

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING (HVAC), LIGHTING SYSTEMS AND GAS NETWORKS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 185–199.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 185–199.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.002.4:697.1

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-185-199

EDN: QVBCGZ

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УСЛОВИИ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

**Алексей Николаевич Белоус¹, Мира Викторовна Оверченко²,
Ясмин Эдинович Бегич³, Ольга Евгениевна Белоус⁴,
Артем Искандарович Еникеев³**

¹ООО «ГДЦ-Развитие», г. Москва, Россия

²Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
г. Макеевка, Россия

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Применение в ограждающих конструкциях строительных материалов, обладающих высокими теплозащитными свойствами, приобретает все большую важность в условиях существующих в мире энергетических и экологических проблем.

Актуальность. Поддержание оптимальных параметров температуры в помещении возможно при условии правильно подобранной теплоизоляции, которая обеспечивает и требуемые значения сопротивления теплопередаче, и показатели тепловой инерции ограждающих конструкций. Это, в свою очередь, способствует снижению потребления энергии зданиями, сокращает расходы на энергоресурсы и позволяет защитить окружающую среду от дополнительных вредных выбросов.

Цель. Установление фактических значений теплотехнических характеристик и их сопоставление с нормативными данными для оценки реальной эффективности теплоизоляционных материалов в строительных конструкциях.

Методы. В рамках работы были определены характеристики материалов как в стационарном, так и в квазистационарном тепловых режимах с использованием лабораторных методов и теоретических исследований.

Результаты. Анализ результатов лабораторных испытаний фрагмента стеновой конструкции выявил существенную разницу между экспериментально определенным коэффициентом теплопроводности и его теоретически рассчитанным значением. Данное расхождение объясняется неточностью нормативных данных, используемых для перевода коэффициента теплопроводности материала из сухого состояния в расчетное, учитывающее эксплуатационную влажность. Для базальтовой ваты отклонение составило 44 %, а для экструзионного пенополистирола – 19 %. Проведенные теоретические исследования продемонстрировали высокую степень соответствия результатов, полученных с использованием плоской расчетной модели, результатам лабораторных испытаний для базальтовой ваты и экструзионного пенополистирола в условиях стационарного и квазистационарного тепловых режимов. Данное соответствие позволило успешно верифицировать разработанную теоретическую модель. Преимуществом теоретического подхода является возможность анализа не только простых плоских конструктивных систем, но и более сложных ограждающих конструкций, содержащих геометрические теплопроводные включения.

Анализ динамики теплового потока в модели наружного угла здания выявил преимущества использования экструзионного пенополистирола в качестве теплоизоляции. В условиях квазистационарного теплового режима конструкция с экструзионным пенополистиролом демонстрирует более стабильные температурные показатели в своей толще по сравнению с аналогичной конструкцией, утепленной базальтовой ватой. Это приводит к уменьшению количества циклов перехода температуры через нулевое значение для материалов, расположенных внутри ограждающей конструкции, что положительно влияет на их долговечность и надежность.

Ключевые слова: теплотехнические характеристики, экструзионный пенополистирол, минеральная вата, квазистационарный тепловой режим, лабораторные испытания

Для цитирования: Белоус А.Н., Оверченко М.В., Бегич Я.Э., Белоус О.Е., Еникеев А.И. Теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов при условии квазистационарного теплового режима // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 185–199. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-185-199. EDN: QVBCGZ

ORIGINAL ARTICLE

THERMAL PROPERTIES OF HEAT INSULATING MATERIALS UNDER QUASI-STATIONARY THERMAL CONDITIONS

Aleksei N. Belous¹, Mira V. Overchenko², Yasmin E. Begich³,
Ol'ga E. Belous⁴, Artem I. Enikeev³

¹ООО "GDTs-Razvitie", Moscow Russia

²Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
Makeevka, Russia

³Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St-Petersburg, Russia

⁴Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. Maintenance of the best parameters of the indoor temperature is possible with properly selected heat insulation that provides both the required heat transfer resistance and thermal

inertia indicators of building envelopes. This, in turn, reduces the energy consumption of buildings, energy costs and helps to protect the environment from additional harmful emissions.

Purpose: The aim of the work is to obtain actual thermal properties and compare them with the standard data in order to evaluate the real effectiveness of heat insulating materials for buildings.

Research findings: The properties of materials are determined in both steady-state and quasi-steady-state thermal conditions using laboratory methods and theoretical studies. The analysis of the laboratory tests of the wall fragment shows a significant difference between the experimentally determined thermal conductivity coefficient and its theoretically calculated value. This difference is explained by inaccurate normative data used to convert the thermal conductivity coefficient from a dry state to the calculated value that accounts for the operational humidity. For basalt wool, the deviation is 44%, and for extruded polystyrene foam, it is 19 %. Theoretical calculations demonstrate good agreement with the experimental data obtained using the 2D calculation model and laboratory test results for basalt wool and extruded polystyrene foam under steady-state and quasi-steady-state thermal conditions. This agreement allows to successfully verify the developed theoretical model. The advantage of the theoretical approach is the ability to analyze not only 2D structures, but also more complex enclosing structures containing heat-conducting inclusions.

Value: The analysis of the heat flow dynamics in the model of the outer building corner shows the advantages of using extruded polystyrene foam as thermal insulation. Under quasi-steady-state thermal conditions, the structure with extruded polystyrene foam demonstrates more stable temperature indicators throughout its thickness compared to the similar structure insulated with basalt wool. This leads to a reduction in the number of temperature transition cycles through zero for materials inside the building envelope, which has a positive effect on their durability and reliability.

Keywords: thermal properties, extruded polystyrene foam, mineral wool, quasi-stationary thermal conditions, laboratory test

For citation: Belous A.N., Overchenko M.V., Begich Ya.E., Belous O.E., Enikeev A.I. Thermal Properties of Heat Insulating Materials under Quasi-Stationary Thermal Conditions. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 185–199. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-185-199. EDN: QVBCGZ

Введение

В современных реалиях вследствие глобального потепления, энергетического кризиса и экологических проблем страны вынуждены уменьшать потребление энергии, значительная часть которой используется для отопления и кондиционирования помещений. Здания, предназначенные для жилья и общественных нужд, потребляют много энергии, и большая часть спроса на нее обусловлена потерей тепла через непрозрачные наружные ограждающие конструкции. Экономия энергии посредством теплоизоляции является важным условием для устойчивого проектирования и энергоэффективности. Теплоизоляция при эффективном ее применении замедляет теплообмен между внутренней и внешней средой здания.

Теплоизоляционные материалы обладают высокой тепловой инерцией, которая позволяет либо препятствовать прохождению теплового потока, либо корректировать колебания на внутренней поверхности ограждающих конструкций вследствие запаздывания температурных колебаний в толще конструкции. Особенно это важно для регионов с холодным или жарким климатом, где благодаря правильно подобранной теплоизоляции обеспечивается необходимое значение сопротивления теплопередаче конструкции R в сочетании

с тепловой инерцией D . В этом случае здания могут поддерживать желаемый уровень температуры в помещении, потребляя меньше энергии, что приносит пользу как окружающей среде, так и экономике. Поэтому при выборе материала важно определить оптимальное сочетание результативности изоляции и экономического эффекта от ее применения. Из-за таких факторов, как различные климатические условия региона, толщина конструктивного и изоляционного материала, используемого в зданиях при неодинаковых условиях, теплоизоляционные материалы должны быть изучены дополнительно. В ряде работ была исследована толщина теплоизоляции в зависимости от вида материала [1–8]; влияние изоляционных материалов и ориентации стен (север, юг, запад и восток) на оптимальную изоляцию с использованием солнечного излучения было изучено другими исследователями [9, 11, 12]. Анализ исследовательских работ показал, что наиболее часто используемыми изоляционными материалами являются минеральная и базальтовая вата, экструзионный пенополистирол (Extruded polystyrene foam, далее – XPS) для стен из штучных материалов.

В работе [10] предложена модель анизотропной изоляции, которая основана на различной интенсивности солнечного облучения в зависимости от ориентации. Модель изоляции использует неравномерную структуру коэффициента теплопередачи через ограждающую конструкцию здания и определяет толщину слоя изоляции в различных ориентациях с использованием принципа равной интенсивности теплового потока. Это приведет к тому, что температура внутренней поверхности оболочки будет одинаковой и значительно уменьшит разницу в тепловой среде комнат различной ориентации. В работе [12] исследования проводились для четырех вариантов конструкции стен с различными теплоизоляционными материалами. Исследованы теплотехнические характеристики всех материалов слоев конструкции, определены общие затраты на отопление, экономия затрат на электроэнергию и срок окупаемости в соответствии с оптимальной толщиной утеплителя с учетом различной конфигурации стен и изоляционных материалов. Установлено, что вместо применения одинаковой толщины изоляции во всех ориентациях можно использовать материалы с различной толщиной в зависимости от ориентации.

В исследованиях [13–16] рассмотрены различные варианты теплоизоляции зданий и методики расчетов теплотехнических параметров с учетом различных видов теплоизоляционных материалов и их влияния на теплотехнические свойства ограждающих конструкций.

Таким образом, для различных регионов разных стран выбор теплоизоляционного материала и его толщину необходимо принимать в зависимости от особенностей климата на основании действующей нормативной документации.

Цель работы – установление фактических значений теплотехнических характеристик и их сопоставление с нормативными данными для оценки реальной эффективности теплоизоляционных материалов в строительных конструкциях.

Задачи исследования:

1. Провести лабораторные исследования теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов на примере базальтовой ваты и экструзионного пенополистирола.

2. Выполнить теоретические исследования теплотехнических свойств теплоизоляционных материалов посредством численного моделирования.

3. Произвести сравнительный анализ результатов, полученных в ходе лабораторных и теоретических исследований теплоизоляционных материалов.

Методы исследований

В работе представлены исследования теплотехнических характеристик теплоизоляционных материалов на примере базальтовой ваты и XPS. Выбор этих материалов обусловлен их широким применением в строительной практике на территории Российской Федерации. Одновременно были проведены лабораторные и теоретические исследования теплотехнических свойств XPS и базальтовой ваты.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой климатическую камеру, в которой находятся испытательные стенды (рис. 1). Испытательные стенды выполнены в форме кубов из экструзионного пенополистирола размером 1035×1035 мм, толщиной стенки ~ 350 мм. На одной из сторон куба помещается фрагмент исследуемой конструкции размером 500×500 мм.



Рис. 1. Климатическая камера с испытательными стендами (общий вид)

Fig. 1. General view of environmental chamber with the test board

Исследуемые фрагменты конструкций состоят из внутреннего слоя, выполненного из газобетона толщиной 100 мм, плотностью 582 кг/м^3 и коэффициентом теплопроводности при условии эксплуатации «Б» $0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ (установленном на основании испытаний в аккредитованной лаборатории), слоя

теплоизоляции толщиной 50 мм и цементно-песчаной штукатурки толщиной 10 мм. Общий вид испытуемых образцов схематично представлен на рис. 2. В качестве теплоизоляционного слоя для одного образца принята базальтовая вата плотностью 123 кг/м^3 , для второго – XPS плотностью 21 кг/м^3 .

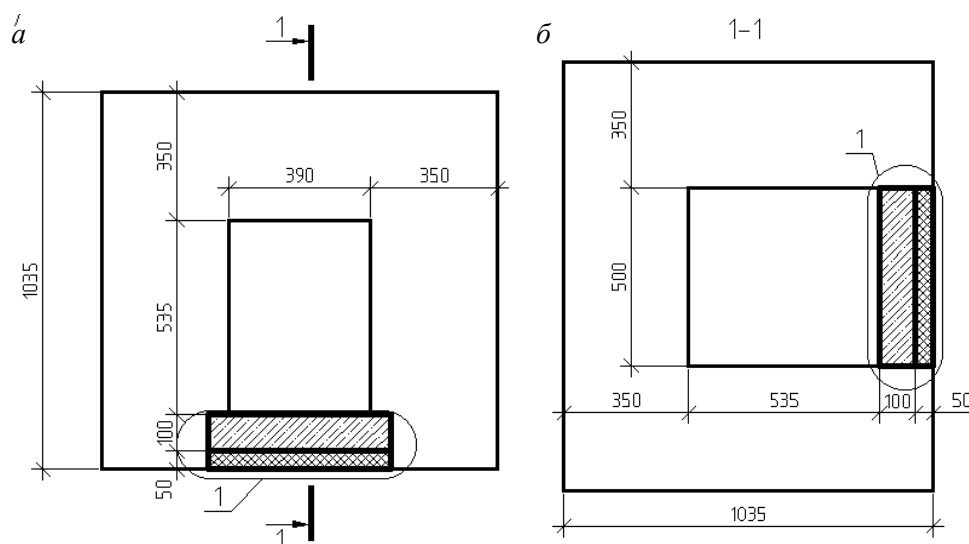


Рис. 2. Испытательный стенд:

a – план; *б* – разрез; 1 – исследуемый фрагмент конструкции, установленный на испытательном стенде

Fig. 2. Test board:

a – plan; *b* – cross section; 1 – wall fragment

Внутри климатической камеры имитируются температурно-влажностные условия наружной среды, наиболее неблагоприятные с точки зрения эксплуатационных воздействий. Внутри лабораторной установки, расположенной в климатической камере, поддерживается температура воздуха $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ и влажность в диапазоне 60–65 %. Климатические воздействия в камере моделируются путем попеременного охлаждения-нагрева, имитирующего нестационарный режим.

Результаты лабораторных исследований

При лабораторных исследованиях образцов фрагмента стены был смоделирован квазистационарный тепловой режим ограждающей конструкции. При этом в связи с техническими особенностями климатической камеры период теплового режима был принят равным 48 ч, амплитуда колебания температуры на наружной поверхности принята 18°C . В результате лабораторных исследований было установлено, что для образца фрагмента конструкции с теплоизоляционным слоем из XPS амплитуда колебаний температуры в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетона составила $A_{\text{XPS}} = 4,3^\circ\text{C}$, а для образца с теплоизоляционным слоем из базальтовой ваты амплитуда колебаний равна $A_{\text{мин.вата}} = 5,5^\circ\text{C}$ (графики на рис. 3).

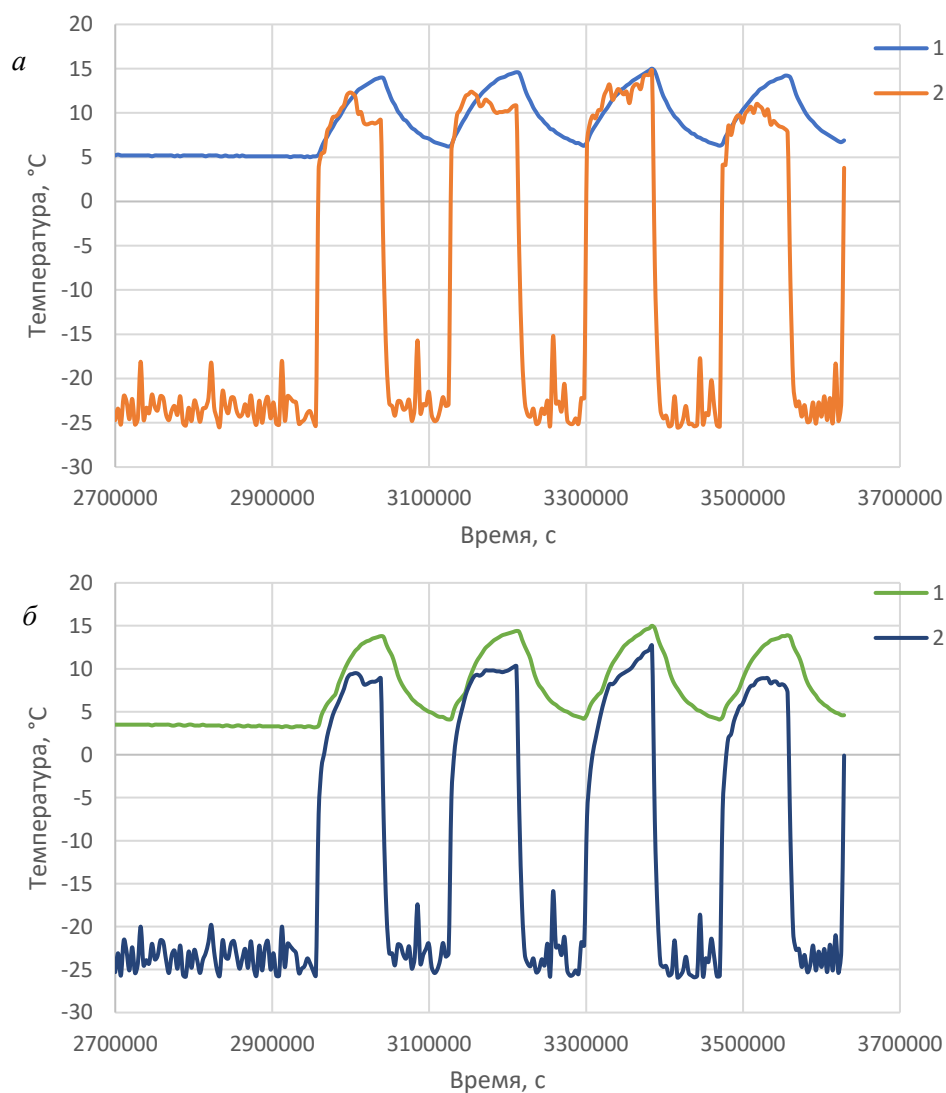


Рис. 3. Графики изменения температуры для образца с XPS (а) и образца с базальтовой ватой (б) в качестве теплоизоляционного слоя:

1 – в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетонных блоков; 2 – на наружной поверхности образца

Fig. 3. Temperature curves for the XPS (a) and basalt wool (b) samples as a thermal insulation layer: 1 –between thermal insulation and aerated concrete block masonry; 2 – on the outer sample surface

Отдельное внимание стоит уделить гармоникам изменения температур (рис. 3, а), которые показывают, что при достижении максимальной температуры на наружной поверхности фрагмента конструкции с теплоизоляцией из XPS значения в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетона остаются стабильными по сравнению с вариантом конструкции с теплоизоляционным слоем из базальтовой ваты (рис. 3, б).

Таким образом, экструзионный пенополистирол в силу лучших теплотехнических показателей при квазистационарном тепловом режиме создает для внутренних конструктивных слоев меньшую амплитуду колебаний температуры, что благоприятно влияет на долговечность конструктивных материалов. При сравнении температур в сечении между кладкой из газобетона и теплоизоляцией (рис. 4) установлено, что при использовании в качестве теплоизоляционного слоя XPS амплитуда колебаний температуры на 22 % меньше, чем в конструкциях с базальтовой ватой.

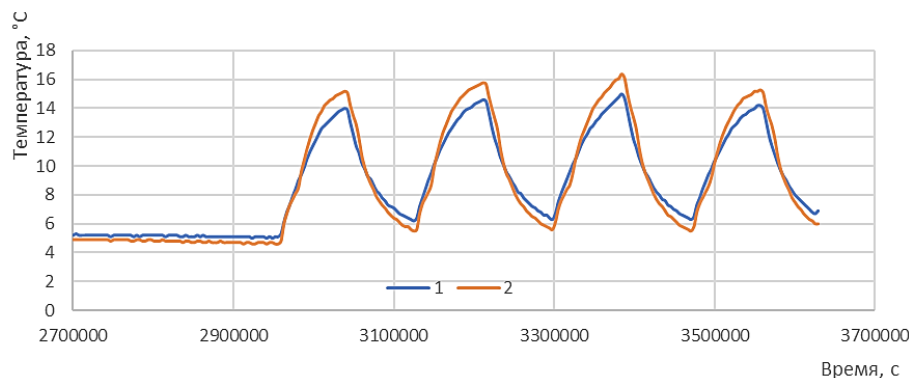


Рис. 4. График изменения температуры в сечении между теплоизоляционным слоем и кладкой из газобетонных блоков для образцов:

1 – с XPS в качестве теплоизоляции; 2 – с базальтовой ватой в качестве теплоизоляции

Fig. 4. Temperature curves for cross-section between heat insulating layer and aerated concrete masonry for samples with different heat insulation:

1 – with XPS; 2 – with basalt wool

При сравнении результатов лабораторных исследований квазистационарного теплового режима фрагмента ограждающей конструкции с различными видами теплоизоляционных материалов установлено, что амплитуда температуры внутренней поверхности фрагмента конструкции с теплоизоляцией из базальтовой ваты $A_{\text{мин. вата}}$ больше амплитуды температуры фрагмента с теплоизоляцией из XPS на 1,8 °C.

Результаты теоретических исследований

Теоретические исследования позволили изучить теплотехнические свойства материалов посредством трехмерного моделирования конструкций с теплопроводными включениями при квазистационарном тепловом режиме (рис. 5).

Для подтверждения данных, полученных в ходе лабораторного исследования, и результатов численного моделирования выполнены теплотехнические расчеты исследуемых фрагментов конструкций. Установлено сопротивление теплопередаче на основе теоретических расчетов и выполнено его сравнение с полученными данными с сопротивлением теплопередаче, установленным в лабораторных условиях. Лабораторные исследования сопротивления теплопередаче рассматриваемых фрагментов ограждающих конструкций с теплоизоляционным слоем из базальтовой ваты и XPS проведены согласно ГОСТ Р 56623–2015 «Контроль не-

разрушающий. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций». Выполнена обработка полученных данных, относительная погрешность которых не превышает 5 %.

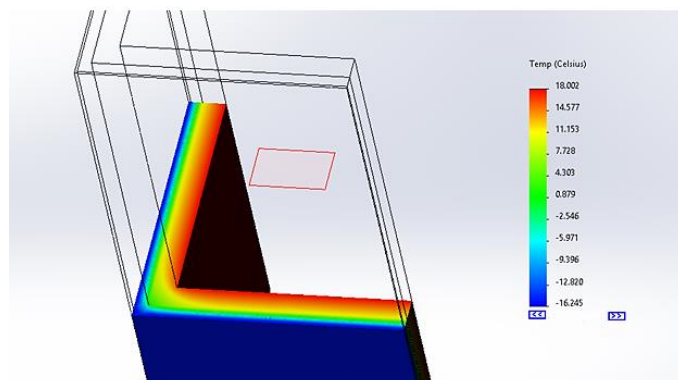


Рис. 5. Общий вид результатов численного моделирования угловой зоны конструкции
Fig. 5. 3D modeling of the building corner

Установлены коэффициенты теплопроводности исследуемых теплоизоляционных материалов на основании проведенных лабораторных исследований, а также в ходе расчета по методике ГОСТ Р 59985–2022 «Конструкции ограждающие зданий. Методы определения теплотехнических показателей теплоизоляционных материалов и изделий при эксплуатационных условиях». В качестве исходных данных принят коэффициент теплопроводности при температуре $(10 \pm 0,3)^\circ\text{C}$, установленный в сертифицированной лаборатории, расположенной в г. Кириши.

Сравнительный анализ указанных выше величин представлен в таблице.

Сравнительный анализ теплотехнических характеристик базальтовой ваты и XPS

Thermal properties of basalt wool and XPS

№ п/п	Характеристика	XPS	Базальтовая вата
1	Сопротивление теплопередаче на основе теоретического расчета, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$	2,125	1,887
2	Сопротивление теплопередаче, полученное лабораторным путем, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$	1,859	1,359
3	Разница между сопротивлением теплопередаче, полученным теоретическим расчетом, и сопротивлением по лабораторным исследованиям, %	13	28
4	Коэффициент теплопроводности при $(10 \pm 0,3)^\circ\text{C}$, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, полученный в сертифицированной лаборатории	0,033	0,035
5	Коэффициент теплопроводности при условии эксплуатации «Б» при пересчете по методике ГОСТ Р 59985–2022, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,035	0,042

Окончание таблицы
End of table

№ п/п	Характеристика	XPS	Базальтовая вата
6	Коэффициент теплопроводности, определенный на основании лабораторных исследований, Вт/(м·К)	0,043	0,075
7	Разница между коэффициентом теплопроводности, полученным по методике ГОСТ Р 59985–2022, и коэффициентом по лабораторным исследованиям, %	19	44
8	Коэффициент температуропроводности, м ² /ч	$1,37 \cdot 10^{-7}$	$7,26 \cdot 10^{-7}$

В результате численного моделирования двух конструктивных решений фрагментов ограждающих конструкций с теплоизоляционным слоем из XPS и базальтовой ваты в условиях, идентичных лабораторным исследованиям, были получены графики распределения температур во времени для участка стены без теплопроводных включений и для угловой зоны (рис. 6, 7).

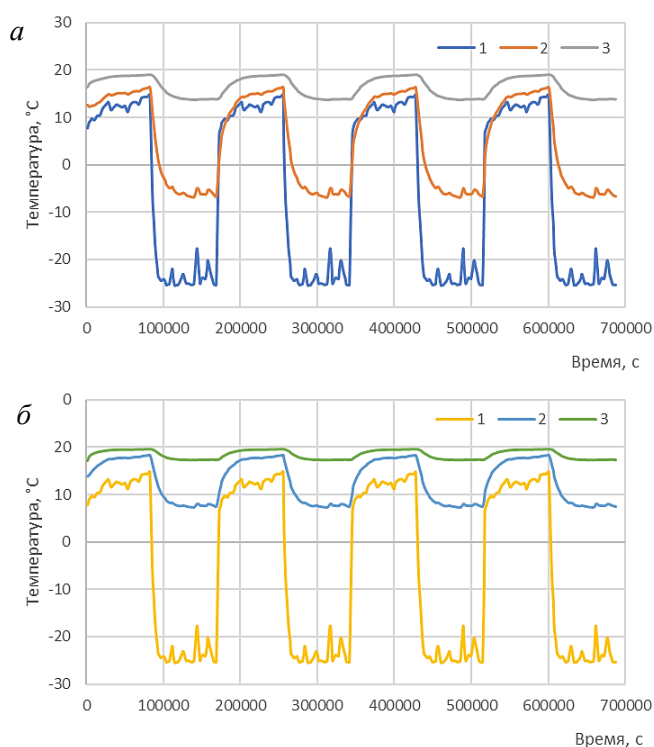


Рис. 6. Графики изменения температуры: а – в угловой зоне; б – в однородной зоне, для образца с XPS в качестве теплоизоляционного слоя в следующих местоположениях: 1 – на наружной поверхности образца; 2 – в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетонных блоков; 3 – на внутренней поверхности

Fig. 6. Time-temperature curves: а – in the corner zone; б – in the homogeneous zone for sample with XPS: 1 – on the outer sample surface; 2 – in the cross-section between heat insulating layer and aerated concrete masonry

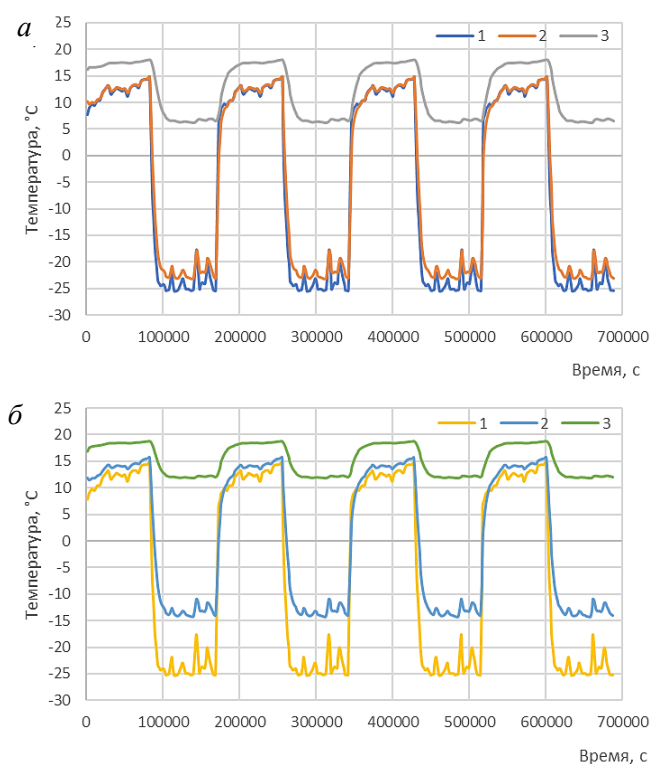


Рис. 7. Графики изменения температуры:

a – в угловой зоне; *b* – в однородной зоне, для образца с базальтовой ватой в качестве теплоизоляционного слоя в следующих местоположениях: 1 – на наружной поверхности образца; 2 – в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетонных блоков; 3 – на внутренней поверхности

Fig. 7. Time-temperature curves:

a – in the corner zone; *b* – in the homogeneous zone for sample with basalt wool: 1 – on the outer sample surface; 2 – in the cross-section between heat insulating layer and aerated concrete masonry; 3 – on the inner surface

При анализе графиков распределения температур по времени для ограждающей конструкции с теплоизоляционным слоем из XPS на наружной поверхности и в сечении между теплоизоляцией и кладкой из газобетона (рис. 6) было установлено, что за счет геометрической формы происходит значительное снижение температуры в слое теплоизоляции угловой зоны с $+8^{\circ}\text{C}$ до -7°C , но одновременно с этим наблюдается сохранение низких температур при увеличении температуры на наружной поверхности до $+12^{\circ}\text{C}$. Также практически отсутствует запаздывание колебаний температуры во времени вследствие высокой тепловой инерции теплоизоляционного слоя.

При аналогичном численном моделировании квазистационарного теплового режима конструкции с теплоизоляцией из базальтовой ваты на графике на рис. 7, *a* для угловой зоны видно, что амплитуды колебания температуры на наружной поверхности ограждающей конструкции и в сечении между теплоизоляцией и кладкой отличаются на $\sim 1^{\circ}\text{C}$ в нижней зоне графика изменения

температуры. Для однородного фрагмента конструкции на графике (рис. 7, б) наблюдается уменьшение амплитуды колебаний температуры в сечении между кладкой и теплоизоляционным слоем; при этом, как и для образца с теплоизоляцией из XPS, отсутствует запаздывание теплового потока во времени.

Заключение

В ходе лабораторных исследований установлены значения сопротивления теплопередаче для базальтовой ваты и XPS, которые отличаются от величин, полученных теоретическим путем. Этот факт указывает на несоответствие коэффициентов теплопроводности, используемых при теоретических исследованиях, и коэффициентов, полученных в ходе лабораторных испытаний.

При этом величина коэффициента теплопроводности для теоретических исследований при условии эксплуатации «Б» была получена по методике ГОСТ Р 59985–2022, исходя из величины коэффициента теплопроводности в сухом состоянии. Это свидетельствует о некорректности коэффициентов теплотехнического качества, участвующих в пересчете коэффициента теплопроводности из сухого состояния в расчетное. Коэффициент теплотехнического качества, принимаемый по табличным данным, имеет только градацию по типу теплоизоляционного материала, однако не учитывает плотность, тип пор, фильтрационные, адсорбционные и абсорбционные характеристики материалов. Значение коэффициента теплотехнического качества необходимо принимать на основании лабораторных исследований. Для базальтовой ваты отклонение коэффициента теплопроводности составило 44 %, для XPS – 19 %.

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость выравнивания температуры в различных точках среды, при этом значение коэффициента для базальтовой ваты в 5,3 раза больше значения для XPS. Однако исходя из графиков изменения температуры установлено незначительное смещение колебания температуры во времени, равное $\pi/40$. Данное расхождение между ожидаемой скоростью выравнивания температуры в толще теплоизоляции между двумя исследуемыми материалами можно объяснить тем, что данная величина была обозначена для упрощения дифференциального уравнения теплопроводности для одномерного движения тепла. В дальнейших расчетах, связанных с определением величин теплового потока при трехмерной постановке задачи, коэффициент температуропроводности не может являться величиной, характеризующей скорость выравнивания температуры.

Исходя из анализа гармоник колебания температур в сечении между теплоизоляционным слоем и кладкой в конструкциях с теплопроводными включениями видно значительное уменьшение температур по сравнению с конструктивными решениями, не содержащими теплопроводных включений. При этом конструктивные решения с теплоизоляционным слоем из XPS характеризуются более стабильными температурами в толще ограждающей конструкции при квазистационарном тепловом режиме по сравнению с аналогичной конструкцией с теплоизоляцией из базальтовой ваты. Таким образом, вариант с теплоизоляционным слоем из XPS позволит сократить количество циклов перехода через «ноль» для конструктивных материалов, расположенных во внутренней части ограждающей конструкции, что благоприятно скажется на их долговечности и надежности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Sisman N., Kahya E., Aras N., Aras H.* Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Türkiye's different degreeday regions // *Energy Pol.* 2007. V. 35 (10). P. 5151–5155. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.04.037
2. *Ucar A., Baló F.* Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls // *Renew. Energy.* 2010. V. 35 (1). P. 88–94. DOI: 10.1016/j.renene.2009.07.009
3. *Liu X., Chen Y., Ge H., Fazio P., Chen G., Guo X.* Determination of optimum insulation thickness for building walls with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China // *Energy Build.* 2015. V. 109. P. 361–368. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.021
4. *Kaynaklı O., Kaynaklı F.* Determination of optimum thermal insulation thicknesses for external walls considering the heating, cooling and annual energy requirement // *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi.* 2016. V. 21 (1). P. 227–242. DOI: 10.17482/uujfe.27323
5. *Kurekci N.A.* Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Türkiye's provincial centers // *Energy Build.* 2016. V. 118. P. 197–213. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.004
6. *Huang H., Zhou Y., Huang R., Wu H., Sun Y.* Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate // *Sustain. Cities Soc.* 2020. V. 52. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101840
7. *Verichev K., Serrano-Jimenez A., Carpio M., Barrios-Padura A., Díaz-López C.* Influence of degree days calculation methods on the optimum thermal insulation thickness in life-cycle cost analysis for building envelopes in Mediterranean and Semi-Arid climates // *J. Build. Eng.* 2023. V. 79. DOI: 10.1016/j.job.2023.107783
8. *Canbolat A.S.* An integrated assessment of the financial and environmental impacts of exterior building insulation application // *J. Clean. Prod.* 2024. V. 435. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140376
9. *Ozel M.* Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials // *Appl. Therm. Eng.* 2011. V. 31 (17–18). P. 3854–3863. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.033
10. *Li T., Liu Q., Mao Q., Chen M., Ma C., Wang D., Liu Y.* Optimization design research of insulation thickness of exterior wall based on the orientation difference of solar radiation intensity // *Appl. Therm. Eng.* 2023. V. 223. DOI: 10.1021/acsomega.3c06432
11. *Zheng Z., Xiao J., Yang Y., Xu F., Zhou J., Liu H.* Optimization of exterior wall insulation in office buildings based on wall orientation: economic, energy and carbon saving potential in China // *Energy.* 2024. V. 290. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130300
12. *Aktemur C., Tarık Çakır M., Faruk Çakır M.* Optimising of thermal insulation thickness based on wall orientations and solar radiation using heating-degree hour method // *Case Studies in Thermal Engineering.* 2024. V. 60. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104725
13. *Белоус А.Н., Оверченко М.В., Выборнов Д.В.* Моделирование теплового режима учебного помещения. Проблемы и перспективы // *Строитель Донбасса.* 2022. № 3 (20). С. 68–72. EDN: QFJCGM
14. *Оверченко М.В.* Анализ факторов, влияющих на выбор систем утепления образовательных учреждений // *Строительные материалы и изделия.* 2019. Т. 2. № 1. С. 24–31. EDN: ZELWDB
15. *Белоус А.Н., Оверченко М.В., Белоус О.Е.* Разработка теплотехнического измерительного комплекса // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* 2020. Т. 22. № 1. С. 140–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-140-151. EDN JUMCRT
16. *Белоус А.Н., Оверченко М.В., Белоус О.Е.* Утепление цокольного узла зданий с неотапливаемым подвалом // *Строительство уникальных зданий и сооружений.* 2016. №11 (50). С. 7–21. DOI: 10.18720/CUBS.50.1. EDN YGHSLN

REFERENCES

1. *Sisman N., Kahya E., Aras N., Aras H.* Determination of Optimum Insulation Thicknesses of the External Walls and Roof (Ceiling) for Türkiye's Different Degree Day Regions. *Energy Policy.* 2007; 35 (10): 5151–5155. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.04.037

2. Ucar A., Balo F. Determination of the Energy Savings and the Optimum Insulation Thickness in the Four Different Insulated Exterior Walls. *Renewable Energy*. 2010; 35 (1): 88–94. DOI: 10.1016/j.renene.2009.07.009
3. Liu X., Chen Y., Ge H., Fazio P., Chen G., Guo X. Determination of Optimum Insulation Thickness for Building Walls with Moisture Transfer in Hot Summer and Cold Winter Zone of China. *Energy and Buildings*. 2015; 109: 361–368. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.021
4. Kaynaklı O., Kaynaklı F. Determination of Optimum Thermal Insulation Thicknesses for External Walls Considering the Heating, Cooling and Annual Energy Requirement. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 2016; 21 (1): 227–242. DOI: 10.17482/uujfe.27323
5. Kurekci N.A. Determination of Optimum Insulation Thickness for Building Walls by using Heating and Cooling Degree-Day Values of all Türkiye's Provincial Centers. *Energy and Buildings*. 2016; 118: 197–213. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.004
6. Huang H., Zhou Y., Huang R., Wu H., Sun Y. Optimum Insulation Thicknesses and Energy Conservation of Building Thermal Insulation Materials in Chinese Zone of Humid Subtropical Climate. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 52. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101840
7. Verichev K., Serrano-Jimenez A., Carpio M., Barrios-Padura A., Diaz-Lopez C. Influence of Degree Days Calculation Methods on the Optimum Thermal Insulation Thickness in Life-Cycle Cost Analysis for Building Envelopes in Mediterranean and Semi-Arid Climates. *Journal of Building Engineering*. 2023; 79. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107783
8. Canbolat A.S. An Integrated Assessment of the Financial and Environmental Impacts of Exterior Building Insulation Application. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 435. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140376
9. Ozel M. Thermal Performance and Optimum Insulation Thickness of Building Walls with Different Structure Materials. *Applied Thermal Engineering*. 2011; 31 (17–18): 3854–3863. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.033
10. Li T., Liu Q., Mao Q., Chen M., Ma C., Wang D., Liu Y. Optimization Design Research of Insulation Thickness of Exterior Wall based on the Orientation Difference of Solar Radiation Intensity. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 223. DOI: 10.1021/acsomega.3c06432
11. Zheng Z., Xiao J., Yang Y., Xu F., Zhou J., Liu H. Optimization of Exterior Wall Insulation in Office Buildings based on Wall Orientation: Economic, Energy and Carbon Saving Potential in China. *Energy*. 2024; 290. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130300
12. Aktemur C., Tarık Çakır M., Faruk Çakır M. Optimising of Thermal Insulation Thickness based on Wall Orientations and Solar Radiation using Heating-Degree Hour Method. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 60. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104725
13. Belous A.N., Overchenko M.V., Vybornov D.V. Modeling of Thermal Conditions for Study Room. *Problemy i perspektivy. Stroitel' Donbassa*. 2022; 3 (20): 68–72. EDN: QFJCGM (In Russian)
14. Overchenko M.V. Analysis of Factors Influencing the Choice of Insulation Systems for Educational Institutions. *Stroitel'nye materialy i izdelya*. 2019; 2 (1): 24–31. EDN: ZELWDB (In Russian)
15. Belous A.N., Overchenko M.V., Belous O.E. Portable Heat Metering System Design. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22. (1): 140–151. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-140-151. EDN: JUMCRT (In Russian)
16. Belous A.N., Overchenko M.V., Belous O.E. Ground Floor Insulation of Buildings with Non-heated Basements. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2016; 11 (50): 7–21. DOI: 10.18720/CUBS.50.1. EDN YGHSLN (In Russian)

Сведения об авторах

Белоус Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, зам. руководителя по проектированию, ООО «ГДЦ-Развитие», 123104, г. Москва, ул. Большая Бронная, 25, us28@ya.ru

Оверченко Мира Викторовна, канд. техн. наук, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, m.v.overchenko@donnasa.ru

Бегич Ясмин Эдинович, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, y.begich@Penoplex.ru

Белоус Ольга Евгениевна, ассистент, Донской государственный технический университет, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ol-0929@mail.ru

Еникеев Артем Искандарович, магистрант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, enikeev.ai@edu.spbstu.ru

Authors Details

Aleksei N. Belous, PhD, A/Professor, ООО "GDTs-Razvitie", 25, Bol'shaya Bronnaya Str., 123104, Moscow Russia, us28@ya.ru

Mira V. Overchenko, PhD, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin Str., 86123, Makeevka, Donetsk People's Republic, Russia, m.v.overchenko@donnasa.ru

Yasmin E. Begich, Research Assistant, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikeskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, y.begich@Penoplex.ru

Ol'ga E. Belous, Assistant Lecturer, Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., 344000, Rostov-on-Don, Russia, ol-0929@mail.ru

Artem I. Enikeev, Graduate Student, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 29, Politekhnikeskaya Str., 195251, St-Petersburg, Russia, enikeev.ai@edu.spbstu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.03.2025
Одобрена после рецензирования 17.09.2025
Принята к публикации 17.09.2025

Submitted for publication 24.03.2025
Approved after review 17.09.2025
Accepted for publication 17.09.2025