

Сбор данных потребления тепловой энергии в жилом фонде города

О.В. Стукач^{1,2}, И.А. Ершов¹

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Аннотация – Мониторинг состояния теплоснабжения в зависимости от эксплуатационных характеристик зданий необходим для выработки и принятия обоснованных управленческих решений по ремонту и повышению энергоэффективности жилого фонда и поэтому является предметом исследований, основанных на данных. В статье рассмотрены проблемы сбора данных коммерческого учёта тепловой энергии в многоквартирных жилых зданиях в масштабах города. Представлен обзор и классификация методов сбора данных для мониторинга теплопотребления, комфортных условий проживания и эксплуатации зданий. Дан обзор наборов данных, имеющих в свободном доступе и исследований потребления тепловой энергии населением по данным общедомовых приборов учёта. Исследованы зависимости изменения потребления тепловой энергии от метеорологических факторов и технико-экономических параметров зданий. Сбор данных увязан с конкретными способами оценки эксплуатационных характеристик зданий. Даны рекомендации по организации исследований по мониторингу зданий. Представлена динамика изменения теплопотребления и даны рекомендации по методологии исследований в рассмотренной предметной области. Таким образом, правильное понимание структуры и состава имеющихся наборов данных позволит получить прочную теоретическую основу для повышения энергоэффективности.

теплогидравлический режим, наборы данных о потреблении энергии в зданиях, автоматизированное управление.

Основные результаты

- Определены цели и результаты теплового мониторинга многоквартирных зданий.
- Сделан обзор моделей количественной оценки влияния свойств здания на потребление тепловой энергии.
- Предложена классификация используемых подходов к сбору данных для мониторинга энергоэффективности.
- Дана оценка полноты наборов данных.
- Используется обширная база данных потребления тепловой энергии для выявления закономерностей в данных и прогнозирования.
- Поведена визуализация сбора и оценки данных.

ВВЕДЕНИЕ

Модернизация зданий обеспечивает экономию тепловой энергии. Но определение приоритетов модернизации и расчёт ожидаемой экономии энергии и соотношения выгод-затрат может быть сложной, дорогостоящей и неопределённой задачей. Последние исследования показали существенные различия между ожидаемыми и фактическими эксплуатационными характеристиками зданий, как с точки зрения теплопотребления, так и комфорта внутри помещений. Для лучшего понимания различий между ожидаемыми и фактическими эксплуатационными характеристиками зданий необходимо изучить потребление тепловой энергии, уровень комфорта в помещениях, а также поведение жителей, их взаимодействие с технологиями рационального теплопотребления [1–2].

В последнее время было проведено значительное количество исследований по теме тепловой эффективности зданий в связи с растущей обеспокоенностью по поводу расточительного использования энергии и её постоянного негативного воздействия на окружающую среду [3].

За последние десятилетия потребление энергии в зданиях во всем мире неуклонно растёт, а на отопление, кондиционирование и вентиляцию воздуха приходится большая часть потребления энергии в зданиях [4]. Таким образом, одним из способов удовлетворения постоянно растущего спроса на

Графическая аннотация



Ключевые слова – адаптивное регулирование, тепловой комфорт, снижение теплопотребления, моделирование теплопотребления здания, источники энергии, тепловая энергия, жилой фонд, тепловой пункт, прогнозирование погоды, модель прогнозирующего управления, режим теплопотребления, гражданское строительство, компьютерный мониторинг, энергоэффективность, геoinформационные системы, теплопотребление,

дополнительное энергоснабжение является создание более энергоэффективных конструкций зданий с улучшенными свойствами энергосбережения [5].

Этому может помочь анализ данных о теплотреблении. Сейчас наблюдается рост доступности данных о характеристиках и оборудовании зданий, потреблении ими тепловой энергии, о погоде в местах сбора данных. Поэтому стало возможным разработка статистических методов и алгоритмов, которые связывают характеристики зданий и меры по ремонту и модернизации [6]. В статье мы исследуем потенциал использования наборов данных для прогнозирования ожидаемой экономии тепловой энергии для большого числа многоэтажных жилых зданий. Мы показываем, что данные о зданиях, полученные с помощью статистических оценок, могут дать представления об экономии энергии в тех случаях, когда детальный тепловой аудит и физическое моделирование нецелесообразны, как по затратам, так и по предполагаемому затраченному времени.

Вдохновлённые растущей актуальностью общедоступных наборов данных, мы решили провести обзор известных наборов данных в области теплотребления зданий. Насколько нам известно, <https://sys-engine.ru/> – это первая платформа, которая предоставляет всесторонний и универсальный обзор наборов данных о потреблении тепловой энергии в зданиях, их применении и будущих тенденциях. Обрисованы будущие направления улучшения использования наборов данных и, следовательно, улучшения теплосбережения.

Цель данной работы – дать обзор и классификацию доступных методов мониторинга, уделяя особое внимание методам сбора данных о потреблении тепловой энергии, определение наиболее эффективных способов мониторинга теплотребления зданий и внедрение их в обычную практику.

Использование перспективных технологий теплосбережения в новых и ранее построенных зданиях обещает не только снизить потребление тепловой энергии, но и создать хорошую внутреннюю среду для жителей. За последние четверть века в стремлении достичь максимальный комфорт в холодное время года было разработано большое количество новых технологий, например, стеклопакеты с двойным и тройным остеклением, фотоэлектрические преобразователи, высокоэффективные методы сжигания ископаемого топлива и тому подобные. Но внедрение технологий сопряжено с трудностями из-за неопределённых сроков окупаемости, стоимостью ограждающих конструкций и привычкой жить расточительно. Кроме того, прошлые и текущие исследования показали различия между требуемыми и фактическими эксплуатационными характеристиками зданий, как с точки зрения теплотребления, так и комфорта, что вызвано поразительным поведением жителей, их негативным влиянием эксплуатацию

зданий, приводящим к разрушению ограждающих конструкций и систем теплоснабжения [7].

Статья состоит из следующих разделов. В первой части даётся обзор методов сбора данных и подходы к классификации методов мониторинга. Представлены и кратко объяснены этапы мониторинга и оценки энергоэффективности зданий, включая выбор способов данных, что и является целью данной статьи. В разделе 2 представлен обзор наборов данных для мониторинга зданий. В разделе 3 представлен пример визуализации данных для оценки теплового комфорта и энергоэффективности. Наконец, в последнем разделе представлены некоторые полезные ссылки на работы, в которых использован новый подход, связанный с применением нейронных сетей и машинного обучения в повышении тепловой эффективности жилых зданий.

I. ОБЗОР МЕТОДОВ СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Мониторинг энергоэффективности здания может носить различный характер в зависимости от цели: научный, диагностический или прогнозный. Научный интерес связан с проверкой эксплуатационных характеристик зданий. Диагностика эксплуатационных характеристик здания полезна для выработки управленческих решений по ремонту и повышению энергоэффективности. Прогноз потребления тепловой энергии необходим для будущего ресурсного обеспечения [8].

Количественные методы исследования направлены на поиск статистических взаимосвязей в численных данных [9]. Объективные данные основаны на измерениях физических параметров. В области эксплуатационных характеристик зданий количественные данные могут использоваться для анализа потребления тепловой энергии и его взаимосвязи с эксплуатацией здания и комфортом. Субъективные данные предоставляются людьми, основаны на некотором феноменологическом опыте, объясняют меньшее число объектов, и чаще всего относятся к оценке комфортности проживания. Конечно, они снижают статистическую значимость данных, но приводит к более глубокому пониманию предмета исследования. К участию в исследовательском проекте важно привлечь самих жителей, чтобы уменьшить вероятность того, что они откажутся от решений по повышению энергоэффективности своих домов или будут недовольны результатом [10].

Чтобы определить методы мониторинга, которые будут использоваться при оценке энергоэффективности здания, нужно определить цель оценки (повышение эффективности, проверка эффективности, будущие проекты), аудиторию, характер исследования, используемые показатели, глубину и методы сбора данных.

Существует два основных метода сбора данных для оценки теплового комфорта: измерения параметров внутри помещений с опросом жителей и регистрация объективных данных с общедомовых приборов учёта [11]. Для мониторинга эксплуатационных характеристик зданий разработано неслабое количество методик. Однако большинство из них являются дорогостоящими, трудоёмкими, интрузивными или требуют специальных знаний для анализа собранных данных. Их применение на практике исчезающе мало. Примером может служить работа [12], в которой изучено влияние восьми входных переменных (относительная компактность, площадь поверхности, площадь стен, площадь крыши, общая высота, ориентация, площадь остекления, распределение площади остекления) на отопление и охлаждение жилых помещений здания. Исследована сила связи каждой входной переменной с каждой из выходных переменных, используя различные классические и непараметрические инструменты статистического анализа, чтобы выявить наиболее сильно связанные входные переменные. Дано сравнение классического регрессионного подхода с мощным современным нелинейным непараметрическим методом случайного леса для оценки отопления и охлаждения. Всестороннее моделирование более чем полтысячи различных жилых зданий показало, что вполне возможно предсказание значений выходных переменных с малыми отклонениями средней абсолютной ошибки от начальных значений.

Долгосрочные измерения необходимы, когда целью мониторинга является определение эксплуатационных характеристик здания в течение достаточно длительного периода времени, в течение нескольких лет. Эти измерения возможны, когда в зданиях установлены и исправно функционируют общедомовые приборы учёта. Сами по себе долгосрочные измерения могут многое сказать об эксплуатационных характеристиках здания. Анализ результатов измерений может дать представление о проблемах с температурой в здании, например, о том, что в помещениях слишком холодно или слишком тепло. Учитывая объём данных, которые могут быть собраны, долгосрочные измерения дают много информации об эксплуатационных характеристиках здания [13].

Обычный сбор данных заключается в измерении энергопотребления за сутки и на регулярной основе. Этот способ является простым и недорогим, однако его главный недостаток заключается в том, что во время измерения и считывания показаний могут возникать ошибки [14 – 15]. При наличии дополнительных счётчиков ошибки можно быстро выявить, но установка дополнительных счётчиков является дорогостоящей и потребует обеспечения безопасности и функционирования энергетических систем здания. Для оценки эффективности

использования счётчиков необходимо, по крайней мере, снимать показания несколько раз в день, чтобы вовремя заметить аномальные показания.

Когда требуется более подробная информация о теплотреблении, возникает необходимость более частого сбора данных в течение очень длительного периода времени. Преимущество этого подхода в том, что он даёт дополнительную информацию о динамике изменения теплотребления и комфорте, внутренних и наружных условиях эксплуатации здания. Он также может сам по себе рассказать о том, как эксплуатируется здание [16]. Например, в выходные и праздничные дни потребление энергии значительно отличается от будней, и можно приблизительно рассчитать возможную экономию энергии при более эффективном управлении теплотреблением. Кроме долгосрочного анализа и мониторинга, более частый сбор данных может своевременно выявить неэффективность и отказы систем сбора данных.

Тепловой комфорт зависит от взаимодействия людей со зданием и их ожиданий, основанных на изменении погоды [17]. Связь между погодными условиями и энергопотреблением была давно и неоднократно доказана [18–19]. По этой причине сбор данных о погоде считается крайне важным при изучении поведения пользователей. Кроме того, характеристики существующих и вновь построенных домов зависят от последствий изменения климата. Соответственно, при сборе новых баз данных о потреблении энергии в этих домах следует учитывать погодные условия, которые дают определённые последствия глобального изменения климата, а не только учёт исторической климатической информации [20]. Исследования влияния изменения климата на энергопотребление зданий показывают, что число внезапных перепадов температуры будет только расти. Поэтому важно внедрять информацию о погоде в системы регулирования отопления, чтобы адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям [21].

Поскольку температура наружного воздуха является единственной независимой переменной в адаптивном уравнении, очень важен способ её определения [22]. Для мониторинга можно использовать как текущее значение среднесуточной температуры, так и результат непосредственного измерения её датчиком. Для анализа имеется возможность получения значения наружной температуры по данным Росгидрометцентра с его сайта <https://meteoinfo.ru/>. Доступна как среднесуточная температура, так и измеренная каждые три часа, то есть восемь значений в сутки [23].

II. МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В настоящее время в области теплоэнергетики, окружающей среды и устойчивого развития актуальна разработка наборов данных и размещение их в

открытом доступе. Более того, необходимо разрабатывать инструменты, помогающие пользователям лучше понимать показатели теплотребления, визуализировать их, и в дальнейшем внедрять новые стратегии, которые помогают улучшить поведение жителей и сократить потери энергии. В связи с этим, в целях изучения способов экономии тепловой энергии и понимания динамики теплотребления в зданиях, по всему миру были собраны наборы данных. Это огромное количество данных, включая многомерные временные ряды и характеристики зданий. Рис. 1 представляет собой блок-схему процесса сбора данных, а также связанные с ней модули, необходимые для предварительной обработки, анализа и интерпретации моделей потребления энергии.

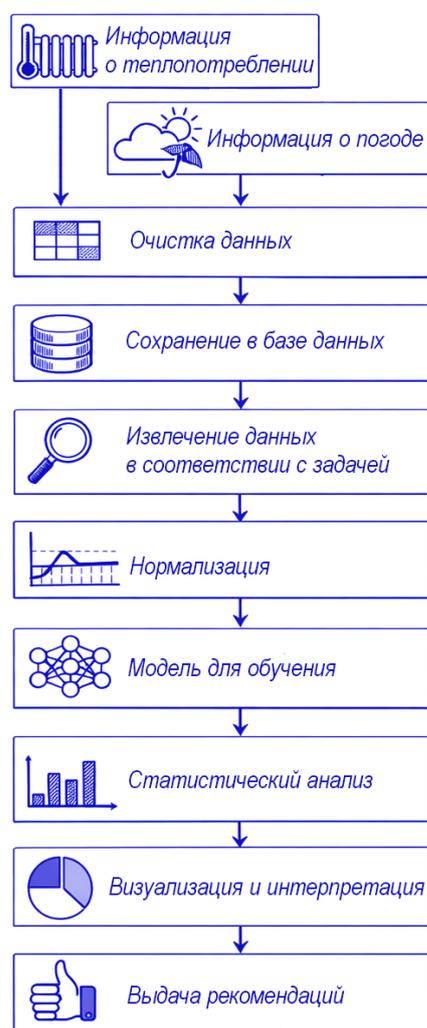


Рис. 1. Представление системы сбора данных о потреблении энергии с соответствующими модулями

Это общее представление, которое можно использовать для различных приложений.

Для лучшего понимания различий между реальным теплотреблением многоэтажных жилых зданий и ожидаемой экономией тепловой энергии при

эксплуатации зданий необходимо следить за потреблением энергии, поведением жителей, а также за создаваемым комфортом проживания. Для этого сформированы крупномасштабные наборы данных, к примеру, [24–25], где представлено потребление энергии с одинаковыми интервалами выборки более чем в 1200 домохозяйствах в течение длительного периода сбора данных, который составляет более четырех лет.

Мониторинг может быть основан на данных о потреблении тепловой энергии в результате коммерческого учёта с помощью общедомовых приборов. Один из таких наборов данных опубликован в IEEE Dataport [26]. Но теплотребление в зданиях зависит от множества факторов, которые необходимо объединить для составления полных наборов данных о потреблении энергии. В работе [27] это называется мультимодальным сбором данных, что означает просто сбор нескольких типов данных для эффективного решения задач по энергосбережению или других связанных с этим приложений. Дополненные данные представлены в базе [28].

Дополнив базу техническими характеристиками зданий, например, по данным сайта Фонда развития территорий фр.т.рф, можно количественно оценить вклад характеристик здания и социальных факторов в теплотребление и создать многомерную регрессионную модель с численными (например, теплотребление, наружная температура) и категориальными переменными (например, тип отопительной системы, материал крыши и стен) для изучения динамики и прогнозирования энергопотребления [29].

В связи с широким распространением интеллектуальных счетчиков и датчиков, использование наблюдений за потреблением тепловой энергии становится абсолютно необходимым для выявления аномального её использования [30–31]. В частности, методы раннего обнаружения могут быть использованы для выявления большого количества прорывов теплотрасс. Кроме того, обнаружение аномалий может позволить понять поведение жителей в области энергопотребления и быть в курсе непредсказуемых значений потребления энергии, приводящим к большим потерям [32]. Были изучены и внедрены различные подходы к интеллектуальному анализу данных для обнаружения аномальных событий в процессе энергопотребления [33]. Но чтобы набор данных можно было корректно и эффективно использовать, он должен соответствовать некоторым требованиям. В частности, для детализации энергопотребления наборы данных должны включать как агрегированные, так и индивидуальные данные. Необходимо также получать данные о потреблении энергии в различных частях здания, а также о состоянии окружающей среды. Для обнаружения аномалий крайне важно, чтобы в него были включены

метки с указанием нормального и аномального уровней потребления для машинного обучения. И, наконец, для прогнозирования потребления энергии период сбора данных должен быть длительным. В целом, обнаружение аномального энергопотребления играет важную роль в сокращении потерь энергии.

Тем не менее, стоит отметить, что напрочь отсутствуют аннотированные наборы данных, предназначенные для обнаружения аномалий теплопотребления.

Учитывая недостатки современных наборов данных, в энергетической лаборатории университета Катара была создана база QUD (<http://em3.i-know.org/datasets/>). Это набор данных о потреблении всех видов энергии различными устройствами (кондиционером, системой отопления, осветительными приборами) в дополнение к погодным данным, включая влажность, температуру, и проч. В наборе данных есть несколько сценариев использования, таких как выявление отклонений в потреблении, тестирование рекомендательная система и оценка инновационных инструментов визуализации. Пожалуй, QUD является одним из первых аннотированных репозиториях, предназначенных для обнаружения аномалий в энергопотреблении.

Для того чтобы разметить данные наблюдений, в QUD используется идея микромоментов, которая помогает определить моменты полезного или неправильного использования [34]. В частности, микромоменты используются для получения точной статистики о потребителях [35]. Данные о потреблении энергии размечаются с помощью пяти классов микромоментов: «правильное использование», «включение», «выключение», «чрезмерное потребление энергии» и «потребление на улице».

Понимание и улучшение поведения жителей в области теплопотребления является одним из успешных подходов к снижению потребления энергии и стимулированию энергосбережения, примерно до уровня 20–50 % [36]. Таким образом, сбор и включение данных о поведении конечных пользователей в модель энергоэффективности может значительно сократить количество потраченной впустую энергии. Это можно сделать путем сбора информации, связанной с их предпочтениями и привычками [37].

III. ПРИМЕР ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ, ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА

Визуализация считается наиболее эффективным способом обработки больших наборов данных с целью интерактивного и совершенного предоставления информации конечным пользователям, потребителям и заинтересованным стейкхолдерам. Инструменты, методы и программное обеспечение, используемые для визуализации потребления энергии, требуют

дальнейшего совершенствования для того чтобы в доступной форме демонстрировать большие затраты энергии. В этой связи анализ микромоментов с временными рядами теплопотребления и наружной температуры может служить новой идеей визуализации.

На Рис. 2 приведены нормализованные значения потребления тепла Q и температуры наружного воздуха T для одного отопительного сезона. Нормализация выполняется по известной формуле:

$$Q = (q - w) / (s \delta)$$

и приводит переменные к одинаковому масштабу при сохранении статистических характеристик, где w – среднее значение для ряда значений потребления тепла q , δ – стандартное отклонение, s – площадь здания. Аналогичным образом нормализуется температура наружного воздуха, но на площадь она конечно не делится. Для сравнения графиков температура взята с обратным знаком, поскольку при повышении температуры потребление тепловой энергии должно уменьшаться.

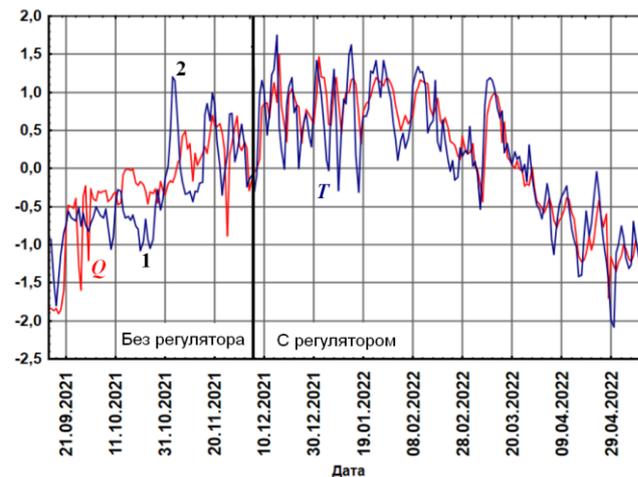


Рис. 2. Нормализованные значения потребления тепла Q и обратной температуры наружного воздуха T

В левой части Рис. 2 приведены нормализованные значения переменных, когда регулятор в здании не установлен. Графики Q и обратной температуры T существенно отличаются. Очевиден перетоп (микромомент 1) или заморозание (микромомент 2). На правой стороне Рис. 2 показаны те же нормализованные значения, но с установленным погодным регулятором. Из сравнения левой и правой частей рисунка видно, что, несмотря на плохую настройку регулятора, графики Q и обратной температуры T стали значительно меньше отличаться, хотя регулятор плохо обрабатывает резкие перепады уличной температуры. Потребление тепловой энергии также увеличивается в дни резкого потепления (минимум на температурных графиках), что может быть объяснено сбросом тепла в атмосферу при открывании окон жителями. Таким образом, очевидно, что в данном случае в здании решена проблема

экономии тепловой энергии, но не повышения уровня комфорта.

Можно сделать вывод о том, что отслеживание микромоментов во временных рядах облегчает выявление моментов аномального потребления тепловой энергии, и вследствие этого может помочь выработать точные рекомендации, помогающие сократить потери энергии. Более того, это помогает жителям понять свои потребительские предпочтения, повышает их осведомлённость и, следовательно, побуждает их улучшать свое поведение за счёт использования рекомендаций. Понятно, что использование микромоментов для обнаружения аномального потребления может быть расширено на выявление других видов аномалий, например, для обнаружения работы кондиционера при открытых дверях и окнах. Таким образом, жители будут получать соответствующие уведомления и советы, например, закрывать двери или окна, чтобы сократить количество потраченной впустую энергии.

Итак, новый способ визуализации, основанный на анализе микромоментов, позволяет людям понять свои собственные показатели энергопотребления и соответствующим образом интерпретировать своё поведение в отношении потребления энергии. Более того, это помогает им легко получать статистику об их фактическом потреблении энергии.

IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Важное направление, которое может улучшить качество и использование наборов данных о потреблении энергии, основано на внедрении алгоритмов машинного обучения, которые могут значительно помочь в снижении энергопотребления [38]. Поэтому первостепенное значение имеет стимулирование новых достижений и задач, связанных с нейросетевыми моделями.

Использование генерирующих моделей, таких как генерирующие состязательные сети, могут значительно улучшить качество собираемых данных за счёт заполнения неполных данных о потреблении энергии из-за потери данных, произошедшей на этапе сбора, и, следовательно, привести к лучшему использованию полученных наборов данных в различных приложениях [39].

В работе [40] предложено интеллектуальное оптимизационное управление процессом отопления на основе нейронной сети. Вместо реального здания используется его модель, а в качестве прогноза погоды используется нейросетевая модель. Управление обеспечивает снижение потребления тепловой энергии при одновременном повышении комфорта пользователя.

Кроме использования моделей глубокого обучения для выявления аномалий потребления энергии [41] и классификации микромоментов энергопотребления могут быть применены другие алгоритмы машинного обучения с различными параметрами конфигурации [42]. Выбор подходящей модели машинного обучения в основном основан на обеспечении наилучшего компромисса между эффективностью идентификации и сложностью вычислений [43]. Всё это позволяет лучше использовать собранные наборы данных для выявления аномального энергопотребления [44].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потребление энергии и эффективное использование централизованного теплоснабжения влияют на экономику и окружающую среду, и поэтому требуют более строгого внимания к решению вопросов градостроительства. Необходимы управленческие решения, которые позволят существенно снизить потери тепловой энергии. Сбор данных о теплотреблении в масштабах городов, использование технически и экономически обоснованного способа оценки эффективности позволят планировать мероприятия по рациональному использованию энергетических ресурсов. В настоящее время оценка энергоэффективности зданий не учитывает динамику потребления тепловой энергии. Уточнённые методы оценки позволяют одномоментно экономить капиталовложения и обеспечивать эффективное потребление тепловой энергии.

Исходя из необходимости всестороннего анализа существующих баз данных, в данной работе проведён обзор, изучение и визуализация наборов данных о потреблении энергии в зданиях. Это исследование направлено на внедрение мониторинга эффективности зданий в практику их эксплуатации. Выявив наиболее перспективные подходы, в исследовании предлагается классификация методов оценки и сбора данных, которая облегчит эту задачу, определяются направления дальнейшего совершенствования наборов данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ефимов Б.В., Кузнецов Н.М., Победоносцева В.В. Эффективность энергосберегающих мероприятий в бюджетной сфере мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9. – № 3-16. – С. 76-86. – eLIBRARY ID: 36474392. – Doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.76-86.
- [2] Fedorcak-Cisak M., Radziszewska-Zielina E., Dechnik M., Buda-Chowaniec A., Sadowska B., Ciula M., Kapecki T. User Comfort Evaluation in a Nearly Zero-Energy Housing Complex in Poland: Indoor and Outdoor Analysis // Energies. – 2025. – V. 18. – № 19:5209. – Doi: 10.3390/en18195209.
- [3] Подлесных А.А. Повышение энергоэффективности объектов жилищно-коммунального комплекса // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2024. – Т. 9 – № 5(43) – с. 126-133.

- [4] Белый А. Проблемы повышения энергоэффективности жилых многоквартирных зданий в условиях текущих цен на тепловую энергию в Казахстане // Центральноазиатский журнал исследования климата и устойчивого развития. – 2024. – Т. 3. – № 2. – С. 24-44. – eLIBRARY ID: 79828196. – EDN: MJAUMT. – Doi: 10.29258/cajscr/2024-r1.v3-2/24-44.rus.
- [5] Черноиван Н.В., Павлова И.П. Исследование энергетической эффективности эксплуатируемых крупнопанельных жилых зданий, прошедших тепловую модернизацию // Вестник брестского государственного технического университета. – 2025. – № 1(136). – С. 53-59. – eLIBRARY ID: 82341190. – EDN: AXZХОQ. – Doi: 10.36773/1818-1112-2025-136-1-53-59.
- [6] Зорин П.А., Стукач О.В. Статистическое моделирование тепловых характеристик жилых домов на основе данных теплосчетчиков / Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы Тринадцатой Международной конференции. Томский государственный университет. Томск, 07-09 сентября 2020. – С. 11. – eLIBRARY ID: 44189681.
- [7] Korniyenko S.V. Renovation of apartment buildings in Russia // Construction of unique buildings and structures. – 2018. – № 5 (68). – С. 15-23. – eLIBRARY ID: 36318476. – Doi: 10.18720/CUBS.68.2. (Корниенко С.В. Реновация жилых зданий в России).
- [8] Зорин П.А., Купреков С.В., Пуговкин А.В., Стукач О.В. Контроль энергоэффективности теплоснабжения зданий типовой застройки // Электронные средства и системы управления / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск). – 2018. – N 1-2. – С. 302-305. – eLIBRARY ID: 37384589.
- [9] Стукач О.В., Зорин П.А. Дисперсионный анализ данных учета тепловой энергии в г. Томске / Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА). Материалы III Международной научно-практической конференции. – Минск, 21-22 апреля 2022. – С. 140-143. – eLIBRARY ID: 8504165.
- [10] Fotopoulou E., Zafeiropoulos A., Terroso F. et al. Data aggregation, fusion and recommendations for strengthening citizens energy-aware behavioural profiles / 2017 Global Internet of Things Summit (GloTS). – Pp. 1-6. (Агрегация, объединение данных и рекомендации по улучшению поведенческих характеристик граждан, ориентированных на потребление энергии)
- [11] Зорин П.А., Стукач О.В. Дисперсионный анализ данных коммерческого учёта тепловой энергии в жилом фонде города Томска / Наука. Технологии. Инновации // Сборник научных трудов в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2019. – ISBN 978-5-7782-4007-0. – С. 72-75. – eLIBRARY ID: 41847032.
- [12] Tsanas A., Xifara A. Accurate quantitative estimation of energy performance of residential buildings using statistical machine learning tools // Energy and Buildings. – 2012. – V. 49. № 6. – Pp. 560-567. – Doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.003. (Точная количественная оценка энергетических показателей жилых зданий с использованием инструментов статистического машинного обучения)
- [13] Стукач О.В., Зорин П.А., Ершов И.А. Использование метода сходящегося перекрестного отображения в задачах исследования взаимной зависимости температурных рядов / VI Международная научно-техническая конференция "Проблемы машиноведения". Омск: Омский государственный технический университет, 22-23 марта 2022. – С. 228-234.
- [14] Федосин А.С., Федосин С.А. Очистка входных данных в автоматизированных системах контроля и учета энергоресурсов // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – Т. 14. – № 2. – С. 162-168.
- [15] Федосин А.С., Савкина А.В. Проблемы качества данных в автоматизированных системах коммерческого учета потребления энергоресурсов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2. – С. 158-164.
- [16] Попов И.Ю., Стукач О.В., Зорин П.А. Оценка качества данных коммерческого учёта тепловой энергии методом полной вариации распознавания ошибок // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Т. 9. – № 3. – С. 117-121. – DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-117-121. – eLIBRARY ID: 47923769.
- [17] Liu Y., Stouffs R., Tablada A., Wong N.H., Zhang J. Comparing micro-scale weather data to building energy consumption in Singapore // Energy and Buildings. – 2017. – № 152. – Pp.776-791. (Сравнение небольших данных о погоде с потреблением энергии зданиями в Сингапуре)
- [18] Koci J., Koci V., Madera J., Cerny R. Effect of applied weather data sets in simulation of building energy demands: Comparison of design years with recent weather data // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – № 100. – Pp. 22-32. (Влияние применяемых наборов погодных данных в моделировании энергопотребления зданий: сравнение годов проектирования с последними данными о погоде).
- [19] Farah S., Whaley D., Saman W., Boland J. Integrating climate change into meteorological weather data for building energy simulation, Energy and Buildings. – 2019. – № 183. – Pp. 749-760. (Интеграция изменений климата в метеорологические данные о погоде для моделирования энергетики зданий).
- [20] Зорин П.А., Стукач О.В. Анализ влияния погодных условий на динамику тепловой энергии в жилом фонде города Томск / Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции. – М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского. – 2020. – С. 365-368. – ISSN 2500-1248. – eLIBRARY ID: 45557868.
- [21] Jalali Z., Shamseldin A.Y., Ghaffarianhoseini A. Impact assessment of climate change on energy performance and thermal load of residential buildings in New Zealand // Building and Environment. – 2023. – V. 243. – Paper 110627. – Doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110627.
- [22] Lupato G., Manzan M. Italian TRYs: New weather data impact on building energy simulations // Energy and Buildings. – 2019. – № 185. – Pp. 287-303. (Влияние новых погодных данных на моделирование энергетики зданий).
- [23] Стукач О.В., Зорин П.А., Фёдоров Н.Г. Результаты энергосберегающего регулирования тепловой энергии на примере Томска и Буденновска // Динамика систем, механизмов и машин. – 2023. – № 1. – Т. 11. – С. 53-56. – eLIBRARY ID: 64903450. – DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-1-53-56.
- [24] Barker S., Mishra A., Irwin D., Cecchet E., Shenoy P., Albrecht J. Smart: An open data set and tools for enabling research in sustainable homes / Proceedings of the 2012 Workshop on Data Mining Applications in Sustainability. – 2012. – Pp. 1-6. (Набор открытых данных и инструментов для проведения исследований в области устойчивого жилища).
- [25] Parson O., Fisher G., Hersey A., Batra N., Kelly J., Singh A. et al. Dataport and NILMTK: A building data set designed for non-intrusive load monitoring / 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). – 2015. – Pp. 210-214. (Dataport и NILMTK: Набор данных о зданиях, предназначенный для неинтрузивного мониторинга нагрузки).
- [26] Zorin P., Stukach O. Data of heating meters from residential buildings in Tomsk (Russia) for statistical modeling of the thermal characteristics of buildings / IEEE Dataport. – 2020. – [Online]. – Doi: 10.21227/3r4e-ch18.
- [27] Himeur Y., Alsalemi A., Al-Kababji A., Bensaali F., Amira A. Data fusion strategies for energy efficiency in buildings: Overview, challenges and novel orientations // Information Fusion. – 2020. – Pp. 1-36. (Стратегии объединения данных для повышения энергоэффективности зданий: обзор, проблемы и новые направления).
- [28] Stukach O., Zorin P. Long-Term Data from the Heat Meters in Residential Buildings Depending on the Outside Temperature and Characteristics of Buildings / IEEE Dataport. – April 13, 2021. – Ddoi: 10.21227/cw53-rr81. – <http://ieee-dataport.org/4034>.
- [29] Зорин П.А., Стукач О.В. База данных потребления тепловой энергии многоэтажными жилыми зданиями в зависимости от метеорологических факторов и характеристик зданий. – Per. № 25452. – DOI: 10.12731/ofernio.2025.25452. – Навигатор в мире

- науки и образования. – 2025. – № 01(66). – С. 119-124. – Бюллетень "Хроники Объединенного фонда электронных ресурсов "Наука и образование"". – 2025. – № 03(190).
- [30] Seem J.E. Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings // *Energy and Buildings*. – 2007. – № 39(1). – Pp. 52-58. (Использование интеллектуального анализа данных для выявления аномального потребления энергии в зданиях).
- [31] Weng Y., Zhang N., Xia C. Multi-agent-based unsupervised detection of energy consumption anomalies on smart campus // *IEEE Access*. – 2019. – № 7. – Pp. 2169-2178. (Мультиагентное обнаружение аномалий энергопотребления без контроля в умном кампусе).
- [32] Nordahl C., Persson M., Grahn H. Detection of residents' abnormal behaviour by analysing energy consumption of individual households / 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). – 2017. – Pp. 729-738. (Выявление аномального поведения жителей при анализе потребления энергии отдельными домохозяйствами).
- [33] Janetzko H., Stoffel F., Mittelstadt S., Keim D.A. Anomaly detection for visual analytics of power consumption data // *Computers & Graphics*. – 2014. – № 38. – Pp. 27-37. (Обнаружение аномалий для визуальной аналитики данных о потреблении энергии).
- [34] Alsalemi A., Ramadan M., Bensaali F., et al. Endorsing domestic energy saving behavior using micro-moment classification // *Applied Energy*. – 2019. – № 250. – Pp. 1302-1311.
- [35] Himeur Y., Alsalemi A., Bensaali F., Amira A. A novel approach for detecting anomalous energy consumption based on micro-moments and deep neural networks // *Cognitive Computation*. – 2020. – Pp. 1-23. (Новый подход к обнаружению аномального потребления энергии, основанный на микромоментах и глубокой нейронной сети).
- [36] Ge S., Li J., Liu H., Liu X., Wang Y., Zhou H. Domestic energy consumption modeling per physical characteristics and behavioral factors // *Energy Procedia (Innovative Solutions for Energy Transitions)*. – 2019. – № 158. – Pp. 2512-2517. (Моделирование внутреннего энергопотребления с учетом физических характеристик и поведенческих факторов).
- [37] Delzende E., Wu S., Lee A., Zhou Y. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review, *Renewable and Sustainable // Energy Reviews*. – 2017. – № 80. – Pp. 1061-1071. (Влияние поведения жильцов на энергетический анализ зданий: обзор исследований, посвященных возобновляемым и устойчивым источникам энергии).
- [38] Stukach O.V., Ershov I.A., Dvurechenskaya N.A. Neural Network Simulation of a Residential Building for a Data-Driven Thermal Consumption / 2025 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) Conference, 11-13 November 2025, Omsk, Russian Federation. – 2025. – Pp. 1-4, doi: 10.1109/Dynamics68764.2025.11302190. (Нейросетевое моделирование теплопотребления жилого здания на основе данных).
- [39] Fekri M., Ghosh A.M., Grolinger K. Generating energy data for machine learning with recurrent generative adversarial networks // *Energies*. – 2019. – V. 12. – P. 13. (Генерация энергетических данных для машинного обучения с помощью рекуррентных генеративных состязательных сетей).
- [40] Chen-xi J., Ping J., Shi L. Intelligent control method of heating process including model prediction and climate compensation / 2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), Hanoi, Vietnam. – 2020. – Pp. 50-55. – Doi: 10.1109/ICAMechS49982.2020.9310086.
- [41] Стукач О.В., Ершов И.А., Кутузов Д.В. LSTM-модель потребления тепловой энергии в многоквартирном жилом здании // *Системная инженерия и инфокоммуникации*. – 2025. – № 4. – С. 11-14. – <https://sys-engine.ru/index.php/SEI/article/view/35>.
- [42] Li G., Kou C., Wang H. Estimating city-level energy consumption of residential buildings: A life-cycle dynamic simulation model // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – 240. – Pp. 451-462. (Оценка энергопотребления жилых зданий на уровне города: динамическая имитационная модель жизненного цикла).
- [43] Стукач О.В., Карапиш Е.А. Идентификация стохастической модели теплопотребления в многоквартирных жилых зданиях города / Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA'2024) : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25-26 апр. 2024 г. / Белорус. гос. ун-т ; ред. В.В. Скаун. – Минск : БГУ, 2024. – С. 172-175. – ISBN: 978-985-881-636-0. – eLIBRARY ID: 67917843. – EDN: HFKICA.
- [44] Стукач О.В., Ершов И.А. Нейросетевая модель жилого здания как объекта управления для погодозависимого регулятора тепловой энергии // *Динамика систем, механизмов и машин: сборник трудов XIX Международной IEEE научно-технической конф., г. Омск, Омский государственный технический университет, 11-13 ноября 2025*. – Омск: издательство ОмГТУ. – 2025. – Т. 13 – N 3. – С. 82-87. – DOI: 10.25206/2310-9793-2025-13-3-82-87. – ISSN: 2310-9793.

Информация об авторах

Стукач Олег Владимирович, д.т.н., профессор кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, профессор департамента Электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия, e-mail: tomsk@icce.org, ORCID: 0000-0001-6845-4285.

Ершов Иван Анатольевич, к.т.н., старший преподаватель кафедры Защиты информации Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия, e-mail: ershov@corp.nstu.ru, ORCID: 0000-0003-1524-6508.

Data collection of the consumption of thermal energy in the residential houses of the city

O.V. Stukach ^{1,2}, I.A. Ershov ²

¹National Research University Higher School of Economics
²Novosibirsk State Technical University

Abstract – Monitoring of heat supply depending on the operational characteristics of buildings is necessary to make and provide management decisions on the repair and improvement of energy efficiency for the residential houses. Therefore it is the subject of data-driven research. The paper discusses the problems of data collection on commercial accounting of thermal energy in multi-storey residential buildings on a whole city. A review and classification of data collection methods for monitoring heat consumption, comfortable living conditions, and building running are presented. A review of publicly available datasets and studies of heat energy consumption by the inhabitants based on data from household metering devices is given. The dependences of changes in heat energy consumption on meteorological factors and technical and economic parameters of buildings are investigated. Data collection is connected with specific assessing building performance. Recommendations on the research for monitoring buildings are given. The dynamics of heat consumption changes is presented. Recommendations on

the research methodology in the considered subject are given. Thus, a proper understanding of the available datasets composition will create a solid foundation for energy efficiency improving.

Keywords – adaptive regulation, thermal comfort, modeling of building heat consumption, energy sources, thermal energy, residential house, heat point, weather forecasting, heat consumption mode, predictive control model, civil engineering, computer monitoring, energy efficiency, geoinformation systems, heat consumption reduction, heat consumption, thermohydraulic mode, datasets on energy consumption in buildings, automated control.

References

- [1] Efimov B.V., Kuznetsov N.M., Pobedonosteva V.V. Efficiency of energy saving measures in the budget sphere of the Murmansk Region // Proceedings of the Kolsk Research Center of RAS. – 2018. – V. 9. – № 3-16. – Pp. 76-86. – eLIBRARY ID: 36474392. – Doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.76-86.
- [2] Fedorczak-Cisak M., Radziszewska-Zielina E., Dechnik M., Buda-Chowaniec A., Sadowska B., Ciula M., Kapecki T. User Comfort Evaluation in a Nearly Zero-Energy Housing Complex in Poland: Indoor and Outdoor Analysis // Energies. – 2025. – V. 18. – № 19:5209. – Doi: 10.3390/en18195209.
- [3] Podlesnykh A.A. Improving the energy efficiency of housing and communal complex facilities // International Journal of Information Technology and Energy Efficiency. – 2024. – V. 9 – № 5(43) – Pp. 126-133.
- [4] Belyi A. Problems of improving the energy efficiency of residential apartment buildings in the context of current prices for thermal energy in Kazakhstan // Central Asian Journal of Climate Research and Sustainable Development. – 2024. – V. 3. – № 2. – Pp. 24-44. – eLIBRARY ID: 79828196. – EDN: MJAUMT. – Doi: 10.29258/cajscr/2024-r1.v3-2/24-44.rus.
- [5] Chernoiivan N.V., Pavlova I.P. Investigation of the energy efficiency of operated large-panel residential buildings that have undergone thermal modernization // Bulletin of the Brest State Technical University. – 2025. – № 1(136). – C. 53-59. – eLIBRARY ID: 82341190. – EDN: AXZ XOQ. – Doi: 10.36773/1818-1112-2025-136-1-53-59.
- [6] Zorin P.A., Stukach O.V. "Statistical modeling of the thermal characteristics of households based on the thermal meter dataset", 13 International conference on new information technologies in the investigation of complex structures. Tomsk State University, Tomsk, September 07-09, 2020, p. 11. – eLIBRARY ID: 44189681.
- [7] Korniyenko S.V. Renovation of apartment buildings in Russia // Construction of unique buildings and structures. – 2018. – № 5 (68). – C. 15-23. – eLIBRARY ID: 36318476. – Doi: 10.18720/CUBS.68.2.
- [8] Zorin P.A., Kuprekov S.V., Pugovkin A.V., Stukach O.V. Control of Energy Efficiency of Thermal Energy Supply for Typical Residential Buildings // Electron Instruments and Control Systems / Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. – 2018. – N 1-2. – P. 302-305. – eLIBRARY ID: 37384589.
- [9] O.V. Stukach, P.A. Zorin, "Dispersion Analysis of Thermal Energy Data in Tomsk", Proceedings of the III International Sci.-Pract. Conf. "Computer Technologies and Data Analysis - CTDA", Minsk, 21-22 April, 2022, pp. 140-143. – eLIBRARY ID: 48504165.
- [10] Fotopoulou E., Zafeiropoulos A., Terroso F. et al. Data aggregation, fusion and recommendations for strengthening citizens energy-aware behavioural profiles / 2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS). – Pp. 1-6.
- [11] Zorin P.A., Stukach O.V. Dispersion analysis of data on commercial accounting of thermal energy in the residential houses of the city of Tomsk / Nauka. Technologies. Innovations. Proceedings in 9 volumes. – Novosibirsk, NSTU Publishing House. – 2019. – ISBN 978-5-7782-4007-0. – Pp. 72-75. – eLIBRARY ID: 41847032.
- [12] Tsanas A., Xifara A. Accurate quantitative estimation of energy performance of residential buildings using statistical machine learning tools // Energy and Buildings. – 2012. – V. 49. № 6. – Pp. 560-567. – Doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.003.
- [13] O.V. Stukach, P.A. Zorin, I.A. Ershov, "The use of the convergent cross mapping method in the problems of studying the cross-dependence of temperature series", VI International scientific conference "Mechanical Science and Technology Update" (MSTU-2022), March 22-23, 2022, Omsk, Russia. – eLIBRARY ID: 48607016.
- [14] Fedosin A.S., Fedosin S.A. Cleaning of input data in automated systems of control and accounting of energy resources // Infocommunication technologies. – 2016. – V. 14. – № 2. – Pp. 162-168.
- [15] Fedosin A.S., Savkina A.V. Data quality problems in automated commercial energy consumption accounting systems // Caspian Journal: Control and High Technologies. – 2014. – № 2. – Pp. 158-164.
- [16] I.Yu. Popov, O.V. Stukach, P.A. Zorin, "Evaluation of the Quality of Commercial Thermal Energy Accounting Data by Total Variation Outlier Recognizer", Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 117-121, DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-117-121.
- [17] Liu Y., Stouffs R., Tablada A., Wong N.H., Zhang J. Comparing micro-scale weather data to building energy consumption in Singapore // Energy and Buildings. – 2017. – № 152. – Pp.776-791.
- [18] Koci J., Koci V., Madera J., Cerny R. Effect of applied weather data sets in simulation of building energy demands: Comparison of design years with recent weather data // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – № 100. – Pp. 22-32.
- [19] Farah S., Whaley D., Saman W., Boland J. Integrating climate change into meteorological weather data for building energy simulation, Energy and Buildings. – 2019. – № 183. – Pp. 749-760.
- [20] Zorin P.A., Stukach O.V. Analiz vliyaniya pogodnykh uslovii na dinamiku teplovoi energii v zhilom fonde goroda Tomsk / Innovative, information and comms tech: Proceedings of the XVII Int. sci.-pract. conf. – Moscow. – 2020. – C. 365-368. – ISSN 2500-1248. – eLIBRARY ID: 45557868.
- [21] Jalali Z., Shamseldin A.Y., Ghaffarianhoseini A. Impact assessment of climate change on energy performance and thermal load of residential buildings in New Zealand // Building and Environment. – 2023. – V. 243. – Paper 110627. – Doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110627.
- [22] Lupato G., Manzan M. Italian TRYs: New weather data impact on building energy simulations // Energy and Buildings. – 2019. – № 185. – Pp. 287-303.
- [23] Stukach O.V., Zorin P.A., Fedorov N.G. Outcomes of Energy-Saving Regulation of Thermal Energy on the Example of Tomsk and Budennovsk, Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – 2023. – № 1. – V. 11. – Pp. 53-56.
- [24] Barker S., Mishra A., Irwin D., Cecchet E., Shenoy P., Albrecht J. Smart: An open data set and tools for enabling research in sustainable homes / Proceedings of the 2012 Workshop on Data Mining Applications in Sustainability. – 2012. – Pp. 1-6.
- [25] Parson O., Fisher G., Hersey A., Batra N., Kelly J., Singh A. et al. Dataport and NILMTK: A building data set designed for non-intrusive load monitoring / 2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). – 2015. – Pp. 210-214.
- [26] Zorin P., Stukach O. Data of heating meters from residential buildings in Tomsk (Russia) for statistical modeling of the thermal characteristics of buildings / IEEE Dataport. – 2020. – [Online]. – Doi: 10.21227/3r4e-ch18.
- [27] Himeur Y., Alsalemi A., Al-Kababji A., Bensaali F., Amira A. Data fusion strategies for energy efficiency in buildings: Overview, challenges and novel orientations // Information Fusion. – 2020. – Pp. 1-36.
- [28] Stukach O., Zorin P. Long-Term Data from the Heat Meters in Residential Buildings Depending on the Outside Temperature and Characteristics of Buildings / IEEE Dataport. – April 13, 2021. – Ddoi: 10.21227/cw53-rr81. – <http://iee-dataport.org/4034>.
- [29] Zorin P.A., Stukach O.V. Database of Heat Energy Consumption by Multi-Storey Residential Buildings Depending on Meteorological Factors and Building Characteristics. – Reg. № 25452. – Bulletin of the Chronicles of the United Fund of Electronic Resources "Science

- and Education". – 2025. – № 03(190). – Doi: 10.12731/ofernio.2025.25452.
- [30] Seem J.E. Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings // *Energy and Buildings*. – 2007. – № 39(1). – Pp. 52-58.
- [31] Weng Y., Zhang N., Xia C. Multi-agent-based unsupervised detection of energy consumption anomalies on smart campus // *IEEE Access*. – 2019. № 7. – Pp. 2169-2178.
- [32] Nordahl C., Persson M., Grahn H. Detection of residents' abnormal behaviour by analysing energy consumption of individual households / 2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW). – 2017. – Pp. 729-738.
- [33] Janetzko H., Stoffel F., Mittelstadt S., Keim D.A. Anomaly detection for visual analytics of power consumption data // *Computers & Graphics*. – 2014. – № 38. – Pp. 27-37.
- [34] Alsalemi A., Ramadan M., Bensaali F., et al. Endorsing domestic energy saving behavior using micro-moment classification // *Applied Energy*. – 2019. – № 250. – Pp. 1302-1311.
- [35] Himeur Y., Alsalemi A., Bensaali F., Amira A. A novel approach for detecting anomalous energy consumption based on micro-moments and deep neural networks // *Cognitive Computation*. – 2020. – Pp. 1-23.
- [36] Ge S., Li J., Liu H., Liu X., Wang Y., Zhou H. Domestic energy consumption modeling per physical characteristics and behavioral factors // *Energy Procedia (Innovative Solutions for Energy Transitions)*. – 2019. – № 158. – Pp. 2512-2517.
- [37] Delzendeh E., Wu S., Lee A., Zhou Y. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review, Renewable and Sustainable // *Energy Reviews*. – 2017. – № 80. – Pp. 1061-1071.
- [38] Stukach O.V., Ershov I.A., Dvurechenskaya N.A. Neural Network Simulation of a Residential Building for a Data-Driven Thermal Consumption / 2025 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) Conference, 11-13 November 2025, Omsk, Russian Federation. – 2025. – Pp. 1-4, doi: 10.1109/Dynamics68764.2025.11302190.
- [39] Fekri M., Ghosh A.M., Grolinger K. Generating energy data for machine learning with recurrent generative adversarial networks // *Energies*. – 2019. – V. 12. – P. 13.
- [40] Chen-xi J., Ping J., Shi L. Intelligent control method of heating process including model prediction and climate compensation / 2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), Hanoi, Vietnam. – 2020. – Pp. 50-55. – Doi: 10.1109/ICAMechS49982.2020.9310086.
- [41] Stukach O.V., Ershov I.A., Kutuzov D.V. LSTM-model of thermal energy consumption in a multi-storey residential building // *Systems Engineering and Infocommunications*. – № 4(4). – Pp. 11-14.
- [42] Li G., Kou C., Wang H. Estimating city-level energy consumption of residential buildings: A life-cycle dynamic simulation model // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – 240. – Pp. 451-462.
- [43] Stukach O.V., Karapish E.A. Identification of a stochastic model of heat consumption in multi-storey residential buildings in the city / Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2024): Proceedings of the IV Int. sci.-pract. conf., Minsk, April 25-26, 2024 / Belarusian State University. – Pp. 172-175. – ISBN: 978-985-881-636-0. - eLIBRARY ID: 67917843. – EDN: HFIKCA.
- [44] Stukach O.V., Ershov I.A. Neural network model of a residential building as a control object for a weather-dependent thermal energy regulator / Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines Conference, 11-13 November 2025, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. – 2025. – V. 13. – № 3. – Pp. 82-87. – Doi: 10.25206/2310-9793-2025-13-3-82-87.

Information about the authors

Oleg V. Stukach is with National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia; Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, e-mail: tomsk@ieec.org, ORCID: 0000-0001-6845-4285.

Ivan A. Ershov is with Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, e-mail: ershov@corp.nstu.ru, ORCID: 0000-0003-1524-6508.