

Демонстрация результатов энергосберегающего регулирования тепловой энергии на примере одного здания

О.В. Стукач^{1,2}, О.О. Габитова³

¹ Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

³ ООО "Развитие", Томск, Россия

Аннотация: Организация потребления тепловой энергии в жилых зданиях довольно затратна, поэтому тема рационального использования тепловой энергии и энергосбережения не теряет актуальности для всех регионов страны. На примере изучения динамики теплопотребления в энергоэффективном многоквартирном доме города Томска показана необходимость скорейшего внедрения энергосберегающих мероприятий. В связи с возрастанием потребностей и ураганном росте цен на тепловую энергию в сфере жилищно-коммунального хозяйства требуется усиление активной деятельности в области автоматического регулирования теплоснабжения, поскольку оно даёт наибольшую экономию энергии по сравнению с любой теплозащитой.

Ключевые слова: многоквартирное жилое здание, удельное потребление энергоресурсов, теплосбережение, энергоэффективность, энергосбережение, мера энергоэффективности.

ВВЕДЕНИЕ

Область рационального энергопотребления никогда не теряла актуальности и получает новые направления исследований в связи с загрязнением атмосферы при использовании энергоресурсов и углеродной повесткой за рубежом [1–3]. Энергоэффективность и энергосбережение входят в пять стратегических направлений приоритетного технологического развития, которые являются огромным резервом отечественной экономики. Помимо экономических проблем стоит учитывать и экологические условия, такие как ухудшение существования человека в условиях городских агломераций. Строительство энергоэффективных многоквартирных жилых зданий и повышение эффективности существующих позволяет решить указанные проблемы [2].

Два основных решения в области энергосбережения, в частности экономии тепловой энергии, заключаются в разработке и внедрении современных механизмов реализации мероприятий по теплозащите и автоматическому регулированию [4–7]. Первый способ снижения тепловых потерь связан с использованием теплоизоляционных материалов и окон с низкой теплоотдачей. Как правило, этот способ связан с капитальным ремонтом здания. Срок окупаемости работ серьёзно увеличивается за счёт обследований и подготовки проектно-сметной документации. Второй способ связан с установкой автоматизированных тепловых пунктов, оснащённых автоматическими приборами для слежения за температурой наружного воздуха. В этой области на рынке существует множество готовых решений [8–13]. Более того, установка автоматических регуляторов даёт существенно большую экономию теплопотребления, чем любые мероприятия по теплозащите [4, 6].

Регулирование всех тепловых пунктов основано на изменении подачи теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха. Правильной настройкой регулятора можно добиться устойчивой комфортной температуры внутри здания. Эта настройка становится насущной необходимостью из-

за того, что изменение метеорологических условий, в частности, температуры наружного воздуха, год от года принимает всё более нестационарный характер.

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрим динамику теплопотребления в доме г. Томска (ул. Киевская, 26). В доме установлен автоматический регулятор с датчиком наружной температуры (Рис. 1).



Рис. 1. Датчик температуры

Поскольку дом состоит из двух секций с разной площадью, учёт для них ведётся раздельно.

На Рис. 2 изображены нормализованные значения теплопотребления Q_n подъездов и наружной температуры T_n для всех отопительных сезонов. Нормализация позволяет привести переменные к одному масштабу с сохранением всех статистических характеристик:

$$Q_n = (q - \bar{q}) / (s\delta),$$

где \bar{q} – среднее арифметическое значение членов ряда

теплопотребления q , δ – среднеквадратическое отклонение (СКО), s – площади подъездов. Время, в которое учёт не ведётся, исключено из построения для сокращения длинных промежутков между кривыми. Температура при построении берётся с обратным знаком для удобства сравнения кривых, так как при понижении температуры потребление тепловой энергии возрастает. Наоборот, при повышении T теплопотребление Q снижается.

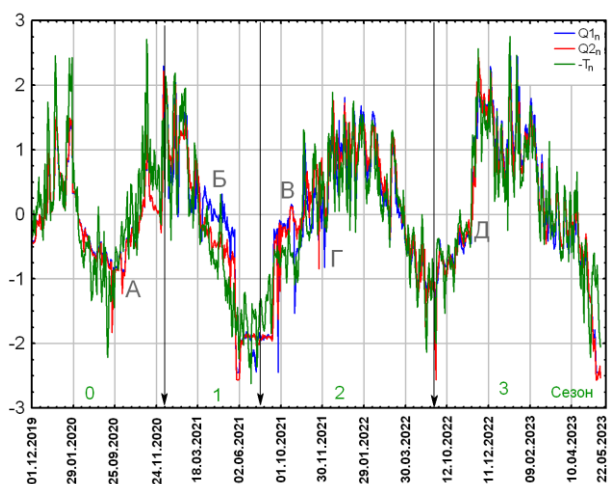


Рис. 2. Нормализованные значения теплопотребления первого подъезда $Q1_n$, 2-3-4 подъездов $Q2_n$ и обратная нормализованная температура снаружи здания $-T_n$. В идеале все три графика должны совпадать.

В нулевой и первый сезон (область А) в доме был установлен один теплосчётчик, $Q1_n=Q2_n$. Автоматики в подъездах не было, использовалась открытая схема теплопотребления. Графики Q и обратной температуры T существенно отличаются, их зависимость невелика. Хорошо видно, что качество учёта снижается в конце отопительных сезонов (например, область Б).

После летнего перерыва в доме была установлена автоматика, и схему теплоснабжения изменили на закрытую. Сначала это было проведено для первого подъезда (область В): хорошо видно, что движение $Q1$ повторяет $-T$, а $Q2$ – нет. После настройки автоматики регулирование обоих подъездов стало двигаться к желаемому (область Г): графики начали приближаться друг к другу. Во втором и третьем сезонах продолжается автоматическое регулирование теплопотребления. Но, как видно из представленных графиков, регулятор плохо отрабатывает резкие изменения температуры (область Д).

На Рис. 3 изображены разности модулей нормализованных значений теплопотребления подъездов и обратной наружной температуры. Это математически некорректные, но тем не менее показательные меры зависимости.

В идеальном регуляторе эти разности должны быть близки к нулю. Конечно, в конце второго и в третьем сезонах эти разности наименьшие, но довольно велики. Кроме того, в начале и особенно в конце сезонов эти разности наибольшие. Это можно объяснить быстротой смены разностей ночных и дневных температур.

Очевиден перетоп, с которым жители борются открытием окон. Мало того, существенно различается теплопотребление подъездов, особенно в дни резких изменений наружной температуры.

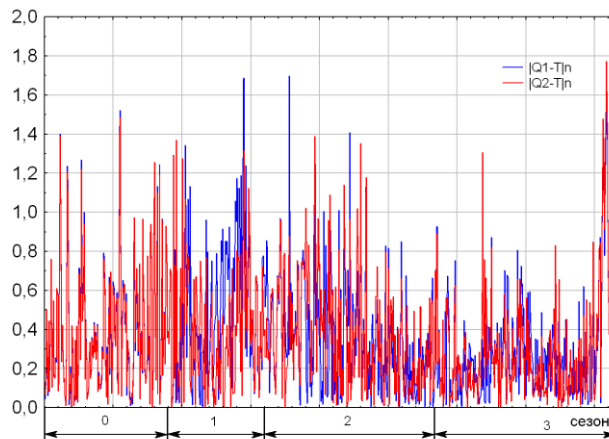


Рис. 3. Разности модулей нормализованных теплопотреблений подъездов $Q1$, $Q2$ и обратной наружной температуры $-T$

Разберём каждый отопительный сезон отдельно. В отсутствие автоматики (Рис. 4) явно видно влияние тепловой инерции здания и большое лишнее теплопотребление даже в случае отсутствия резких перепадов температуры наружного воздуха. Графики существенно расходятся, их функциональная зависимость весьма невелика.

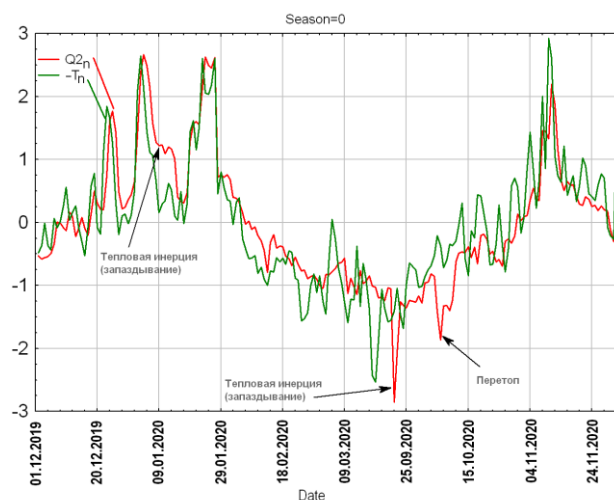


Рис. 4. Нормализованные значения теплопотребления подъездов $Q1=Q2$ и обратной наружной температуры $-T$ в нулевой сезон (отсутствие авторегулирования).

В первый отопительный сезон ситуация с теплоснабжением не изменилась (Рис. 5). Видно большое значение лишнего теплоснабжения, особенно для первого подъезда: график $Q1$ практически всегда существенно выше $Q2$. Перетоп для первого подъезда сохранится и в последующие отопительные сезоны. Это может объясняться тем, что через подъезд проходит транзитная теплотрасса, но её влияние на разогрев дома не учитывается. Попытка сократить подачу тепла может привести к замерзанию верхних этажей из-за

ветровой нагрузки. В конце сезона регулятор был установлен в первый подъезд, но он не настроен и не налажен.

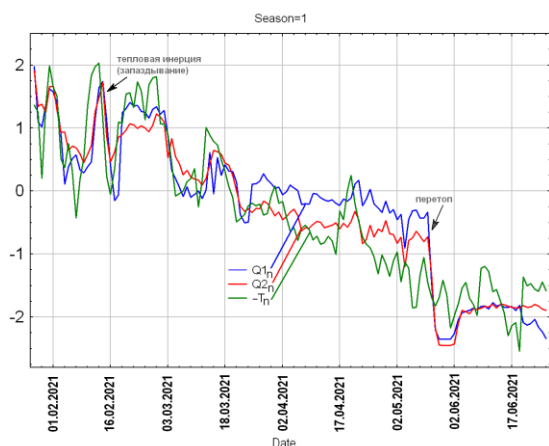


Рис. 5. Нормализованные значения теплопотребления подъездов и обратной наружной температуры $-T$ в первый сезон (отсутствие авторегулирования).

Во второй отопительный сезон регулятор в первом подъезде по-прежнему не настроен и не налажен (Рис. 6). В ноябре устанавливается автоматика и для остальных подъездов дома. Осуществляется настройка регулятора, и наблюдается повышение качества регулирования теплопотребления. Оно снижается к концу сезона.

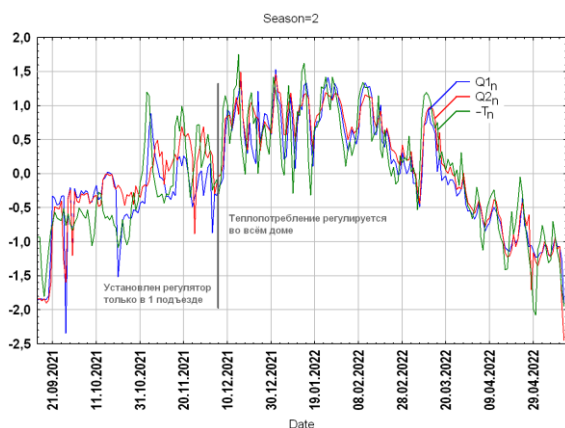


Рис. 6. Нормализованные значения теплопотребления подъездов и обратной наружной температуры T во второй сезон.

Как и в прошлые годы, энергетики стремятся продать как можно больше тепловой энергии, компенсируя недополученный доход зимой. Графики теплопотребления и температуры наружного воздуха начинают расходиться, система не отрабатывает резких перепадов температуры.

В начале третьего сезона наблюдается низкое качество регулирования, причём довольно продолжительное время (Рис. 7). В зимний период с декабря качество регулирования повышается, автоматика отрабатывает резкие атмосферные перепады температуры. Стрелками (1–3) обозначены эффекты повышенной ошибки авторегулирования: запаздывание из-за тепловой

инерции здания и разница в регулировании теплопотребления подъездов. В конце апреля и до окончания сезона регулирование по сути прекратилось (4): было принято решение об окончании сезона, а температура атмосферы понизилась. Но было поздно...

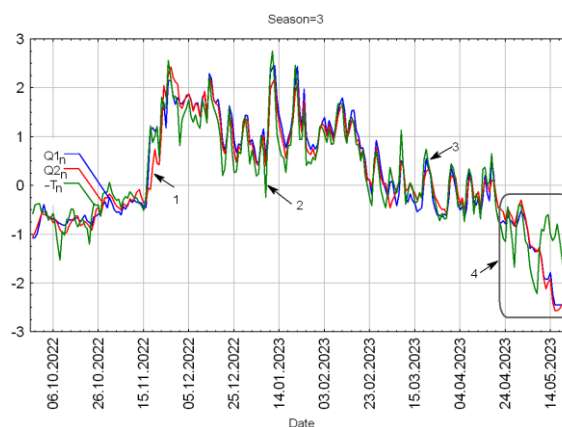


Рис. 7. Нормализованные значения теплопотребления подъездов и обратной наружной температуры $-T$ в третий сезон.

В целом достигнута хорошая повторяемость изменения теплопотребления и наружной температуры, графики незначительно отличаются друг от друга. Но регулятор плохо отрабатывает резкое понижение температуры атмосферы. В дни резких потеплений (минимумы на графиках температуры) потребление тепловой энергии также возрастает, что может объясняться сбросом тепла в атмосферу методом открывания окон жителями.

На Рис. 8 изображены те же графики для третьего сезона в более крупном масштабе для января и февраля 2023 г. Потребление тепловой энергии для первого подъезда всегда больше остальных, регулятор даёт большую ошибку в случае резкого понижения температуры (максимумы графика $-T$), в доме становится существенно холоднее.

Регуляторы с разной настройкой по-разному отрабатывают изменение входного воздействия. Теплопотребление Q_{2n} сильнее отличается от $-T$, чем Q_{1n} , что объясняется большей площадью второй секции дома и, следовательно, большей тепловой инерцией. В целом работу регулятора по текущей температуре наружного воздуха как задающему воздействию нельзя считать оптимальной, так как ошибка регулирования довольно велика.

Таким образом, очевидно, что в доме к 2023 году задача экономии тепловой энергии как будто бы решена, а повышения уровня комфортности – не в полной мере.

Для оценки экономии тепловой энергии рассмотрим графики средних нормализованных значений теплопотребления подъездов и обратной температуры наружного воздуха в рассматриваемые отопительные сезоны (Рис. 9).

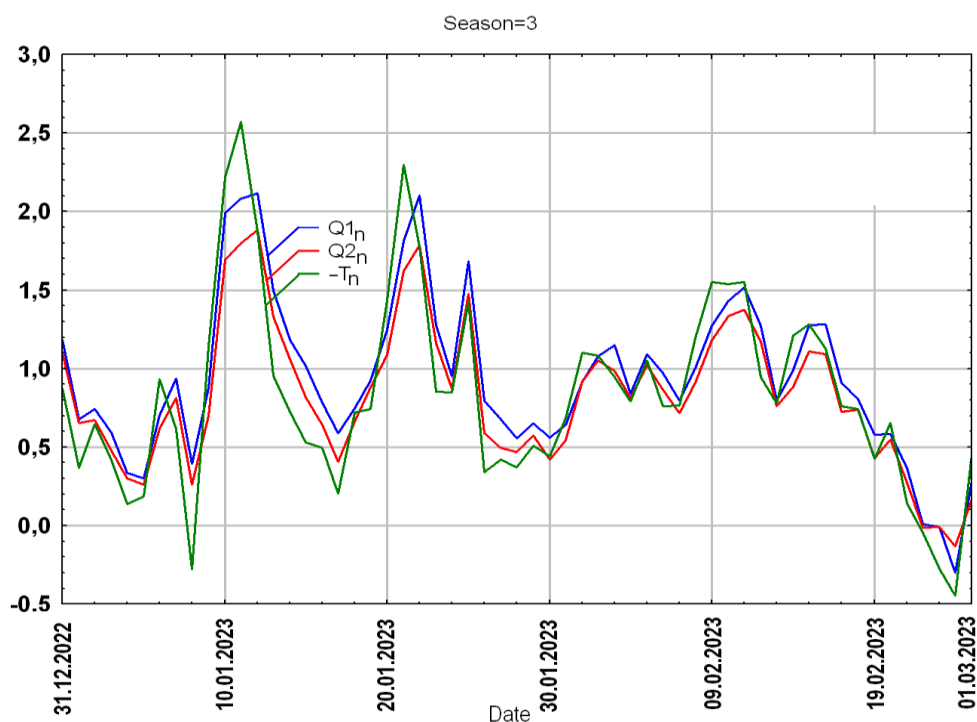


Рис. 8. Нормализованные значения теплопотребления подъездов и обратной наружной температуры $-T$ в январе и феврале 2023 г.

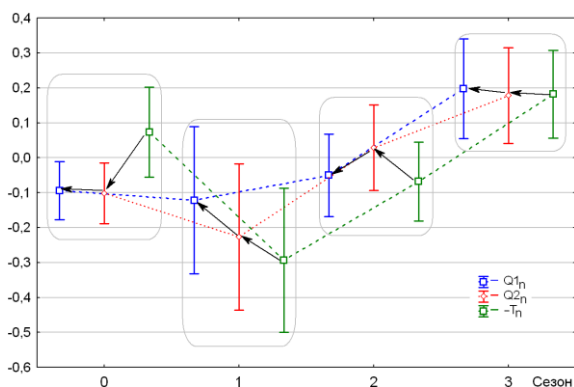


Рис. 9. Средние нормализованные значения теплопотребления подъездов и обратной температуры наружного воздуха $-T$ в рассматриваемые отопительные сезоны

Значения теплопотребления подъездов и обратной температуры наружного воздуха подпадают в доверительные интервалы друг друга, что говорит о терпимом качестве регулирования в среднем. Третий сезон 2022–23 года – самый холодный из всех исследованных, следовательно, и потребление тепла выше обычного. Чёрными стрелками отмечено различие между теплопотреблением подъездов и наружной температуры. Видно, что к третьему сезону настройку регулятора «в среднем» можно считать оптимальной: нет существенных различий ни в среднем значении переменных, ни в доверительных интервалах.

Оценим экономию тепловой энергии путём сравнения первого и третьего сезонов, когда регулирования не было, и когда оно осуществляется с наилучшим ка-

чеством. Отсортируем значения температуры наружного воздуха по возрастанию и в зависимости от температуры построим значения теплопотребления подъездов, отнесённые к площади (Рис. 10).

Видно, что через отчёты теплопотребления можно провести регрессионные прямые: потребление тепловой энергии практически линейно зависит от наружной температуры. Эти прямые недалеко отстоят друг от друга: средняя разница между теплопотреблением подъездов находится в пределах статистической погрешности. Уравнения этих прямых построены в программе Statistica [14] и приведены на рисунке.

Коэффициенты наклона этих прямых дают средние значения по сезонам. Их отношение показывает, во сколько раз изменилось среднее значение теплопотребления в разрезе сезонов:

$$\frac{Q^{(1)}}{Q^{(3)}} = \frac{-0,1267}{-0,0868} = 1,45.$$

Таким образом, средняя экономия тепловой энергии после установки автоматических регуляторов составила 45 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Установка автоматических регуляторов в доме изменила динамику теплоснабжения: зависимость потребления тепловой энергии от температуры наружного воздуха стала более сильной, что позволило добиться повышения уровня комфорта.

2. Тепловая инерция здания не позволяет мгновенно регулировать температуру внутри помещений и, следовательно, достигнуть предельно возможного

уровня комфорта. Во время резкого понижения температуры потребление тепловой энергии запаздывает, при повышении температуры наблюдается перетоп.

Поэтому задача погодозависимого регулирования окончательно не решена, исходя из критерия минимума ошибки регулирования.

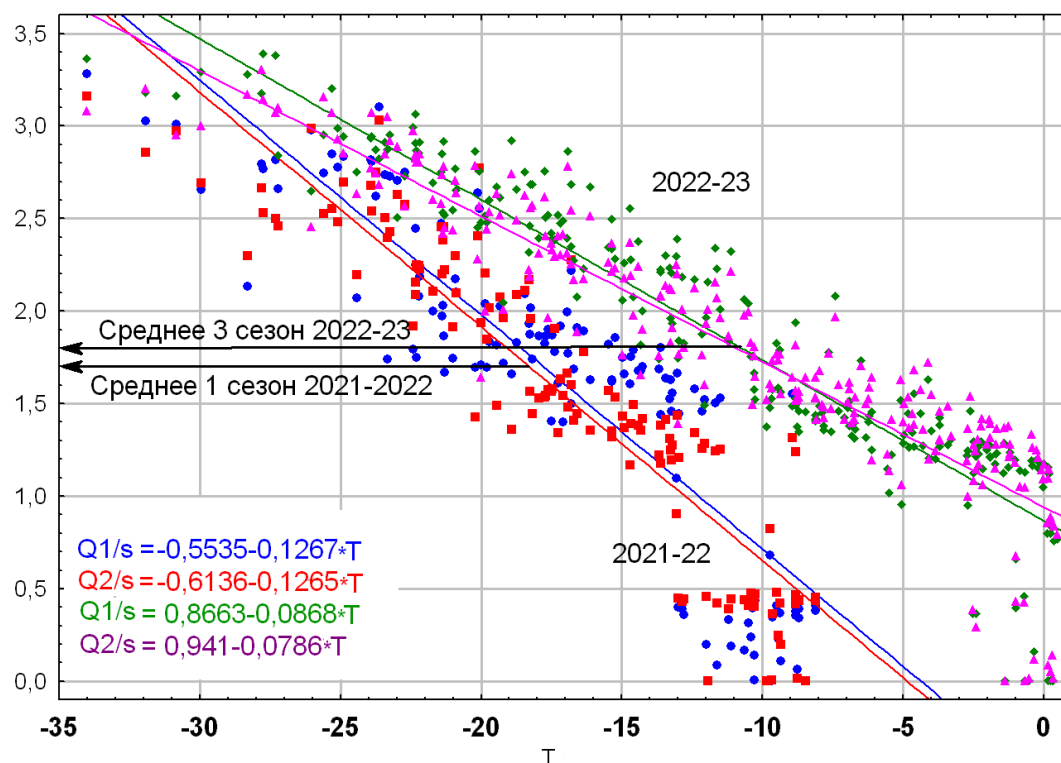


Рис. 10. Значения теплопотребления Q/s в зависимости от температуры T в разрезе первого и третьего отопительных сезонов

3. Установка автоматических регуляторов в доме позволила добиться существенного повышения энергоэффективности: средняя экономия тепловой энергии составила 45 %.

4. Настройку регулятора «в среднем» можно считать оптимальной: нет существенных различий между средним значением нормализованного теплопотребления подъездов и температуры наружного воздуха. Тем не менее, ошибка регулирования остаётся значительной, особенно в дни положительной температуры наружного воздуха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Введение интеллектуальной инженерной системы для текущего содержания и обслуживания объекта даст возможность рационально использовать энергетические ресурсы, а интеграция автоматизированных инженерных систем в создаваемую или существующую инфраструктуру жизнеобеспечения объектов будет способствовать повышению комфорта жителей и устойчивому развитию урбанизированных территорий» [15]. Как видим, неплохая возможность рационально использовать энергетические ресурсы существует и без интеллекта, с применением обычных регуляторов [16].

Итак, показательный пример демонстрирует способность не только снизить затраты на отопление авторегулированием, но и обеспечить большой комфорт жителям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят ООО «Центр энергетических технологий» (г. Томск) за работы по автоматизации теплопотребления и предоставленные данные по теплоучёту.

ЛИТЕРАТУРА

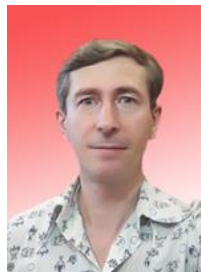
- [1] J.-P. Levy, F. Belaid, “The determinants of domestic energy consumption in France: Energy modes, habitat, households and life cycles”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) 2104–2114, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.022.
- [2] X. Wang, W. Feng, W. Cai, H. Ren, C. Ding, N. Zhou, “Do residential building energy efficiency standards reduce energy consumption in China? A data-driven method to validate the actual performance of building energy efficiency standards”, *Energy Policy* 131 (2019) 82–98, doi: 10.1016/j.enpol.2019.04.022.
- [3] M. Baldini, M. Brøgger, H.K. Jacobsen, K.B. Wittchen, “Cost-effectiveness of energy efficiency improvements for a residential building stock in a Danish district heating area”, *Energy Efficiency*, doi: 10.1007/s12053-020-09889-x.
- [4] 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: 48504165.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Danfoss ECL 310 (087H3040). Электронный регулятор температуры. – <https://tdkomfort.ru/shop/danfoss-elektronnyj-regulyator-temperatury-ecl-310-087h3040y.html>.
- [9] TRM32 контроллер для отопления с ГВС. – <https://owen.ru/product/trm32/specifications>.
- [10] TRM132M ОВЕН (TRM 132M ОВЕН) – контроллер отопления и горячего водоснабжения. – <https://insat.ru/products/?category=1152>.
- [11] ОВЕН TRM132M контроллер системы отопления и ГВС. – <https://roskip.ru/?id=9244>.
- [12] Программируемый логический контроллер ВЭСТ-02. – <https://npwest.ru/index.php?p=21&id=19>.
- [13] Регулятор отопления ВЗЛЕТ. – https://vzljot.ru/catalogue/avtomatizaciya_sistem_otopleniya/vzlet_ro-2m/.
- [14] Стукач О.В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2011. – 163 с.
- [15] Савина О.В., Парыгин Д.С., Финогеев А.А., Чикин А.Д., Щербаков А.Г. Поддержка принятия решений по повы-

шению энергоэффективности объектов городской инфраструктуры // Социология города. – 2022. – № 4. – С. 58–69.

- [16] Жмудь В.А., Димитров Л.В., Носек Я. Системы автоматического управления. Новые концепции и структуры регуляторов: учебник. – М.: Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 158 с. – ISBN 978-5-4497-1876-1.



Стукач Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и Новосибирского государственного технического университета, основатель Томской группы Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике IEEE.
E-mail: tomsk@ieee.org.



Габитова Ольга Олеговна – управляющая ООО «Развитие» (г. Томск).
E-mail: tomsk@ieee.org.

Статья получена 30.06.2023

Outcomes of Energy-Saving Regulation of Thermal Energy on the Example of One Building

O.V. Stukach^{1,2}, O.O. Gabitova³

¹ National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

³ LLC Razvitie, Tomsk, Russia

Abstract. The organization of heat energy consumption in residential buildings is quite expensive, so the problem of rational use of heat energy and energy saving does not lose relevance for all regions. Using the example of studying the heat consumption dynamics in an energy-efficient multi-storey building in Tomsk, the early introduction of energy-saving activities is shown. Due to the growing needs and the hurricane increase in prices for thermal energy for housing and communal services, it is necessary to proactive fortify a driving innovation in the field of automatic regulation of heat supply, since it provides the most energy savings compared any thermal protection.

Key words: multi-storey residential building, particular energy consumption, heat saving, energy efficiency, energy saving, energy efficiency measure.

REFERENCES

- [1] J.-P. Levy, F. Belaid, “The determinants of domestic energy consumption in France: Energy modes, habitat, households and life cycles”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) 2104–2114, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.022.
- [2] X. Wang, W. Feng, W. Cai, H. Ren, C. Ding, N. Zhou, “Do residential building energy efficiency standards reduce energy consumption in China? A data-driven method to validate the actual performance of building energy efficiency standards”, *Energy Policy* 131 (2019) 82–98, doi: 10.1016/j.enpol.2019.04.022.
- [3] M. Baldini, M. Brøgger, H.K. Jacobsen, K.B. Wittchen, “Cost-effectiveness of energy efficiency improvements for a

- residential building stock in a Danish district heating area”, Energy Efficiency, doi: 10.1007/s12053-020-09889-x.
- [4] 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.
- [5] P.A. Zorin, S.V. Kuprekov, A.V. Pugovkin, O.V. Stukach. Control of energy efficiency of heat supply of standard buildings. Electronic means and Control Systems. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk), 2018, no. 1–2, pp. 302–305.
- [6] P.A. Zorin, O.V. Stukach. Dispersion analysis of the data of commercial accounting of thermal energy in the Tomsk housing stock. Nauka. Technologies. Innovations: Proceedings. Novosibirsk, Publishing House of NSTU, 2019, ISBN 978-5-7782-4007-0, p. 72–75.
- [7] 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.
- [8] Danfoss ECL 310 (087H3040). Electronic temperature controller, <https://tdkomfort.ru/shop/danfoss-elektronnyj-regulyator-temperatury-ecl-310-087h3040y.html>.
- [9] TRM32 controller for heating with hot water, <https://owen.ru/product/trm32/specifications>.
- [10] TPM132M OVEN controller for heating with hot water, <https://insat.ru/products/?category=1152>.
- [11] OVEN TPM132M heating and hot water supply controller, <https://roskip.ru/?id=9244>.
- [12] VEST-02 Programmable logic controller, <https://npowest.ru/index.php?p=21&id=19>.
- [13] VZLET heating regulator, https://vzljot.ru/catalog/avtomatizaciya_sistem_otopleniya/vzlet_ro-2m/.
- [14] O.V. Stukach, "Statistica software in quality management problems", Tomsk: TPU Publishing House, 2011, 163 p.
- [15] O.V. Savina, D.S. Parygin, A.A. Finogeev, A.D. Chikin, A.G. Shcherbakov, "Decision-making support for improving the energy efficiency of urban infrastructure facilities", City Sociology, 2022, no. 4, p. 58–69.
- [16] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, Ya. Nosek, "Automatic control systems. New concepts and structures of regulators: textbook", Moscow: AI Pi Ar Media, 2023, 158 p. ISBN 978-5-4497-1876-1.



Oleg V. Stukach is founder of the Tomsk IEEE Chapter, Dr. of Sci., Professor of the A.N. Tikhonov Moscow Institute Electronics and Mathematics of National Research University Higher School of Economics and Novosibirsk State Technical University. E-mail: tomsk@ieee.org.



Olga O. Gabitova is supervisor of the Razvitie Ltd. (Tomsk) E-mail: tomsk@ieee.org.

The paper has been received on 30/06/2023.