAC systems with dynamic supply capability and distributed demand response. *Building and Environment*, 2022, vol. 221, art. 109322. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109322
- [14] Monsalves J.J., Bergaentzle C., Keles D. Impacts of flexible-cooling and waste-heat recovery from data centres on energy systems: a Danish case study. *Energy*, 2023, vol. 281, art. 128112. doi: 10.1016/j.energy.2023.128112
- [15] Wang H., Wang H., Zhu T. A new hydraulic regulation method on district heating system with distributed variable-speed pumps. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 147, pp. 174-189. doi: 10.1016/j.enconman.2017.03.059
- [16] Dang L. M., Nguyen L. Q., Nam J., Nguyen T. N., Lee S., Song H.-K., Moon H. Fifth generation district heating and cooling: A comprehensive survey. *Energy Reports*, 2024, vol. 11, pp. 1723-1741. doi: 10.1016/j.egyr.2024.01.037
- [17] Jiana Y., Lia Y., Liua Z., Lib R. Real operation pattern of district heating system and its heating effects. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 121, pp. 1741-1748. doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.146
- [18] Chambers J., Narula K., Sulzer M., Patel M. K. Mapping district heating potential under evolving thermal demand scenarios and technologies: A case study for Switzerland. *Energy*, 2019, vol. 176, pp. 682-692. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.044
- [19] Cunha J.M., Faria A.S., Soares T., Mourão Z., Nereu J. Decarbonization potential of integrating industrial excess heat in a district heating network: The Portuguese case. *Cleaner Energy Systems*, 2022, vol. 1, art. 100005. doi: 10.1016/j.cles.2022.100005
- [20] Testasecca T., Catrini P., Beccali M., Piacentino A. Dynamic simulation of a 4th generation district heating network with the presence of prosumers. *Energy Conversion and Management: X*, 2023, vol. 20, art. 100480. doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100480
- [21] Zhao A., Dong F., Xue X., Xi J., Wei Y. Optimal control for hydraulic balance of secondary network in district heating system under distributed architecture. *Energy and Buildings*, 2023, vol. 290, iss. 3, art. 113030. doi:10.1016/j.enbuild.2023.113030
- [22] Zhao A.-J., Zhang Y., Zhang Y.-P., Dong F.-F. Optimization of hydraulic pipe network control strategy for central heating system based on insect intelligence. *Kongzhi yu Juece/Control and Decision*, 2023, vol. 35, iss.05, art. 10355
- [23] Hepple R., Du H., Feng H., Shan S., Yang S. Sustainability and carbon neutrality in UK's district heating: A review and analysis. *e-Prime - Advances in Electrical, Engineering, Electronics and Energy*, 2023, vol. 4, art. 100133. doi:10.1016/j.prime.2023.100133
- [24] Monsalves J.J., Bergaentzle C., Keles D. Waste-heat recovery utilisation for district heating systems under diverse pricing schemes: a bi-level modelling approach. Preprint, 15 Apr. 2024, P. 32. Available at: <https://ssrn.com/abstract=4795225>. (accessed 17.06.2024)
- [25] Dong W., Dong Y., Sun J., Zhang H., Chen D. Analysis of the internal flow characteristics, pressure pulsations, and radial force of a centrifugal pump under variable working conditions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 47, pp. 397-415. doi: 10.1007/s40997-022-00533-w
- [26] Danielsen B.E., Baxter M.N., Nielsen P.S. An indicator framework for evaluating building renovation potential. *Energies*, 2024, vol. 17, iss. 4, art. 846. doi : 10.3390/en17040846
- [27] Bojko E. E., Byk F. L., Ivanova E. M., Ilyushin P. V. Perspektivy primeneniya teplovykh nakopitelej v kommunal'noj energeticheskoy infrastrukture [Prospects for the use of thermal storage in municipal energy infrastructure]. *Problemy prognozirovaniya – Problems of Forecasting*, 2024, no. 3 (204), pp. 56-65. doi: 10.47711/0868-6351-204-56-65
- [28] Zhang J., Hu Y., Yuan Y., Yuan H., Mei N. Accuracy improvement of the load forecasting in the district heating system by the Informer-based framework with the optimal step size selection. *Energy*, 2024, vol. 291, art. 130347. doi: 10.1016/j.energy.2024.130347
- [29] Guzhov S.V., Barabanov A.O. Prognozirovanie teplovoj nagruzki na otoplenie s ispol'zovaniem

- INS [Forecasting the heat load for heating using ANN]. *Santekhnika, Otoplenie, Kondicionirovanie*, 2019, no. 11. (In Russian). Available at: <https://www.c-o-k.ru/articles/prognozirovaniye-teplovoy-nagruzki-na-otoplenie-s-ispolzovaniem-ins>. (accessed 02.07.2024)
- [30] Mohanraj M., Jayaraj S., Muraleedharan C. Applications of artificial neural networks for thermal analysis of heat exchangers – A review. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, vol. 90, pp. 150-172. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.11.030
- [31] Kunelbayev M.M. Ispol'zovanie algoritmov mashinnogo obucheniya dlja sistemy solnechnogo teplosnabzheniya [Using machine learning algorithms for solar heating supply system]. *Inzhenernyj vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2022, no. 3. (In Russian). Available at: <http://ivdon.ru/en/magazine/archive/n3y2022/7544>. (accessed 29.06.2024)
- [32] Rotov P.V., Sharapov V.I. *Regulirovanie nagruzki gorodskikh teplofikacionnykh sistem* [Load regulation of urban heating systems]. Moscow, 2023. 356 p.
- [33] Shan X., Wang P., Ren P., Zhao H. The influence of central regulation methods upon annual heat loss in heating network. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 54, art. 06004. doi:10.1051/mateconf/20165406004
- [34] Tian X., Lin X., Zhong W., Zhou Y. Sensitivity analysis and safety adjustment of the hydraulic condition in district heating networks. *Energy and Buildings*, 2023, vol. 299, art. 113603. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113603
- [35] Pyrkov V.V. *Sovremennye teplovye punkty. Avtomatika i regulirovanie* [Modern heating points. Automation and regulation]. Kyiv, II SE “Such cases”, 2007. 252 p.
- [36] Rafalskaya T., Mansurov A.R., Mansurova A.R. Issledovanie peremennykh rezhimov raboty sistem centralizovannogo teplosnabzheniya pri kachestvenno-kolichestvennom regulirovanii [Investigation of variable modes of centralized heat supply systems operation with qualitative and quantitative regulation]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura – Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 79-91. doi: 10.15593/2224-9826/2019.2.07. (In Russian).
- [37] Abugabbara M., Javed S., Bagge H., Johansson D. Bibliographic analysis of the recent advancements in modeling and co-simulating the fifth-generation district heating and cooling systems. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 224, art. 110260. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110260
- [38] Gong M., Zhao Y., Sun J., Han C., Sun G., Yan B. Load forecasting of district heating system based on Informer. *Energy*, 2022, vol. 253, art. 124179. doi: 10.1016/j.energy.2022.124179
- [39] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.H. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. New York, Springer New York, 2009. 745 p. doi: 10.1007/978-0-387-84858-7
- [40] Ding C.; He X. K-means Clustering via Principal Component Analysis. *Proc. 21th Int. Conf. on Machine Learning, ICML'04, Canada, 2004*, vol.1, pp. 225-232. doi: 10.1145/1015330.1015408

Сведения об авторах.



Дворцевой Александр Игоревич, к.т.н., доцент. Область научных интересов: анализ технологических данных и диагностика оборудования
E-mail: dvorcevoj@corp.nstu.ru



Хорева Валентина Александровна, Область научных интересов: ресурсосбережение, экологические аспекты систем теплоснабжения на базе возобновляемых источников энергии. E-mail: khorevavalentina@yandex.ru



Боруш Олеся Владимировна, Новосибирский государственный технический университет, кафедра ТЭС, д.т.н., профессор. Область научных интересов: схемные решения для энергетических установок. E-mail: olesyaborush@yandex.ru



Яковина Ирина Николаевна, к.т.н., доцент. Область научных интересов: исследование эффективности применения методов машинного обучения. E-mail: yakovina@corp.nstu.ru