



Research Article

Received: July 16, 2024

Accepted: July 30, 2024

Published: August 8, 2024

Influence of climatic factors on thermal performance of wall panels

Veliky, Yaroslav Andreevich¹  
Nemova, Daria Viktorovna^{1*}  

¹Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; yaroslav0gj@gmail.com (V.Y.A.); darya0690@mail.ru (N.D.V.)

Keywords:

Climatic factors, thermal characteristics, wall panels, modular structures, panel structures, energy efficiency, climate chamber, climate testing

Abstract:

Recently, more attention has been paid to energy efficiency in residential houses. The energy efficiency of buildings is one of the key factors affecting the comfort of occupants during operation, so it is very important to understand whether building materials will retain their thermal performance characteristics during their entire life cycle. **Research object.** This study explores thermal performance of wall panels of modular buildings and structures. The purpose of the study is to test wall panels in a climatic chamber, compare the obtained thermal performance with initial values and draw conclusions. **Method.** Experimental, involves testing the exposure of a wall panel sample to climatic factors for a design time and measuring the thermal characteristics of the sample before and after exposure. **Results.** After exposure of the sample to climatic factors, thermal conductivity increased from 0.037 W/m·K to 0.04 W/m·K by 8%, and heat transfer resistance decreased from 2.76 to 2.67 m²·K/W by 3%. The changes could be related to various factors that occurred during the climatic tests, such as: moisture absorption and structural degradation. Climatic tests show that the thermal insulation properties of mineral wool deteriorate under certain environmental conditions, resulting in an increase in thermal conductivity and a decrease in heat transfer resistance.

1 Introduction

Одним из основных факторов, определяющих энергоэффективность здания, являются теплотехнические характеристики ограждающих конструкций. Эти характеристики влияют на микроклимат в помещениях, затраты на отопление и охлаждение, а также на общий комфорт проживания и работы в здании.

Теплотехнические характеристики стеновых панелей — это параметры, определяющие способность стеновых материалов и конструкций удерживать тепло внутри здания и предотвращать теплопотери.

Стеновые панели, как основной элемент здания, защищающий от внешних климатических факторов, играет важную роль в энергоэффективности модульных зданий и сооружений. Изоляция, встроенная в стеновые панели, предотвращает теплопередачу через стены и уменьшает тепловой поток между внутренней и внешней средой. Сопротивление теплопередаче стабилизирует температуру внутри помещений, потребление энергии системами отопления и вентиляции [1].

Строительные материалы должны соответствовать многим техническим требованиям в течение всего срока службы здания. Необходимо, чтобы материалы и конструкции сохраняли свои характеристики на протяжении своего срока службы. Когда фактический срок сохранения характеристик меньше планируемого, результатом являются увеличенные затраты, из-за увеличения объема технического обслуживания, замена определенных строительных модулей и потенциальных рисков для здоровья. Чтобы избежать этого следует



проверять материалы и конструкции на сохранение своих характеристик после воздействия различных климатических факторов, имитирующих окружающую среду.

В работе [2] проводилось исследование сопротивления теплопередаче теплоизоляционных сэндвич-панелей из сборного железобетона. Целью данной работы является разработка энергоэффективных железобетонных сэндвич-панелей. В данной работе было проведено экспериментальное исследование для определения сопротивления теплопередаче сэндвич-панелей. Для определения сопротивления теплопередаче использовался метод горячей камеры (печи), а результаты были проверены с помощью метода конечных элементов в программном обеспечении COMSOL Multiphysical. Исследование показывает, что изменение конструкции теплоизоляционного слоя может обеспечить улучшение сопротивления теплопередаче без необходимости использования альтернативных материалов. Многообещающий результат сопротивления теплопередаче $2.48 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ получен для сэндвич-панелей с расположенными в шахматном порядке сдвижными швами.

В работе [3] было проведено два эксперимента по изучению метода ускоренных испытаний - определение долгосрочного изменения сопротивления теплопередаче пластиков, и наблюдению за изменением тепловых характеристик изоляционного материала с течением времени в процессе старения в реальном времени. Ускоренный метод испытаний проводился в течение 120 дней с использованием образцов толщиной 10 мм, которые отбирались из корпуса плиты толщиной 50 мм. Процесс старения в реальном времени проводился в течение 5000 дней при постоянной температуре и относительной влажности $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $50 \pm 5 \%$. Деградация тепловых характеристик составила 38–41 % по сравнению с первоначальными значениями, через 10 дней после начала испытаний. Процесс старения в реальном времени выявил аналогичные уровни деградации примерно через 130 дней. Таким образом, по наблюдениям авторов, ускоренного испытания вполне достаточно для прогнозирования практической деградации изоляционных материалов с точностью не менее 90% при заданных продолжительности, температуре и толщине.

В работе [4] изучается накопление влаги в фасадной системе на основе бетона и теплоизоляции. Было проведено гигротермическое моделирование фасадной системы, подверженной старению. Накопление влаги рассматривалось теоретически для текущей процедуры испытаний и сравнивалось с модифицированной установкой, в которой внутренний климат контролировался на уровне $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Результаты показали, что накопление влаги в теплоизоляции в значительной степени зависит от типа бетона, что нанесение водоотталкивающей поверхностной обработки снижает накопление влаги, и что текущая установка приводит к меньшему накоплению влаги по сравнению с модифицированной установкой.

В работе [5] проводилось исследование вакуумных изоляционных панелей и их теплотехнические характеристики после ускоренных испытаний в различных условиях. Для метода оценки были установлены условия ($80 \text{ }^\circ\text{C}$ и 70% относительной влажности) с использованием максимальной температуры ($80 \text{ }^\circ\text{C}$), указанной в международных стандартах, и проведено сравнение с методом испытаний в условиях ($50 \text{ }^\circ\text{C}$ и 70% относительной влажности). Скорость увеличения внутреннего давления образцов вакуумных изоляционных панелей после воздействия на них в течение примерно 70 дней при первых условиях была аналогична скорости увеличения внутреннего давления после воздействия в течение 180 дней при вторых условиях. Кроме того, расчетная теплопроводность вакуумных изоляционных панелей была получена 0.0076 и $0.0054 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ в сильно ускоренных и ускоренных условиях, соответственно. Эти ускоренные методы могут быть использованы для получения вакуумных изоляционных панелей с аналогичными долгосрочными теплопроводностями.

Обзор литературы показал недостаточность экспериментальных и численных данных и исследований по влиянию климатических факторов на теплотехнические характеристики стеновых панелей. В данном исследовании предлагается методика определения долговечности и теплотехнических характеристик, после воздействия климатических факторов, стеновых панелей зданий, а также представлена экспериментальная и численная оценка воздействия. Он влияет не только на комфорт жителей дома, но и на экономическую составляющую, такую как работы по обслуживанию или повышение счетов за отопление. [6], [7], [8]. Поэтому информационная база, а также методики по оценке фактического срока



службы панелей, а также его влияние на теплотехнические характеристики является необходимым этапом для улучшения качества строительства [9].

Данная статья особенно актуальна для людей, занятых в строительной сфере и участвующих в проектировании, строительстве и городском планировании. Рассматривая сложные взаимодействия между климатическими факторами и тепловыми характеристиками стеновых панелей, это исследование может сформировать новое направление в развитии устойчивых и энергоэффективных строительных технологий [10], [11], [12]. Тема изучения теплотехнических характеристик стеновых панелей широко распространена. Разработаны правила проектирования, требования к энергоэффективности, а также новые материалы, способствующие повышению комфорта жильцов.

Целью исследования является проведение испытаний стеновых панелей в климатической камере и оценка полученных результатов.

Задачи исследования:

1. Расчет коэффициента ускорения климатических испытаний.
2. Разработка методики и проведение эксперимента, моделирующего различные климатические условия, основываясь на международных стандартах. Получение теплотехнических характеристик стеновых панелей через срок, равный сроку эксплуатации.
3. Анализируя полученные данные, установить взаимосвязь между сроком эксплуатации стеновых панелей и их теплотехническими характеристиками.

2 Materials and Methods

Стеновые панели, эксплуатируемые на открытом воздухе, неизбежно подвергаются воздействию целого ряда климатических факторов, включая прямые солнечные лучи, высокую влажность и другие атмосферные явления. Основной функцией этих строительных элементов, формирующих ограждающие конструкции, является теплоизоляция. В связи с этим очень важна комплексная оценка влияния этих климатических воздействий на способность сохранять теплотехнические характеристики в течение всего срока эксплуатации.

Испытания стеновых панелей в климатической камере — это процесс, предназначенный для имитации различных погодных условий [13], [14]. Панели подвергаются воздействию условий, имитирующих высокие и низкие температуры, высокую влажность, температурные колебания и осадки. Это позволяет оценить поведение материалов и конструкций в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации [15].

Во время испытаний измеряются физико-механические параметры, а также анализируются изменения термических свойств, таких как теплопроводность и термическое сопротивление. Особое внимание уделяется динамике изменений этих параметров под влиянием длительного воздействия смоделированных климатических условий [16], [17].

Метод исследования – экспериментальный. Включает в себя проведение эксперимента по воздействию климатических факторов на образец стеновой панели в течение расчетного времени и измерение тепловых характеристик образца до и после воздействия.

Анализируя результаты испытаний, можно не только оценить, соответствуют ли стеновые панели действующим нормам и стандартам теплоизоляции, но и выявить возможные дефекты и направления для совершенствования конструкции и материалов. Таким образом, метод испытаний играет важную роль в повышении качества и надежности стеновых панелей, способствует развитию инновационных подходов в строительной отрасли и повышению энергоэффективности зданий [18], [19].

2.1 Purpose of testing

Согласно Российскому государственному стандарту ГОСТ 31310–2015 «Панели стеновые трехслойные железобетонные с эффективным утеплителем. Общие технические условия» [20], стеновые панели должны сохранять технические характеристики в течение срока эксплуатации. Определение долговечности стеновых панелей является основной целью проведения данного испытания, так как этот показатель напрямую влияет на комфорт жильцов дома, экономическую эффективность проекта и привлекательность здания в целом [21].



Показателями долговечности панелей, подверженных испытаниям, согласно являются [22]:

- коэффициент теплотехнической однородности
- срок службы материала утеплителя до достижения предельного состояния по теплозащитным свойствам при заданных условиях эксплуатации.

Также панели должны обладать свойствами, способствующими рациональному расходу тепловой энергии на отопление ограждаемых помещений в течение отопительного периода. Поэтому будет определено изменение показателя энергоэффективности – приведенное сопротивление теплопередачи панели.

Испытание продолжают до тех пор, пока [23]:

1. Поверхность испытываемых образцов не получит согласованное количество энергетической освещенности
2. Не будет получен согласованный критерий старения.

Требования к оборудованию, условиям испытаний, и образцам приведены с учетом международных и национальных стандартов.

Необходимые условия проведения испытаний

Ни одно лабораторное испытание не может считаться идеальной имитацией реальных условий эксплуатации. Относительная долговечность материалов в реальных условиях эксплуатации может существенно отличаться в разных местах из-за разницы в экспозиции солнечного света, времени намокания, относительной влажности, температуре, наличии загрязнителей и других негативных факторов и тому подобное. Даже если результаты конкретного экологического испытания, проведенного по критериям этой серии, пригодны для сравнения относительной долговечности материалов в конкретной среде, они не могут считаться действительными для определения относительной долговечности тех же материалов в других условиях [25],[26].

2.2 Equipment used

Испытательная камера [27]: закрытый аппарат, используемый для создания контролируемых условий окружающей среды для испытания материалов и оборудования. Он может имитировать ряд условий, включая температуру, влажность и воздействие света, чтобы оценить производительность и долговечность образца в конкретных условиях окружающей среды.

Технические характеристики используемого везерометра:

- солнечная радиация: видимый и УФ-спектр: 280–800 нм; 150–1200 Вт/м²;
- повышенная температура: 0°C – 70°C и температура «черной панели»: 45°C – 85°C;
- повышенная влажность: осадки/роса; 20%–95%.
- Производитель TBT Scietech. Модель TBT-XLW-150A

Приборы контроля относительной влажности: устройства, встроенные в испытательную камеру для регулирования влажности воздуха. Эти устройства могут точно регулировать и поддерживать относительную влажность воздуха в камере в соответствии с конкретными требованиями протокола испытаний.

Устройство для орошения водой: механизм в испытательной камере, имитирующий воздействие дождя или влаги. Используется для оценки водостойкости и воздействия влаги на материалы и изделия путем распыления воды на материал или изделие в контролируемых условиях.

Дуговая ксеноновая лампа: источник света, который испускает излучение, подобное естественному солнечному свету, включая ультрафиолетовый (УФ), видимый и инфракрасный (ИК) спектр. Используется в лабораториях для имитации воздействия солнечного света и изучения влияния солнечного света на материалы, включая выцветание, деградацию и нагрев.

Термометр «черная панель» [28]: прибор для измерения температуры с черной поверхностью, предназначенный для поглощения всего падающего солнечного излучения. Этот термометр показывает температуру, которую достигает материал под прямыми солнечными лучами.



Стандартный термометр: традиционный прибор для измерения температуры окружающей среды в испытательной камере. В отличие от термометров с черной поверхностью, он обеспечивает общее измерение температуры воздуха и помогает гарантировать, что в испытательной камере поддерживаются требуемые условия на протяжении всего испытания.

Требования к лабораторным установкам.

Программа испытаний разработана таким образом, чтобы обеспечить непрерывную работу оборудования во время выбранного испытания. Перерывы для обслуживания оборудования и проверки образцов должны быть сведены к минимуму.

Оптика испытательного оборудования должна содержаться в чистоте для обеспечения однородности излучения, падающего на образцы.

Датчики температуры черной поверхности должны быть установлены в зоне испытания образца таким образом, чтобы они получали то же излучение, что и плоская поверхность образца, и находились в тех же условиях охлаждения.

Приборы, предназначенные для имитации воздействия чередующихся циклов день/ночь, должны быть оснащены электронными или механическими устройствами для программирования периодов со светом или без него.

2.3 Determining the duration of the test

Согласно ASTM G155-13 [29] и Российскому государственному стандарту [23], выбран метод испытаний, в котором 12-часовой цикл состоит из:

- 8 часов воздействия УФ-излучением при температуре черной панели 70 C (± 3 C), а затем
- 4 часа высокой влажности (100% относительной влажности) при 55 C (± 3 C) температура черной панели. Цикл состоит из двух меньших циклов: 102 минуты воздействия температурой, 18 минут орошения водой.

При проведении ускоренных испытаний используется коэффициент ускорения, который приводит время испытания конструкции к эквивалентному сроку.

Коэффициент ускорения старения рассчитывался на основе комбинации нескольких коэффициентов ускорения старения. Для расчета коэффициента ускорения старения были использованы: уравнение Аррениуса и пропорция между общей УФ-энергией во время старения и естественным процессом старения на открытом воздухе. Комбинируя эти подходы, можно получить более точную оценку коэффициента ускорения, учитывая различные факторы, влияющие на процесс старения [30],[31].

$$AF_{UV+t/RH} = \frac{1}{3}(AF_{T1} * AF_H) + \frac{2}{3}(AF_{T2} * AF_{UV}), \quad (1)$$

где $AF_{UV+t/RH}$ — комбинированный коэффициент ускорения УФ-излучения, температуры и влажности

AF_{T1} — коэффициент температурного ускорения в течение 4-часового испытательного цикла.

AF_H — коэффициент ускорения влажности.

AF_{T2} — коэффициент температурного ускорения в течение 8-часового испытательного цикла.

AF_{UV} — коэффициент ускорения УФ-излучения.

Для определения связи условий испытаний на старение с типичными полевыми коэффициент ускорения рассчитывался на основе уравнения Аррениуса. Это связывает время воздействия при экспериментальной температуре с температурой условий использования [13]:

$$AF_T = e^{-\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_U} \right)}, \quad (2)$$

где AF_T — коэффициент температурного ускорения,



E_A — энергия активации механизма разрушения,

R — газовая постоянная ($8,314 \text{ Дж} / \text{К} * \text{моль}$),

T_A — температура ускорения в Кельвинах,

T_U — температура условий эксплуатации в Кельвинах. Согласно Российскому государственному стандарту СП 131.13330.2018 «Строительная климатология» [32] среднегодовая температура в г. Санкт-Петербург равняется 5.4С.

Энергия активации – это параметр, характеризующий минимальную энергию, необходимую для инициирования химической реакции. Предполагается, что энергия активации не обусловлена изменением температуры и имеет постоянное значение, равное 68132 Дж/моль [33], [34]. Подобный подход обусловлен фактом, что в рассмотренных температурных диапазонах, свойственных строительным изоляционным материалам, влияние температуры на энергию активации считается незначительным.

Коэффициент ускорения УФ-излучения [35], [36]

$$AF_{UV} = \frac{\Phi_{lab}}{\Phi_{nat}}; \quad (3)$$

где Φ_{lab} — общая энергия УФ-излучения при ускоренном старении;

Φ_{nat} — энергия УФ-излучения при естественном старении на открытом воздухе.

Таблица 1 – расчет солнечной радиации на квадратный метр в Санкт-Петербурге согласно данным СП 131.13330.2018 «Строительная климатология»
Table 1 – calculation of solar radiation per square meter in St. Petersburg according to SP 131.13330.2018 “Construction Climatology”

Суммарная радиация по месяцам	60 градусов северной широты, МДж/м ²	Суммарная за год, МДж/м ²	Суммарная за год, Вт-ч/м ²	Средняя доза радиации в час, Вт/м ²
Январь	232	5886	1 635 000	186.13
Февраль	470			
Март	744			
Апрель	720			
Май	612			
Июнь	544			
Июль	559			
Август	596			
Сентябрь	614			
Октябрь	562			
Ноябрь	324			
Декабрь	141			

Примечание: Ориентация вертикальной панели принята южной, для соответствия самым тяжелым условиям эксплуатации.

Коэффициент ускорения по влажности:

$$AF_H = \left(\frac{RH_A}{RH_U} \right)^m; \quad (4)$$

где RH_A — относительная влажность теста (100%),

RH_U — относительная влажность в естественных климатических условиях (75%),

m — константа влажности, принятая за значение 2.66[15].

Расчет коэффициента ускорения:

$$AF_{T1} = e^{-\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_{A1}} - \frac{1}{T_U} \right)} = 2,718^{-\frac{70000}{8,314} \left(\frac{1}{343} - \frac{1}{278,4} \right)} = 297,44;$$

$$AF_{T2} = e^{-\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_{A2}} - \frac{1}{T_U} \right)} = 2,718^{-\frac{70000}{8,314} \left(\frac{1}{328} - \frac{1}{278,4} \right)} = 96,81;$$

$$AF_H = \left(\frac{RH_A}{RH_U} \right)^m = \left(\frac{100}{75} \right)^{2,66} = 2,14;$$

$$AF_{UV} = \frac{\Phi_A}{\Phi_U} = \frac{1200}{186,13} = 6,44.$$

В таком случае эксплуатация длительностью 10 лет будет воспроизведена в климатической установке за 65 часов, что составит 6 циклов по 12 часов.

2.4 Preparation of test samples

Выбор образцов фасадных стеновых панелей ограничен габаритами испытательной климатической установки, размером 300x350 мм.

Для изготовления образца были выбраны основные элементы конструкции стеновой панели. Бетон, как несущий элемент, минеральная вата, как теплоизоляционный слой и облицовочная плита. Размер образца 250x250 мм (Рис. 1).

Таблица 2– Состав экспериментального образца.
Table 2 – Composition of the experimental sample.

№ слоя	Название	δ, мм
1	Ограждающая конструкция: Ячеистый бетон D800	25
2	Теплоизоляционный слой: Минеральная вата 80 кг/м ³	100
3	Облицовочный материал: Керамогранит	10



Рис. 1 – Образец испытаний
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 1 – Test sample
Image by the author of the article

Так как наиболее подверженным воздействию является слой минеральной ваты, было принято решение защитить этот слой от внеэксплуатационного воздействия металлическим профилем.

Для достижения максимального соответствия испытаний реальным условиям эксплуатации образцы подвергаются кондиционированию в специализированном помещении с контролируемыми параметрами влажности и температуры, в течение 2 дней. Длительность и условия кондиционирования определяются на основе методических рекомендаций, целью которых является стабилизация физических и механических свойств материала перед проведением климатических испытаний.

2.5 Methodology for determining thermal characteristics of a wall panel fragment

Тепловые свойства фрагментов стен определяются в соответствии с методическими указаниями. Стандарт устанавливает методику измерений для определения таких параметров, как эффективная теплопроводность (λ_{eff} в $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$) и термическое сопротивление (R , в $\frac{м^2 \cdot ^\circ C}{Вт}$), которые важны для оценки энергоэффективности и теплоизоляционных свойств строительных материалов.

Метод, предложенный в Российском государственном стандарте ГОСТ 7076[22], основан на создании и поддержании постоянного теплового потока (неизменного во времени) через плоский образец материала постоянной толщины. Тепловой поток направлен перпендикулярно поверхности образца, что сводит к минимуму влияние кромок и обеспечивает равномерное распределение температуры в материале. Важными измеряемыми величинами являются плотность теплового потока, температура противоположной поверхности образца и его толщина.

Для установления состояния равновесия теплового потока необходимо продемонстрировать стабильность термического сопротивления измеряемого образца, состояние равновесия считается достигнутым, если разница в термическом сопротивлении, рассчитанном по результатам пяти последовательных измерений, не превышает 1% и эти значения не имеют монотонно возрастающей или убывающей тенденции.

Таким образом, метод, позволяет измерять тепловые свойства строительных материалов с высокой степенью точности и воспроизводимости.

В рамках эксперимента определение сопротивление теплопередаче образца определялось на приборе ПИТ-2.1.

2.6 Conducting tests



Рис. 2 – Климатическая установка и образец
Изображение выполнено автором статьи
Fig. 2 – Climate control unit and sample
Image by the author of the article

Для всесторонней оценки долговременной надёжности и сохранения теплотехнических характеристик строительных материалов, таких как фрагменты стеновых панелей, предлагается комплексное испытание, включающее в себя измерение исходных физических параметров образца, его выдерживание в условиях моделируемых климатических воздействий и последующую оценку изменений его свойств. Образец помещается в климатическую установку (Рис. 2), способную моделировать различные условия окружающей среды, включая температурные колебания, влажность, и излучение.

Устанавливаются циклы испытаний, имитирующие длительное воздействие климатических факторов, и запускается программа.

Во время проведения испытания ведется контроль работоспособности установки, а также периодически пополняется вода, необходимая для регулировки влажности.

Через срок, равный рассчитанному в разделе 5 образец достается из установки и проводятся испытания по определению сопротивления теплопроводности на приборе ПИТ-2.1. Результаты испытаний и их анализ представлены ниже.

2.7 Анализ полученных данных

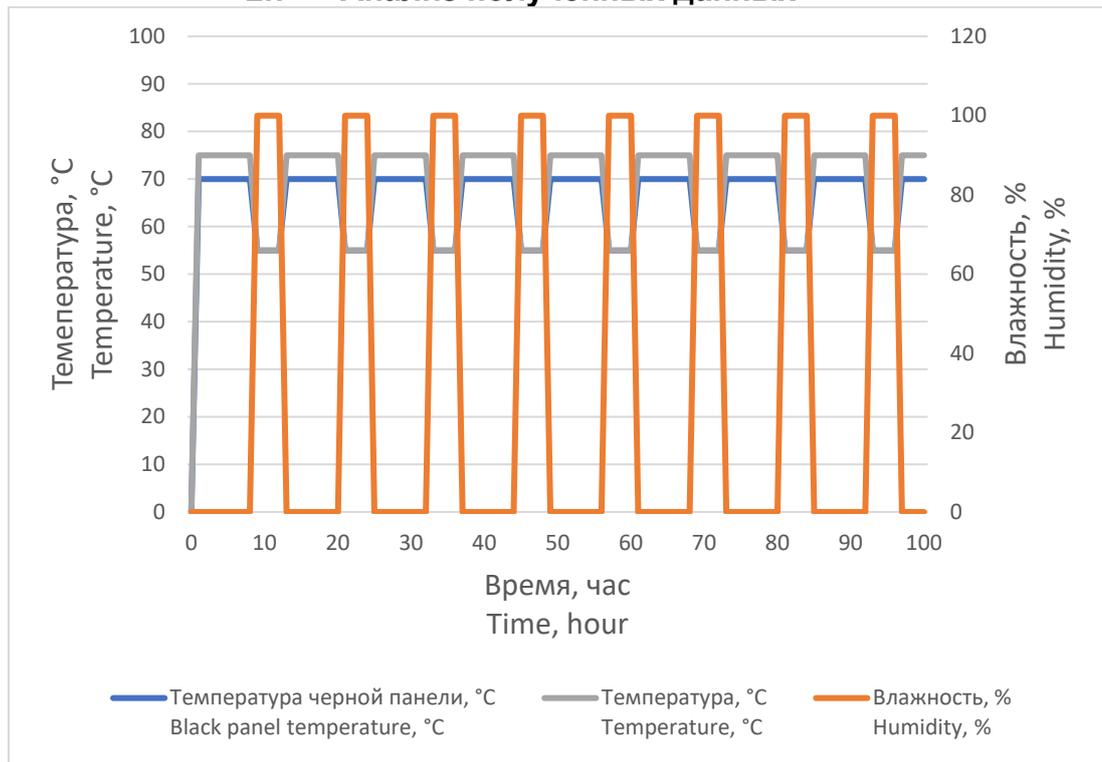


Рис. 4 – График климатических условий во время испытаний

Изображение выполнено автором статьи

Fig. 4 – Graph of climatic conditions during testing

Image by the author of the article

Испытания в климатической камере проводились 325 часов. График изменения температуры, температуры черной панели и влажности во времени для первых 100 часов испытаний представлены на рисунке 4.

До климатических испытаний и после их проведения образцы теплоизоляции, толщиной 50 мм, были испытаны в приборе измерения теплопроводности ПИТ– 2.1. Испытания проводились до полного установления теплового равновесия. В обоих случаях это заняло более 3 часов, а измерения регистрировались каждые 14 секунд (Рис. 5, 6). В таблице 3 представлены результаты измерений.

Таблица 3 – Результаты измерений сопротивления теплопередаче
Table 3 – Results of heat transfer resistance measurements

	Температура измерительного нагревателя, $T_{изм,н}, ^\circ C$	Температура нижнего нагревателя, $T_{ниж,н}, ^\circ C$	Мощность, необходимая для поддержания температуры $P, Вт$	Величина теплового потока $Q, Вт/м^2$	Сопротивление теплопередаче $R, ^\circ C * м^2/Вт$
До испытаний	27.0008	23.003	0.362	2.93	1.36
После испытаний	27.0004	23.00021	0.039	3.17	1.26

По формуле 8 [22], определяется эффективная теплопроводность материала образца.



$$\lambda_{effu} = \frac{d_u}{\frac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_k} \quad (5)$$

где d_u – толщина образца.

ΔT_u – разность температур лицевых граней

q_u – Плотность стационарного теплового потока, проходящего через испытываемый образец

R_k – Термическое сопротивление между лицевой гранью образца и рабочей поверхностью плиты прибора. Для теплоизоляционных материалов принимают нулю.

Сравнив основные показатели теплотехнических характеристик строительных материалов, полученные эмпирическим путем, можно сделать вывод, что постоянное воздействие климатическими факторами, такими как, температура, влажность и ультрафиолетовое излучение, оказало влияние на данные характеристики. Сопротивление теплопроводности уменьшилось на 7.3%. Для оценки значимости изменения характеристик проведен пересчет приведенного коэффициента теплопередачи и коэффициента теплотехнической однородности согласно Российскому своду правил СП 50.13330.2024 (приложение Е)[37] , взяв за конструкцию модуль TOPWALL (таблица 4). Результаты внесены в таблицу 5.

Таблица 4 – Состав наружной стены фасадного стенового модуля с внутренней обшивкой из ячеистого бетона

Table 4 – Composition of the external wall of the facade wall module with internal cladding made of cellular concrete

№ слоя	Название	δ, мм	λ, Вт/(м·°С)	R, м ² ·°С/Вт
		1	8.7	0.1149
1	Ограждающая конструкция: Ячеистый бетон D800 (в составе ФCM)	100	0.37	0.27
2	Силовой каркас: ЛСТК 200 мм, толщина стенки 1.5 мм	1.5	–	–
3	Теплоизоляционный слой: Минеральная вата 80 кг/м ³	150	0.045	3.33
4	Контрутепление: Минеральная вата 80 кг/м ³	50	0.045	1.11
5	Подсистема облицовки: ЛСТК 120 мм, толщина стенки 1.5 мм; Омега-профили 45 мм, толщина стенки 1.0 мм	1	–	–
6	Воздушный зазор			
7	Облицовочный материал: Керамогранит / Сталекомпозит	10	–	–

Таблица 5 – Результаты пересчета теплотехнических характеристик конструкции

Table 5 – Results of recalculation of thermal characteristics of the structure

Показатель	До испытаний	После испытаний
λ_{effu} – эффективная теплопроводность	0.037	0.04
R_o – общее сопротивление теплопередаче.	5.87	5.47
R_o^{np} – приведенное сопротивление теплопередаче	2.76	2.67
γ – коэффициент теплотехнической однородности	0.47	0.49



3 Results and Discussion

Теплопроводность увеличилась с 0.037 Вт/м·К до 0.04 Вт/м·К. Теплопроводность — это показатель способности материала передавать тепло; чем выше значение, тем менее эффективен материал в качестве изолятора. Таким образом, увеличение теплопроводности указывает на то, что изоляционные свойства минеральной ваты снизились в результате климатических испытаний.

Сопrotивление теплопередаче снизилось с 2.76 до 2.67 м²·К/Вт. Более высокие значения теплопроводности указывают на лучшие изоляционные характеристики. Более низкое значение указывает на то, что сопротивление тепловому потоку материала снижено.

Увеличение теплопроводности и уменьшение значения сопротивления тепловому потоку указывает на снижение теплоизоляционных характеристик минеральной ваты. Это говорит о том, что материал стал менее эффективным в сопротивлении теплопередаче после воздействия климатических условий испытания.

Изменения могли быть связаны с различными факторами, возникшими во время климатических испытаний, такими как:

- Поглощение влаги: Минеральная вата способна впитывать влагу, что может значительно повысить ее теплопроводность.
- Структурная деградация. Физические изменения или повреждения структуры волокна из-за колебаний температуры, влажности или других факторов окружающей среды могли повлиять на его тепловые свойства.

Также результаты подчеркивают важность долговечности изоляционных материалов. Кроме того, необходим ответственный подход к выбору этих материалов, так как вопрос качества играет важную роль в долговечности материалов.

4 Conclusion

В данной статье была представлена методика по проведению климатических испытаний стеновых панелей. При проведении экспериментальных исследований были получены эмпирические данные по влиянию климатических факторов на теплотехнические характеристики стеновых панелей.

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Сопrotивление теплопередаче снизилось на 3%, с 2.76 до 2.67 м²·К/Вт. Более высокие значения сопротивления теплопередаче указывают на лучшие изоляционные характеристики.
2. Теплопроводность увеличилась на 8% с 0.037 Вт/м·К до 0.04 Вт/м·К. Более высокое значение означает, что материал менее эффективен в качестве изолятора.
3. Ухудшение тепловых свойств после климатических испытаний говорит о том, что здания, утепленные минеральной ватой, могут со временем увеличить потребление энергии на отопление, особенно в районах с суровыми климатическими условиями, что приведет к увеличению эксплуатационных расходов и снижению энергоэффективности.

Таким образом, климатические испытания показывают, что теплоизоляционные свойства минеральной ваты ухудшаются при определенных условиях окружающей среды, что приводит к увеличению теплопроводности и снижению сопротивления теплопередаче.

References

- 1 Dmitrienko, E.A. and Granina, T.O. (2017) Innovacionny`e Konstruktivny`e Resheniya By`strovovodimy`x Zdanij Iz Sbornogo Zhelezobetona. *Vestnik Donbasskoj nacional`noj akademii stroitel`stva i arxitektury*, **126**, 108–115. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30480492>.
- 2 Bida, S.M., Abdul Aziz, F.N.A., Jaafar, M.S., Hejazi, F. and Abu Bakar, N. (2021) Thermal Resistance of Insulated Precast Concrete Sandwich Panels. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Springer, **15**. <https://doi.org/10.1186/S40069-021-00477-6>.



- 3 Choi, H.J., Ahn, H., Choi, G.S., Kang, J.S. and Huh, J.H. (2021) Analysis of Long-term Change in the Thermal Resistance of Extruded Insulation Materials through Accelerated Tests. *Applied Sciences (Switzerland)*, MDPI, **11**. <https://doi.org/10.3390/APP11199354>.
- 4 Asphaug, S.K., Time, B. and Kvande, T. (2021) Moisture Accumulation in Building Façades Exposed to Accelerated Artificial Climatic Ageing—A Complementary Analysis to NT Build 495. *Buildings*, MDPI, **11**. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11120568>.
- 5 Bae, M., Kim, S. and Kang, J. (2023) Development of Accelerated Test Method to Evaluate the Long-Term Thermal Performance of Fumed-Silica Vacuum Insulation Panels Using Accelerated Conditions. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), **16**. <https://doi.org/10.3390/MA16196542>.
- 6 Thai, H.T., Ngo, T. and Uy, B. (2020) A Review on Modular Construction for High-Rise Buildings. *Structures*, Elsevier Ltd, **28**, 1265–1290. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.09.070>.
- 7 Kamali, M. and Hewage, K. (2016) Life Cycle Performance of Modular Buildings: A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, **62**, 1171–1183. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.031>.
- 8 Innella, F., Arashpour, M. and Bai, Y. (2019) Lean Methodologies and Techniques for Modular Construction: Chronological and Critical Review. *Journal of Construction Engineering and Management*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **145**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001712](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001712).
- 9 Pontinha, A.D.R., Mäntyneva, J., Santos, P. and Durães, L. (2023) Thermomechanical Performance Assessment of Sustainable Buildings' Insulating Materials under Accelerated Ageing Conditions. *Gels*, MDPI, **9**. <https://doi.org/10.3390/GELS9030241>.
- 10 Belyaev V.S. (2011) E`nergoeffektivnost` Naruzhny`x Sten Krupnopanel`nogo Domostroeniya. *Zhilishhnoe stroitel`stvo*, OOO Reklamno-izdatel'skaya firma «Strojmaterialy», 23–26. <https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnost-naruzhnyh-sten-krupnopanelnogo-domostroeniya>.
- 11 Zav`yalov I.V. (2022) Preimushhestva i Perspektivy` Modul`nogo Stroitel`stva. *Korrekcionno-pedagogicheskoe obrazovanie: e`lektronny`j zhurnal*, 65–68. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48198152>.
- 12 Wang, Y., Zhao, Z., Liu, Y., Wang, D., Ma, C. and Liu, J. (2019) Comprehensive Correction of Thermal Conductivity of Moist Porous Building Materials with Static Moisture Distribution and Moisture Transfer. *Energy*, Elsevier Ltd, **176**, 103–118. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.03.178>.
- 13 Escobar, L.A. and Meeker, W.Q. (2006) A Review of Accelerated Test Models. *Statistical Science*, **21**, 552–577. <https://doi.org/10.1214/088342306000000321>.
- 14 Künzel, H.M., Hens, H., Karagiozis, A. and Shipp, P. (2009) Heat, Air, and Moisture Control in Building Assemblies - Fundamentals. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/220093>.
- 15 Alekseeva A.S. and Irmanova E.V. (2019) Innovacionny`e Texnologii v Proektirovanii i Stroitel`stve Modul`ny`x Zhily`x Zdani. Aktual`ny`e Problemy` Nauki i Texniki, Donskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, g. Rostov-na-Donu, 147–148. <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yqespr>.
- 16 Hung Anh, L.D. and Pásztor, Z. (2021) An Overview of Factors Influencing Thermal Conductivity of Building Insulation Materials. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **44**. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102604>.
- 17 Fazio, P., Mao, Q., Ge, H., Alturkistani, A. and Rao, J. (2007) Test Method to Measure the Relative Capacity of Wall Panels to Evacuate Moisture from Their Stud Cavity. *Journal of Architectural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **13**, 194–204. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2007\)13:4\(194\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2007)13:4(194)).
- 18 Gunawardena, T., Mendis, P., Ngo, T., Aye, L. and Alfano, J. (2014) Sustainable Prefabricated Modular Buildings. <https://doi.org/10.13140/2.1.4847.3920>.
- 19 Bida, S.M., Aziz, F.N.A.A., Jaafar, M.S., Hejazi, F. and Nabilah, A.B. (2018) Thermal Performance of Super-Insulated Precast Concrete Structural Sandwich Panels. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **176**, 418–430. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.08.004>.
- 20 GOST 31310-2015 "Wall Three-Layer Reinforced Concrete Panels with Energy-Efficient Insulation. General Specifications." <https://docs.cntd.ru/document/1200133283>.



- 21 Wang, Y., Huang, J., Wang, D., Liu, Y., Zhao, Z. and Liu, J. (2019) Experimental Investigation on Thermal Conductivity of Aerogel-Incorporated Concrete under Various Hygrothermal Environment. *Energy*, Elsevier Ltd, **188**. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.115999>.
- 22 GOST 7076 “Building Materials and Products. Method of Determination of Steady-State Thermal Conductivity and Thermal Resistance.” <https://docs.cntd.ru/document/1200005006>.
- 23 GOST 28205-89 “Basic Environmental Testing Procedures. Part 2. Tests. Guidance for Solar Radiation.” <https://docs.cntd.ru/document/1200017245>.
- 24 EN ISO 6946:2017. “Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method.” <https://www.iso.org/standard/65708.html>.
- 25 ASTM C1717-19. “Standard Test Methods for Conducting Strength Tests of Masonry Wall Panels.” <https://www.astm.org/c1717-19.html>.
- 26 Yang, W., Liu, J., Wang, Y. and Gao, S. (2020) Experimental Study on the Thermal Conductivity of Aerogel-Enhanced Insulating Materials under Various Hygrothermal Environments. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **206**. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109583>.
- 27 Berardi, U. (2019) The Impact of Aging and Environmental Conditions on the Effective Thermal Conductivity of Several Foam Materials. *Energy*, Elsevier Ltd, **182**, 777–794. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.06.022>.
- 28 Jelle, B.P. (2012) Accelerated Climate Ageing of Building Materials, Components and Structures in the Laboratory. *Journal of Materials Science*, **47**, 6475–6496. <https://doi.org/10.1007/S10853-012-6349-7>.
- 29 Wang, Y., Zhang, S., Wang, D. and Liu, Y. (2023) Experimental Study on the Influence of Temperature and Humidity on the Thermal Conductivity of Building Insulation Materials. *Energy and Built Environment*, KeAi Communications Co., **4**, 386–398. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2022.02.008>.
- 30 ASTM G155 «Standard Practice for Operating Xenon Arc Lamp Apparatus for Exposure of Materials». <https://www.astm.org/standards/g155>.
- 31 Lacey, A.W., Chen, W., Hao, H. and Bi, K. (2018) Structural Response of Modular Buildings – An Overview. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **16**, 45–56. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2017.12.008>.
- 32 Berardi, U. and Nosrati, R.H. (2018) Long-Term Thermal Conductivity of Aerogel-Enhanced Insulating Materials under Different Laboratory Aging Conditions. *Energy*, Pergamon, **147**, 1188–1202. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.01.053>.
- 33 SP 131.13330.2020 Building Climatology. <https://docs.cntd.ru/document/573659358>.
- 34 Ojanen, T. (2017) Moisture Performance of Mineral Wool Insulation Products in Highly Insulated Structures. *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, **132**, 795–800. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.10.026>.
- 35 Zheldakov, D.Y., Tursukov, S.A., Sinicin, D.A., Pudovkin, A.N. and Parfenova, A.A. (2023) Ocenka Dolgovechnosti Nanostrukturnykh Volokon Mineral'noj Vaty s Primeneniem Teorii Ximicheskoy Korrozii. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*, 59–71. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-1-59-71>.
- 36 Sekki, P., Karvinen, T. and Vinha, J. (2021) Moisture Behavior of External Insulated Precast Concrete Wall Panels. *Journal of Building Physics*, SAGE Publications Ltd, **44**, 409–434. <https://doi.org/10.1177/1744259120925850>.
- 37 Berardi, U. and Nosrati, R.H. (2018) Long-Term Thermal Conductivity of Aerogel-Enhanced Insulating Materials under Different Laboratory Aging Conditions. *Energy*, Pergamon, **147**, 1188–1202. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.01.053>.
- 38 SP 50.13330.2024 “Thermal Performance of the Buildings.” <https://docs.cntd.ru/document/1306326592>.