

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 628.87. 004.9

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226



Оригинальная статья /Original article

**Анализ энергетического баланса и моделирование системы отопления
для жилого дома**

И. Тальха

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

Резюме. Цель. Данное исследование сосредоточено на анализе спроса на отопление в здании, а также на соответствующем проектировании и моделировании отопительной системы. В исследовании оценивается тепловая эффективность здания, выявляются ключевые факторы, такие как внешние температурные условия и внутренние тепловые нагрузки. Исследование посвящено комплексному анализу энергетического баланса и проектированию системы отопления для жилого дома, расположенного в городе Виченца, Италия, с использованием метода моделирования энергетического баланса здания (Building Energy Modeling, BEM) в программном комплексе IES-VE 2023. **Метод.** Спрос на отопление моделируется и рассчитывается с учетом динамических условий, а отопительная система проектируется таким образом, чтобы обеспечить оптимальную работу и энергоэффективность. Для моделирования работы системы используются передовые инструменты, что позволяет оптимизировать потребление энергии и экономичность затрат. **Результат.** Разработана и проанализирована система отопления с использованием воздушного теплового насоса и радиантного пола, параметры которой были оптимизированы с учетом гидравлических характеристик и тепловых потерь. Результаты предоставляют ценные данные для эффективного проектирования отопительных систем и управления энергией в строительных проектах. **Вывод.** Анализ BEM с использованием идеальной системы для энергетического баланса, включая как чувствительные, так и латентные тепловые потоки, показал стабильную взаимосвязь между прибавками и потерями, иллюстрируя тепловую эффективность здания. Полученные результаты служат надежной основой для дальнейших разработок и внедрения энергоэффективных технологий в области проектирования систем отопления жилых зданий в аналогичных климатических зонах.

Ключевые слова: проектирование, отопительная система, тепловая эффективность, энергоэффективность

Для цитирования: И.Тальха. Анализ энергетического баланса и моделирование системы отопления для жилого дома. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):220-226. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226

Energy balance analysis and heating system modeling for a residential building

I.Talha

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University),
44 Nikolaeva St., Vladikavkaz 362021, Russia

Abstract. Objective. The study focuses on the analysis of heating demand in the building, as well as on the design and modeling of the heating system. The thermal efficiency of the building is assessed, key factors are identified: external temperature conditions and internal heat loads. The study is devoted to the comprehensive analysis of the energy balance and the design of the heating system for a residential building located in Vicenza, Italy, using the Building Energy Modeling

(BEM) method in the IES-VE 2023 software package. **Method.** Heating demand is modeled and calculated taking into account dynamic conditions, and the heating system is designed for optimal operation and energy efficiency. Advanced tools are used to model the system operation, which allows for optimized energy consumption and cost efficiency. **Result.** An air source heat pump and radiant floor heating system is designed and analyzed, the parameters of which are optimized taking into account hydraulic characteristics and heat losses. The results provide valuable data for the efficient design of heating systems and energy management in building projects. **Conclusion.** BEM analysis using an ideal system for energy balance, including both sensible and latent heat fluxes, showed a stable relationship between gains and losses, illustrating the thermal efficiency of the building. The results serve as a basis for further development and implementation of energy-efficient technologies in the design of heating systems for residential buildings in similar climate zones.

Keywords: design, heating system, thermal efficiency, energy efficiency

For citation: I.Talha. Energy balance analysis and heating system modeling for a residential building. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):220-226. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226.

Введение. В условиях современных требований к энергоэффективности и устойчивому развитию зданий особое значение приобретает детальный анализ тепловых характеристик и энергетических потребностей жилых объектов с учетом климатических условий конкретного региона. В рамках исследования проведен климатический анализ, включающий оценку температурных режимов и параметров влажности воздуха, а также моделирование внутренних тепловых поступлений и энергетических потоков здания.

Особое внимание уделено количественной оценке чувствительных и латентных тепловых нагрузок, а также потребностей в отоплении, охлаждении и дехумификации на ежемесячной и годовой основе. На основе полученных данных разработана и проанализирована система отопления с использованием воздушного теплового насоса и radiantного пола, параметры которой были оптимизированы с учетом гидравлических характеристик и тепловых потерь.

Постановка задачи. Был проведен анализ с использованием BEM для кейс-исследования в Виченце, Италия, с использованием IES-VE 2023, результаты которого обрабатывались в Excel. Исследование оценивало энергетический баланс (ежемесячные чувствительные и скрытые количества) и энергетические потребности (ежемесячное и годовое охлаждение, отопление и дехумификация). Виченца расположена в зоне E (DPR 412/1993, HDD 2101–3000) и характеризуется холодными зимами и мягким летом, с отопительным сезоном с 15 октября по 14 апреля, с максимальным временем работы отопления до 14 часов в день. Как показано на рис. 1, в городе наблюдаются значительные колебания температуры воздуха (DBT) в течение года, со среднегодовой температурой 12,4°C.

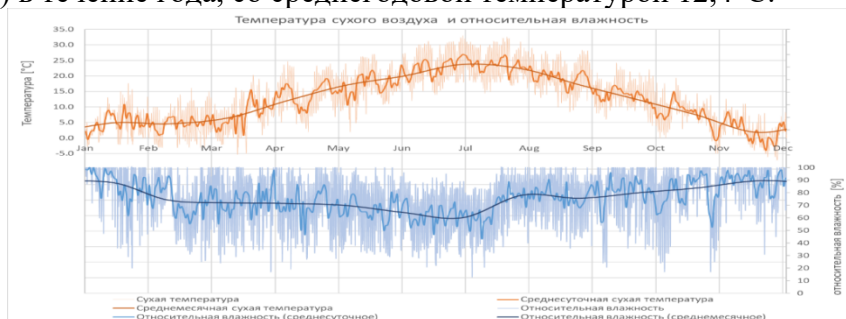


Рис. 1 – Температура сухого термометра и относительная влажность

Три линии для каждой категории соответствуют почасовым, суточным и месячным значениям, при этом темные оттенки указывают на каждый временной интервал

Fig. 1 – Dry thermometer temperature and relative humidity

The three lines for each category correspond to hourly, daily, and monthly values, with dark shades indicating each time interval

Температура в сезон охлаждения с октября по апрель обычно варьируется от $1,8^{\circ}\text{C}$ до $12,2^{\circ}\text{C}$ в среднем, с минимальной температурой $-7,1^{\circ}\text{C}$, зарегистрированной в ночное время, и максимальной температурой $24,7^{\circ}\text{C}$ в дневные часы.

Что касается относительной влажности (RH), в Виченце преобладает прохладная, но влажная погода, при этом средний уровень влажности остается повышенным около 70%, достигая пика в 89,5% в декабре. Проанализированное кейс-исследование представляет собой дом с общей площадью 140 м^2 , который был смоделирован в IES-VE.

Как показано на рис. 2, здание имеет прямоугольную основу размером $10\text{ м} \times 7\text{ м}$ и два этажа. Общая площадь оконных проемов составляет 23 м^2 , равномерно распределенных по четырем фасадам, при этом каждое окно имеет размеры $1\text{ м} \times 1\text{ м}$. Термическая проницаемость внешней стены, первого этажа, крыши и окон составляет 0,67, 0,28, 0,58 и $3,00\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ соответственно.

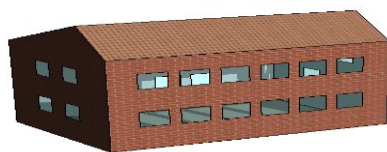


Рис. 2 – Аксонометрическое изображение исследуемого объекта

Fig. 2 – Axonometric image of the object under study

Тепло, выделяемое от присутствия людей, разделяется на 20 Вт конвективных и 40 Вт радиационных притоков на человека. Кроме того, скрытая теплота 40 Вт учитывается через влажность с массовым расходом $0,059\text{ кг}/\text{ч}$. Паттерн занятости следуют по часовой профиле, как показано на рис. 3. С другой стороны, тепловые притоки от электрооборудования следуют по суточному циклу, как показано на рис. 3, внося общий вклад в $13,4\text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год.

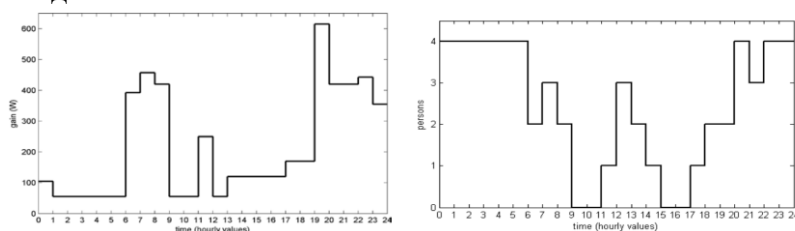


Рис. 3 – Профиль занятости и электропотребления

Fig. 3 – Employment and electricity consumption profile

Рис. 4 иллюстрирует баланс чувствительной и скрытой энергии для рассматриваемого кейс-исследования, основываясь на климатических условиях Виченцы.

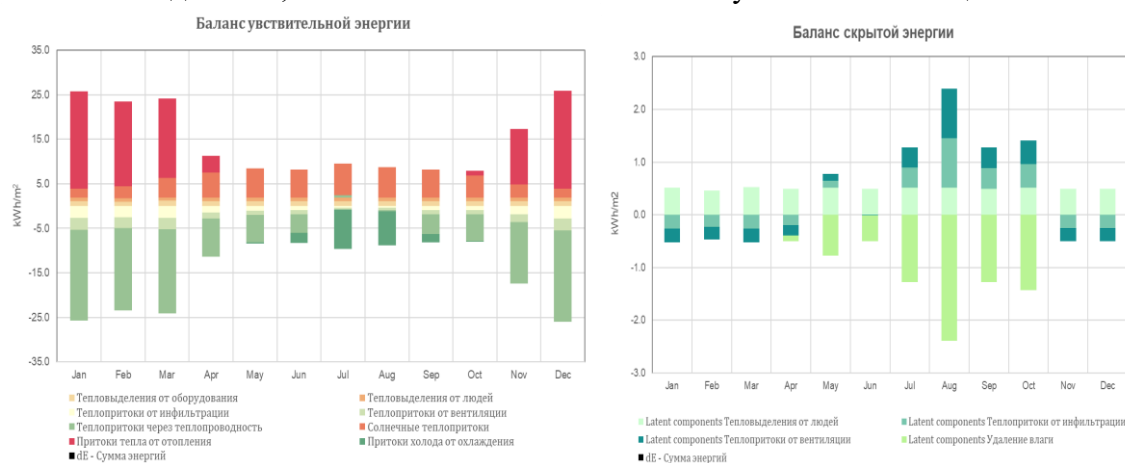


Рис. 4 – Энергетический баланс чувствительного и латентного тепла тепловой зоны

Fig. 4 – Energy balance of the sensitive and latent heat of the thermal zone

Чувствительная часть показывает, что наибольшая нагрузка на отопление приходится на декабрь, самый холодный месяц, составляя $22,1\text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, что на 76,7% больше,

чем в ноябре — 12,5 кВт·ч/м². В то время как установка для дехумификации, учитывая скрытые нагрузки, имеет нулевые значения с ноября по март, и постепенно снижается в отрицательном диапазоне, достигая более теплых месяцев года.

Рис.5 показывает энергетические потребности на отопление, охлаждение и дехумификацию в течение месяцев года. Особенно, с ноября по март, наблюдается значительная потребность в отоплении, достигающая пика в декабре — 22,1 кВт·ч/м². Эта потребность постепенно снижается, достигая 17,7 кВт·ч/м² в марте, что представляет собой снижение примерно на 20% по сравнению с декабрем.



Рис. 5 – Месячные энергетические потребности для отопления, охлаждения и осушения исследуемого объекта, расположенного в Виченце

Fig. 5 – Monthly energy requirements for heating, cooling and dehumidification of the studied facility located in Vicenza

Годовые энергетические потребности показывают, что Виченца имеет преимущественно холодный климат, что приводит к значительным потребностям в энергии для отопления, которые значительно превышают потребности для охлаждения и дехумификации. Конкретно, потребности в энергии для отопления составляют 98,2 кВт·ч/м², что соответствует 77% от общего объема.

Обсуждение результатов. Подсистема – Радиантный пол. Параметры радиаторного пола, приведенные в табл. 1 ниже, используются для моделирования пола в программном обеспечении.

Таблица 1. Свойства слоев 1 и 2 стратиграфии

Table 1. Properties of stratigraphy layers 1 and 2

N	Описание Description	Толщина [m] Thickness	Плотность Density [kg/m ³]	Удельный вес [kg/m ²] Specific gravity
1	Керамическая плитка Ceramic tiles	0.015	2300	34.5
2	Адаптивный слой для радиаторного пола Adaptive layer for radiator floor	0.05	1800	90
Общий удельный вес Total specific gravity		124.5		

Трубопроводы радиантного пола. Расстояние между центрами двух смежных труб установлено на 25 см, а температуры на входе и выходе составляют 35°C и 25°C соответственно. Здание состоит из 5 комнат, каждая из которых имеет свою водяную петлю. Длина каждой петли составляет 112 м, внутренний диаметр труб 16 мм, а толщина 2 мм. Каждая петля может содержать эквивалентный объем воды 22,52 л. Потери давления в радиаторном полу составляют 15,12 МПа. В табл. 2 приведено резюме основных параметров, полученных в результате проектирования радиаторного пола.

Таблица 2. Параметры для расчета размера радиантного пола

Table 2. Parameters for calculating the size of the radiant floor

Q Проект. Чув.тепл. [kW]	Q' в.реф [kW]	m [kg/s]	Δp_луп [MPa]	Δp_реф [MPa]
6.4	1.28	0.03	3.024	15.12

Подсистема распределения. Учитывая ограничение давления в 250 Па/м для жилых зданий и объемный расход всей системы радиаторного пола, равный 0,15 кг/с, внутренний

диаметр труб 20 мм приводит к падению давления 150 Па/м. Кроме того, для предотвращения тепловых потерь в этой подсистеме трубы были установлены в наиболее критическом случае, то есть снаружи, где линейная теплопередача установлена на уровне 0,034 Вт/м·К, а толщина теплоизоляции труб составляет 23 мм. Тепловые потери составляют 98,09 кВт·ч/год, что соответствует 0,611% от тепла, необходимого для обеспечения комфорта (табл. 3).

Таблица 3. Параметры для расчета размера радиантного пола
Table 3. Parameters for calculating the size of the radiant floor

Q_потер [kWh/year]	Q_тепло [kWh]	Доля потерь [%]
98.09	16056.56	0.611%

Подсистема – Насос. Для компенсации потерь давления была выбрана насосная установка с удельной мощностью 136,2 Вт/(л/с), используя соответствующую формулу, представленную ниже.

$$P_{spec} = \frac{P_t}{V'_{water}} \left[\frac{W}{l/s} \right]$$

где, P_{spec} - удельная мощность насоса в [Вт/(л/с)]; P_t - мощность, потребляемая насосом в [Вт]; V'_{water} - объемный расход воды в [л/с]

Генерирующая система – Воздушный тепловой насос. Входные данные моделирования теплового насоса в IESVE, в основном COP и профиль тепловой мощности, приведены в табл. 4.

Таблица 4. COP и тепловая мощность выбранного теплового насоса
для различных внешних температур при постоянной скорости компрессора, равной 100%
Table 4. COP and heat output of the selected heat pump
for various external temperatures at a constant compressor speed of 100%

Рабочие условия отопления Heating operating conditions		Рабочие условия отопления Heating operating conditions	
Температура внешнего воздуха [°C] Outside air temperature	Тепловая выходная мощность [kW] Thermal output power	Температура внешнего воздуха Outside air temperature	Коэффициент полезного действия [-] Efficiency
-15	6.3	-15	2.6
-7	7.6	-7	3
2	9.6	2	3.6
7	11	7	4

Тепловая мощность эмиссионной системы, температуры воды и её массовый расход. Рис. 6 иллюстрирует изменение тепловой мощности системы отопления ($\dot{Q}_{emitted}$) и энергетических потребностей в самый холодный день, 21 декабря. Поскольку это самый холодный день, тепловая мощность системы отопления остается почти постоянной, следуя тренду, близкому к горизонтальной линии на уровне 6,6 кВт, с незначительными колебаниями, достигающими пика в 6,78 кВт около 10 часов утра.

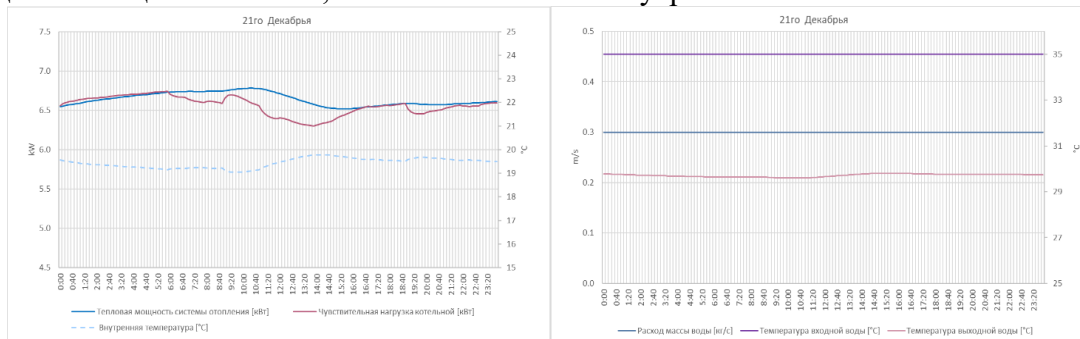


Рис. 6 – Почасовая производительность системы
Fig. 6 – Hourly system performance

Чувствительная нагрузка отопительного агрегата тесно следует за трендом $\dot{Q}_{emitted}$, что подтверждает, что система отопления эффективно удовлетворяет энергетические потребности. Так как 21 декабря является самым холодным днем, температура на входе

в систему отопления и массовый расход воды остаются постоянными, образуя четкую горизонтальную линию на уровнях 35°C и $0,3 \text{ кг/с}$ соответственно. Незначительные колебания наблюдаются только в выходной температуре из радиаторного пола, колеблющейся между $29,6^{\circ}\text{C}$ и $29,8^{\circ}\text{C}$.

Как показано на рис. 7, температура на входе начинается с примерно 35°C с незначительными колебаниями в начале каждого отопительного цикла. Она остается стабильной в течение всех интервалов отопления, демонстрируя постоянные условия на входе от системы генерации тепла. Напротив, температура на выходе имеет минимальный пик в начале каждого цикла отопления, а затем постепенно повышается с течением времени, достигая значений, близких к 30°C . Такое поведение отражает процесс теплообмена, происходящий в системе радиаторного пола.

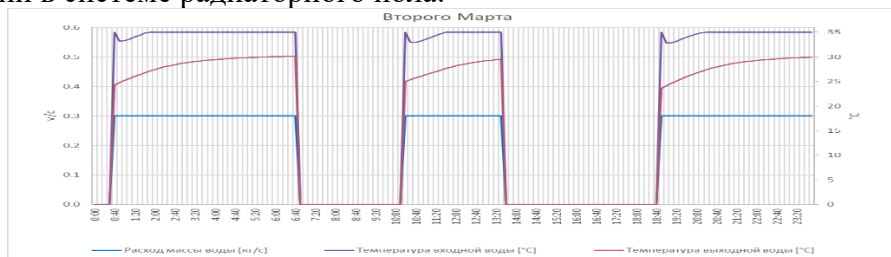


Рис. 7 – Почасовая производительность эмиссионной системы
Fig. 7 – Hourly output of the emission system

Ежемесячное сравнение. Рис. 8 показывает эмиссионную энергию, выходную энергию генерации, входную энергию генерации и энергетические потребности для отопления. Ясно, что система отопления полностью удовлетворяет энергетические потребности, с незначительной разницей между ними, которую можно устранить с помощью оптимизации системы управления. Кроме того, график подчеркивает эффективность системы каждый месяц, что отображается разрывом между входной энергией генерации и эмиссионной энергией.

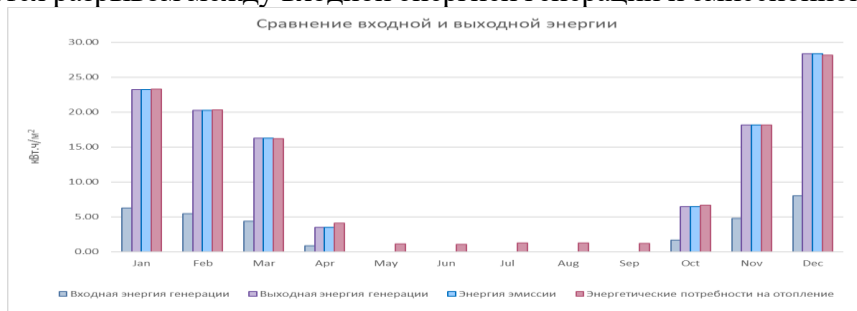


Рис. 8 – Энергетические значения системы: энергия эмиссии, энергия выхода генерации, энергия ввода генерации и потребности в энергии для отопления

Fig. 8 – Energy values of the system: emission energy, generation output energy, generation input energy, and energy requirements for heating

Самые холодные месяцы, декабрь и январь, демонстрируют наибольшие энергетические потребности ($28,15 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2/\text{месяц}$ и $23,28 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2/\text{месяц}$ соответственно), что приводит к пиковому потреблению электроэнергии в этот период ($11,06 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2/\text{месяц}$ в декабре, $8,77 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2/\text{месяц}$ в январе). В межсезонные месяцы (март, октябрь и ноябрь) энергетическая потребность снижается, и система соответственно регулирует свою работу. В летние месяцы (май - август) потребление энергии минимально или почти нулевое, и эта потребность не покрывается системой отопления.

Вывод. Анализ ВЕМ с использованием идеальной системы для энергетического баланса, включая как чувствительные, так и латентные тепловые потоки, показал стабильную взаимосвязь между прибавками и потерями, иллюстрируя тепловую эффективность здания. Годовые энергетические потребности на отопление выше, чем на охлаждение и осушение, что подтверждает, что климат региона имеет большие потребности в зимние месяцы, с пиковым значением в январе. В целом, моделирование с использованием идеальной

системы послужило надежной основой для будущих приложений, обеспечив ясность по энергетическим потребностям и направляя оптимизацию системы для специфического климата Виченцы. Анализ был сосредоточен на исследовании климатических характеристик и тепловых нагрузок с моделированием системы отопления в отопительный сезон для рассматриваемого случая. Результаты выбора проектирования и размеров различных подсистем гидравлической системы можно оценить на основе температуры в помещении. Выбранная система отопления эффективно поддерживает температуру внутри в пределах диапазона $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ в течение всего отопительного сезона (с 15 октября по 15 апреля), как и ожидалось от настроек системы управления.

В течение отопительного сезона количество часов вне диапазона $19-21^{\circ}\text{C}$ ограничено 46 часами, что составляет всего 2% года. Это демонстрирует, что система эффективно справляется с проектной тепловой нагрузкой 6,4 кВт, как было указано изначально. Система отопления с тепловым насосом и радиаторным полом демонстрирует эффективную работу, что подтверждается сезонным коэффициентом эффективности 3,65. Это свидетельствует о том, что система эффективно использует энергию в течение отопительного сезона, обеспечивая стабильное покрытие потребностей в отоплении при минимальном потреблении электроэнергии. Способность адаптироваться к изменяющимся сезонным потребностям дополнительно подчеркивает ее пригодность для энергоэффективного и устойчивого отопления.

Библиографический список:

1. ASHRAE, ASHRAE *Handbook—Fundamentals*, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2021.
2. ISO 13790:2008, *Energy Performance of Buildings – Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling*, International Organization for Standardization, 2008.
3. ISO 52016-1:2017, *Energy Performance of Buildings – Energy Needs for Heating and Cooling, Internal Temperatures, and Sensible and Latent Heat Loads*, International Organization for Standardization, 2017.
4. ISO 13370:2017, *Thermal Performance of Buildings – Heat Transfer via the Ground – Calculation Methods*, International Organization for Standardization, 2017.
5. CIBSE, *Building Performance Modeling: AM11*, Chartered Institution of Building Services Engineers, London, U.K.
6. CIBSE, *Environmental Design: Guide A*, Chartered Institution of Building Services Engineers, London, U.K.

References:

1. ASHRAE, ASHRAE Справочник по основам, Атланта, Джорджия: Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха, 2021 г.
2. ISO 13790:2008, Энергоэффективность зданий. Расчет энергопотребления для отопления и охлаждения помещений, Международная организация по стандартизации, 2008 г.
3. ISO 52016-1:2017, Энергоэффективность зданий. Потребность в энергии для отопления и охлаждения, внутренняя температура, явная и скрытая тепловая нагрузка, Международная организация по стандартизации, 2017 г.
4. ISO 13370:2017, Теплоэффективность зданий. Теплопередача через грунт. Методы расчета, Международная организация по стандартизации, 2017 г.
5. CIBSE, Моделирование эксплуатационных характеристик зданий: AM11, Институт дипломированных инженеров строительных служб, Лондон, Великобритания.
6. CIBSE, Проектирование окружающей среды: Руководство А, Институт дипломированных инженеров строительных служб, Лондон, Великобритания.

Сведения об авторе:

Ихаб Тальха, аспирант, кафедра «Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования»; ihabtalha.it@gmail.com

Information about author:

Ihab Talha, Postgraduate Student, "Computer modeling and automation of design"; ihabtalha.it@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 15.01.2025.

Одобрена после рецензирования / Reviced 01.03.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 10.05.2025.