

## Раздел 2. Проблемы организации строительства

УДК 697.112

### ОЦЕНКА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Баденко В.Л.<sup>2</sup>, Шкильнюк М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Белорусско-Российский университет, 212000, Беларусь, г. Могилев, проспект Мира, 43, e-mail: [eeld9696@gmail.com](mailto:eeld9696@gmail.com)

<sup>2</sup>Инженерно-строительный институт (структурное подразделение), Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 195 251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: [vbadenko@gmail.com](mailto:vbadenko@gmail.com)

**Аннотация.** В исследовании представлены результаты натурных измерений термического сопротивления многослойных 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. Для конструкций с монтажом теплоизоляции наблюдается систематическое занижение эксплуатационных показателей теплозащиты. Также установлено, что продолжительность эксплуатации и техническое состояние конструкций представляют собой наиболее существенный фактор деградации их теплотехнических характеристик, обуславливающий прогрессирующее снижение теплозащитных свойств в течение жизненного цикла здания.

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 многослойных ограждающих 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: Результаты исследования демонстрируют, что снижение фактического термического сопротивления относительно проектных значений на 6–41% обусловлено в первую очередь конструктивными особенностями (слоистость, наличие теплопроводных включений) и техническим состоянием (наличие дефектов, степень износа), тогда как влияние типа применяемых материалов не превышает 10%. Установлено, что монолитные конструкции (из кирпича или блоков) с теплоизоляцией соответствуют заявленным теплозащитным характеристикам исключительно при сохранении удовлетворительного технического состояния. Наибольшие отклонения от проектных параметров зафиксированы у конструкций, отнесенных к 4-й категории технического состояния.

Новизна: экспериментально доказано преобладающее влияние конструктивных и эксплуатационных факторов над типом материалов на снижение термического сопротивления ограждающих конструкций. Выполнена количественная оценка деградации теплозащитных свойств в зависимости от категории технического состояния с определением "критического порога", соответствующего 3-й категории и выше. Проведена верификация стабильности теплотехнических характеристик монолитных и сборных конструкций при соблюдении проектных требований к их монтажу и эксплуатации.

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

## ВВЕДЕНИЕ

Строительная отрасль входит в число ведущих мировых потребителей энергоресурсов, при этом значительная доля конечного энергопотребления, достигающая 40% в ЕС, 61% в Российской Федерации и 53% в Республике Беларусь [1–4], обусловлена работой отопительных систем. В глобальном масштабе на жилищный сектор приходится 60% энергопотребления строительной сферы, 36% выбросов CO<sub>2</sub> [5, 6] и 50% спроса на электроэнергию [7], что обусловило активизацию исследований, направленных на разработку релевантных энергетических моделей [8]. Учитывая, что доминирующий механизм теплопереноса реализуется через ограждающие конструкции, скрупулезный анализ их теплофизических характеристик представляет собой критически важный элемент проектирования [9, 10]. Сохраняющейся проблемой является дефицит методов системной идентификации и сквозного мониторинга в течение жизненного цикла объекта [11]. Нормируемое термическое сопротивление [12–16], служащее ключевым показателем, рассчитывается на основе регламентированных теплотехнических показателей материалов [17–20], однако их фактические эксплуатационные характеристики часто отклоняются от проектных вследствие ряда техногенных и эксплуатационных факторов [21–23].

Современный этап развития отечественной строительной отрасли, характеризующийся интенсификацией строительства, ужесточением нормативных требований и расширением

номенклатуры применяемых материалов и технологий, предопределяет повышенную значимость проблемы обоснования параметров конструктивных решений для ограждающих конструкций объектов жилищного строительства в контексте обеспечения их энергетической эффективности. Указанная проблема усугубляется наличием на территории РФ и РБ обширного парка зданий с высоким физическим износом, не соответствующих актуальным энергетическим нормативам, а также потребностью эксплуатационных организаций в оптимизации затрат, связанных с теплоснабжением. При этом существующий научный задел в области обоснования подобных решений обладает ограниченной практической значимостью, что связано со сложностью структурных взаимосвязей между их параметрами, условиями эксплуатации и результирующими показателями эффективности.

### **АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ**

В области исследований ограждающих конструкций жилых зданий научный ландшафт характеризуется наличием нескольких сформировавшихся школ, каждая из которых, однако, обладает определенными методологическими ограничениями. Так, работы, посвященные сравнительному анализу конструктивных решений и строительных материалов Hauser G., Sinnesbichler H., Park B. и др. [24-26], страдают от отсутствия формализованного математического аппарата, связывающего характеристики решений с результирующими показателями энергетической эффективности, что снижает их практическую применимость.

Исследования в области моделирования температурно-влажностных режимов Заборова Д. Д., Коряковцева (Мусорина) Т. А., Петриченко М. Р. и др. [27-28] предлагают динамические модели, но не содержат критериев для объективной оценки предпочтительности конкурирующих вариантов. Методологии, учитывающие дихотомию энергетической эффективности и экономической целесообразности (Gossard D., Thellier F. и др.), требуют дальнейшего развития в части повышения адекватности моделей и оптимизации вычислительных алгоритмов.

Широко исследуется влияние параметров теплоизоляционных материалов на теплофизические характеристики [28–30], а также потенциал цифровых систем для критического анализа и проектирования [31–36]. Проведенный обзор позволяет констатировать, что, несмотря на обширную теоретическую базу, сохраняется дефицит в интегрированных подходах, лишенных выявленных недостатков и позволяющих проводить объективное многокритериальное обоснование конструктивных решений на стадии проектирования.

Проблематике анализа взаимозависимостей между параметрами конструктивных решений для ограждающих конструкций объектов жилищного строительства и соответствующими показателями их энергетической эффективности посвящены исследования Saber H. H., Rahiminejad M. и соавторов [37–41].

### **ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Настоящее исследование было направлено на установление влияния конструктивного решения и технического состояния многослойных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий на величину отклонения их фактического термического сопротивления от проектных значений. Дополнительной задачей выступила оценка соответствия теплозащитных свойств указанных конструкций нормативным требованиям при различной степени их износа.

Достижение поставленной цели обеспечило решение ряда задач, включавших проведение комплекса натурных измерений термического сопротивления с применением прибора ИТП-МГ4.03 «Поток», определение сопротивления теплопередаче в соответствии с действующими нормативами [42-45] и выполнение серии замеров для многослойных ограждений в зданиях различных населенных пунктов.

Решение задач осуществлялось с применением комплекса методов, основу которого составили инструментальные натурные измерения, сравнительный анализ теплотехнических характеристик и группировка данных по категориям технического состояния. В статье представлены результаты измерений, выполненных для объектов в г. Могилев, г. Бельничи и г. Круглое.

**ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ**

Исследование базировалось на комплексе натуральных измерений термического сопротивления многослойных ограждающих конструкций зданий, расположенных в различных населенных пунктах. Метрологическое обеспечение экспериментов включало синхронную регистрацию параметров с использованием 5 датчиков плотности теплового потока и 5 температурных датчиков на каждую исследуемую конструкцию. Цикл измерений продолжительностью 24 часа с дискретностью 1 минуту обеспечил получение 7200 измерений на конструкцию. Согласно данным таблицы 1, анализ результатов подтвердил соответствие фактических значений сопротивления теплопередаче расчетным показателям для конструкций, находящихся в удовлетворительном техническом состоянии.

Таблица 1. Сравнение сопротивления теплопередаче, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт

Описание здания, год постройки, расположение	Описание и толщина ограждающих конструкций	Термическое сопротивление, (м <sup>2</sup> ·К)/Вт			Отношение фактического значения к расчетному, %	Категория технического состояния ограждающей конструкции
		по данным замеров (фактическое)	расчетное (проектное)	Нормативное		
Двухэтажное административное здание, (2003 г.), г. Бельничи	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	4,69	6,44	2,86	73%	3
Трехэтажный жилой дом, (2010 г.), г. Бельничи	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	4,93	6,44	2,86	77%	3
Двухэтажное административное здание, (1986 г.), г. Бельничи	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	4,28	6,44	2,86	66%	4
Трехэтажный жилой дом, (1998 г.), г. Бельничи	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	5,67	6,44	2,86	88%	2
Трехэтажный жилой дом, (1981 г.), г. Бельничи	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	5,93	6,44	2,86	92%	2
Пятиэтажный жилой дом, (2010 г.), г. Могилев	Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	2,71	2,87	2,86	94%	2
Пятиэтажный жилой дом, (2001 г.), г. Могилев	Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	2,20	2,87	2,86	76%	3
Пятиэтажный жилой дом, (1998 г.), г. Могилев	Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	2,19	2,87	2,86	76%	3

Окончание таблицы 1

Описание здания, год постройки, расположение	Описание и толщина ограждающих конструкций	Термическое сопротивление, (м <sup>2</sup> ·К)/Вт			Отношение фактического значения к расчетному, %	Категория технического состояния ограждающей конструкции
		по данным замеров (фактическое)	расчетное (проектное)	Нормативное		
Пятиэтажный жилой дом, (1989 г.), г. Могилев	Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	2,91	2,87	2,86	66%	4
Трехэтажный жилой дом, (1977 г.), г. Могилев	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	4,10	6,44	2,86	63%	4
Трехэтажный жилой дом, (1986 г.), г. Могилев	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	5,63	6,44	2,86	87%	2
Шестиэтажный жилой дом, (2005 г.), г. Могилев	Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	2,72	2,87	2,86	94%	2
Двухэтажное административное здание, (2004 г.), г. Круглое	Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	2,46	2,87	2,86	86%	2
Трехэтажный жилой дом, (2010 г.), г. Круглое	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	5,92	6,44	2,86	92%	2
Двухэтажное административное здание, (1993 г.), г. Круглое	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	4,76	6,44	2,86	74%	3
Трехэтажный жилой дом, (2001 г.), г. Круглое	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	5,02	6,44	2,86	78%	3
Трехэтажный жилой дом, (1972 г.), г. Круглое	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	3,61	6,44	2,86	56%	4
Пятиэтажный жилой дом, (2011 г.), г. Круглое	Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	2,31	2,87	2,86	81%	2

Проведенный анализ данных позволил выявить зависимость между отклонением расчетного и фактического термического сопротивления и характеристиками многослойных ограждающих конструкций. В таблице 2 представлены коэффициенты снижения термического сопротивления

(отношение фактического значения к расчетному) для различных типов ограждений. Полученные данные свидетельствуют о том, что наименьшее расхождение между фактическими и проектными показателями характерно для монолитных конструкций.

Таблица 2.

Снижение термического сопротивления разных видов ограждающих конструкций

Вид ограждающей конструкции	Отношение фактического значения к расчетному, %
Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем	76%
Силикатный кирпич, минераловатный утеплитель, вентилируемый фасад	81%

Дополнительно исследовалась корреляция между категорией технического состояния ограждающих конструкций и степенью деградации их термического сопротивления. Для количественной оценки данной зависимости были рассчитаны показатели расхождения для каждой категории таблица 3. Анализ результатов демонстрирует, что наибольшее отклонение фактических значений от проектных наблюдается у конструкций, имеющих 4-ю категорию технического состояния.

Таблица 3.

Снижение термического сопротивления по категориям технического состояния

Номер	Вид ограждающей конструкции	Категория технического состояния	Отношение фактического значения к расчетному, %
1	Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем	4 категория	61%
2		3 категория	76%
3		2 категория	89%
4	Силикатный кирпич, минераловатный утеплитель, вентилируемый фасад	4 категория	66%
5		3 категория	76%
6		2 категория	88%

На рисунке 1 представлена зависимость отношения фактического термического сопротивления к расчетному от категории технического состояния ограждающих конструкций. Анализ данных показывает, что максимальное снижение данного показателя характерно для конструкций 4-й категории. Основными причинами этой деградации являются существенные конструктивные дефекты, повышенная теплотехническая неоднородность (например, в кладке и стыках теплоизоляционных плит), несоответствие фактических свойств материалов проектным значениям и их значительное старение в процессе эксплуатации.

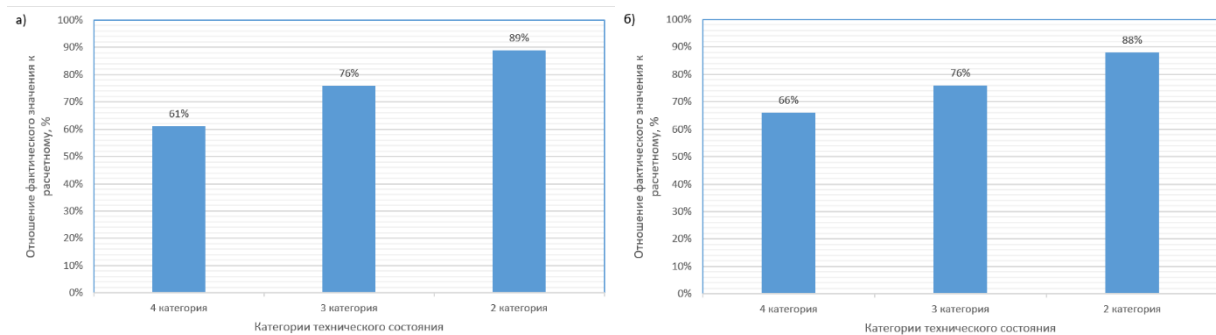


Рис. 1. Снижение термического сопротивления в зависимости от категории технического состояния:

- а) Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем; б) Силикатный кирпич, минераловатный утеплитель, вентилируемый фасад

В рамках исследования проведен анализ корреляции типа материала со степенью снижения термического сопротивления ограждающих конструкций. Расчетные показатели расхождения для различных материалов не демонстрируют статистически значимой дифференциации. Установлено,

что детерминирующими факторами уменьшения термического сопротивления являются конструктивные особенности и эксплуатационное состояние элементов, а не тип применяемого материала.

Выводы исследования свидетельствуют о необходимости оптимизации конструктивных решений и внедрения систем мониторинга технического состояния ограждающих систем. Особую значимость данный вывод имеет для сектора индивидуального жилищного строительства [46-48], где повышенный коэффициент компактности малоэтажных зданий приводит к увеличенному удельному энергопотреблению при идентичных ограждающих конструкциях и существенно возрастающим энергопотерям в случае наличия дефектов.

### **ВЫВОДЫ**

Проведенный анализ позволяет утверждать, что снижение экспериментально определенного термического сопротивления относительно проектных значений в первую очередь детерминировано конструктивным исполнением и техническим состоянием ограждающих конструкций, а не типом используемых материалов.

Установлено, что многослойные конструкции (кладка с утеплителем) соответствуют теплотехническим характеристикам проектных значений при работоспособном состоянии, когда имеющиеся дефекты не нарушают функциональности, но потенциально сокращают расчетный срок службы.

Наибольшая деградация теплозащитных свойств характерна для конструкций 4-й категории технического состояния (неудовлетворительное, с высокой степенью повреждения), требующих безотлагательных мероприятий: ограничения эксплуатационных нагрузок, срочного усиления или замены. Восстановление конструктивно или экономически нецелесообразных элементов выполняется в первоочередном порядке.

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке корректирующих коэффициентов для проектных расчётов и создании математических моделей, учитывающих деградацию термического сопротивления в зависимости от категории технического состояния (с выделением "критического порога"), типа конструктивного решения и климатических условий эксплуатации. Параллельно необходима оптимизация методов неразрушающего контроля, в частности развитие инструментальных методик для ранней диагностики скрытых дефектов и прогнозирования снижения термического сопротивления до перехода конструкций в неработоспособное состояние, а также автоматизация сбора данных с их привязкой к BIM-моделям.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. EPBD, On the energy performance of buildings // Official Journal of the European Union., 2010. – С. 1-9.
2. Dixon, W. The impacts of construction and the built environment / W. Dixon // Briefing Notes, Willmott-Dixon Group. – 2010 – С. 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, С.А. 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. 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 / T. J. Kesik //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 / J. Yuan // 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. и др. Вопросы энергосбережения в условиях устойчивого функционирования, модернизации и развития жилищного фонда / М. М. Косухин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ 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 теплотерь подземной части здания расчетом трехмерного температурного поля грунта / Е.Г. Малявина, Д.С. Иванов // Вестник МГСУ. – 2011. – №. 7. – С. 209-215.
16. Кушев Л. А. Пути снижения энергозатрат в жилищно-коммунальном хозяйстве / Л.А. Кушев, Г.Л. Дронова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2008. – №. 2. – С. 24-25.
17. Гушин, С. В. Мировые тенденции развития энергосберегающих технологий / С.В. Гушин, А.С. Семенов, Ч. Шень // 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 : дис. – Гурьянов Николай Сергеевич. Нижний Новгород, 2003, 2003.
24. Hauser, G. Experimental and numerical investigations for comparing the thermal performance of infrared reflecting insulation and of mineral wool / G. Hauser, M. Kersken, H. Sinnesbichler, A. Schade // Energy and Buildings. – 2013. – Vol. 58. – Pp. 131–140. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.033.

25. Park, B. Energy performance analysis of variable thermal resistance envelopes in residential buildings / B. Park, W. V. Srubar, M. Krarti // *Energy and Buildings*. – 2015. – Vol. 103. – Pp. 317–325. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.061.
26. Ambli, K. G. Heterogeneous composites for low and medium temperature thermal insulation: A review / K. G. Ambli, B. M. Dodamani, A. Jagadeesh, M. B. Vanarotti // *Energy and Buildings*. – 2019. – Vol. 199. – Pp. 455–460. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.07.024.
27. Гагарин, В. Г. О нормировании тепловой защиты зданий в Китае / В. Г. Гагарин, Ч. Чжоу // *Жилищное строительство*. – 2015. – № 7. – С. 18–22. – EDN: VCLZVT.
28. Гагарин, В. Г. Перспективы применения актуализированной редакции СНиП «Тепловая защита зданий» для снижения тепловых потерь через ограждающие конструкции / В. Г. Гагарин, А. Ю. Неклюдов // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. – 2015. – № 6(41). – С. 80–87. – EDN: XNOAXZ.
29. 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. – С. 1-4.
30. Баденко, В. Л. Оценка теплотехнических характеристик ограждающих конструкций на основе их технического состояния / В. Л. Баденко, М. А. Шкильнюк // *Экономика строительства и природопользования*. – 2025. – № 1(94). – С. 50-57. – EDN YYWWDX.
31. 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. – С. 25-26.
32. Hardin, B. BIM and construction management: proven tools, methods, and workflows / B. Hardin, D. McCool. – John Wiley & Sons, 2015. – 363 p.
33. Knowles, T. R. Proportioning composites for efficient thermal storage walls / T.R. Knowles // *Solar Energy*. – 1983. – Т. 31. – №. 3. – С. 319-326.
34. 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. – Т. 32. – №. 2. – С. 197-203.
35. Asan, H. Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor / H. Asan // *Energy and buildings*. – 1998. – Т. 28. – №. 3. – С. 299-305.
36. Sultanguzin, I. A. et al. Using of BIM, BEM and CFD technologies for design and construction of energy-efficient houses / I. A. Sultanguzin et al. // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2019. – Т. 124. – С. 03014.
37. Saber, H. H. Practical correlations for the thermal resistance of vertical enclosed airspaces for building applications / H. H. Saber // *Building and Environment*. – 2013. – Vol. 59. – Pp. 379–396. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.09.003.
38. Мусорина, Т. А. Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений / Т. А. Мусорина, О. С. Гамаюнова, М. Р. Петриченко // *Вестник МГСУ*. – 2017. – Т. 12, № 11(110). – С. 1269–1277. – DOI: 10.22227/1997-0935.2017.11.1269-1277. – EDN: TAUMWV.
39. Горшков, А. С. Теплопроводность облицовочного каменного слоя из керамического пустотелого кирпича при различной степени заполнения пустот строительным раствором / А. С. Горшков, В. Я. Ольшевский, Р. А. Горшков // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. – 2018. – № 9–10(236–237). – С. 26–33. – EDN: RIJNXD.
40. Горшков, А. С. Анализ тепловых нагрузок и удельного потребления тепловой энергии в многоквартирных домах / А. С. Горшков, М. С. Кабанов, Ю. В. Юферев // *Теплоэнергетика*. – 2021. – № 8. – С. 72–80. – DOI: 10.1134/S0040363621050052. – EDN: NZHXEX.
41. Rahiminejad, M. Numerical and experimental study of the dynamic thermal resistance of ventilated air-spaces behind passive and active façades / M. Rahiminejad, D. Khovalyg // *Building and Environment*. – 2022. – Vol. 225. – No. 109616. – DOI: doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109616.
42. Gerrish, T. et al. BIM application to building energy performance visualisation and management: Challenges and potential / T. Gerrish et al // *Energy and buildings*. – 2017. – Т. 144. – С. 218-228.
43. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Введ. 2013-07-01. – М.: Минрегион России, 2012. – 96 с.

44. ГОСТ 26254-84 (1994). Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Введ. 1985-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 34 с.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Тарасевич, М. А. Оценка роста сегмента «энергоэффективный дом» в индивидуальном жилищном строительстве Республики Беларусь. – Биэкономика – экономика будущего : материалы I Междунар. науч. студен. конф., Минск, 29 нояб. 2022 г. / М.А. Тарасевич, Е.М. Карпенко // Белорус. гос. ун-т ; редкол.: А. А. Королёва (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2023. – С. 40-44.
49. Жиленко О.Б., Строительство и эксплуатация модульных домов в природно-климатических условиях РЕСПУБЛИКИ КРЫМ / О.Б. Жиленко, Д.А. Маринич // Экономика строительства и природопользования. – 2025. – № 2(95). – С. 36 - 43.

## ASSESSMENT OF THERMAL CHARACTERISTICS OF MULTILAYERED FENCING CONSTRUCTIONS BASED ON THEIR TECHNICAL CONDITION

<sup>2</sup>Badenko V. L., <sup>1, 2</sup>Shkilniuk M. A.

<sup>1</sup>Belarusian Russian University, Mogilev, Republic of Belarus;

<sup>2</sup>Saint Petersburg State Polytechnical University, Saint Petersburg, Russian Federation

**Annotation.** The study presents the results of field measurements of the thermal resistance of multilayer building envelopes of in-service buildings, grouped by categories of technical condition, as well as data comparing actual thermal performance characteristics with design values. It was established that the reduction in actual thermal resistance relative to the design value is determined primarily by the structural design and the technical condition of the envelopes, rather than by the type of materials used. For structures with installed thermal insulation, a systematic underestimation of operational thermal protection performance is observed. It was also found that the duration of operation and the technical condition of the structures represent the most significant factor in the degradation of their thermal characteristics, leading to a progressive decrease in thermal protection properties throughout the building's lifecycle.

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