

УДК 697.112

ОЦЕНКА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Баденко В.Л.², Шкильнюк М.А.^{1,2}

¹, Белорусско-Российский университет, 212000, Беларусь, г. Могилев, проспект Мира, 43, e-mail: eeld9696@gmail.com

²Инженерно-строительный институт (структурное подразделение), Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 195 251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: badenko_vl@spbstu.ru

Аннотация. В исследовании представлены результаты натурных измерений термического сопротивления ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий, сгруппированных по категориям технического состояния, а также данные сопоставления фактических теплотехнических характеристик с проектными значениями. Установлено, что снижение фактического термического сопротивления относительно расчетного детерминировано преимущественно конструктивным решением и техническим состоянием ограждений, а не типом применяемых материалов. Монолитные (кирпичная/блочная кладка) и сборные конструкции заводского изготовления демонстрируют соответствие заявленным теплозащитным свойствам при удовлетворительном техническом состоянии.

Цель: установить влияние конструктивного исполнения и технического состояния ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий на отклонение фактического термического сопротивления от проектных значений, а также оценить соответствие теплозащитных свойств монолитных и сборных конструкций заявленным характеристикам при различных категориях технического состояния.

Методы: натурные измерения термического сопротивления ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий. Группировка объектов по категориям технического состояния (от удовлетворительного до неработоспособного). Сравнительный анализ фактических теплотехнических характеристик с проектными значениями.

Результаты: снижение фактического термического сопротивления относительно проектного на 6–41% детерминировано конструктивным решением (слоистость, наличие теплопроводных включений) и техническим состоянием (дефекты, износ), а не типом материалов (доля влияния $\leq 10\%$). Монолитные (кирпич/блоки) и сборные конструкции заводского изготовления сохраняют соответствие заявленным теплозащитным свойствам только при удовлетворительном техническом состоянии. Наибольшие расхождения выявлены в конструкциях 4-й категории состояния.

Новизна: экспериментальное обоснование приоритетности конструктивных и эксплуатационных факторов над выбором материалов в снижении термического сопротивления ограждений. Количественная оценка деградации теплозащитных свойств для разных категорий технического состояния с выделением "критического порога" (категория 3 и выше). Верификация устойчивости свойств монолитных/сборных конструкций при сохранении проектных параметров монтажа и эксплуатации.

Ключевые слова: термическое сопротивление, ограждающие конструкции, утепление, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Строительный сектор входит в число ведущих мировых потребителей энергоресурсов. На отопительные системы зданий приходится значительная доля конечного энергопотребления: порядка 40% в ЕС, 61% в Российской Федерации и 53% в Республике Беларусь [1–4].

В глобальном масштабе жилищный сектор обуславливает 60% энергопотребления строительной отрасли, 36% выбросов CO₂ [5, 6] и 50% спроса на электроэнергию [7]. В связи с этим активизировались исследования, направленные на снижение энергопотребления жилых зданий, включая разработку адекватных энергетических моделей [8].

Поскольку доминирующий путь теплопереноса в зданиях протекает через ограждающие конструкции, детальный анализ их теплофизических характеристик представляет собой критически важный элемент проектирования энергоэффективных объектов [9, 10]. При этом ключевым вызовом остается отсутствие системной идентификации и сквозного мониторинга объектов капитального строительства и их компонентов в течение жизненного цикла [11].

Термическое сопротивление ограждающих конструкций служит ключевым показателем теплозащиты зданий [12–16], его минимально требуемое значение регламентировано строительными нормативами. При проектировании теплозащиты зданий и сооружений применяются расчетные теплотехнические показатели строительных материалов и изделий [17–20]. Фактические значения теплопроводности материалов в эксплуатируемых зданиях могут существенно отличаться от расчетных вследствие повышенной влажности, деградации конструкций, а также несоответствия качества материалов и работ нормативным требованиям [21–23].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В международной практике осуществляются масштабные исследования влияния типа теплоизоляционных материалов, их конфигурации, толщины и локализации на теплофизические характеристики ограждений [24, 25]. Оптимальному применению указанных материалов непосредственно способствует внедрение цифровых систем, обеспечивающих критический анализ и проектирование строительных объектов [26–31].

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью проведенного исследования являлась установление влияния конструктивного решения и технического состояния ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий на отклонение фактического термического сопротивления от проектных значений, а также оценка соответствия теплозащитных свойств монолитных и сборных конструкций заявленным характеристикам при различных категориях технического состояния.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведение натурных измерений термического сопротивления с использованием прибора ИТП-МГ4.03/10 «Поток» в течение отопительного сезона; определение сопротивления теплопередаче (R) согласно действующим нормативным требованиям [32–34] выполнение серии замеров для разнотипных ограждающих конструкций в зданиях различных населенных пунктов.

Решение поставленных задач достигнуто применением следующих методов: инструментальные натурные измерения термического сопротивления, сравнительный анализ фактических и проектных теплотехнических характеристик, группировка данных по категориям технического состояния конструкций. В данном исследовании представлены результаты инструментальных натурных измерений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий в г. Могилев и г. Бельнич.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

В ходе исследования выполнена серия замеров термического сопротивления для разнотипных ограждающих конструкций зданий в различных населенных пунктах. Сводные данные с характеристиками объектов представлены в таблице 1. Анализ выявил соответствие фактических и расчетных значений R для однородных конструкций и заводских панелей при удовлетворительном техническом состоянии.

Таблица 1. Сравнение сопротивления теплопередаче, ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$)

Описание здания, год постройки, расположение	Описание и толщина ограждающих конструкций	Термическое сопротивление, ($\text{м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$)			Отношение фактического значения к расчетному, %	Категория технического состояния ограждающей конструкции
		по данным замеров (фактическое)	расчетное (проектное)	нормативное		
1	2	3	4	5	6	7
Трехэтажный жилой дом, (1975 г.), г. Бельнич	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,67	0,85	2,86	78%	3
Одноэтажный жилой дом, (1974 г.), г. Бельнич	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,51	0,85	2,86	60%	4
Двухэтажный жилой дом, (1984 г.), г. Бельнич	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,79	0,85	2,86	92%	2
Двухэтажный жилой дом, (1994 г.), г. Бельнич	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	1,03	0,85	2,86	121%	2

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7
Пятиэтажный жилой дом, (1977 г.), г. Бельниччи	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,71	0,93	2,86	76%	3
Пятиэтажный жилой дом, (1992 г.), г. Бельниччи	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	1,02	0,93	2,86	109%	2
Пятиэтажный жилой дом, (1986 г.), г. Бельниччи	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	1,05	0,93	2,86	112%	2
Пятиэтажный жилой дом, (1986 г.), г. Бельниччи	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,85	0,93	2,86	91%	2
Пятиэтажный жилой дом, (1985 г.), г. Бельниччи	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,9	0,93	2,86	96%	2
Пятиэтажный жилой дом, (1992 г.), г. Бельниччи	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,89	0,93	2,86	95%	2
Двухэтажный жилой дом, (1950 г.), г. Могилев	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,49	0,83	2,86	59%	4
Трехэтажный жилой дом, (1958 г.), г. Могилев	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,53	0,83	2,86	63%	4
Пятиэтажный жилой дом, (1980 г.), г. Могилев	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,88	0,83	2,86	106%	2
Шестиэтажное жилое здание, (1970 г.), г. Могилев	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,61	0,83	2,86	73%	3
Двухэтажный жилой дом, (1950 г.), г. Могилев	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,52	0,83	2,86	62%	4
Десятиэтажный жилой дом, (1975 г.), г. Могилев	Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	0,69	0,83	2,86	83%	2
Пятиэтажный жилой дом, (1970 г.), г. Могилев	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,72	0,93	2,86	77%	3
Пятиэтажный жилой дом, (1973 г.), г. Могилев	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,86	0,93	2,86	92%	2
Пятиэтажный жилой дом, (1971 г.), г. Могилев	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,74	0,93	2,86	79%	3

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7
Девятиэтажный жилой дом, (1979 г.), г. Могилев	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,83	0,93	2,86	89%	2
Пятиэтажный жилой дом, (1965 г.), г. Могилев	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,62	0,93	2,86	66%	4
Пятиэтажный жилой дом, (1969 г.), г. Могилев	Однослойные панельные плиты, 400 мм.	0,56	0,93	2,86	60%	4

Анализ данных выявил ряд зависимостей отклонения расчетного и фактического термического сопротивления от характеристик ограждающих конструкций, сгруппированных по заданным признакам. В таблице 2 представлен коэффициент снижения термического сопротивления (отношение фактического (измеренного) для различных типов ограждений. Как видно из таблицы, монолитные конструкции демонстрируют наименьшее расхождение между фактическим и расчетным сопротивлением.

Таблица 2. Снижение термического сопротивления разных видов ограждающих конструкций

Вид ограждающей конструкции	Отношение фактического значения к расчетному, %
Кирпичная кладка из силикатного кирпича	80%
Однослойные панельные плиты	87%

Также в работе выполнен анализ влияния категории технического состояния ограждающих конструкций на степень снижения их фактического термического сопротивления относительно расчетного. Для этого рассчитаны показатели расхождения для различных категорий технического состояния. Полученные данные классифицированы по категориям технического состояния таблице 3. Как следует из представленных данных, максимальное расхождение между расчетным и фактическим термическим сопротивлением характерно для ограждающих конструкций 4-й категории технического состояния.

Таблица 3. Снижение термического сопротивления по категориям технического состояния

Номер	Вид ограждающей конструкции	Категория технического состояния	Отношение фактического значения к расчетному, %
1	Кирпичная кладка из силикатного кирпича	4 категория	61%
2		3 категория	76%
3		2 категория	101%
4	Однослойные панельные плиты	4 категория	63%
5		3 категория	77%
6		2 категория	98%

На рисунке 1 отображено отношение фактического термического сопротивления к расчетному для ограждающих конструкций, сгруппированных по категории их технического состояния. Наибольшее относительное снижение сопротивления характерно для конструкций 4-й категории. Это обусловлено значительным влиянием конструктивных дефектов и повышенной теплотехнической неоднородностью (кладки, стыков плит теплоизоляции и пр.), а также несоответствием фактических теплотехнических свойств материалов проектным значениям и их значительной деградацией в процессе эксплуатации.

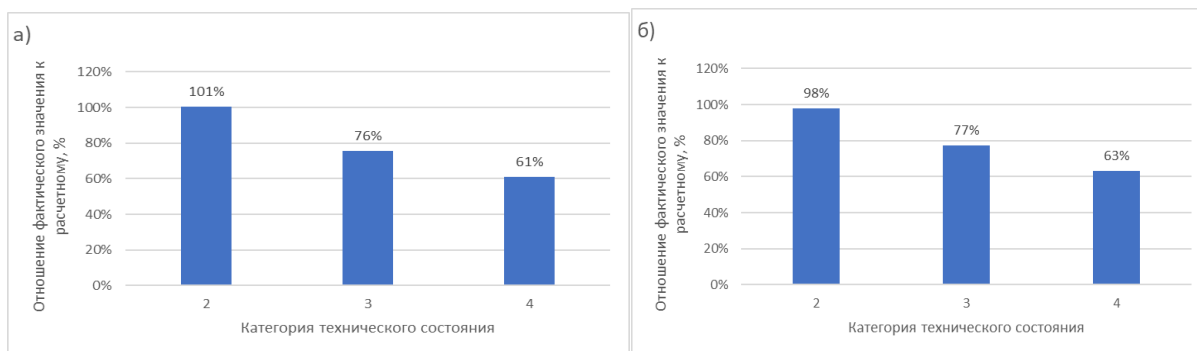


Рис.1. Снижение термического сопротивления в зависимости от категории технического состояния:
а) Кирпичная кладка из силикатного кирпича; б) Однослойные панельные плиты

В работе также проанализировано влияние типа материала на степень снижения фактического термического сопротивления ограждений относительно расчетного. Для этого рассчитаны показатели расхождения для различных материалов, входящих в состав конструкций. Однако, в отличие от ранее представленных результатов, различия между материалами оказались статистически незначимыми. Следовательно, основными факторами, детерминирующими снижение фактического термического сопротивления, являются конструктивное исполнение и техническое состояние ограждающих элементов, а не тип применяемого материала.

Таким образом, оптимизация конструктивного решения ограждающих систем и своевременная эксплуатационная диагностика с выявлением дефектов являются ключевыми для достижения максимальной энергоэффективности зданий. Это особенно актуально для сектора индивидуального жилищного строительства (ИЖС), характеризующегося в настоящее время активным развитием [35-37]. В малоэтажных зданиях, как правило, выше коэффициент компактности по сравнению с многоэтажными, что приводит к повышенному удельному расходу энергии на отопление при идентичных ограждающих конструкциях и существенно увеличивает энергопотери при наличии в них дефектов.

ВЫВОДЫ

Ключевым фактором снижения фактического (экспериментально определенного) термического сопротивления ограждающих конструкций относительно расчетных (проектных) значений является их конструктивное исполнение и техническое состояние, а не тип используемых материалов.

Ограждающие конструкции монолитного типа (кладка из кирпича/блоков) и сборные заводского изготовления демонстрируют соответствие теплотехнических характеристик проектным значениям при работоспособном (удовлетворительном) техническом состоянии, при котором имеющиеся дефекты не нарушают функциональности в текущих условиях эксплуатации, однако потенциально снижают долговечность.

Наибольшее расхождение фактического термического сопротивления с расчетным характерно для стеновых конструкций 4-й категории технического состояния (неработоспособное/неудовлетворительное: высокая степень повреждения, критическая перегрузка, риск обрушения). Данное состояние требует безотлагательных мер: ограничение нагрузок, срочное усиление или замена конструкции (определяется расчетом). Замена конструктивно или экономически нецелесообразных элементов выполняется в приоритетном порядке. В исключительных случаях допускается временная эксплуатация объекта до проведения восстановительных работ.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Перспективами дальнейшего исследования являются, разработка корректирующих коэффициентов для проектных расчётов, создание математических моделей, учитывающих деградацию термического сопротивления в зависимости от категории технического состояния (с выделением "критического порога"), типа конструктивного решения (слоистые или монолитные системы), климатических условий эксплуатации.

Оптимизация методов неразрушающего контроля, а именно развитие инструментальных

методик для ранней диагностики скрытых дефектов (расслоение кладки, увлажнение утеплителя) прогнозирования снижения R до перехода конструкций в неработоспособное состояние.

Автоматизации сбора данных с привязкой к BIM-моделям.

ЛИТЕРАТУРА

1. EPBD, On the energy performance of buildings // Official Journal of the European Union., 2010. – P. 1-9.
2. Dixon, W. The impacts of construction and the built environment // Briefing Notes, Willmott-Dixon Group. – 2010 – P. 1-8.
3. Саакян, В. М. Эффективность энергосберегающих технологий утеплений фасадов / В.М. Саакян, И. В. Лагута // International scientific news 2017 : XXVIII Международная научно-практическая конференция, Москва, 22 декабря 2017 года. – М.: Научный центр "Олимп", 2017. – С. 182-184.
4. Аноп, К. М. Энергоэффективная недвижимость в Беларуси / К. М. Аноп // Культура и экология - основы устойчивого развития России. Человеческий капитал как ключевой ресурс зеленой экономики, Екатеринбург, 13–16 апреля 2018 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Кафедра культурологии и дизайна. Том Часть 1. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2018. – С. 149-152.
5. Poel, B., Energy performance assessment of existing dwellings / B. Poel, G. van Cruchten, C.A. Balaras //Energy and buildings. – 2007. – Т. 39. – №. 4. – С. 393-403.
6. Hasan, O. A. simplified building thermal model for the optimization of energy consumption: Use of a random number generator / O.A. Hasan, D. Defer, I.A. Shahrour // Energy and Buildings. – 2014. – Т. 82. – С. 322-329.
7. Li, H. X. et al. Energy performance optimisation of building envelope retrofit through integrated orthogonal arrays with data envelopment analysis / H.X. Li et al. // Renewable energy. – 2020. – Т. 149. – С. 1414-1423.
8. Li, X. Review of building energy modeling for control and operation / X. Li, J. Wen // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Т. 37. – С. 517-537.
9. Kesik, T. J. Building enclosure design principles and strategies // Whole Building Design Guide. A Program of the National Institute of. – 2014. – 262 p.
10. Yuan, J. Impact of insulation type and thickness on the dynamic thermal characteristics of an external wall structure // Sustainability. – 2018. – Т. 10. – №. 8. – С. 2835.
11. Adhikari, P. et al. Life-cycle cost and carbon footprint analysis for light-framed residential buildings subjected to tornado hazard / P. Adhikari et al. // Journal of Building Engineering. – 2020. – Т. 32. – С. 101657.
12. Ибрашева, Л. Р. Энергосберегающие технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве России / Л.Р. Ибрашева //Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – №. 7. – С. 224-229.
13. Косухин, М. М. Вопросы энергосбережения в условиях устойчивого функционирования, модернизации и развития жилищного фонда / М.М. Косухин //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – №. 10. – С. 51-61.
14. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н.В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.
15. Малявина, Е. Г. Определение теплопотерь подземной части здания расчетом трехмерного температурного поля грунта / Е. Г. Малявина, Д. С. Иванов //Вестник МГСУ. – 2011. – №. 7. – С. 209-215.
16. Куцев, Л. А. Пути снижения энергозатрат в жилищно-коммунальном хозяйстве / Л.А. Куцев, Г. Л. Дронова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2008. – №. 2. – С. 24-25.
17. Гушин, С. В. Мировые тенденции развития энергосберегающих технологий / С.В. Гушин, А. С. Семиненко, Шень Ч. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – №. 5. – С. 31-43.

18. Тарасенко, В. Н. Проблема энергосбережения в России / В. Н. Тарасенко, Ю. В. Денисова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – №. 11. – С. 63-68.
19. Шубин, И. Л. Проблемы энергосбережения в российской строительной отрасли / И.Л. Шубин, А.В. Спиридонов // Энергосбережение. – 2013. – №. 1. – С. 15-21.
20. Кузнецов, А. В. Оценка теплотехнических качеств зданий монолитной конструкции Санкт-Петербурга / А.В. Кузнецов // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий. – 2011. – С. 35-43.
21. Гагарин, В. Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий / В.Г. Гагарин // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – №. 5. – С. 297-305.
22. Малявина, Е. Г. Строительная теплофизика и проблемы утепления современных зданий / Е.Г. Малявина // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2009. – №. 1. – С. 4-7.
23. Гурьянов, Н. С. Оценка и обеспечение тепловой надёжности наружных стен эксплуатируемых зданий: дис.... канд. техн. наук: 05.23. 03 / Гурьянов Николай Сергеевич. – Нижний Новгород, 2003. – 232 с :
24. Ma, Y. et al. Study on power energy consumption model for large-scale public building / Y. Ma et al. // 2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications. – IEEE, 2010. – P. 1-4.
25. Alam, M. J. Energy simulation to estimate building energy consumption using EnergyPlus / M.J. Alam, M.A. Islam, B.K. Biswas // International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering. – 2014. – P. 25-26.
26. Hardin, B., McCool D. BIM and construction management: proven tools, methods, and workflows. – John Wiley & Sons, 2015. - 363 p.
27. Knowles, T. R. Proportioning composites for efficient thermal storage walls / T.R. Knowles // Solar Energy. – 1983. – T. 31. – №. 3. – P. 319-326.
28. Asan, H. Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view / H. Asan //energy and buildings. – 2000. – T. 32. – №. 2. – P. 197-203.
29. Asan, H. Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor / H. Asan //energy and buildings. – 1998. – T. 28. – №. 3. – P. 299-305.
30. Sultanguzin, I. A. et al. Using of BIM, BEM and CFD technologies for design and construction of energy-efficient houses / I.A. Sultanguzin // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – T. 124. – P. 03014.
31. Gerrish, T. et al. BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential / T. Gerrish // Energy and buildings. – 2017. – T. 144. – С. 218-228.
32. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: введен 01.07.2013. – М., 2012. – 96 с.
33. ГОСТ 26254-84 (1994). Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. – Введ. 1985–01–01. –М., 1994. – 34 с.
34. СП 2.04.01-2020. Строительная теплотехника. – Введ. 20.01.2021 (с отменой ТКП 45-2.04-43-2006 (02250)). – Минск Минстройархитектуры РБ, 2020. – 76 с.
35. Комаров, С. И. Развитие рынка земельных участков под индивидуальное жилищное строительство вокруг крупных мегаполисов (на примере Московского региона) / С.И. Комаров, Г.В. Ломакин // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. – 2005. – №. 3. – С. 96-103.
36. Лещенко, П. И. Анализ состояния и развития объектов жилищного строительства в Республике Беларусь / П.И. Лещенко, Т.Р. Кисель // Наука и техника. – 2012. – №. 3. – С. 78-84.
37. Тарасевич М. А., Карпенко Е. М. Оценка роста сегмента «энергоэффективный дом» в индивидуальном жилищном строительстве Республики Беларусь. – Биоэкономика – экономика будущего : материалы I Междунар. науч. студен. конф., Минск, 29 нояб. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: А. А. Королёва (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2023. – С. 40-44.

ASSESSMENT OF THERMAL ENGINEERING CHARACTERISTICS OF ENCLOSING STRUCTURES BASED ON THEIR TECHNICAL CONDITION

²Badenko, V. L., ^{1,2}Shkilniuk. M. A.

¹Belarusian Russian University, Mogilev, Republic of Belarus;

²Saint Petersburg State Polytechnical University, Saint Petersburg, Russian Federation

Annotation. The study presents the results of full-scale measurements of the thermal resistance of the enclosing structures of operated buildings, grouped by categories of technical condition, as well as data comparing the actual thermal characteristics with design values. It is established that the decrease in the actual thermal resistance relative to the calculated one is determined mainly by the design solution and the technical condition of the fences, rather than by the type of materials used. Monolithic (brick/block masonry) and prefabricated factory-made structures demonstrate compliance with the declared thermal protection properties in satisfactory technical condition.

Keywords: thermal resistance, enclosing structure, insulation, energy efficiency.