

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-7-15-25

*Данилов В.М., Ярцев В.П., Забелин Г.Н.

Тамбовский государственный технологический университет

*E-mail: vm.danilov1997@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования влияния циклического понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии на физические и эксплуатационные характеристики жестких минераловатных плит ($\rho=130 \text{ кг/м}^3$) и плит повышенной жесткости ($\rho=175 \text{ кг/м}^3$), изготовленных на основе базальтового волокна с разнонаправленной структурой. В работе использован комплекс экспериментальных и теоретических методов. Физико-механические характеристики минераловатных плит определялись до и после воздействия многократных циклов понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии. Для учета структурной анизотропии свойства материала исследовались в различных плоскостях, соответствующих ориентации волокон. Дополнительно применён термофлуктуационный подход, позволивший оценить закономерности длительной прочности, а также выполнить прогноз долговечности материала. Установлено, что циклическое понижение и повышение температуры во влагонасыщенном состоянии приводит к существенной деградации физико-механических и эксплуатационных свойств минераловатных плит. Основным механизмом разрушения является деструкция связующего вещества на поверхности минеральных волокон, вызывающая ослабление межволоконных связей. Показано, что вследствие анизотропии структуры характер изменения свойств существенно различается в зависимости от рассматриваемой плоскости материала. С термофлуктуационных позиций выявлено увеличение предельной температуры существования твердого тела и снижение энергии активации разрушения, что свидетельствует о деградации связующего вещества и приводит к значительному снижению прогнозируемой долговечности минераловатных плит.

Ключевые слова: долговечность, материаловедение, минераловатная плита, термофлуктуационная концепция, физические характеристики.

Введение. Современное строительство развивается в условиях постоянного ужесточения требований к энергоэффективности, долговечности и надёжности ограждающих конструкций. Одним из ключевых элементов таких конструкций являются теплоизоляционные материалы, от эксплуатационных свойств которых напрямую зависят энергетические показатели зданий и сооружений [1, 2]. Рынок строительной теплоизоляции демонстрирует устойчивый рост, что обусловлено совокупностью экономических, нормативных и технологических факторов [3]. В России продолжается увеличение объёмов строительства, что напрямую усиливает потребность в теплоизоляционных материалах [4]. На фоне расширяющегося рынка минераловатная плита остаётся наиболее востребованным видом утеплителя благодаря сочетанию надёжности, универсальности и устойчивых эксплуатационных характеристик [5, 6].

Минераловатная плита – это тепло- и звукоизоляционный материал волокнистой структуры, изготавливаемый на основе неорганического минерального сырья. В качестве исходных компонентов применяют горные породы базальтовой группы (диабаз, габбро, базальт), доменные шлаки или их смеси. Сырьё расплавляется в печах при температуре порядка 1400–1500 °С, после

чего расплав подвергается волокнообразованию (центрифугированию или раздувке), в результате чего формируются тонкие минеральные волокна. Для придания материалу формы и прочности в волокнистую массу вводят связующие вещества (как правило, фенолформальдегидные смолы в малых количествах) и гидрофобизирующие добавки, затем материал формуется в ковёр с заданной плотностью, подвергается термообработке и разрезается на плиты заданных размеров [7].

В зависимости от назначения и эксплуатационных требований минераловатные плиты различаются по плотности, прочности и ориентации волокон. Выделяют мягкие, полужёсткие и жёсткие плиты, применяемые, соответственно, для ненагруженных конструкций, каркасных стен и фасадных систем, а также для кровель и полов. Кроме того, различают плиты общего назначения, фасадные, кровельные и огнезащитные, что позволяет широко использовать минераловатную изоляцию в современном строительстве. По структуре волокон плиты могут быть с хаотичной или направленной (ориентированной) структурой, что влияет на их механические и теплофизические свойства [8–11].

При проектировании и применении минераловатных плит в строительных конструкциях

важно учитывать их анизотропные свойства, обусловленные волокнистой структурой материала и ориентацией минеральных волокон в процессе производства. Физико-механические и теплофизические характеристики минераловатных плит могут существенно различаться в зависимости от направления действия нагрузки или теплового потока относительно ориентации волокон. В частности, прочность на сжатие, модуль деформации и теплопроводность в продольном и поперечном направлениях нередко имеют неодинаковые значения. Учет анизотропных свойств особенно важен при использовании минераловатных плит в нагруженных системах, таких как фасадные системы, кровельные конструкции и полы, где направление основных напряжений и тепловых потоков должно соответствовать наиболее благоприятной ориентации волокон [12]. Ввиду этого в работе оценка данных эксплуатационных свойств оценивалась во всех направлениях.

Применение минераловатных плит в строительстве на территории России имеет как существенные преимущества, так и ряд ограничений, обусловленных физико-механическими свойствами материала и климатическими условиями эксплуатации. К основным достоинствам минераловатной теплоизоляции относятся низкий коэффициент теплопроводности, обеспечивающий эффективное снижение теплопотерь в условиях продолжительного отопительного периода, а также высокая звукоизоляционная способность, связанная с волокнисто-пористой структурой материала. Существенным преимуществом является негорючесть минераловатных плит и их устойчивость к высоким температурам, что повышает уровень пожарной безопасности зданий и сооружений [13]. Кроме того, материал характеризуется паропроницаемостью, способствующей выравниванию влажностного режима ограждающих конструкций и снижению риска образования конденсата и биопоражений. Широкая сырьевая база и развитая производственная инфраструктура обеспечивают доступность минераловатных плит на российском рынке и их экономическую целесообразность.

Вместе с тем применение минераловатных плит имеет и определённые недостатки. Ключевым ограничением является чувствительность материала к увлажнению, при котором существенно снижаются его теплофизические характеристики и возможно ухудшение геометрической стабильности [14]. В условиях холодного климата России эта проблема усугубляется: вода, попавшая в структуру плит, может замерзать, вызывая расширение и разрушение волокнистой структуры [15]. Изучение влияния температурно-влажностных

воздействий на эксплуатационные характеристики минераловатной плиты важно, поскольку этот процесс напрямую отражается на её долговечности и эффективности как теплоизоляционного материала. В холодных климатических условиях плиты подвергаются многократному промерзанию зимой и оттаиванию весной или при колебаниях температуры, что может приводить к деградации связующего вещества и самих волокон, снижению теплоизоляционных свойств, а также долговечности в целом [16, 17].

Минераловатная плита является композитным материалом, в котором в качестве матрицы выступает связующая смола. Наиболее часто применяемым вариантом является термореактивная фенолформальдегидная смола [18]. В процессе полимеризации фенолформальдегидная смола переходит из вязкотекучего состояния в пространственно сшитую полимерную структуру. При этом известно, что для полимеров и других композитных материалов резко проявляется температурно-временная зависимость прочности, т.е. действие трёх параметров – температуры, нагрузки и времени. Такая зависимость имеет линейный характер и образует семейство веерообразных прямых, сходящихся в точку (полюс). Классическим видом данной зависимости является «прямой пучок», который описывается уравнением [19]:

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right], \quad (1)$$

где τ_m – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц – атомов, групп атомов, сегментов), [с]; U_0 – максимальная энергия активации разрушения, [кДж/моль]; γ – структурно-механическая константа, [кДж/(моль·МПа)]; T_m – предельная температура существования твёрдого тела (температура разложения), [К]; R – универсальная газовая постоянная, [кДж/(моль·К)]; τ – время до разрушения (долговечность), [с]; σ – напряжение, [МПа]; T – температура, [К].

В соответствии с данной концепцией, разрушение твёрдых тел является непрерывным во времени термоактивационным процессом. Она описывается экспоненциальным множителем $\exp(U/kT)$, отражающим вероятность преодоления энергетического барьера U за счёт тепловых флуктуаций. Аналогичный механизм характерен для химических реакций, диффузии и фазовых переходов и реализуется в метастабильных системах, где с ростом температуры процессы протекают быстрее.

Материалы и методы. В данной работе изучаются минераловатные плиты плотностью 130 и 175 кг/м³ (марки ИЗОКУФ-Н и ИЗОКУФ-В)

на основе базальтового волокна с разнонаправленной структурой и фенолформальдегидной смолы в качестве связующего вещества.

Циклическое понижение и повышение температуры во влагонасыщенном состоянии образцов проводится в соответствии с ГОСТ Р 57418–2017 по следующей методике: предварительно образцы высушиваются до постоянной массы, затем увлажняются до расчётной влажности (8 %) с помощью шприца в разных точках по всему объёму и герметизируются плёнкой, после чего многократно подвергаются циклам понижения температуры ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и повышения температуры ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$), полностью имитируя реальные климатические условия. Каждый цикл включает в себя не менее 6 часов замораживания и 6 часов оттаивания.

Испытания на водопоглощение по массе и объёму, а также оценка изменений массы и плотности образцов проводится с применением электронных технических весов и штангенциркуля. Для испытаний на водопоглощение по массе и объёму используются образцы размером $100\times100\times50\text{ мм}$, предварительно взвешенные на технических весах. Затем образцы укладывают в емкость с водой с сетчатым пригрузом и через заданный интервал времени фиксируют изменение массы и геометрических размеров образцов.

Определение коэффициента теплопроводности материала с использованием установки ИТП-МГ4 «100» осуществляется для образцов размером $100\times100\times25\text{ мм}$ в условиях стационарного теплового потока. Установка представляет собой измерительную систему с двумя температурными плитами – нагревательной (горячей) и охлаждаемой (холодной), между которыми зажимается испытуемый образец. Для минимизации теплотерь по краям дополнительно используется изоляционная рамка.

Испытания на прочность при сжатии до 10%-ной относительной деформации проводится на устройстве, представляющем собой станину с установленной на ней штоком, под которым размещается образец размером $50\times50\times50\text{ мм}$, а сверху прикладывается нагрузка. Величину деформации при этом фиксирует индикатор часового типа.

Испытания на прочность при поперечном изгибе до разрушения проводится на стенде, представляющем собой раму, на которой смонтировано несколько опорных площадок, которые представляют собой две роликовые опоры, на которых фиксируется образец размером $120\times50\times50\text{ мм}$. Нагрузка прилагается к центру образца с помощью пригруза.

Для изучения долговечности с применением термофлуктуационной концепции применяется

стенд для испытаний на поперечный изгиб. Образцы размером $120\times50\times50\text{ мм}$ нагружаются с понижающим коэффициентом (5 ступеней) от разрушающей нагрузки с фиксацией времени до наступления разрушения. Для каждой точки проводится не менее 6...12 испытаний с последующей статистической обработкой. Данные испытания проводятся при трех температурах (20, 40 и $60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Требуемая температура в зоне испытаний образцов достигается с помощью покрывного теплоизоляционного кожуха и нагревающих стержней, работающих от электричества. Температура нагрева стержней регулируется с помощью трансформатора. Процесс построения графиков «пучков» и метод графоаналитического перестроения для определения констант описан в [20].

Основная часть. Изучение изменений в ходе циклического понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии образцов проводится путем оценки плотности, массы, процессов водопоглощения, коэффициента теплопроводности и прочностных характеристик при сжатии и изгибе. Для оценки анизотропных свойств изменения коэффициента теплопроводности и прочностных характеристик при сжатии и изгибе проводится для каждой грани в соответствующих осях: XOZ, XOY и YOZ (рис. 1).

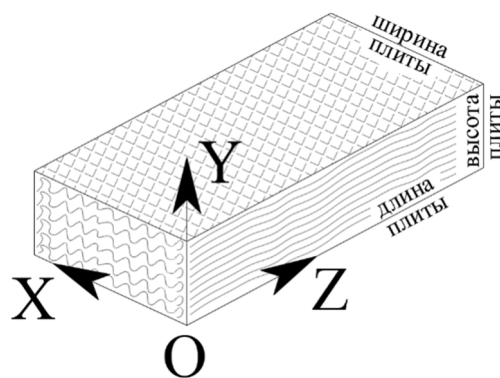


Рис. 1. Оси изучаемых граней

Влияние циклов понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии на плотность и массу приведены на рисунке 2.

Из приведенных графиков видно, что основные изменения приходятся на первую половину циклических воздействий, после чего изменения не столь значительны. Попадание воды в минераловатную плиту и последующее воздействие циклов приводит к прогрессирующему нарушению её структуры. При насыщении влагой вода заполняет поровое пространство и межволоконные контакты, а при замерзании увеличивается в объёме, создавая внутренние напряжения. Эти напряжения вызывают смещение и разрыв волокон, ослабление связующего и

нарушение межволоконных связей [21]. Вследствие этого происходит уменьшение массы и плотности [22].

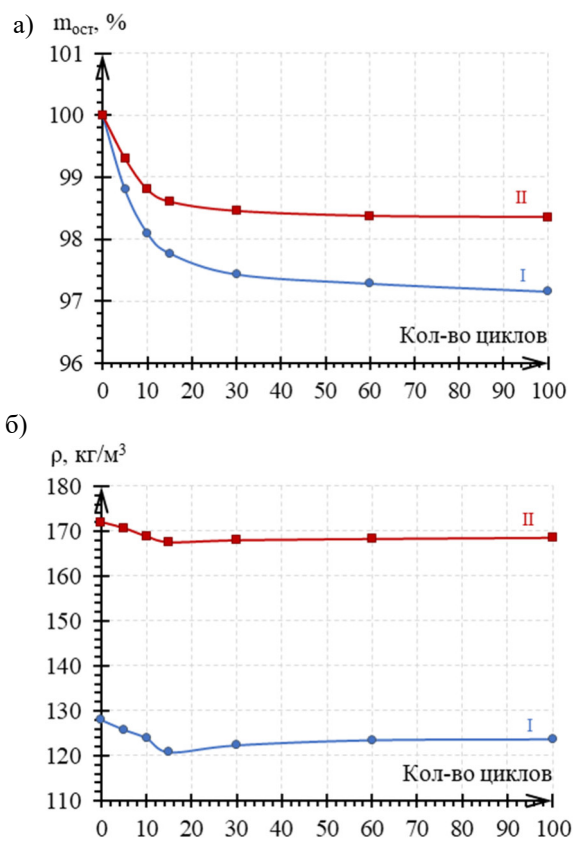


Рис. 2. Остаточная масса (а) и плотность (б) в ходе циклического понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии минераловатной плиты марки: ИЗОРУФ-Н (I) и ИЗОРУФ-В (II)

Влияние циклов понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии на процессы водопоглощения приведены на рисунке 3.

Нарушение структуры в ходе расширения воды при циклическом понижении и повышении температуры во влагонасыщенном состоянии приводит так же и к повышенному водопоглощению, как по массе, так и по объему. Это связано как с нарушением самой структуры, так и деградацией гидрофобных добавок. Ухудшение характеристики водопоглощения по массе в ходе первых циклов происходят медленно, но уже после 10 циклов изменения происходят более интенсивно. Характеристика водопоглощения по объему в ходе первых циклов улучшается, что связано с процессом изменения массы и плотности, но вскоре также ухудшается. При этом стоит отметить достаточную формостабильность изучаемых образцов, так как изменения по объему не превышают 2 %.

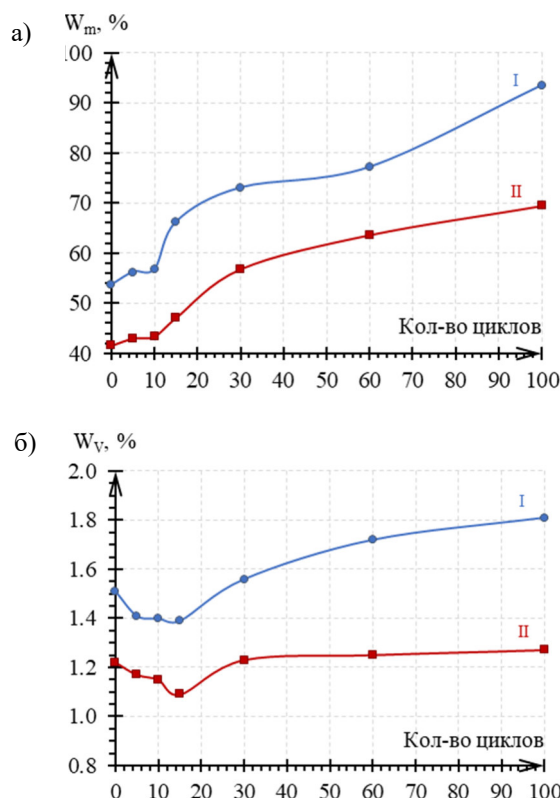


Рис. 3. Водопоглощение по массе (а) и объему (б) в ходе циклического понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии минераловатной плиты марки: ИЗОРУФ-Н (I) и ИЗОРУФ-В (II)

Влияние циклов понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии на коэффициент теплопроводности приведено на рисунке 4.

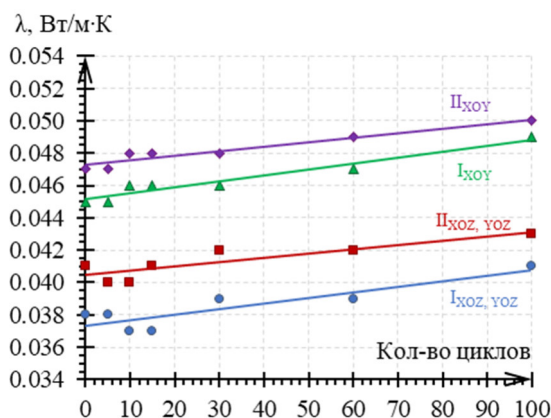


Рис. 4. Коэффициент теплопроводности в ходе циклического понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии минераловатной плиты марки: ИЗОРУФ-Н (I) и ИЗОРУФ-В (II)

Циклы понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии приводят к ухудшению характеристик теплозащитных свойств. Это также связано с нарушением структуры, а именно нарушением организованной пористости, задерживающей воздух в ней. При

нарушении структуры начинает преобладать влияние кондуктивного теплопереноса над конвективным, что приводит к увеличению коэффициента теплопроводности [23]. При этом стоит отметить, что в плоскостях XOZ и YOZ результаты идентичны, но в плоскости XOY наблюдается более высокое значение теплопроводности, что связано с более открытой структурой, напоминающей гофрированную (см. рис. 5).

Влияние циклов понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии на предельное сжимающее напряжение до деформации 10% и разрушающее изгибающее напряжение приведены на рисунке 6.

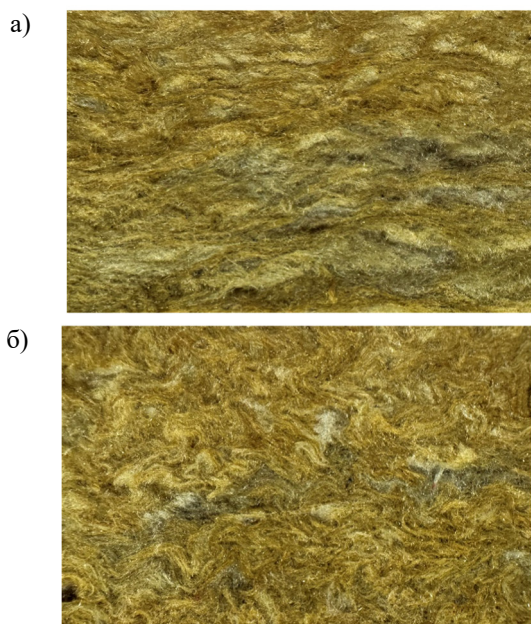


Рис. 5. Структура изучаемых минераловатных плит в плоскостях XOZ, YOZ (а) и XOY (б)

Циклы понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии существенно снижают прочность минераловатной плиты. Вода, заполняющая поры материала, при замерзании расширяется и создаёт внутренние напряжения, приводящие к повреждению волокон, ослаблению связующего и нарушению целостности волокнистого каркаса [12]. По мере накопления повреждений уменьшаются прочностные характеристики при сжатии и изгибе. При этом стоит отметить, что в плоскости XOY наблюдается наибольшая сопротивляемость материала к сжимающим усилиям, но при этом наименьшая – при изгибе. В некоторых ситуациях, когда нагрузка создает сжимающее напряжение, но отсутствуют или незначительны изгибающие напряжения и при этом допустимо некоторое снижение теплозащитных свойств, имеет практический смысл разрезать плиту и располагать ее с поворотом на 90°, с целью повышения

несущей способности и долговечности, например, в эксплуатируемых кровлях с устройством стяжки.

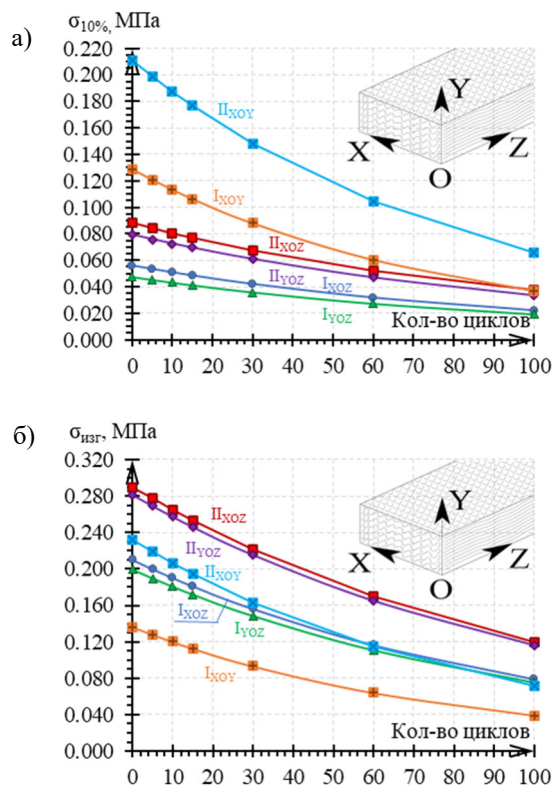


Рис. 6. Предельное сжимающее напряжение до деформации 10% (а) и разрушающее изгибающее напряжение (б) в ходе циклического понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии минераловатной плиты марки: ИЗОРУФ-Н (I) и ИЗОРУФ-В (II)

На рисунке 7 приведены графики долговечности от силового изгибающего воздействия минераловатной плиты марки ИЗОРУФ-Н без внешних воздействий и после циклов понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии. При этом закономерности для марки ИЗОРУФ-В идентичны приведенным. Константы, полученные в ходе графоаналитического перестроения графиков приведены в таблице 1.

По приведенным константам и уравнению 1, можно рассчитать прогнозируемую долговечность. Срок службы при этом будет варьироваться от эксплуатационных характеристик: нагрузки и температуры. При этом помимо традиционных «прямых пучков» наблюдаются прямые, которые не сходятся в полюс. Это является частным случаем и константы для него определяются путем, описанным в [19]. Также приведенные константы позволяют определить границы прочности и термостойкости по соответствующим уравнениям [19]. На рисунке 8 приведены диаграммы срока службы, зависящие от

напряжения и температуры до воздействий и после для минераловатной плиты марки ИЗОРУФ-Н, рассчитанные по приведенным константам. По диаграмме (рис. 8, а) можно вычислить, что при изгибающем напряжении 0,125 МПа и температуре эксплуатации 10 °С срок службы составит не менее 35 лет. При этом в соответствии с ГОСТ Р 57418–2017 два цикла воздействия равняется одному условному году эксплуата-

ции. Тогда по диаграмме (рис. 8, б) после условных 30 лет (60 циклов) эксплуатации при такой же температуре 10 °С и оставшемся спрогнозированному сроку службы 5 лет, нагрузка не должна превышать 0,058 МПа. На основании этого учет климатических воздействий крайне важен для корректной оценки срока службы и расчета предельной нагрузки при заданной температуре эксплуатации.

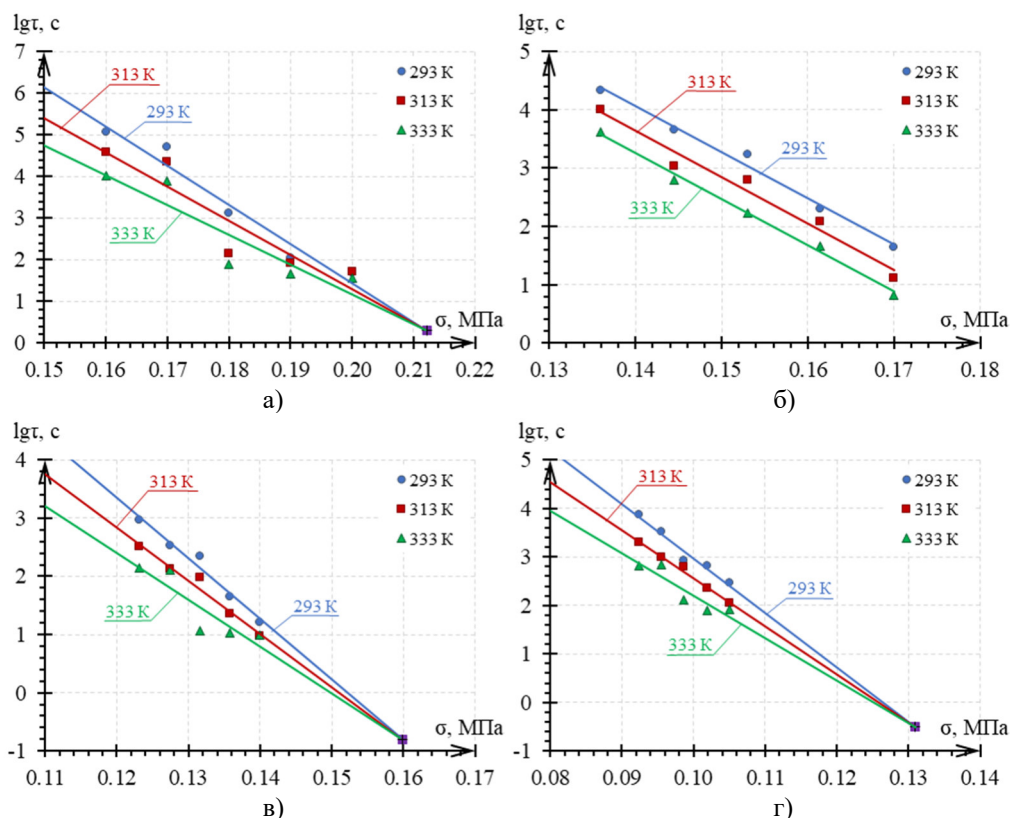


Рис. 7. Графики долговечности от силового изгибающего воздействия минераловатной плиты марки ИЗОРУФ-Н без внешних воздействий (а) [20] и после 15 (б), 30 (в), 60 (г) циклов понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии

Таблица 1

Значения констант минераловатных плит при поперечном изгибе

Марка плиты	Кол-во циклов	Константы						
		τ_m , с	T_m , К	U_0 , кДж/моль	γ , кДж/(моль·МПа)	τ^* , с	U , кДж/моль	β , 1/МПа
ИЗОРУФ-Н	б/в*	$10^{0,3}$	588	223	1051	—	—	—
	15	—	—	—	—	$10^{8,5}$	38	79
	30	$10^{-0,8}$	623	176	1100	—	—	—
	60	$10^{-0,5}$	645	151	1152	—	—	—
ИЗОРУФ-В	б/в*	$10^{-0,3}$	625	155	500	—	—	—
	15	$10^{-0,2}$	659	141	513	—	—	—
	30	—	—	—	—	$10^{5,5}$	48	58
	60	10^{-1}	683	123	540	—	—	—

* Константы для марок ИЗОРУФ-Н и ИЗОРУФ-В без воздействий были получены в ранней работе [20] и приведены для справки.

После каждого из этапов циклов наблюдается планомерное повышение константы предельной температуры. Это можно интерпретировать как деградацию связующего вещества, поскольку температура существования базальтовых волокон намного выше, чем фенолформальдегидной смолы, и повышение данной константы говорит о преобладающем влиянии базальтовых волокон. Также наблюдается снижение энергии активации разрушения, что говорит о прямом снижении долговечности.

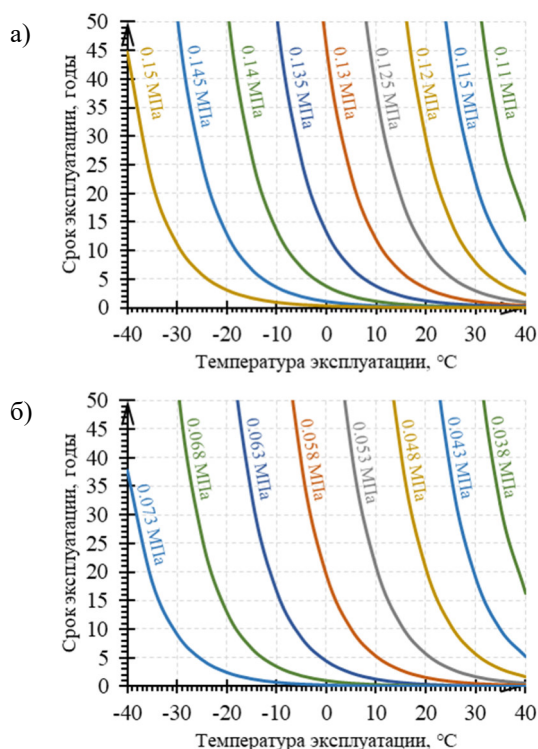


Рис. 8. Диаграмма срока службы при силовом изгибающем воздействии минераловатной плиты марки ИЗОУФ-Н без внешних воздействий (а) и после 60 циклов понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии (б)

Выводы.

1. По результатам исследования получены данные об изменениях теплопроводности и прочностных характеристик минераловатных плит с разнонаправленной структурой волокон учитывая анизотропию. При использовании плиты в положении, предусмотренном производителем, минераловатные плиты показывают заявленные характеристики в соответствии с техническими параметрами. Наиболее значимые изменения наблюдаются в случае внешнего воздействия к ребру плиты в осях ХОУ: наблюдается ухудшение теплозащитных свойств, снижение прочности при изгибающих нагрузках, но кратное возрастание прочности при сжимающих нагрузках.

2. Изучено влияние циклического понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии образцов минераловатной плиты на их

физические и эксплуатационные характеристики. В ходе данного воздействия наблюдается изменение всех параметров: рост водопоглощения, уменьшение массы и плотности, возрастание теплопроводности и снижение прочностных характеристик при изгибающем и сжимающем воздействии.

3. Выявлены изменения термофлуктуационных констант уравнения долговечности, происходящие в ходе влияния циклического понижения и повышения температуры во влагонасыщенном состоянии образцов минераловатной плиты. Данные изменения характеризуются, в первую очередь, снижением энергии активации разрушения, а, следовательно, приводящим к прямому снижению прогнозируемой долговечности, а во вторую очередь, росту предельной температуры существования, что говорит о большем влиянии базальтового волокна, и, соответственно, меньшем влиянии связующего ввиду его деградации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ali A., Issa A., Elshaer A. A comprehensive review and recent trends in thermal insulation materials for energy conservation in buildings // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 20. 8782. DOI: 10.3390/su16208782.
2. Alassaf Y. Comprehensive review of the advancements, benefits, challenges, and design integration of energy-efficient materials for sustainable buildings // Buildings. 2024. Vol. 14. No. 9. 2994. DOI: 10.3390/buildings14092994.
3. Energy Efficiency 2023 [Электронный ресурс] / International Energy Agency. Paris: IEA, 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dfd9134f-12eb-4045-9789-9d6ab8d9bf4/EnergyEfficiency2023.pdf> (дата обращения: 15.01.2026)
4. Кондаков М.В. Внедрение технологий бережливого производства и рециклинга отходов: опыт ведущих производителей теплоизоляционных материалов // Человек. Общество. Инклюзия. 2024. Т. 15. № 1. С.111–120. DOI: 10.24412/2412-8139-2024-1-111-120.
5. Баранов Е.В., Шелковникова Т.И., Дудина Н.В. Исследование конъюнктуры рынка и конкурентоспособности теплоизоляционных материалов на примере минераловатных плит и пенополистирола // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 3. С. 49–53.
6. Анисимов С.Н., Ломоносова Т.И., Ильина И.Р., Лешканов А.Ю. Сравнение теплоизоляционных свойств различных видов утеплителя для строительства многоквартирных жилых домов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы.

Конструкции. Технологии. 2025. № 1 (33). С. 19–28. DOI: 10.25686/2542-114X.2025.1.19.

7. Бобров Ю. Л., Овчаренко Е. Г., Шойхет Б. М., Боброва Е. Ю. Теплоизоляционные материалы и конструкции: учебник. М.: Инфра-М, 2024. 266 с.

8. Landolfi R., Nicoletta M. Durability assessment of ETICS: Comparative evaluation of different insulating materials // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 2. 980. DOI: 10.3390/su14020980.

9. Li H., Zhang W., Zhang Y., Zhai F., Chen F. Thermal bridging and its mitigation in bamboo panel construction with steel frameworks and mineral wool insulation // BioResources. 2024. Vol. 19. No. 1. Pp. 416–433. DOI: 10.15376/biores.19.1.416-433.

10. Сенокосов Е. А., Белозерова Т. А. Модернизация технологии «мокрого фасада» в целях сокращения трудоемкости процесса монтажа // Химия. Экология. Урбанистика. 2025. Т. 3. С. 148–151.

11. Jelle B.P. Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory // Journal of Materials Science. 2012. Vol. 47. Pp. 6475–6496. DOI: 10.1007/s10853-012-6349-7.

12. Buska A., Maciulaitis R. The compressive strength properties of mineral wool slabs: Influence of structure anisotropy and methodical factors // Journal of Civil Engineering and Management. 2007. Vol. 13. No. 2. Pp 97–106. DOI: 10.1080/13923730.2007.9636425.

13. Lakatos A., Csik A., Lucchi E., La Rosa A. D. Thermal performance and ageing effects to model the life cycle assessment of heat-protective thermal insulation materials in pipe systems // International communications in heat and mass transfer. 2025. Vol. 164. 108819. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108819.

14. Vrana T., Bjork F. Frost formation and condensation in stone–wool insulations // Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. No. 5. Pp. 1775–1787. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.10.014.

15. Непомнящий А. Н., Выровой В. Н., Суханов В. Г. Влияние условий замораживания на морозостойкость строительных композитов // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4(7). С. 41–46. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10034.

16. Черноиван В. Н., Черноиван Н. В., Черноиван А. В. Оценка влияния атмосферных воздействий на прочностные и упругие характеристики минераловатных плит в системах утепления стен // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 1. С. 101–104.

17. Муминиен А. А., Нагановский Ю. К., Ройтман В. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б., Федотов И. О. Влияние длительного естественного старения теплоизоляционных минераловатных материалов на физико-химические и термические превращения // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 3. С. 131–141. DOI: 10.25257/FE.2024.3.131-141.

18. Кетов А. А., Красновских М. П. Определение органических связующих в изделиях из минерального волокна и исследование продуктов, образующихся в результате термического воздействия на данные изделия // Вестник пермского университета. Серия: химия. 2014. № 2(14). С. 4–11.

19. Ярцев В. П., Данилов В. М. Прогнозирование основных эксплуатационных параметров минераловатных плит: учебное пособие. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. 81 с. ISBN 978-5-8265-2683-5.

20. Ярцев В. П., Данилов В. М. Термофлуктуационные закономерности разрушения и деформирования минераловатной плиты при силовом воздействии // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 79–84. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.07.79-84.

21. Гусев Б. В., Езерский В. А., Монастырев П. В. Потеря массы минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий // Кровельные и изоляционные материалы. 2005. № 2. С. 48–49.

22. Ivanic A., Kravanja G., Kidess W., Rudolf R., Lubej S. The influences of moisture on the mechanical, morphological and thermogravimetric properties of mineral wool made from basalt glass fibers // Materials. 2020. Vol. 13. No. 10. 2392. DOI: 10.3390/ma13102392.

23. Румянцев Б. М., Жуков А. Д., Смирнова Т. В. Теплопроводность высокопористых материалов // Вестник МГСУ. 2012. № 3. С. 108–114.

Информация об авторах

Данилов Владислав Михайлович, аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: vm.danilov1997@gmail.com. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Ярцев Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: jarcev21@rambler.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Забелин Глеб Николаевич, магистрант кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: zabelin_gleb@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106/5.

Поступила 14.01.2026 г.

© Данилов В.М., Ярцев В.П., Забелин Г.Н., 2026

**Danilov V.M., Yartsev V.P., Zabelin G.N.*

Tambov State Technical University

**E-mail: vm.danilov1997@gmail.com*

EFFECT OF TEMPERATURE–MOISTURE EXPOSURE ON THE SERVICE PROPERTIES OF MINERAL WOOL BOARDS

Abstract. The paper presents the results of an experimental study of the effect of cyclic temperature decrease and increase under moisture-saturated conditions on the physical and service properties of rigid mineral wool boards ($\rho=130 \text{ kg/m}^3$) and high-rigidity boards ($\rho=175 \text{ kg/m}^3$) manufactured on the basis of basalt fibers with a multidirectional structure. A combination of experimental and theoretical methods was employed. The physical and mechanical properties of the mineral wool boards were determined before and after exposure to multiple cycles of temperature decrease and increase under moisture-saturated conditions. To account for structural anisotropy, the material properties were investigated in different planes corresponding to the fiber orientation. In addition, a thermal fluctuation approach was applied to assess long-term strength behavior and to predict the durability of the material. It was established that cyclic temperature decrease and increase under moisture-saturated conditions leads to significant degradation of the physical, mechanical, and service properties of mineral wool boards. The primary damage mechanism is the destruction of the binder on the surface of mineral fibers, resulting in the weakening of inter-fiber bonds. It is shown that, due to structural anisotropy, the nature of property changes differs substantially depending on the plane of the material considered. From a thermal fluctuation standpoint, an increase in the limiting temperature of solid-state existence and a decrease in the activation energy of fracture were revealed, indicating degradation of the binder and leading to a substantial reduction in the predicted durability of mineral wool boards.

Keywords: durability, materials science, mineral wool board, thermal fluctuation concept, physical properties.

REFERENCES

1. Ali A., Issa A., Elshaer A. A comprehensive review and recent trends in thermal insulation materials for energy conservation in buildings. Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 20. 8782. DOI: 10.3390/su16208782.
2. Alassaf Y. Comprehensive review of the advancements, benefits, challenges, and design integration of energy-efficient materials for sustainable buildings. Buildings. 2024. Vol. 14. No. 9. 2994. DOI: 10.3390/buildings14092994.
3. Energy Efficiency 2023 [Electronic resource]. International Energy Agency. Paris: IEA, 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dfd9134f-12eb-4045-9789-9d6ab8d9fbf4/EnergyEfficiency2023.pdf> (accessed: 15.01.2026)
4. Kondakov M.V. Implementation of lean manufacturing technologies and waste recycling: experience of leading manufacturers of thermal insulation materials [Vnedrenie tekhnologij berezhlivogo proizvodstva i reciklinga othodov: opyt vedushchih proizvoditelej teploizolyacionnyh materialov]. Human. Society. Inclusion. 2024. Vol. 15. No. 1. Pp. 111–120. DOI: 10.24412/2412-8139-2024-1-111-120. (rus)
5. Baranov E.V., Shelkovnikova T.I., Dudina N.V. Study of market conditions and competitiveness of thermal insulation materials using mineral wool boards and expanded polystyrene as examples [Issledovanie konyunktury rynka i konkurentosposobnosti teploizolyacionnyh materialov na primere mineralovatnyh plit i penopolistirola]. Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2015. No. 3. Pp. 49–53. (rus)
6. Anisimov S.N., Lomonosova T.I., Ilyina I.R., Leshkanov A.Yu. Comparison of thermal insulation properties of various types of insulation for the construction of multi-apartment residential buildings [Sravnenie teploizolyacionnyh svojstv razlichnyh vidov uteplitelya dlya stroitel'stva mnogokvartirnyh zhilyh domov]. Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Structures. Technologies. 2025. No. 1 (33). Pp. 19–28. DOI: 10.25686/2542-114X.2025.1.19. (rus)
7. Bobrov Yu.L., Ovcharenko E.G., Shoikhet B.M., Bobrova E.Yu. Thermal Insulation Materials and Structures [Teploizolyacionnye materialy i konstrukcii]. Moscow: Infra-M, 2024. 266 p. (rus)
8. Landolfi R., Nicoletta M. Durability assessment of ETICS: Comparative evaluation of different

insulating materials. Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 2. 980. DOI: 10.3390/su14020980.

9. Li H., Zhang W., Zhang Y., Zhai F., Chen F. Thermal bridging and its mitigation in bamboo panel construction with steel frameworks and mineral wool insulation. BioResources. 2024. Vol. 19. No. 1. Pp. 416–433. DOI: 10.15376/biores.19.1.416-433.

10. Senokosov E.A., Belozeroва T.A. Modernization of the “wet facade” technology to reduce installation labor intensity [Modernizatsiya tekhnologii «mokrogo fasada» v celyah sokrashcheniya trudoemkosti processa montazha]. Chemistry. Ecology. Urban Studies. 2025. Vol. 3. Pp. 148–151. (rus)

11. Jelle B.P. Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory. Journal of Materials Science. 2012. Vol. 47. Pp. 6475–6496. DOI: 10.1007/s10853-012-6349-7.

12. Buska A., Maciulaitis R. The compressive strength properties of mineral wool slabs: Influence of structure anisotropy and methodical factors. Journal of Civil Engineering and Management. 2007. Vol. 13. No. 2. Pp. 97–106. DOI: 10.1080/13923730.2007.9636425.

13. Lakatos A., Csik A., Lucchi E., La Rosa A. D. Thermal performance and ageing effects to model the life cycle assessment of heat-protective thermal insulation materials in pipe systems. International communications in heat and mass transfer. 2025. Vol. 164. 108819. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108819.

14. Vrana T., Bjork F. Frost formation and condensation in stone-wool insulations. Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. No. 5. Pp. 1775–1787. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.10.014.

15. Nepomyashchiy A.N., Vyrovoy V.N., Sukhanov V.G. Influence of freezing conditions on the frost resistance of construction composites [Vliyanie usloviy zamorazhivaniya na morozostojkost' stroitel'nykh kompozitov]. Expert: Theory and Practice. 2020. No. 4(7). Pp. 41–46. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10034. (rus)

16. Chernoi van V.N., Chernoi van N.V., Chernoi van A.V. Assessment of the influence of atmospheric effects on strength and elastic characteristics of mineral wool boards in wall insulation systems [Ocenka vliyaniya atmosferykh vozdeystviy na prochnostnye i uprugie harakteristiki mineralovatnykh plit v sistemah utepleniya sten]. Industrial and Civil Engineering. 2017. No. 1. Pp. 101–104. (rus)

17. Muminien A.A., Naganovskiy Yu.K., Roitman V.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B., Fedotov I.O. Influence of long-term natural aging of thermal insulation mineral wool materials on physicochemical and thermal transformations [Vliyanie dlitel'nogo estestvennogo stareniya teploizolyacionnykh mineralovatnykh materialov na fiziko-himicheskie i termicheskie prevrashcheniya]. Fires and Emergencies: Prevention, Response. 2024. No. 3. Pp. 131–141. DOI: 10.25257/FE.2024.3.131-141. (rus)

18. Ketov A.A., Krasnovskikh M.P. Determination of organic binders in mineral fiber products and study of products formed as a result of thermal exposure [Opredelenie organicheskikh svyazuyushchih v izdeliyah iz mineral'nogo volokna i issledovanie produktov, obrazuyushchihsya v rezul'tate termicheskogo vozdeystviya na dannye izdeliya]. Bulletin of Perm University. Series: Chemistry. 2014. No. 2(14). Pp. 4–11. (rus)

19. Yartsev V.P., Danilov V.M. Prediction of the Main Service Parameters of Mineral Wool Boards [Prognozirovanie osnovnykh ekspluatatsionnykh parametrov mineralovatnykh plit]. Tambov: Publishing Center of TSTU, 2023. 81 p. ISBN: 978-5-8265-2683-5. (rus)

20. Yartsev V.P., Danilov V.M. Thermofluctuation regularities of fracture and deformation of mineral wool boards under mechanical loading [Termofluktuationnye zakonomernosti razrusheniya i deformirovaniya mineralovatnoj plity pri silovom vozdeystvii]. Industrial and Civil Engineering. 2023. No. 7. Pp. 79–84. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.07.79-84. (rus)

21. Gusev B.V., Ezerskiy V.A., Monastirev P.V. Mass loss of mineral wool boards under service conditions [Poterya massy mineralovatnykh plit v usloviyakh ekspluatatsionnykh vozdeystviy]. Roofing and Insulation Materials. 2005. No. 2. Pp. 48–49. (rus)

22. Ivanic A., Kravanja G., Kidess W., Rudolf R., Lubej S. The influences of moisture on the mechanical, morphological and thermogravimetric properties of mineral wool made from basalt glass fibers. Materials. 2020. Vol. 13. 2392. No. 10. DOI: 10.3390/ma13102392.

23. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D., Smirnova T.V. Thermal conductivity of highly porous materials [Teploprovodnost' vysokoporistykh materialov]. Vestnik MGSU. 2012. No. 3. Pp. 108–114. (rus)

Information about the author

Danilov, Vladislav M. Postgraduate student. E-mail: vm.danilov1997@gmail.com. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Yartsev, Viktor P. DSc, Professor. E-mail: jarcev21@rambler.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Zabelin, Gleb N. Master student. E-mail: zabelin_gleb@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392000, Tambov, st. Sovetskaya, 106/5.

Received 14.01.2026

Для цитирования:

Данилов В.М., Ярцев В.П., Забелин Г.Н. Влияние температурно-влажностных воздействий на эксплуатационные свойства минераловатных плит // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 7. С. 15–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-7-15-25

For citation:

Danilov V.M., Yartsev V.P., Zabelin G.N. Effect of temperature–moisture exposure on the service properties of mineral wool boards. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 7. Pp. 15–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-7-15-25