

**В. П. ЯРЦЕВ, В. М. ДАНИЛОВ**

# **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ**



**Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

**В. П. ЯРЦЕВ, В. М. ДАНИЛОВ**

# **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ**

Утверждено Ученым советом университета  
в качестве учебного пособия для магистрантов и аспирантов  
направлений подготовки 08.04.01 и 08.04.01 «Строительство» всех  
форм обучения

*Учебное электронное издание*



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2023

УДК 691.619.8

ББК 38.3

Я71

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Строительное материаловедение и дорожные технологии»  
ФГБОУ ВО «ЛГТУ»

*М. А. Гончарова*

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Городское строительство и автомобильные дороги»

ФГБОУ ВО «ТГТУ»

*К. А. Андрианов*

**Ярцев, В. П.**

Я71 Прогнозирование основных эксплуатационных параметров минераловатных плит [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. П. Ярцев, В. М. Данилов. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 1 электрон. Опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; 2,7 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2683-5

Рассмотрены основные методы прогнозирования эксплуатационных параметров минераловатных плит. Приведенные методики дают возможность оценить совокупное влияние внешних деформационных нагрузок, окружающей температуры и длительность данных воздействий. Помимо этого, приведены методики, позволяющие учитывать другие виды воздействий, например, влияние внешних климатических параметров или внешних агрессивных сред. Также представлены практические сведения об эксплуатационных параметрах, позволяющие прогнозировать долговечность минераловатных плит.

Предназначено для магистрантов и аспирантов направлений подготовки 08.04.01 и 08.06.01 «Строительство» всех форм обучения.

УДК 691.619.8

ББК 38.3

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.  
Незаконное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2683-5

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2023

## ВВЕДЕНИЕ

---

Рынок строительных материалов предоставляет огромный выбор продукции для различных целей, в том числе и для теплоизоляции. Это волокнистые минеральные, пенополистирольные, пенополиуретановые, полиизоциануратные материалы и т.п. Минеральная вата является одним из самых базовых и проверенных временем материалом среди предлагаемых. Этот материал является неорганическим теплоизоляционным материалом, который получается в процессе расплава горных пород, а также металлургических шлаков. Первые упоминания о данном материале в том виде, в котором мы знаем его сейчас, начинаются с 1840 года, но технология производства была еще крайне несовершенна и сопутствующие ей сложности не позволили данному материалу получить распространенность. В промышленном же масштабе минеральную вату начали производить в 1871 году на металлургическом заводе в Германии. В России же минеральную вату впервые получили в 1901 году, но ввиду того, что отрасль теплоизоляционных материалов не была развита, а в основном теплоизоляционные материалы поставлялись из-за зарубежных стран, то начальным периодом производства можно назвать только времена первых пятилеток советской власти.

В период эксплуатации все строительные материалы в большей или меньшей мере подвергаются влиянию внешних факторов, которые часто приводят к структурным изменениям и, соответственно, кардинально могут изменить эксплуатационные параметры. Поэтому важно еще на этапе проектирования знать точно спрогнозированные эксплуатационные параметры применяемого строительного материала.

Для качественной оценки эксплуатационных параметров необходимо применять современные методы их оценки. Методики, рассматриваемые в данном учебном пособии, позволяют учесть совместное влияние температурных и деформационных воздействий и, в итоге, позволяют сформировать выводы о долговечности рассматриваемого материала. Помимо этого, приведены методики, позволяющие учитывать другие виды воздействия, например, влияние внешних климатических параметров или внешних агрессивные среды.

Термофлуктуационная концепция, которая является основным стержнем рассматриваемых методик в данном пособии, воспринимает механическое разрушение или деформацию не как мгновенный процесс, а развивающийся во времени. Здесь основным фактором разрушения является тепловое движение атомов, которое ослабляет межмо-

лекулярные и межатомные связи, а приложенная нагрузка лишь ускоряет данный процесс.

В данном учебном пособии приведены теоретические сведения о минераловатной плите, ее физико-механические и технологические свойства, а также технология их производства. Рассмотрены экспериментальные методы изучения минераловатных плит, а также методы обработки экспериментальных данных. Приведены практические сведения об эксплуатационных характеристиках минераловатных плит марки Изоруф-Н и Изоруф-В. Таким образом, данное учебное пособие, кроме предоставления полезных практических данных об основных эксплуатационных характеристиках минераловатных плит, формирует у обучающихся необходимые представления о современных и эффективных подходах к вопросам прогнозирования долговечности строительных материалов.

# 1. МИНЕРАЛОВАТНАЯ ПЛИТА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

---

Минеральная вата является продуктом промышленности и изготавливается путем плавки силикатных расплавов горных пород, металлургических шлаков и их смесей при температурах не менее 1500 °С с последующим нагнетанием воздуха в центрифуге и соответственно формированием волокон ваты. Ее применяют для создания изделий тепловой и звуковой защиты, а также в качестве звукопоглощающих элементов. Теплоизоляционные маты из данного материала позволяют применять их на поверхностях, имеющих температуру вплоть до 700 °С. Веским преимуществом, по сравнению с другими подобными материалами, и позволяющим до сих пор занимать лидирующие позиции на рынке строительных материалов, является ее негорючесть (группа НГ). В современных реалиях, в которых требования к негорючести очень высоки, в особенности на предприятиях по технологическим соображениям, минераловатная плита является практически безальтернативным выбором. Помимо таких полезных параметров, данный теплоизоляционный материал имеет высокую устойчивость к температурным деформациям, малую усадку и сохранение геометрической формы в течение всего периода эксплуатации, химической и биологической стойкостью и пассивностью, экологичностью и крайней легкостью работ в процессе монтажа [1, 2].



**Рис. 1. Минераловатная плита**

Основным минусом, в особенности по сравнению с современными теплоизоляционными материалами, является наличие гигроскопичности и водопоглощения. Гигроскопичность составляет при нормальных условиях эксплуатации до 0,5% по объему и соответственно влага, впитавшаяся от воздуха, может значительно испортить теплотехнические способности и притом проблематично выводится даже в сухом помещении. Также значительным минусом является склонность материала к водопоглощению, что не позволяет применять данный материал в условиях повышенной влажности. Но данные минусы купируются путем обработки материала в процессе производства специальными гидрофобизаторами.

Традиционно минераловатные изделия применяются в следующих стандартных ситуациях:

- при необходимости устройства наружного утепления мокрого типа;
- при необходимости устройства наружного утепления в вентилируемых фасадах;
- при необходимости устройства утепления на внутренней стороне ограждающей конструкции;
- при необходимости устройства утепления внутри ограждающей конструкции;
- при необходимости устройства утепления технологических трубопроводов, воздухопроводов, оборудования и тому подобное.

## **1.1. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Все материалы для тепловой защиты подразделяют по определенному ряду признаков.

По виду изначального сырья подразделяют на материалы органического и неорганического происхождения. К органическим относятся материалы на основе дерева или другого растительного сырья. К неорганическим можно отнести минеральную и стеклянную вату, пеностекло, перлит и вермикулит. Для материалов, включающие в себя как органические, так и неорганические элементы, условно можно назвать материалами смешанного типа. Материалы, в которых преобладают неорганические материалы (более 50% по массе) относят к неорганическим и наоборот.

Теплоизоляционные материалы по форме подразделяют на штучные и сыпучие. Штучные представляют собой материалы, которые могут быть различной формы. Например, плоские (блоки, маты, плиты, рулоны), фасонные (скорлупы для труб, цилиндры, различные сегмен-

ты), шнуровые (жгуты, шнуры). Штучные материалы считаются более надежным видом теплоизоляции по сравнению с насыпными, а также при работе с ними отмечается более удобный процесс монтажа. К сыпучим можно отнести различные волокнистые, зернистые, порошкообразные и т.п. материалы. Такие материалы в основном применяют, чтобы заполнить пустоты в каркасных зданиях, заполнить пустоты в перекрытиях и различных других подобных ситуациях. Основным недостатком данного вида теплоизоляции является эффект слеживания, в результате чего ухудшается способность теплопроводности, а соответственно, ухудшаются теплозащитные характеристики [3].

Также теплоизоляционные материалы подразделяют по структуре. В основном подразделяют на волокнистые (стекловата, минеральная вата), ячеистые (пенобетон, пенокерамика, пеностекло), гранулированные (перлит, вермикулит).

По жесткости материалы подразделяют на мягкие, полужесткие, жесткие, повышенной жесткости и твердые. С целью индустриализации производства все большую распространенность получают жесткие крупноразмерные материалы. О степени жесткости судят по показателю их сжимаемости, также можно судить по относительной деформации сжатия. Для жестких материалов при удельной нагрузке 0,02 МПа относительная сжимаемость доходит до 6%. Полужесткие сжимаются до значений 6...30%. Мягкие сжимаются более 30%. В материалах, имеющих повышенную жесткость и твердость при удельной нагрузке в районе 0,04...0,1 МПа, относительное сжатие не превышает в таком случае 10% [4, 5, 6]. Теплоизоляционные материалы по плотности подразделяют на особо легкие ( $15...75 \text{ кг/м}^3$ ), легкие ( $100...175 \text{ кг/м}^3$ ), средней плотности ( $200...350 \text{ кг/м}^3$ ) и плотные ( $400...600 \text{ кг/м}^3$ ).



**Рис. 2.** Структура минераловатной плиты



Ключевым показателем является теплопроводность, которая делится на низкий класс (до  $0,06 \text{ Вт} / (\text{м}\cdot\text{К})$ ), средний класс ( $0,06\dots0,115 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) и высокий класс ( $0,115\dots0,175 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) [7, 8].

## 1.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ

*Плиты минераловатные П-75.* Плиты марки П-75 (мягкие минераловатные плиты) используются для теплоизоляции трубопроводов теплоносителей в системах магистральных коммуникаций и на промышленных предприятиях. Также плиты П-75 могут использоваться в частном строительстве – для теплоизоляции чердачных перекрытий частных домов и коттеджей.

*Плиты минераловатные П-125.* Плиты типа П-125 (полужесткие минераловатные плиты) применяются в жилищном и промышленном строительстве для теплоизоляции стеновых перегородок. Также плиты этого типа используются для утепления мансардных надстроек и скатных крыш. Монтаж утеплителя П-125 происходит путем запрессовывания плит между элементами конструкций каркаса мансарды или внутренних перегородок. Также плиты П-125 получили широкое распространение при изготовлении сэндвич панелей.

*Плиты минераловатные П-175.* Плиты типа П-175 (жесткие минераловатные плиты) применяются в качестве теплоизоляции в горизонтальных и вертикальных ограждающих конструкциях, а также в легких ограждающих конструкциях каркасного типа. Кроме этого, П-175 можно использовать в качестве нижнего теплоизолирующего слоя в многослойных кровельных покрытиях и для теплоизоляции промышленного оборудования. Максимальная температура изолируемой поверхности  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Рис. 3. Применение минеральной ваты в качестве теплоизоляции трубопровода**



**Рис. 4. Применение минеральной ваты в качестве теплоизоляции стен**

*Маты М1-100, М2-100.* Применение: для применения в гражданском и промышленном строительстве для тепло- и звукоизоляции строительных конструкций зданий, сооружений и промышленного оборудования при температуре поверхности от  $-180$  до  $+700$  °С. Маты М2 прошивные на металлической сетке.

*Маты М3-100.* Применение: для применения в гражданском и промышленном строительстве для тепло- и звукоизоляции строительных конструкций зданий, сооружений и промышленного оборудования при температуре поверхности от  $-180$  до  $+450$  °С. Маты М3 имеют покрытие из стеклохолста.

*Плиты минераловатные повышенной жесткости ППЖ-200.* Минераловатные плиты повышенной жесткости ППЖ-200 состоят из минеральной ваты и нетоксичного композиционного связующего. Плиты ППЖ-200 имеют плотную волокнистую структуру, низкую теплопроводность и относятся к трудногоряемым материалам. Поэтому ППЖ-200 эффективно применяются в качестве огнезащитного материала при строительстве сооружений и для увеличения огнестойкости различных металлоконструкций.

Плиты повышенной жесткости ППЖ-200 успешно используются с целью утепления цокольных конструкций и полов под цементную стяжку. Применение ППЖ-200 позволяет повысить степень звукоизоляции межэтажных перекрытий.

Также плиты типа ППЖ-200 (минераловатные плиты повышенной жесткости) в комбинации с мягкими кровельными материалами, в том числе и наплавляемыми, применяются для кровельных покрытий.



**Рис. 5. Применение минеральной ваты для теплоизоляции кровли**



**Рис. 6. Монтаж минераловатной плиты**

Кроме этого, ППЖ-200 могут применяться в качестве фасадного утеплителя под штукатурку с использованием металлической сетки или других армирующих приспособлений. Также ППЖ-200 применяются при утеплении покрытий из профнастила или железобетона.

### **1.3 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ**

Для определения конструктивной пригодности минераловатных плит в той или иной системе утепления плит необходимо знать их основные физико-механические свойства механические свойства.

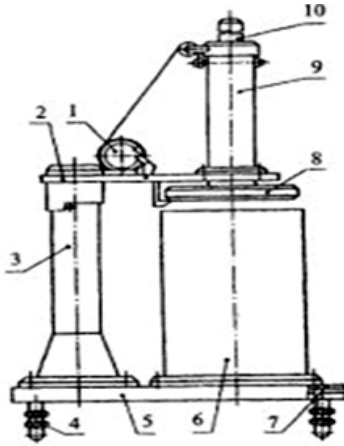


Рис. 7. Толщиномер проб

Важнейшими и самыми характерными из них являются теплопроводность, плотность, водопоглощение.

*Плотность.* Плотность минераловатных плит определяют по следующей методике:

С помощью специального храповика *1* в крайнее верхнее положение поднимается и поворачивается влево на  $90^\circ$  штوك прибора *10* с диском *8* (рис. 7). Затем заранее взвешенный образец волокнистого материала с массой  $(500 \pm 10 \text{ г})$  закладывают в цилиндр *6* горизонтальными слоями. После этого поворачивают обратно на  $90^\circ$  кронштейн *2* и с помощью храповика *7* штук *10* с диском *8* опускают в цилиндр *6* на испытуемый материал, при этом освобождается канат храповика. Затем по истечению 5 мин для подвергнутого удельной нагрузке  $(2000 \pm 30 \text{ Па})$  материала измеряют показание толщины пробы по шкале прибора с погрешностью не более 0,5 мм. После этого измеряемый образец убирают, выдвинув задвижку *7*, через нижнюю часть цилиндра *6*.

Вычисляют значение объема (с округлением до  $0,0001 \text{ м}^3$ ) рыхлого волокнистого материала под воздействием удельной нагрузки  $(2000 \pm 30 \text{ Па})$  по формуле:

$$V = \pi R^2 h, \quad (1)$$

где  $R$  – внутренний радиус цилиндра, м;  $h$  – высота сжатого слоя материала в цилиндре, м.

Вычисление плотности материала  $\rho_0$ ,  $\text{кг/м}^3$ , под воздействием удельной нагрузкой  $(2000 \pm 30 \text{ Па})$  вычисляют по формуле:

$$\rho_0 = \frac{m}{V(1 + 0,01W)}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса пробы рыхлого волокнистого материала, кг;  $V$  – объем, занимаемый пробой в приборе под удельной нагрузкой  $(2000 \pm 30)$  Па, м<sup>3</sup>;  $W$  – влажность материала.

В итоге получившееся значение плотности округляют до 1 кг/м<sup>3</sup>.

*Водопоглощение.* Сущность метода заключается в измерении массы воды, поглощенной образцом сухого материала при полном погружении в воду в течение заданного времени. Для испытания из изделия вырезают образец в форме прямоугольного параллелепипеда длиной и шириной  $(100 \pm 2)$  мм и толщиной, равной толщине изделия. Образцы высушивают до постоянной массы и охлаждают в эксикаторе над хлористым кальцием.

Порядок проведения испытания: в ванну 4 (рис. 8) на сетчатую подставку 3 помещают образец 2 и фиксируют его положение сетчатым пригрузом 1. Затем заливают в ванну воду температурой  $(22 \pm 5)$  °С так, чтобы уровень воды был выше пригруза на 20...40 мм.

Через 24 ч после залива воды образец переносят на подставку и через 30 с взвешивают на сухом поддоне. Массу воды, вытекшей из образца во время взвешивания в поддон, включают в массу насыщенного водой образца.

*Теплопроводность.* Для определения теплопроводности материала в первую очередь его образец вкладывают в прибор. Образец можно расположить как вертикально, так и горизонтально.

При этом во время проведения эксперимента температурная разность  $\Delta T_u$  граней образца должна быть в районе 10...30 К. Среднее значение температуры образца в целом во время испытания зависит от самого материала и указывается в нормативном документе.

На приборе задают граничные значения температур рабочих поверхностей плит прибора и постепенно с интервалом каждые 300 с проводится измерение сигналов тепломера  $e_u$  и датчиков температур.

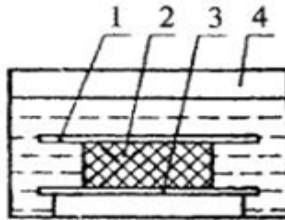


Рис. 8. Ванна с образцом, полностью погруженным в воду

Тепловой поток через испытываемый образец считают установившимся (стационарным), если значения термического сопротивления образца, вычисленные по результатам пяти последовательных измерений сигналов датчиков температур и плотности теплового потока, отличаются друг от друга менее чем на 1%, при этом эти величины не возрастают и не убывают монотонно.

После достижения стационарного теплового режима измеряют толщину помещенного в прибор образца  $d_u$  штангенциркулем с погрешностью не более 0,5%.

После окончания испытания определяют массу образца  $M_3$ .

Обработка результатов испытания.

1. Вычисляют относительное изменение массы образца вследствие его сушки  $T_r$  и в процессе испытания  $T_w$  и плотность образца  $\rho_u$  по формулам:

$$T_r = \frac{M_1 M_2}{M_2}; \quad (3)$$

$$T_w = \frac{M_2 M_3}{M_3}; \quad (4)$$

$$\rho_u = \frac{M_3}{V_u}. \quad (5)$$

Объем испытываемого образца  $V_u$  вычисляют по результатам измерения его длины и ширины после окончания испытания, а толщины – в процессе испытания.

2. Вычисляют разность температур лицевых граней  $\Delta T_u$  и среднюю температуру испытываемого образца  $T_{mu}$ :

$$T_{mu} = \frac{(T_{1u} + T_{2u})}{2}. \quad (6)$$

3. При вычислении теплофизических показателей образца и плотности стационарного теплового потока в расчетные формулы подставляют среднearифметические значения результатов пяти измерений сигналов датчиков разности температур и сигнала тепломера или электрической мощности, выполненных после установления стационарного теплового потока через испытываемый образец.

4. При проведении испытания на приборе, собранном по асимметричной схеме, термическое сопротивление образца  $R_u$  вычисляют по формуле:

$$R_u = \frac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_k, \quad (7)$$

где  $R_k$  принимают равным  $0,005 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ , а для теплоизоляционных материалов и изделий – нулю.

5. Эффективную теплопроводность материала образца  $\lambda_{effu}$  вычисляют по формуле:

$$\lambda_{effu} = \frac{du}{\frac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_k}. \quad (8)$$

6. Термическое сопротивление  $R_u$  и эффективную теплопроводность  $\lambda_{effu}$  образца насыпного материала вычисляют по формулам:

$$R_u = \frac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_L. \quad (9)$$

$$\lambda_{effu} = \frac{du}{\frac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_L}. \quad (10)$$

7. Плотность стационарного теплового потока  $q_u$  через образец, испытываемый на приборе, собранном по асимметричной и симметричной схемам, вычисляют соответственно по формулам:

$$q_u = f_u e_u; \quad (11)$$

$$q_u = \frac{f'_u e'_u + f''_u e''_u}{2}. \quad (12)$$

8. При проведении испытания на приборе с горячей охранной зоной, в котором плотность теплового потока определяют путем измерения электрической мощности, подаваемой на нагреватель зоны измерения горячей плиты прибора, термическое сопротивление, эффективную теплопроводность и плотность стационарного теплового потока через образец вычисляют по формулам:

$$R_u = \frac{A\Delta T_u}{\Phi} - 2R_k; \quad (13)$$

$$\lambda_{effu} = \frac{du}{\frac{A\Delta T_u}{\Phi} - 2R_k}; \quad (14)$$

$$q_u = \frac{\Phi}{A}. \quad (15)$$

При испытании насыпных материалов в формулы (13) и (14) вместо  $R_k$  подставляют значение  $R_L$ .

9. За результат испытания принимают среднearифметические значения термического сопротивления и эффективной теплопроводности всех испытанных образцов [9, 10].

#### 1.4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Термин «минеральная вата» является общим для обозначения изоляционных материалов различных типов. В самом названии происхождение материала довольно неясно. Различные продукты, классифицируемые под этим термином, различаются главным образом по сырью, из которого они изготовлены. Таким образом, существует:

- шлаковая вата, которая изготавливается из металлургического шлака железа, меди или свинца;
- стекловата, которая изготавливается из кварцевого песка, кальцинированной соды и со стеклом или без него;
- каменная вата, которая изготавливается из натуральных шерстяных волокон или комбинации различных минералов. Эти изделия изготавливаются с использованием флюса или без него.

Было сформулировано множество определений минеральной ваты, и все они включают в себя, по существу, одни и те же предпосылки. Одно из этих определений гласит, что минеральная вата – это вещество, состоящее из очень тонких переплетенных минеральных волокон, имеющих вид рыхлой шерсти или хлопка. Продукт представляет собой волокнистое стеклообразное вещество, состоящее в основном из силикатов кальция, алюминия и магния с другими второстепенными компонентами.

Ввиду того, что минеральную вату применяют в различных отраслях, то для различных областей применения требуются специальные характеристики изделия. Так, например для утепления дома важной характеристикой является теплозащита, в то время как строгая однородность волокон или влагостойкость материала имеют второстепенное значение. Но специальные изделия, используемые для изоляции сложного технологического оборудования или в различном военном и военно-морском оборудовании (кораблях, танках и самолетах), имеют свои собственные жесткие требования [11].

Таким образом, не существует такого понятия, как типичная минеральная вата. Различные составы шерсти разработаны специально для намеченной цели.



Готовая продукция включает в себя сыпучие изделия, гранулированные изделия, покрытия, блоки, маты и специальные изделия. Исходный продукт, выдуваемый из печи, называется рыхлой ватой и используется, в основном, как исходное сырье для дальнейшего производства. Большая часть сырой шерсти пропускается через грануляторы, которые измельчают волокна и отделяют их от крошечных стеклянных шариков, называемых «дробью». После отделения от дробы волокна скатываются в небольшие гранулы. Это называется гранулированной ватой и используется, в основном, для утепления уже построенных зданий. Шерсть выдувается сжатым воздухом в пустоты между внутренней и внешней стенами дома.

Многие коммерческие изделия изготавливаются для конкретных целей. Коротковолокнистая вата, получаемая в результате свободной дробы, смешивается с другими материалами для получения изолирующего покрытия. Блоки из рыхлой или гранулированной шерсти изготавливаются различных размеров и толщины для облицовки холодильников. Гранулированную вату смешивают с другими ингредиентами, различными связующими веществами и водой для образования смеси. Затем ее укладывают на поддоны и подвергают низкому давлению и потокам горячего воздуха, которые высушивают ее. Из этой же смеси также формуют изделия для покрытия труб.

Высокотемпературная изоляция изготавливается из смеси огнеупорных вяжущих и ваты, а затем прессуется в кирпичи. Такой материал используется в стекольных и металлургических печах, печах для отжига и эмалирования.

Минеральную вату можно рассматривать с точки зрения системы компонентов, состоящей из кремния, извести, оксида алюминия и магния. Не существует конкретной формулы минеральной ваты и не имеет значения, производится ли вата из однородного сырья или из смеси сырьевых материалов, потому что, учитывая желаемые характеристики, можно рассчитать состав и количество дополнительных ингредиентов, необходимых для получения удовлетворительного продукта.

Исходное сырье из горных уплотненных пород делится на две основные группы:

Первая группа – консолидированный известняк, доломиты с высоким содержанием кремнезема и илистых зерен, некоторые конгломераты, кремнистые известняки, доломиты с известковой смесью и известковые сланцы.

Вторая группа – из тонких, переслаивающихся, длительно сходных слоев, которые вместе, а не по отдельности, содержат надлежащие

компоненты в достаточных количествах, т.е. переслаивающийся сланец с доломитом или известняком и песчаник с доломитом или известняком, эти источники не обязательно являются чистыми, поскольку они могут быть глинистыми, песчаными или известковыми.

Неуплотненные породы – это неуплотненные эквиваленты вышеуказанных консолидированных пород. Некоторые магматические и метаморфические породы могут соответствовать необходимым требованиям. Могут быть использованы некоторые перидотиты, пироксениты, талькозные и змеевидные породы, волластониты и амфиболы, которые содержат требуемые количества известняка и магнезии при приблизительно равных количествах кремнезема. Однако содержание железа обычно слишком велико для удобства производства.

Подстилающие породы – это любые известковые породы, консолидированные или неконсолидированные, которые содержат приблизительно 65% карбоната кальция или карбоната кальция и карбоната магния.

Есть несколько вредных материалов, которые содержатся в минеральной вате. Железо и сера являются наиболее распространенными веществами, которые могут активно влиять на цвет, запах или стабильность волокна. При наличии железа или серы цвет волокон варьируется от светло-коричневого до черного. Сульфат кальция может выделять неприятные запахи и вещества, вызывающие коррозию стали [12].

Минеральная вата, кроме как полезными теплоизоляционными качествами, обладает рядом других полезных свойств. Например, высокая эффективность для звукоизоляции. Минеральная вата поглощает звуки различных тональностей. Звукоизоляционные изделия из минеральной ваты изготавливают в виде матов, листов, прокладок и добавлением гранул минеральной ваты в штукатурку.

## **1.5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ**

Большая часть минераловатных плит на данный момент производится из шлака или смеси шлака и породы. Данные шлаки образуются на металлургических заводах, в качестве побочных продуктов доменных печей, когда производят чугун. Другими источниками шлака являются медная, свинцовая и фосфатная промышленность. Процесс производства включает в себя 3 основных этапа: процесс плавки минералов, формирование и сбор волокон, формирование конечного продукта. Принципиальная схема производства приведена на рис. 9.



**Рис. 9. Принципиальная схема производства**



**Рис. 10. Подготовка и транспортировка сырья**

Первый этап включает в себя плавление минерального сырья при температурах от 1500 °С. Сырье (шлак и порода) загружается в ванную печь или вагранку (топливная печь шахтного типа) чередующимися слоями с каменноугольным коксом при массовых соотношениях примерно 5–6 частей минерала на 1 часть кокса.

Вагранка – это плавильный агрегат, который состоит из резервуара и нагревающей горелки. По мере сжигания кокса минеральная шихта нагревается при температурах от 130 до 1650 °С вплоть до перехода в расплавленное состояние.

Воздух для горения при этом подается через фурмы, которые расположены вблизи нижней части печи. Иногда на некоторых заводах применяются модифицированные печи, для дополнительного обогащения воздухом и использования дополнительных горелок, работающих на природном газе, с целью снижения расхода кокса. Также на некоторых предприятиях применяются побочные продукты из алюминиевого флюса, также для снижения потребления кокса.



**Рис. 11. Вагранка**



**Рис. 12. Охлаждение расплава после вагранки**

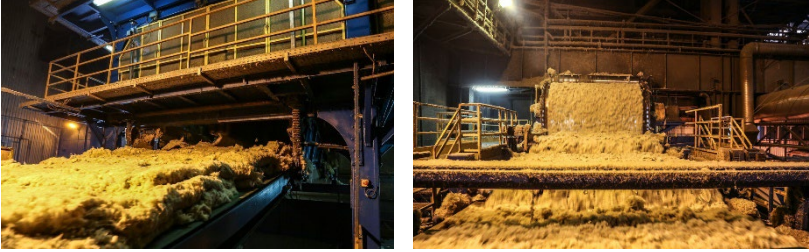
Затем расплавленная минеральная шихта выходит из нижней части вагранки в специальный желоб, в котором устроено водяное охлаждение, и по этому желобу охлажденный продукт подается на устройство получения волокна.

Процесс волокнообразования чаще всего применяется двух видов. Первый вид представляет собой применение группы роторов, которые вращаются с высокой скоростью. Расплавленный материал распределяется тонкой пленкой по поверхностям роторов и затем отбрасывается центробежной силой. По мере выгрузки материала из роторов на них образуются мелкие шарики, которые при горизонтальном перемещении образуют длинный волокнистые хвосты. Обдувание воздухом или паром роторов также положительно сказывается на производстве, ускоряя его. Второй метод представляет собой применение вращающегося вогнутого ротора с амортизацией воздухом или паром. Расплавленный материал в таком случае также покрывает поверхность ротора и затем вытекает вверх, после чего подхватывается воздушными массами.

Во время прядения не все образовавшиеся шарики преобразуются в волокно. В сырой минеральной вате практически половина всей массы состоит из таких шариков. В процессе производства эти шарики под действием силы тяжести отделяются от остальной шерстяной массы. В зависимости от требований к конечному продукту, сформированное волокно на этом этапе могут обработать различными химическими веществами.



Рис. 13. Центрифуга



**Рис. 14. Маятниковый раскладчик**

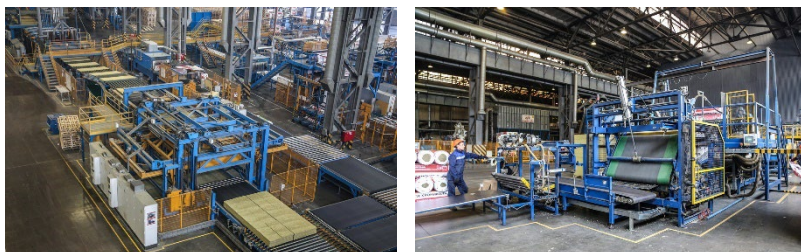
Почти во всех случаях с целью устранения пыли и отжига волокон используют масло. Такое масло может быть стандартным топливом, либо запатентованным продуктом. Также на этом этапе применяются гидрофобизирующие добавки. Если в дальнейшем эта масса будет использоваться в качестве сыпучих изделий, то дальнейшая обработка не требуется. Если же требуется, чтобы изделия из минеральной ваты обладали необходимой жесткостью и структурной прочностью, то наносится связующее вещество. Обычно таким веществом выступает фенолформальдегидная смола, которая требует отверждения при термической обработке. Как масло, так и связующее вещество наносится путем распыления жидкостей по поверхности всего волокна.

Затем после формования и химической обработки волокно собирается в выдувной камере. Волокна, которые покрыты смолой (или маслом), вытягиваются на конвейере из проволочной сетки промышленными вентиляторами, расположенными внизу. Скорость конвейера устанавливается таким образом, чтобы можно было получить шерстяное одеяло желаемой толщины. Минеральная вата, которая содержит связующее вещество, направляется конвейером в печь для отверждения, где шерстяное одеяло прессуется до требуемой плотности и связующее обжигается. Горячий воздух при температуре от 150 до 320 °C пропускается через одеяло до тех пор, пока связующее не затвердеет. Время затвердевания и подаваемая температура зависит от типа использованного связующего и массовой скорости прохождения через печь. За печью находится секция охлаждения, где воздуходувки нагнетают воздух с температурой окружающей среды через шерстяное одеяло.

Для изготовления плит и различных изделий шерстяное полотно подается на специальные устройства разрезки. Здесь шерстяное одеяло разрезается в продольном и поперечном направлениях до необходимого размера. Некоторые изделия затем покрывают пароизоляцией или защитным материалом (процесс каширования) из алюминиевой бумаги или другими подобными материалами.



**Рис. 15. Узел разрезки**



**Рис. 16. Упаковка готового изделия**



**Рис. 17. Хранение и транспортировка готового изделия**

Сыпучие шерстяные изделия состоят в основном из выдувной шерсти и объемного волокна. Для этих продуктов связующее вещество не наносится и процесс отверждения в печи исключается. Для гранулированных изделий волокнистый материал, выходящий из камеры обдува, направляется в измельчитель (или гранулятор). Гранулятор формирует небольшие гранулы диаметром не более 2...3 см.

Затем происходит процесс расфасовки полученных материалов и упаковки. Сыпучие материалы упаковываются в мешки, жесткие плиты упаковываются в несколько штук и обтягиваются транспортной пленкой. Различные другие изделия поставляются в индивидуальной упаковке.



**Рис. 18. Контроль качества выпускаемого изделия**

Также стоит отметить, что наибольшие выбросы в атмосферу и, соответственно, большее влияние на экологию оказывает процесс расплавки в печи. Для того, чтобы уменьшить влияние данного процесса на экологию, предприятия обязывают применять специальные фильтры, очищающие дымовые продукты расплавки перед выброской в атмосферу [13].

## **1.6. УСТРОЙСТВО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ**

Как и в любой другой работе, подготовка чрезвычайно важна. Прежде чем монтировать какую-либо изоляцию на основание, ее необходимо осмотреть и проверить. Основание при этом должно быть чистым, сухим и без пыли. Его также необходимо очистить от краски и других веществ, которые могут повлиять на работу клея. Один из лучших способов получить чистую и готовую поверхность – использовать струю воды под высоким давлением или подготовить стену вручную с помощью жесткой щетки.

Если изоляция из минеральной ваты устанавливается поверх существующей штукатурки, необходимо убедиться, что это конструктивно надежно, прежде чем начинать процесс установки. Если существующая штукатурка слабая и отрывается от стены с минимальным усилием, то рекомендуется удалить ее перед установкой.

После того, как основание подготовлено, его необходимо загрунтовать перед монтажом минеральной ваты или нанесением клея. Рекомендуется покрывать основание грунтовкой на водной основе глубокого проникновения. Она действует аналогично грунтовке ПВА, помогая герметизировать пористые поверхности перед выполнением каких-либо работ.



Если основание требует повышенной адгезии (например, на очень гладких или окрашенных поверхностях), то рекомендуется использовать универсальную грунтовку, которая содержит силикат, обеспечивающий механическое сцепление изоляционных плит.

Количество грунтовки (необходимый объем грунтовки) будет зависеть от того, насколько впитывающей способностью обладает основание. Как правило, расход варьируется в пределах от 50 до 300 мл на м<sup>2</sup>.

Грунтовку чаще всего наносят кистью или валиком. Высыхание грунтовки займет примерно 4 ч. Однако могут потребоваться дополнительные слои в зависимости от впитывающей способности основания. Между нанесением дополнительного грунтовочного слоя должно пройти не менее 24 ч.

Как только стены будут загрунтованы, необходимо установить монтажный «стартовый» профиль. Стартовый профиль прикрепляется к основанию. Это не только обеспечивает ровную поверхность для легкого монтажа утеплителя, но и защищает основание утеплителя от атмосферных воздействий, сырости и других повреждений.

Такие профили бывают из ПВХ, либо из алюминия. Стартовый профиль из ПВХ является самостоятельным изделием и помогает свести к минимуму тепловые стыки. Для алюминиевой дорожки требуется зажимной профиль, который обеспечивает слой сетки, помогающий связать направляющую вместе с изоляцией при добавлении армирующего слоя.

Оба типа стартового профиля крепятся к основанию с помощью специальных заглушек, закрепленных в центрах диаметром 300 мм, чтобы обеспечить надежное удержание стартовой дорожки на месте.

На следующем этапе необходимо нанести базовое покрытие на основание, которое наносится шпателем перед тем, как в него будут встроены полоски стекловолоконной сетки. Чаще всего сетка из стекловолокна выпускается в рулонах площадью 50 м<sup>2</sup>.

Правильная подготовка базового покрытия очень важна. Базовое покрытие следует смешать с чистой питьевой водой в соотношении 6,5 л на мешок весом 25 кг. Смешивать следует с помощью мощного штукатурного миксера при медленном вращении. Смешанную смесь следует оставить примерно на 5 мин, а затем повторно перемешать в течение короткого периода времени перед использованием. Срок службы такой смеси составляет примерно 1 ч, хотя это зависит от погодных условий.

Как только базовое покрытие и стартовый профиль готовы, можно переходить к монтажу минераловатных плит. Изоляционные плиты из минеральной ваты крепятся к основанию с помощью клеев. Рекомендуется выбирать качественный клей и использовать одну выбранную марку на весь объем, не смешивая с другими марками, для повышения долговечности и предсказуемости конструкции при эксплуатации.

Чаще всего клей поставляется в виде сухой смеси в мешках по 25 кг. Эта смесь должна быть смешана с чистой водой в соотношении 6,5 л на мешок по 25 кг. Для этого используется мощный штукатурный миксер с медленным вращением. Свежесмешанный клей следует оставить примерно на 5 – 10 мин, а затем повторно перемешать в течение короткого периода времени перед использованием. Срок службы разбавленной смеси, как и для готового раствора базового покрытия, составляет всего примерно 1 ч, хотя это так же зависит от погодных условий.

Рекомендуется наносить клей на изоляционные плиты из минеральной ваты методом «точка-мазок». При этом используется шпатель, которым равномерно наносится клей по краям плиты (дорожка шириной 3...4 см), затем наносятся точки. Как правило, клей должен покрывать не менее 40% поверхности плиты. Также вполне допустимо использовать зубчатый шпатель для нанесения слоя клея на всю поверхность плиты из минеральной ваты. Этот метод лучше подходит для полностью плоских стен.

Количество клея, используемого любым из этих методов, должно быть примерно одинаковым. Каждый мешок весом 25 кг должен быть способен прикрепить к основанию примерно 5 м<sup>2</sup> плит, хотя это зависит от качества поверхности, на которую монтируются плиты (для плоской стены потребуется меньше клея).

Изоляционные плиты следует прикреплять к стене в шахматном порядке. В углах важно соединить изоляцию с двух сторон. При монтаже утеплителя из минеральной ваты вокруг оконных и дверных проемов важно, чтобы стыки между плитами не совпадали с этими отверстиями. Это предотвратит появление трещин в будущем. Для достижения наилучших результатов и простоты монтажа рекомендуется использовать уголок, который помогает укрепить эту область.

Плиты из минеральной ваты габаритны и оставляют очень мало места для коррекции. Поэтому важно убедиться, что плиты правильно выровнены как по горизонтали, так и по вертикали, без зазоров. Лучше всего этого достичь можно, используя строительный уровень.

Дальнейшим этапом является применение механических креплений (анкеров). Механические крепления помогают обеспечить полную надежность системы. Монтаж крепежных элементов следует производить по крайней мере через 1–2 дня после того, как плиты из минеральной ваты были прикреплены к основанию с помощью клея.

Рекомендуется установить по 1 механическому креплению в каждом углу каждой изоляционной плиты, а также еще 1–2 крепления в середине плит (минимум 7 креплений на квадратный метр). В зависимости от используемого крепления они могут быть либо вбиты на место молотком, либо вбиты прямо в изоляцию с помощью электроинструмента.

Для минеральной ваты следует использовать металлические штыревые механические крепления с усилительными дисками, которые помогают распределять нагрузку. При использовании минеральной ваты толщиной 90 или 100 мм требуются крепления длиной 140...170 мм.

При нанесении системы утепления на подготовленную стену важно добавить дополнительные 30 мм к длине крепления, чтобы оно проходило через изоляцию, а существующая штукатурка прочно держалась на основной части здания.

Усиливающие элементы устанавливаются для укрепления участков, которые могут подвергнуться удару (например, внешние углы) и для отвода воды с поверхности финишной отделки, путем формирования капель. Такие усиливающие элементы производят из ПВХ, поэтому она не ржавеет. Такие усиливающие элементы встраиваются в базовый слой покрытия.

Как только усиливающие элементы установлены на место, монтируется армирующий слой базового покрытия (важно помнить, что усиливающие элементы полностью встроены в базовый слой, поэтому их не видно).

На этом этапе необходимо использовать базовое покрытие, которое наносится шпателем на основание перед тем, как в него будут встроены армирующие элементы из стекловолоконной сетки. Такая сетка из стекловолокна выпускается в рулонах площадью 50 м<sup>2</sup>.

Правильная подготовка базового покрытия очень важна. Базовое покрытие следует смешать с чистой питьевой водой в соотношении 6,5 л на мешок весом 25 кг. Базовое покрытие следует смешивать с помощью мощного штукатурного миксера при медленном вращении. Свежесмешанный состав следует оставить примерно на 5 мин, а затем повторно перемешать в течение короткого периода времени перед

использованием. Срок службы смеси составляет примерно 1 ч, но это зависит от погодных условий.

Базовое покрытие может наноситься как в один, так и в два прохода со встроенной в него сеткой из стекловолокна.

Систему за один проход следует наносить зубчатым шпателем на основание толщиной 6...8 мм. Затем сетка укладывается в базовое покрытие вертикальными полосками с помощью плоского края зубчатого шпателя. Каждая полоса стекловолоконной сетки должна перекрывать соседнюю полосу примерно на 10...15 см.

Двухпроходную систему следует наносить на основание зубчатым шпателем – этот слой должен составлять от 3 до 4 мм. Затем сетка укладывается на базовое покрытие вертикальными полосками и заделывается с помощью плоского края зубчатого шпателя. Еще один слой базового покрытия следует нанести на сетку толщиной 3...4 мм до того, как сойдет первый слой.

Базовое покрытие можно выровнять с помощью щетки или губки для получения абсолютно ровного покрытия.

После того, как армирующий слой базового покрытия высохнет в течение 24 – 48 ч (в зависимости от погодных условий), его необходимо загрунтовать перед нанесением штукатурки. Грунтовка верхнего слоя просто наносится поверх армирующего слоя базового покрытия с помощью кисти или валика.

Перед нанесением его нужно будет оставить для высыхания на 12 – 24 ч. Грунтовка также окрашивается тем же оттенком, что и верхнее покрытие. Это делается для того, чтобы избежать образования пятен на верхнем слое и обеспечить полное проявление конечного цвета на финишной поверхности.

Рекомендуется использовать силиконовую гранулированную финишную штукатурку при финишной отделке. Используя шпатель, наносится тонкий слой штукатурки на загрунтованную поверхность. Если наносится гранулированная тонкослойная финишная отделка, то стоит согласовать толщину нанесения финишного слоя с размером зерен – таким образом, при размере зерен 1 мм финишную отделку необходимо наносить толщиной 1 мм.

После нанесения штукатурки необходимо разровнять ее с помощью шпателя, удалив излишки со стены, чтобы получился очень тонкий слой (толщиной в одно зернышко). Необходимо обработать поверхность круговыми движениями – это обеспечит текстурированную отделку.

## 2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИНЕРАЛОВАТНОЙ ПЛИТЫ

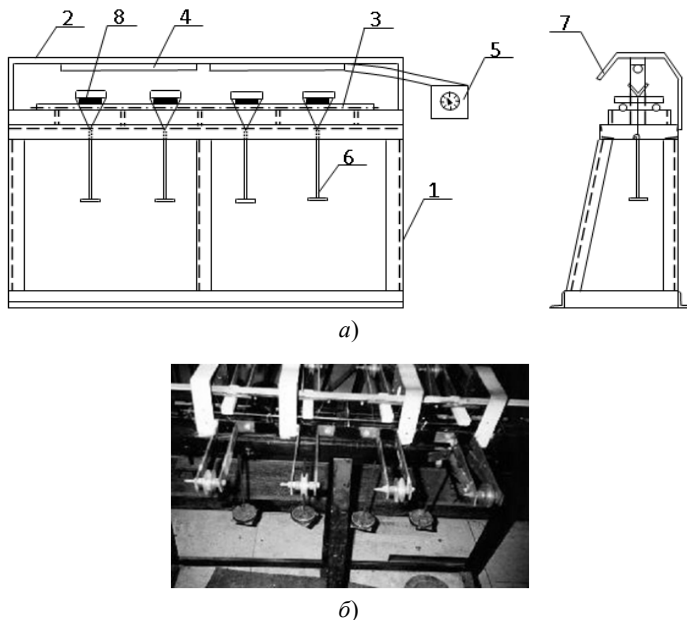
---

### 2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ

#### 2.1.1. Испытания на кратковременную и длительную прочность при поперечном изгибе

Испытания на разрушения поперечным изгибом проводят в условиях постоянства как скорости нагружения, так и постоянства окружающей температуры и скорости приложения нагрузки. Кратковременные испытания проводят на разрывной машине, которая должна соответствовать всем требованиям ГОСТ 7855–84, например, – разрывной машине модели 2167 Р-50 или аналогичном аппарате. Образцы подвергаются нагрузке со ступенчатом возрастанием. При этом сохраняется постоянство скорости деформации вплоть до их полного разрушения. В момент разрушения фиксируется их предельная возможная выдерживаемая нагрузка. Также стоит отметить, что образцы при этом должны быть той же температурой, что и температура окружающего воздуха. Для этого образцы выдерживаются в помещении не менее 30 минут, в этот момент они термостатируют. Чтобы получить одну точку необходимо разрушить не менее 6 – 12 образцов. Окончательным результатом можно считать их среднее арифметическое значение.

Стенд для силовых испытаний, приведенный на рис. 19, состоит из нескольких элементов. Основным элементом является несущая рама 1, на которую крепятся остальные компоненты. Такими компонентами являются испытательные секции с встроенными нагружающими устройствами 6, в термические камеры которых встроены нагревающие стержневые элементы за счет электричества 4, а также теплоизоляционный кожух 7. Электронагревательные приборы с помощью скоб 2 крепятся к раме. Кожух фиксируется на П-образных стойках. Требуемая температура регулируется специальным устройством – трансформатором 5. Таким прибором может быть, например ЛАТР 1М 220В-9А или аналогичный прибор. ЛАТР 1М 220В-9А при этом способен регулировать температуру с точностью до  $\pm 1$  °С. Для дополнительного контроля используется термометр. Термопара и термометр должны находиться как можно ближе к месту расположения образца, который будет разрушен. Для того, чтобы вибрации от разрушения не влияли на соседние образцы, необходимо устроить демпфирующие устройства – антивибрационные маты или емкости с песком.



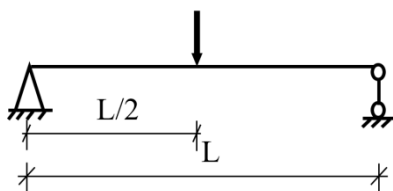
**Рис. 19.** Стенд для длительных испытаний на поперечный изгиб:  
*а* – схема установки; *б* – общий вид

При испытаниях образцы минераловатных плит прямоугольной формы (длиной 120 мм, шириной 20 мм и толщиной 20 мм) устанавливаются на опоры и загружаются в середине пролета. Напряжения в образцах определяется по формуле (15):

$$\sigma = \frac{3NL}{2(b\delta^2)}, \quad (15)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $N$  – нагрузка, Н;  $L$  – расстояние между опорами, м;  $b$  – ширина образца, м;  $\delta$  – толщина образца, м.

Расчетная схема приложения нагрузки приведена на рис. 20.



**Рис. 20.** Расчетная схема для испытаний на поперечный изгиб

### 2.1.2. Испытания на долговечность при пенетрации

При пенетрации испытания проводятся следующим способом. При заданном напряжении (или твердости) и температуре через определенные промежутки времени с помощью индикатора часового типа фиксируется деформация (или глубина погружения индентора). Эксперимент проводится при температурах (18...20, 40, 60 °С) и трех напряжениях (твердости). Для получения одной точки в одинаковых условиях испытывается не менее 5–6 образцов. За конечный результат также принимается среднее арифметическое значение.

Для проведения экспериментов на пенетрацию используется установка, изображенная на рис. 21. Она состоит из станины 1 и штока 2, в который завальцован шарик 5 диаметром 10 мм. Образец 4 помещается под шток, на который сверху прикладывается нагрузка. Глубина погружения индентора фиксируется при помощи индикатора часового типа 3 с точностью 0,01 мм. Повышенная температура создается накладной термокамерой и регулируется ЛАТРОМ 1М 220В-9А (или аналог) и потенциометром ЭПВ2-11А гр. ХК 0...300 °С (или аналог). Замеры производятся термопарой и термометром на верхней плоскости образца с точностью  $\pm 1$  °С.

При испытаниях используются образцы минераловатных плит в виде полосы шириной 20 мм.

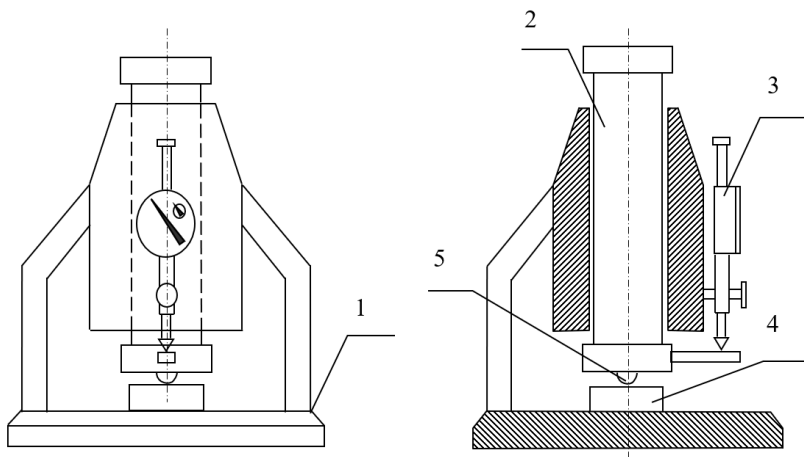


Рис. 21. Устройство для длительных испытаний на пенетрацию:

1 – станина; 2 – шток; 3 – индикатор часового типа;

4 – образец; 5 – шарик ( $\varnothing$  10 мм)

Твердость определяется по формуле:

$$H = \frac{N}{\pi dh}, \quad (16)$$

где  $H$  – твердость, МПа;  $N$  – нагрузка, Н;  $d$  – диаметр завыльцованного шарика, м;  $h$  – глубина погружения индентора, м.

### 2.1.3. Определение коэффициента линейного теплового расширения

Для того, чтобы измерить коэффициент линейного расширения используется специальный прибор, называемый оптическим дилатометром, который изображен на рис. 22. Данный прибор состоит из нескольких элементов. Основным является его основание 4. На это основание крепится микроскоп, в котором встроен окуляр-микrometer 5, также на основание крепится термическая камера 2. Термическая камера выполнена из тугоплавкого металла с крайне низким значением  $\alpha$ . Данная камера также состоит из нескольких элементов, основным которым является массивный корпус с нагревательными электрическими элементами 6. Также предусматривается стальная планка 3, которая размещается в пазе корпуса и фиксируется винтом. Планка и паз должны быть отшлифованы до класса чистоты II. Чтобы наблюдать за процессом удлинения испытуемого образца предусмотрена смотровая щель 8 с габаритными размерами  $1 \times 10$  мм.

Для того, чтобы обеспечить освещение внутри корпуса, предусматривается сквозной канал, через который с помощью фотоотражателя направляется поток света от лампы накаливания.

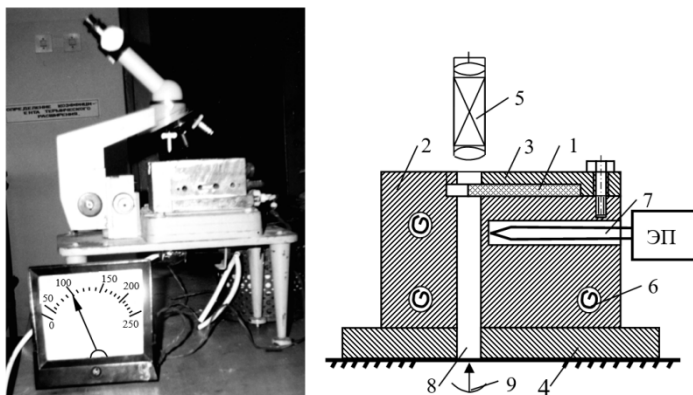


Рис. 22. Оптический дилатометр



Скорость нагрева регулируется с помощью трансформатора ЛАТР 1М 220В-9А или аналогичным прибором. Чтобы отвечать нормативным требованиям, а именно, ГОСТ 15173–70, линейная скорость не должна превышать 1,5 °С/мин. Оптимальная скорость нагрева задается по тарировочным графикам, по которым определяется необходимое значение напряжения в интервале 70...150 В. Так, например для минераловатной плиты оптимальным значением должно быть 130 В. Но при этом скорость нагрева будет составлять 2,6 °С/мин, что нарушает нормативные требования. Поэтому целесообразно применить напряжение 100 В, для которого оптимальна и близка к линейной зависимость ( $T-\tau$ ), но скорость нагрева будет соответствовать 1,65 °С/мин.

Температура окружающей среды вокруг испытуемого образца измеряется с помощью термометра.

Проведение эксперимента включает в себя три главных этапа:

- 1) в специальный паз корпуса помещается образец прямоугольной формой;
- 2) производится нагрев термической камеры (скорость нагрева при этом должна быть постоянной);
- 3) через определенные заранее промежутки времени экспериментатор фиксирует значение удлинения образца (с точностью вплоть до 0,0001 мм).

Для проведения эксперимента образцы минеральной ваты подготавливаются в габаритах 30×15×8 мм.

#### **2.1.4. Камера для сушки, УФ-облучения и теплового старения**

Эксперимент для изучения влияния УФ-облучения на минераловатные плиты проводится на специальной установке – камере искусственного фотостарения, которая приведена на рис. 23.



**Рис. 23. Установка на УФ-облучение**

Перед тем как начать механические испытания образцы выдерживаются заданное время под лампами ПРК. Подобная установка состоит из нескольких основных элементов. Основным элементом является сушильный шкаф. В него по воздуховодам от центробежного вентилятора подается воздух. Также предусматривается балластная нагрузка. Для создания необходимого уровня излучения в установке имеется ртутная лампа высокого давления марки ДРТ1000 ЖИЦУ. 0675610.006. Мощность потребления такой установки составляет 1 кВт. Лучистый поток волн находится в пределах 240...320 нм и 128 Вт. Возможно применение аналогичного по характеристикам прибора. Чтобы задать рабочий ток лампы применяется балластная нагрузка (резистор) сопротивлением 15 Ом и максимальной мощностью 3 кВт.

Охлаждение лампы, как и отвод скапливающегося озона вокруг нее, производится с помощью воздуховодов, направляющих поток воздуха в атмосферу за счет центробежного вентилятора марки ВЦ4-75-2.5.

Эксперименты на минераловатной плите проводятся на образцах с габаритными размерами 60×60×60 мм. Эксперимент проводится в несколько этапов:

- 1) образцы, подготовленные из минераловатных плит, выдерживаются в течение некоторого времени в сушильном шкафу при температуре 80 °С;
- 2) затем образцы охлаждаются до комнатной температуры, равняющейся 18 °С;
- 3) после охлаждения образцы подвергаются механическим испытаниям.



Рис. 24. Установка на термостарение

### 2.1.5. Испытание на сжатие после циклов замораживания и оттаивания

Воздействие замораживания и оттаивания изучается методом, который можно описать в несколько этапов:

1) подготавливаются образцы с габаритными размерами  $60 \times 60 \times 60$  мм;

2) подготовленные образцы погружают в воду и выдерживают их в течение 1 ч при температуре окружающей среды  $20 \pm 2$  °С;

3) после этого образцы располагают в морозильной камере, которые находятся там в течение 3 – 5 ч при температуре окружающего воздуха минус 20 °С;

4) после этого замороженные образцы оттаивают и соответственно сушатся при комнатной температуре в течение 18 – 20 ч;

5) после оттаивания и сушки можно проводить необходимые механические испытания и испытания на теплопроводность.

### 2.1.6. Испытания на водопоглощение и набухание

Для испытания на водопоглощение и разбухание используются предварительно взвешенные на электронных технических весах ACCULAB VIC-610d2 (или аналог) в соответствии с ГОСТ 24104–80 с точностью до 0,01 г. Образцы минераловатных плит выполняются в виде призмы с размерами:  $25 \times 25 \times 25$  мм. Затем их укладывают в емкость с водой при температуре 20 °С и через заданный интервал времени фиксируют изменение массы и геометрических размеров образцов, затем тот же алгоритм действий выполняют при температуре 40 и 60 °С [14].

Водопоглощение определяют по формуле:

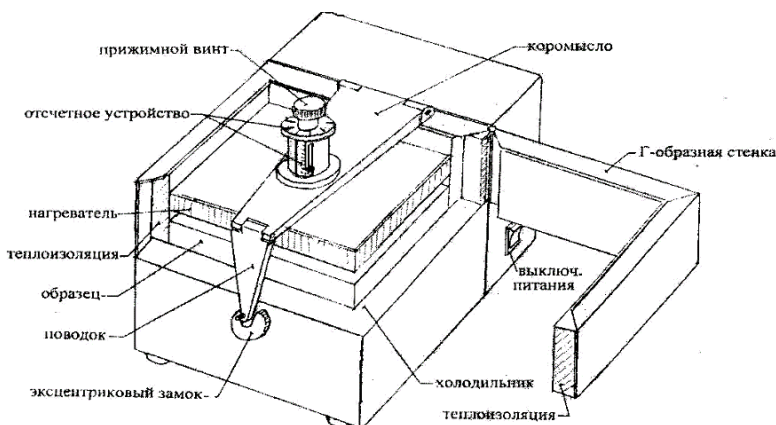
$$B = \frac{m_n - m_k}{m_n} \cdot 100, \quad (17)$$

где  $m_n$  – масса образца до испытания, кг;  $m_k$  – масса образца после его пребывания в воде, кг.

Набухание материала по толщине определяют по схожей формуле:

$$P = \frac{c_n - c_k}{c_n} \cdot 100, \quad (18)$$

где  $c_n$  – высота образца до испытания, мм;  $c_k$  – высота образца после его пребывания в воде, мм.



**Рис. 25. Общий вид установки для нагрева образцов ИТП-МГ4 «250» (ИТП-МГ4 «100»)**

### **2.1.7. Определение коэффициента теплопроводности и коэффициента термического расширения**

Для определения коэффициента теплопроводности и коэффициента термического сопротивления минераловатной плиты используется прибор ИТМ-МГ4 (или аналог).

Образец минераловатной плиты размером 100×100×25 мм помещается внутрь установки, затем опускается коромысло, после чего закрывается Г-образная стенка. Вращая прижимной винт, фиксируется образец до срабатывания трещетки. Образец готов для проведения испытания, дальнейшие манипуляции производятся уже с электронным блоком прибора, на котором выставляются нужные параметры, затем в течение определенного времени прибор выводит результаты эксперимента на экран.

Вычисление коэффициента теплопроводности  $\lambda$  и термического сопротивления  $R$  производится вычислительным устройством прибора по формулам:

$$\lambda = \frac{Hq}{T_n - T_x}, \quad (19)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $H$  – толщина образца в процессе испытаний, м;  $q$  – плотность стационарного теплового потока, проходящего через испытываемый образец, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_n$  – температура горячей лицевой грани испытываемого образца, К;  $T_x$  – температура холодной лицевой грани испытываемого образца, К.

$$R_n = \frac{T_n - T_x}{q} - 2R_k, \quad (20)$$

где  $R_n$  – термическое сопротивление испытуемого образца,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;  $R_k$  – термическое сопротивление между лицевой гранью испытуемого образца и рабочей поверхностью плиты прибора,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

### **2.1.8. Методика проведения испытаний для определения модуля упругости**

Образцы для испытаний должны иметь форму куба со стороной 60 мм. Испытание проводится на установке рычажного типа. В процессе сжатия регистрируются его деформация при заданной нагрузке при помощи штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Нагружение производится ступенчато. Модуль упругости определяется как среднеарифметическое из 6 испытаний.

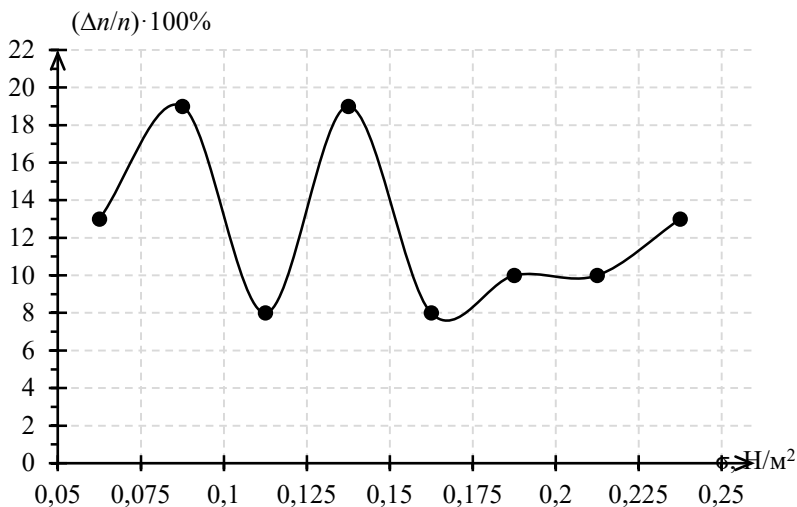
## **2.2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

### **2.2.1. Разброс экспериментальных результатов при определении прочности и долговечности**

Минераловатные плиты относятся к волокнистым материалам. Они имеют сложную структуру, поэтому в процессе разрушения наблюдается значительный разброс прочности и долговечности. При испытаниях одинаковых образцов в одинаковых условиях он может для прочности достигать сотен процентов, а для долговечности – одного-двух десятичных порядков.

Разброс отдельных измерений зависит от множества внешних и внутренних факторов. К внешним относят технологические неточности при изготовлении образцов, колебания приложенной нагрузки, нестабильность теплового режима в процессе испытаний. Однако решающая роль принадлежит внутренним факторам. К ним относятся дефекты (остаточные напряжения, неравномерность распределения волокон по объему при изготовлении и т.д.), имеющиеся в материале.

Для оценки разброса величины разрушающего напряжения при изгибе было испытано по 100 образцов минераловатных плит. Условия испытания (температура, влажность, скорость нагружения) поддерживали строго постоянными. По полученным результатам построены кривая распределения прочности (рис. 26).



**Рис. 26.** Кривая распределения прочности минераловатных плит

Из рисунка видно, что кривая распределения прочности имеет несколько пиков, которые характерны для разных уровней прочности. Такой ее разброс вызван наличием дефектов. Они могут возникать либо как особенности, присущие данному материалу по его природе, либо в результате переработки или механической обработки. Дефекты беспорядочно распределены по образцу и имеют разные размеры. Характер распределения прочности определяется не только наличием дефектов. Волокна могут переплетаться друг с другом в «клубок», образуя достаточно плотные и прочные сплетения, но при этом этот клубок недостаточно сильно связан с основной массой материала, где волокна распределены и переплетены друг с другом более равномерно. Это также приводит к перепадам прочности и образованию нескольких пиков на графике разброса прочности [15].

### **2.2.2. Определение физических и эмпирических констант графоаналитическим методом и расчет основных параметров работоспособности**

Известно, что для полимеров и других композитных материалов резко проявляется температурно-временная зависимость прочности, т.е. действие трех параметров – температуры, нагрузки и времени – качественно одинаково. Такая зависимость имеет линейный характер и

образует семейство веерообразных прямых, сходящихся в точку (полюс) [16]. Классическим видом данной зависимости является «прямой пучок» (рис. 27, а), который описывается уравнением:

$$\tau = \tau_m \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right], \quad (21)$$

где  $\tau_m$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  и  $T_m$  – физические константы материала:  $\tau_m$  – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц – атомов, групп атомов, сегментов), с;  $U_0$  – максимальная энергия активации разрушения, кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-механическая константа, кДж/(моль·МПа);  $T_m$  – предельная температура существования твердого тела (температура разложения), К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $\tau$  – время до разрушения (долговечность), с;  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К.

Физические константы, входящие в это уравнение, определяются графоаналитическим способом. Для этого экспериментальные данные перестраиваются в координаты  $\lg \tau - 10^3/T$  (рис. 27, б). Константы  $\tau_m$  и  $T_m$  находятся из положения полюса. Для определения остальных двух констант  $U_0$  и  $\gamma$  для каждой прямой по равенству (22) рассчитывают значение энергии активации  $U$ .

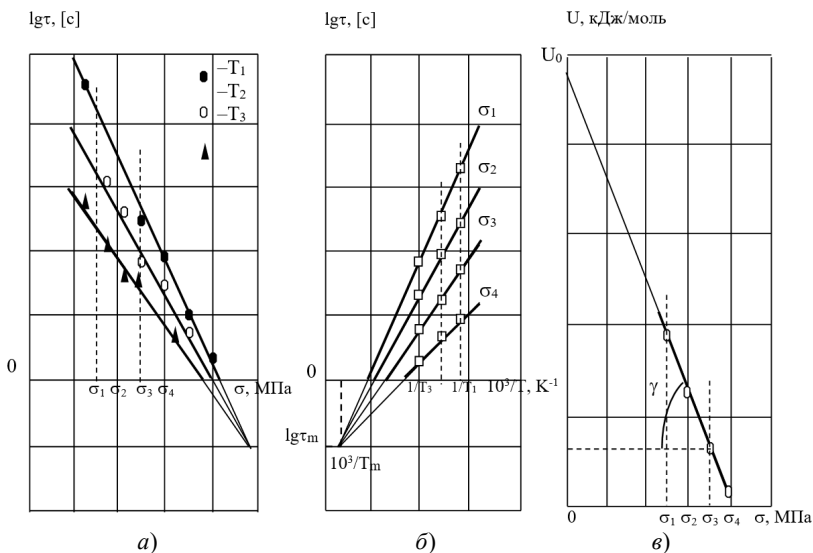


Рис. 27. Схема определения физических констант при разрушении для «прямого пучка»

Затем по полученным данным строят график в координатах  $U-\sigma$  (рис. 27, в). При экстраполяции на  $\sigma = 0$  определяют максимальную энергию активации  $U_0$ , а по тангенсу угла наклона прямой  $U-\sigma$  величину  $\gamma$  [17].

$$U(\sigma) = 2,3R \frac{\Delta \lg \tau}{\Delta(10^3 / T)}. \quad (22)$$

Часто формула (21) не оправдывается. Это наблюдается при хрупком разрушении наполненных полиамидов, полиалкилтерефталатов, т.е. полимеров, в которых наряду с химическими и межмолекулярными силами существенны и силы промежуточной величины. В результате наблюдается семейство прямых, которые в координатах  $\lg \tau - \sigma$  и  $\lg \tau - 10^3/T$  не сходятся в полюс (образуются параллельные прямые) (рис. 28, а).

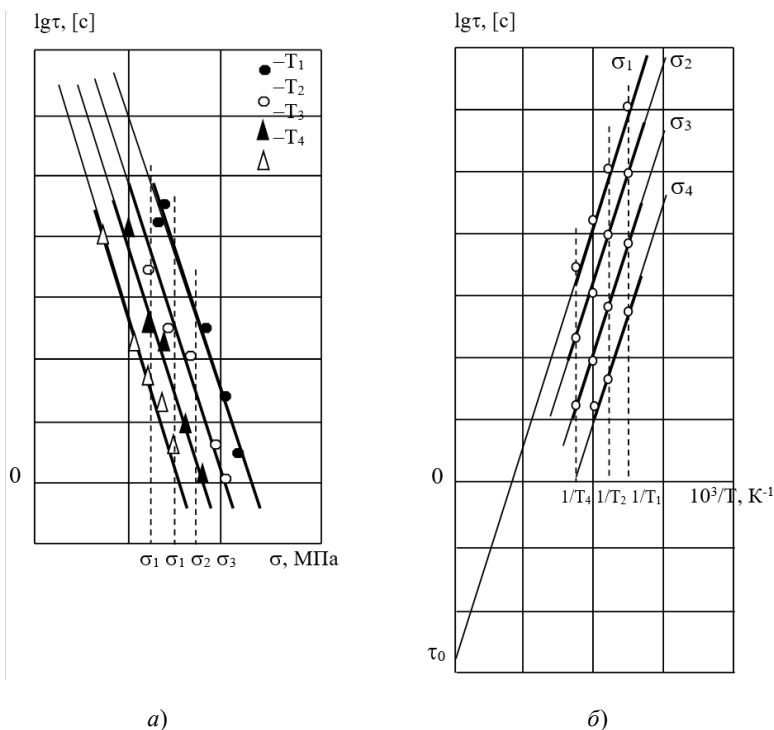


Рис. 28. Схема определения физических констант при разрушении для зависимости с параллельными прямыми



В этом случае нагрузка не влияет на энергию активации, и реализуется формула:

$$\tau = 2\tau_* \exp \frac{U}{RT} \exp(-\beta\sigma), \quad (23)$$

где  $\tau_*$ ,  $U$  – эмпирические константы;  $\beta$  – структурно-механический коэффициент, 1/МПа.

Значение константы  $U$  в формуле (23) определяют из семейства прямых в координатах  $\lg\tau-10^3/T$ . Константа  $\beta$  равна углу наклона прямых в координатах  $\lg\tau-\sigma$  по формуле (24). Оставшаяся константа  $\tau_*$  определяется по формуле (25) в координатах  $\lg\tau-10^3/T$  (рис. 28, б). Для этого задаются  $\sigma_0$  и экстраполяцией на  $\lg\tau$  при данном напряжении находят  $\tau_0$ .

$$\beta = \frac{\Delta \lg \tau}{\Delta \sigma}; \quad (24)$$

$$\tau_* = \tau_0 \exp(\beta\sigma). \quad (25)$$

Наблюдаются также и случаи обращения пучка прямых, когда они сходятся в полюс не при предельно высокой, а при предельно низкой температуре. Это встречается для некоторых термостойких резин, при усталостном истирании полиуретана, при срезе холодноформованных полиолефинов, при изгибе и сжатию цементно-стружечных (рис. 29). При этом справедлива формула:

$$\tau = \tau_m^* \exp \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left( \frac{T_m^*}{T} - 1 \right), \quad (26)$$

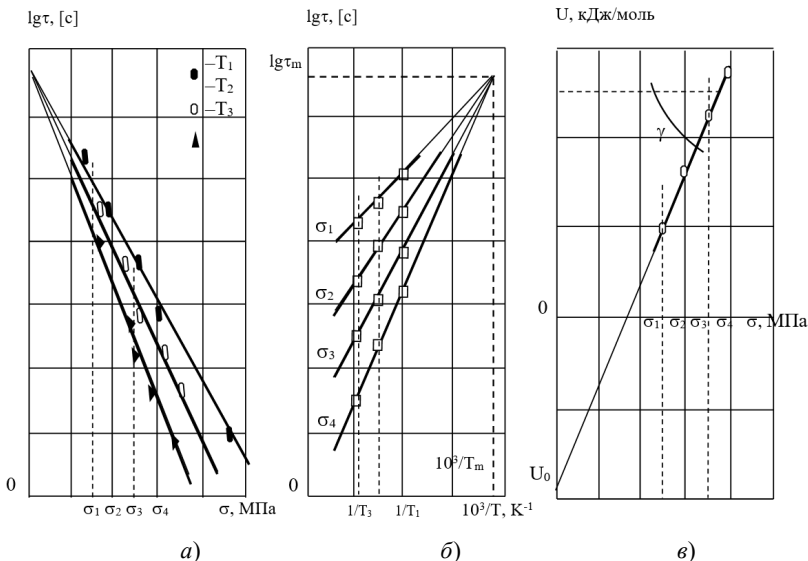
где  $\tau_m^*$ ,  $U_0^*$ ,  $\gamma^*$ ,  $T_m^*$ , – эмпирические константы.

Эмпирические константы в данном случае определяются аналогично константам для «прямого пучка» [18].

Для оценки работоспособности из уравнений (21) – (26) можно выразить два оставшихся параметра: прочность и термостойкость.

Уравнение прочности при «прямом пучке»:

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left( U_0 - \frac{2,3RT}{1 - T/T_m} \lg \frac{\tau}{\tau_m} \right). \quad (27)$$



**Рис. 29. Схема определения физических констант при разрушении для «обратного пучка»**

Уравнение термостойкости при «прямом пучке»:

$$T = \left( \frac{1}{T_m} + \frac{2,3R}{U_0 - \gamma\sigma} \lg \frac{\tau}{\tau_m} \right)^{-1}. \quad (28)$$

Уравнение прочности при «обратном пучке»:

$$\sigma = \frac{1}{\gamma^*} \left[ U_0^* - 2,3 \frac{RT}{T_m^* / T - 1} \lg \frac{\tau}{\tau_m^*} \right]. \quad (29)$$

Уравнение термостойкости при «обратном пучке»:

$$T = \left( -A + \sqrt{A} \sqrt{A + 2T_m^*} \right) \cdot 10^3, \quad (30)$$

где  $A$  – определяется по формуле:

$$A = \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{2 \cdot 2,3R \lg \frac{\tau}{\tau_m^*}}. \quad (31)$$

Уравнение прочности при «параллельных прямых»:

$$\sigma = \frac{1}{\beta} \left( \frac{U}{2,3RT} - \lg \frac{\tau}{\tau_*} \right)^{-1}. \quad (32)$$

Уравнение термостойкости при «параллельных прямых»:

$$T = \frac{U}{2,3RT} \left( \lg \frac{\tau}{\tau_*} + \beta\sigma \right)^{-1}. \quad (33)$$

При деформировании минераловатные плиты также подчиняются температурно-временной концепции прочности. Для «прямого пучка» их долговечность можно описать уравнением:

$$\theta = \theta_m \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (34)$$

где  $\theta_m$  – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц: атомов, молекул, сегментов), с;  $U_0$  – максимальная энергия активации перемещения сегмента из одного положения в другое, кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-механическая константа, отражающая неравномерность распределения нагрузки по цепям полимера, кДж/(моль·МПа);  $T_m$  – предельная температура размягчения, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $\theta$  – время достижения заданной деформации (деформационная долговечность), с;  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К.

Для «обратного пучка» их долговечность можно описать уравнением:

$$\theta = \theta_m^* \exp \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left( \frac{T_m^*}{T} - 1 \right), \quad (35)$$

где  $\theta_m^*$ ,  $U_0^*$ ,  $\gamma^*$ ,  $T_m^*$  – эмпирические константы.

Физические и эмпирические константы, входящие в эти уравнения, определяются графоаналитическим способом так же, как при разрушении.

### 2.2.3. Определение физических и эмпирических констант графоаналитическим дифференцированием

При экспериментировании на деформацию сжатием и пенетрацией кинетические кривые (рис. 30, а) в координатах деформация (глубина погружения индентора) от времени ( $\varepsilon$ - $\tau$ ) описываются уравнением вида Аррениуса:

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{U}{RT}\right), \quad (36)$$

где  $v$  – скорость деформирования, %/с;  $v_0$  – начальная скорость, %/с;  $U$  – температурно-силовой фактор, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $T$  – температура, К.

Для определения констант уравнения зависимость  $\varepsilon$ – $\tau$  дифференцируется и затем строится график в координатах  $v$ – $\tau$ . Для этого кинетические кривые (см. рис. 30, *a*) разбивают на прямолинейные отрезки и к точкам их пересечения проводят касательные. Затем на горизонтальной оси на расстоянии 20 мм отмечают полюс  $H_v$  (рис. 30, *б*), через который до пересечения с осью  $v$  (скорость деформации) проводятся прямые, параллельные касательным. В результате получаем зависимость скорости деформирования от времени ( $v$ – $\tau$ ) (рис. 30, *в*), масштаб которой определяется по формуле:

$$M_v = \frac{M_\varepsilon}{M_\tau H_v}, \quad (37)$$

где  $M_\varepsilon$  – масштаб деформации от времени, мм/мин;  $M_\tau$  – масштаб времени, с/мм;  $H_v$  – полюсное расстояние, мм.

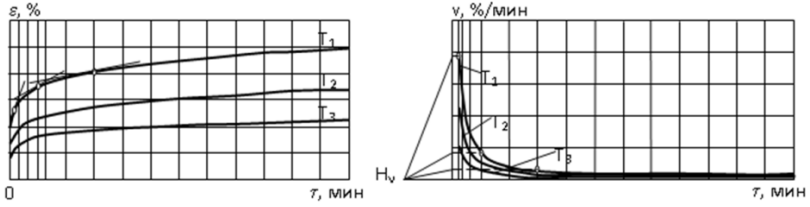
По полученным зависимостям строится график в координатах  $v$ – $\varepsilon$  и экстраполяцией линейных участков кривых на ось ординат ( $v$ ) определяют кажущиеся начальные скорости ( $v_0$ ). После этого строится зависимость  $\lg v_0$ – $10^3/T$  (рис. 30, *з*), по которой для каждой прямой определяют:

$$U = 2,3R \frac{\Delta(\lg v_0)}{\Delta(10^3/T)}. \quad (38)$$

По полученным значениям строится график в координатах  $U$ – $\sigma$  (рис. 30, *д*), экстраполяцией которого на ось  $U$  определяют  $U_0$ , а по тангенсу угла наклона величину  $\gamma$ .

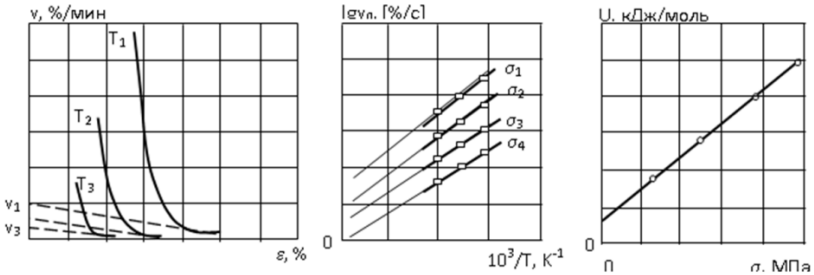
#### 2.2.4. Статистическая обработка экспериментальных данных

При испытаниях на долговечность разброс отдельных значений времени критического события достигает одного-двух десятичных порядков, поэтому каждое испытание проводится на 6 – 12 образцах при постоянных напряжениях и температурах. За результат принимается их среднее арифметическое значение. Для получения надежных результатов экспериментальные данные подвергаются статистической обработке методом наименьших квадратов по ГОСТ 14359–69.



а)

б)



в)

з)

д)

**Рис. 30. Схема определения констант для метода графоаналитического дифференцирования**

### 3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ

Технические характеристики исследуемых минераловатных плит приведены в табл. 1 и 2.

#### 1. Технические характеристики минераловатной плиты Изоруф-Н

Технические характеристики	Ед. изм.	Показатель
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	130
Длина	мм	1000
Ширина	мм	600
Толщина	мм	40...150
Прочность на сжатие при 10 %-ной деформации	кПа, не менее	45
Прочность на отрыв слоев	кПа, не менее	10
Теплопроводность:		
– при температуре 10 °С	Вт/(м·К)	0,035
– при условиях эксплуатации А	Вт/(м·К)	0,038
– при условиях эксплуатации Б	Вт/(м·К)	0,039
Водопоглощение при кратковременном и частичном погружении	кг/м <sup>2</sup> , не более	1,0
Влажность по массе	%, не более	0,5
Содержание органических веществ, по массе	%, не более	4,0
Группа горючести	Группа	НГ

## 2. Технические характеристики минераловатной плиты Изоруф-В

Технические характеристики	Ед. изм.	Показатель
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	175
Длина	мм	1000
Ширина	мм	600
Толщина	мм	40...50
Прочность на сжатие при 10 %-ной деформации	кПа, не менее	65
Прочность на отрыв слоев	кПа, не менее	10
Теплопроводность:		
– при температуре 10 °С	Вт/(м·К)	0,037
– при условиях эксплуатации А	Вт/(м·К)	0,043
– при условиях эксплуатации Б	Вт/(м·К)	0,045
– при условиях эксплуатации А	Вт/(м·К)	0,043
– при условиях эксплуатации Б	Вт/(м·К)	0,045
Водопоглощение при кратковременном и частичном погружении	кг/м <sup>2</sup> , не более	1,0
Влажность по массе	%, не более	0,5
Содержание органических веществ, по массе	%, не более	4,0
Группа горючести	Группа	НГ

### 3.1. ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ

В процессе эксплуатации строительные материалы подвергаются воздействию внешних факторов, зачастую приводящих к структурным изменениям материалов. Выявить нарушения связей, возникших под

действием старения, возможно путем изучения процессов поглощения материалом жидких сред и набухания. Вода существенно влияет на физико-механические характеристики минераловатных плит. Кроме того, она является наиболее распространенной жидкой средой, поэтому изучение процессов набухания осуществлялось в ней.

В качестве объектов исследования были взяты образцы минераловатных плит. Испытания проводились в воде при постоянных температурах (20, 40 и 60 °С). Точность поддержания температуры  $\pm 2$  °С. Для экспериментов использовали образцы размерами 20×20×20 мм. По полученным результатам были построены кинетические кривые в координатах набухание (водопоглощение) от времени выдержки в воде (рис. 31 – 33). Кривые имеют экспоненциальный вид.

Из рисунков видно, что наиболее сильно процесс водопоглощения протекает в течение 60 мин, после чего он замедляется и наступает стабилизация. При повышенных температурах процесс водопоглощения протекает более равномерно, но при увеличении температуры (с 20 до 60 °С) водопоглощение увеличивается в три раза.

Скорость процессов водопоглощения зависит от структуры материала, температуры и состава воды. Для прогнозирования скорости водопоглощения и набухания необходимо знать величины, постоянные в течение всего процесса, и не зависящие от температуры. Такие величины можно получить, рассмотрев эти процессы с термоактивационных позиций, т.е. используя закон Аррениуса.

Закон Аррениуса выражается следующим уравнением:

$$w = w_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (39)$$

где  $w$  – скорость набухания, %/с;  $w_0$  – предэкспоненциальный множитель, %/с;  $E$  – энергия активации (набухания или разбухания), кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $T$  – температура, К.

Тогда скорость водопоглощения (набухание) будет характеризоваться двумя величинами  $w_0$  и  $E$ .

Зависимости водопоглощения от времени отражают экспоненциальный характер процесса и описываются уравнением (39).

Кинетические кривые обрабатывали методом графоаналитического дифференцирования. Для определения констант, входящих в урав-



нение (39), построена зависимость логарифма скорости водопоглощения от обратной температуры, представляющая собой прямую линию. Предэкспонента определяется экстраполяцией данной прямой на ось ординат, а энергия активации (температурно-временной фактор) данного процесса – как тангенс угла ее наклона. Полученные величины констант представлены в табл. 3.

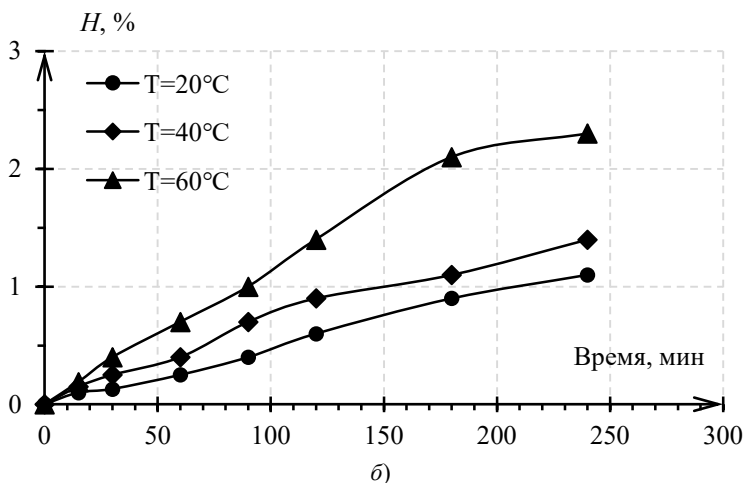
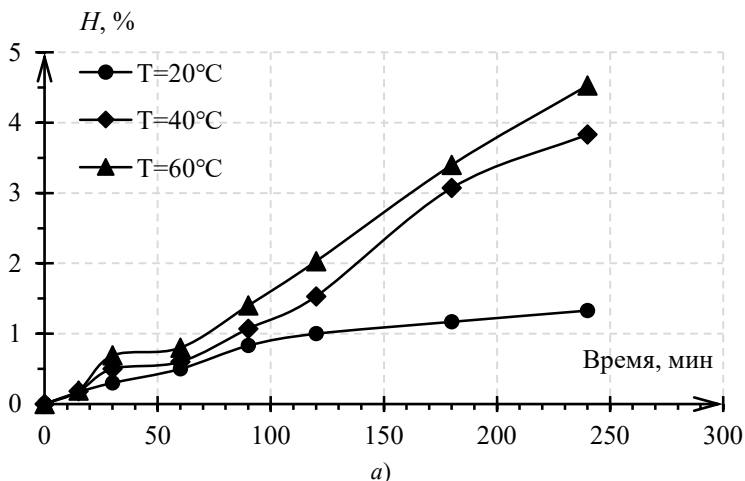


Рис. 31. Набухание минераловатных плит при 20, 40 и 60 °С:  
а – Изоруф-Н; б – Изоруф-В

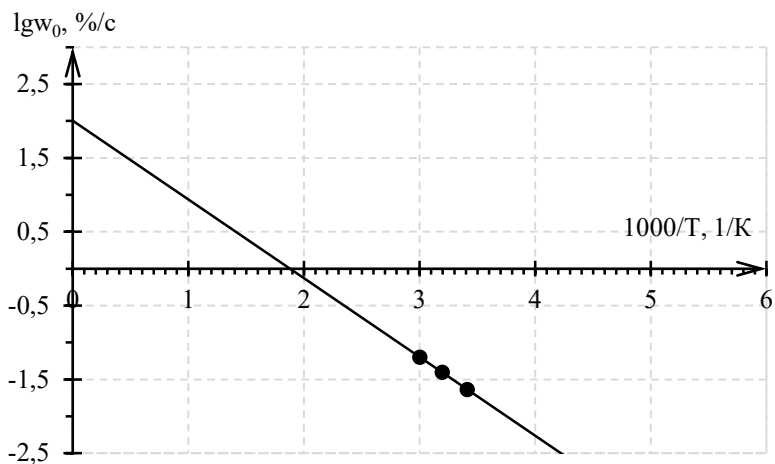
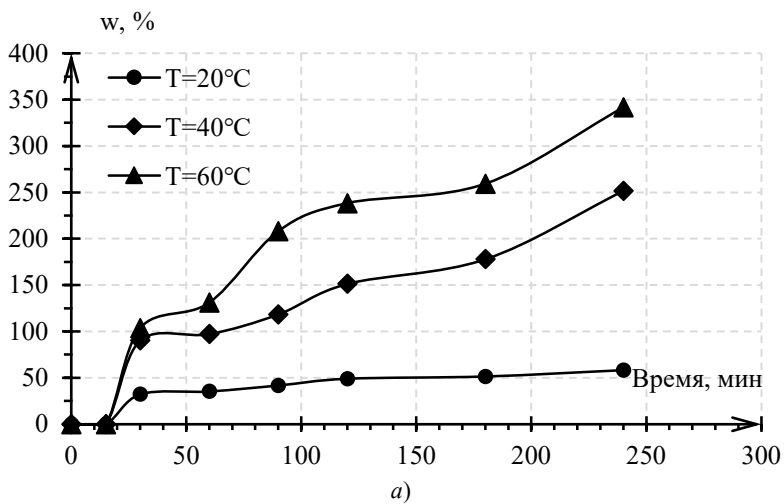


Рис. 32. Зависимости водопоглощения от времени (а) и скорости водопоглощения от обратной температуры (б) для минераловатной плиты Изоруп-Н

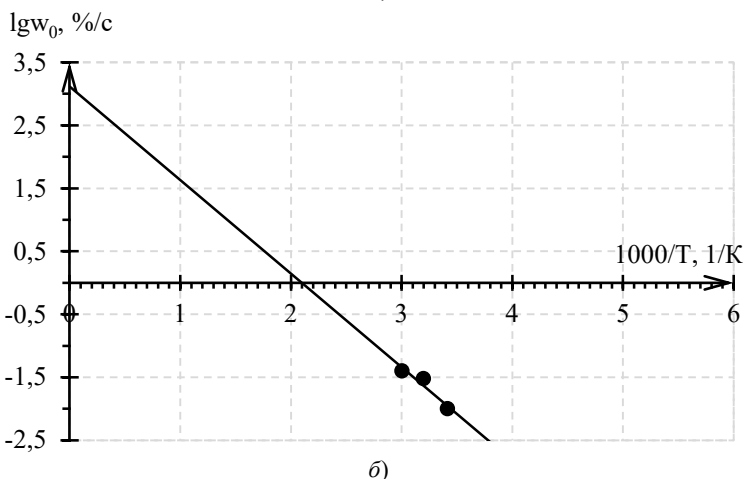
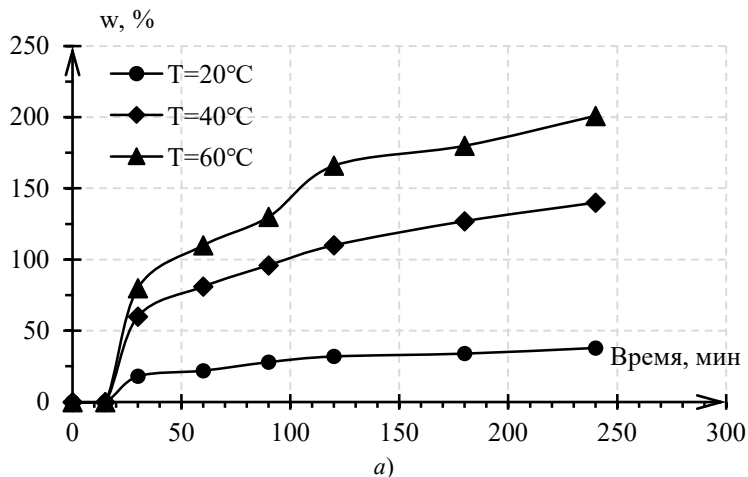


Рис. 33. Зависимости водопоглощения от времени (а) и скорости водопоглощения от обратной температуры (б) для минераловатной плиты Изоруф-В

### 3. Значения физических констант при водопоглощении минераловатных плит Изоруф-Н и Изоруф-В

Материал	$E$ , кДж/моль	$\lg w_0$	$\lg w_0$ , %/с при $T = 40^\circ\text{C}$
Изоруф-Н	21,25	2,0	-1,4
Изоруф-В	26,06	3,0	-1,5

Константы позволяют рассчитать скорость водопоглощения при заданной температуре эксплуатации и прогнозировать ее в широком диапазоне температур.

Таким образом, рассмотренные с единых термоактивационных позиций закономерности разрушения, деформирования и водопоглощения минераловатных плит позволяют прогнозировать их долговечность, скорость деформирования и водонасыщения в эксплуатационном диапазоне нагрузок и температур [19].

### 3.2. ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ

В процессе эксплуатации строительные материалы подвергаются воздействию повышенных температур. При этом происходит изменение их размеров, вызывающее в материале значительные термические напряжения. В связи с этим возникает необходимость изучения поведения материала в свободном состоянии при нагревании с заданной скоростью.

Исследования образцов минераловатных плит проводили в линейном dilatометре. Испытания проводили при постоянной скорости нагрева 1,65 °С/мин.

Полученные результаты представлены на рис. 34. Из рисунка видно, что на начальном этапе нагревания практически не происходит изменение размеров образцов минераловатных плит до достижения температуры в 35...40°, когда эти изменения становятся заметными.

По полученным кривым определили коэффициенты линейного термического расширения.

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad (40)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного термического расширения, 1/°С;  $l_0$  – первоначальная длина образца, мм;  $\Delta l$  – удлинение образца, мм;  $\Delta T$  – изменение температуры, °С.

Так как зависимости не являются прямолинейными, их разбивают на линейные участки. Для каждого участка находится коэффициент линейного термического расширения. И затем определяется  $\alpha_{\text{ср}}$  по формуле:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 \Delta T_1 + \dots + \alpha_n \Delta T_n}{\Delta T_1 + \dots + \Delta T_n}. \quad (41)$$

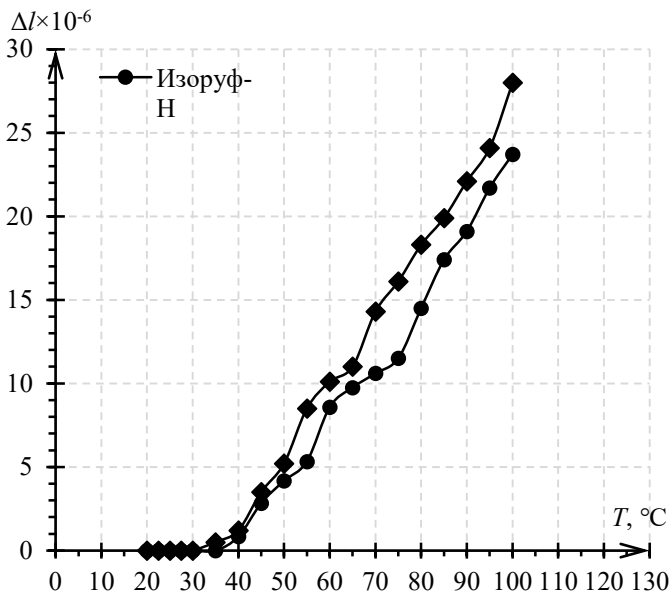


Рис. 34. Дилатометрическая кривая

Для испытываемой минераловатной плиты Изоруф-Н коэффициент термического расширения составляет  $0,98 \cdot 10^{-6}$ ,  $1/^\circ\text{C}$ . Для Изоруф-В составляет  $1,01 \cdot 10^{-6}$ ,  $1/^\circ\text{C}$  [20].

### 3.3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ НА СЖАТИЕ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Прошивные минераловатные базальтовые маты М-100 на основе минеральной ваты в основном работают на сжатие. Поэтому были проведены испытания на сжатие образцов прошивного минераловатного мата. Нагрузку, передаваемую на образец, увеличивали ступенчато, замеряя при этом деформации. Полученные графики зависимости относительной деформации от нагрузки носят экспоненциальный характер, то есть при приложении небольших нагрузок мы наблюдаем значительный рост деформаций. С дальнейшим увеличением нагрузок рост деформаций замедляется и практически прекращается. Остаточные деформации после испытаний на сжатие составляют порядка 25% от начальной высоты образца (рис. 35).

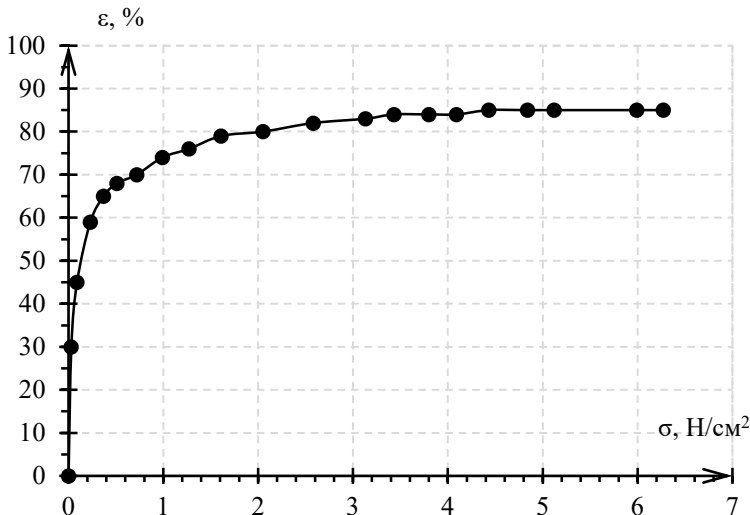


Рис. 35. Зависимость относительной деформации от нагрузки

Рассчитывалась величина модуля упругости для минераловатной плиты в обычных условиях при температуре 20 °С по формуле:

$$E = \frac{\varepsilon}{\sigma}. \quad (42)$$

Значение модуля упругости равняется 10,1 МПа.

Испытания на сжатие были проведены по той же методике после теплового старения, УФ-облучения и циклов замораживания и оттаивания.

После теплового старения наблюдается увеличение модуля упругости с 11,3 до 14,4 МПа, но при этом после снятия всей приложенной к образцу нагрузки идет увеличение остаточных деформаций. Возможно, увеличение модуля упругости на начальном этапе нагружения связано с уменьшением количества влаги, находящейся в материале, которая постепенно испаряется в результате теплового старения. При этом рост остаточных деформаций связан со старением материала, нарушением структуры и неспособности волокон восстанавливать нарушенные связи.

УФ-облучение практически не оказывает влияние на работу материала при сжатии, так как из полученных графиков нельзя сделать вывод об изменении упругих свойств материала в ту или иную сторону.

После циклов замораживания и оттаивания значительно снижается значение модуля упругости материала после первых же циклов, наблюдается уменьшение высоты самих образцов, увеличивается величина остаточных деформаций.

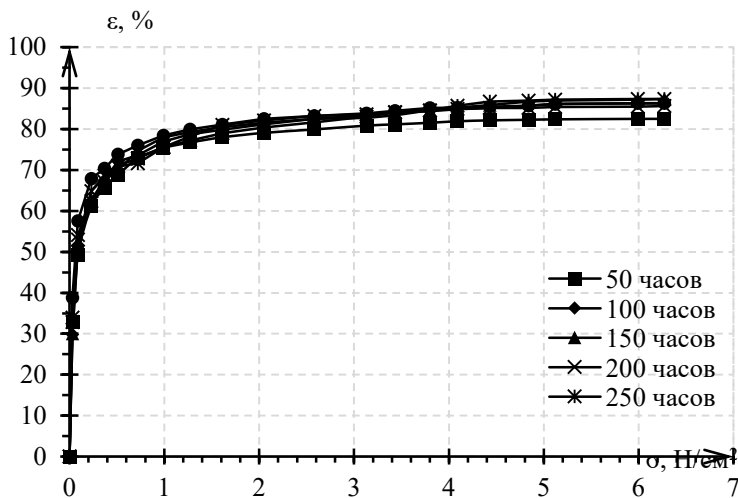


Рис. 36. Зависимость относительной деформации от нагрузки после теплового старения

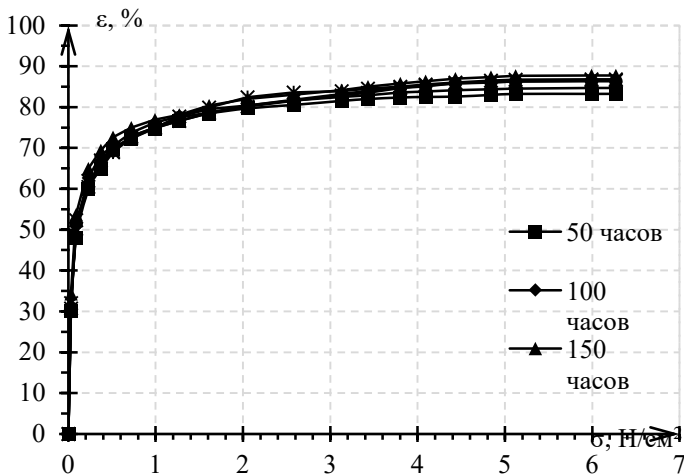
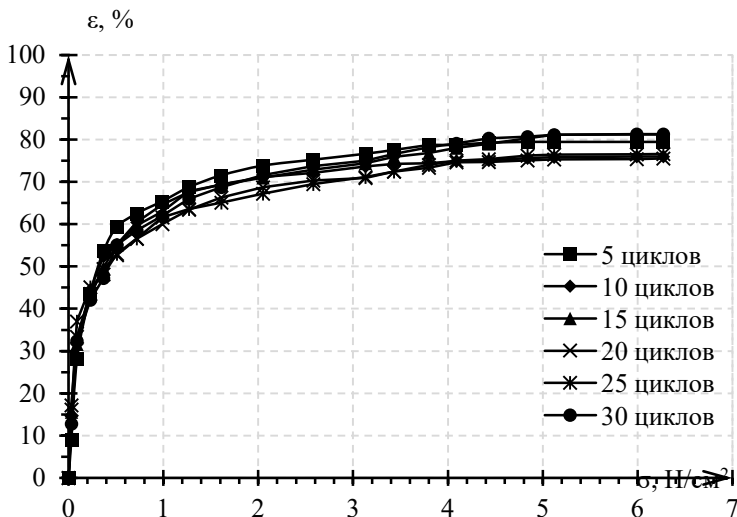


Рис. 37. Зависимость относительной деформации от нагрузки после УФ-облучения



**Рис. 38.** Зависимость относительной деформации от нагрузки после циклов замораживания и оттаивания

Во время проведения экспериментов фиксировалось так же изменение внешнего вида испытываемых образцов. Как показали исследования, после теплового старения и УФ-облучения видимых изменений внешнего вида образцов минераловатной плит не произошло. Наиболее заметным в этом плане оказалось влияние циклов замораживания и оттаивания. Видимые изменения структуры материала наблюдались уже после первого цикла замораживания и оттаивания, с каждым последующим циклом изменения становились все заметнее [20]. Высота образцов уменьшалась, материал становился слоистым и терял свою первоначальную форму (рис. 39).



5 циклов 10 циклов

**Рис. 39.** Образцы после циклов замораживания и оттаивания





15 циклов 20 циклов



25 циклов 30 циклов

**Рис. 39. Окончание**

### **3.4. ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛОВАТНОЙ ПЛИТЫ ПРИ СЖАТИИ**

Скорость деформирования твердых тел можно оценить по тангенсу угла наклона отдельных участков кинетической кривой. Однако эта величина меняется во времени и зависит от температуры. Так, для исследованных видов фанеры с повышением нагрузки и температуры скорость деформирования растет. А для ее оценки необходимо использовать величину, постоянную в течение всего процесса и не зависящую от температуры. Это возможно с термоактивационных позиций.

По закону Аррениуса, скорость деформации ( $v$ ) материала можно описать уравнением 36, где  $U_0$  является энергией активации процесса деформирования. Этими константами можно характеризовать деформационную способность материала. Испытания проводили в режиме постоянных температур. Установка описана в пункте в методической части, там же изложена схема проведения испытаний. Для минерало-

ватной плиты были построены кинетические кривые в координатах деформация от времени в режиме постоянных напряжений и температур. Полученные зависимости представлены на рис. 40 – 45.

Полученные кривые можно разбить на два участка. На первом участке наблюдается значительный рост деформации, затем наступает стабилизация процесса. Из рисунков видно, что на величину деформации большое влияние оказывают температура и величина нагрузки.

Обработка полученных данных осуществлялась методом графо-аналитического дифференцирования.

Для определения деформационных характеристик минераловатных плит были построены зависимости скорости деформирования от обратной температуры. Зависимости представляют собой семейство веерообразных прямых, сходящихся в точку, и описываются уравнением (26).

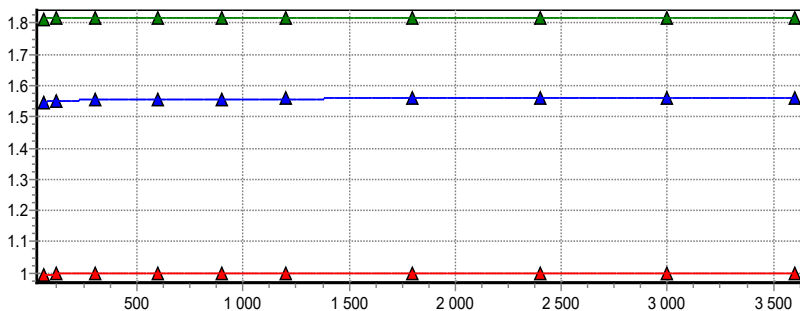


Рис. 40. График зависимости глубины погружения от времени для  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

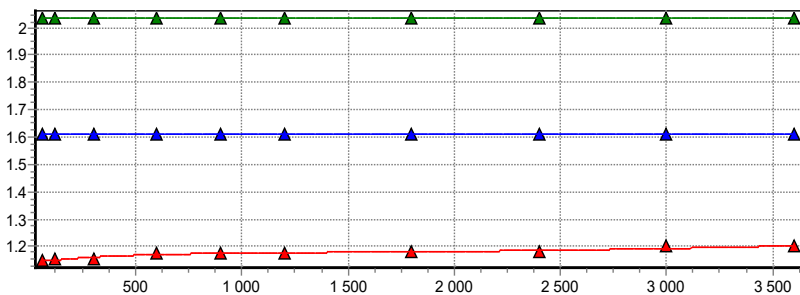


Рис. 41. График зависимости глубины погружения от времени для  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

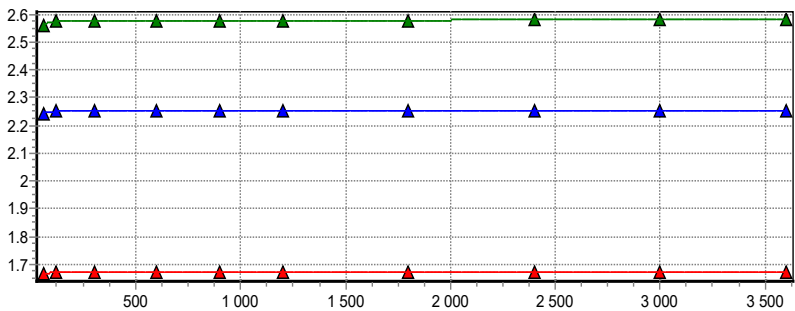


Рис. 42. График зависимости глубины погружения от времени для  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

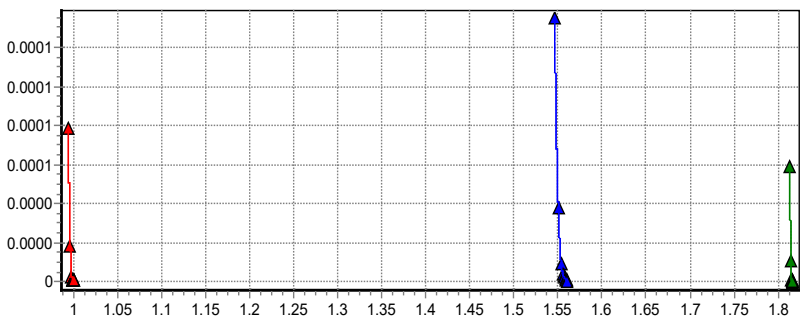


Рис. 43. Графики зависимости скорости погружения от глубины для  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

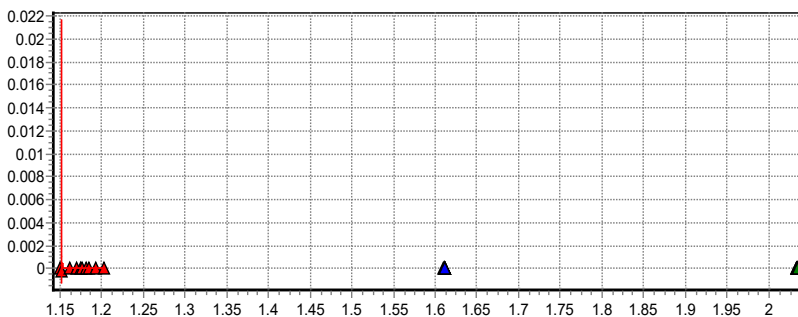


Рис. 44. Графики зависимости скорости погружения от глубины для  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

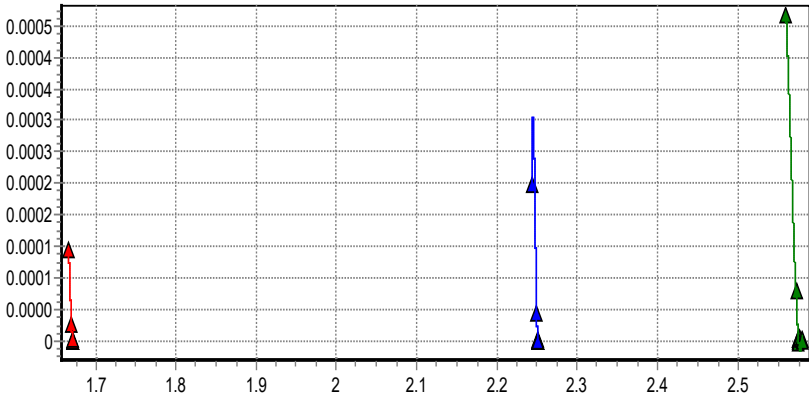


Рис. 45. Графики зависимости скорости погружения от глубины для  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

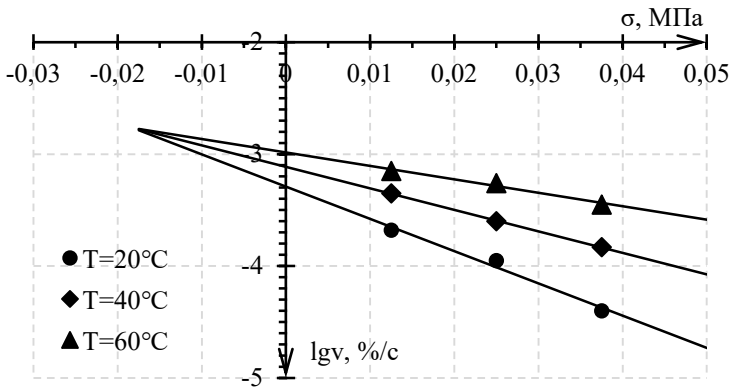


Рис. 46. Зависимость скорости деформирования от напряжения для минераловатной плиты Изоруф-Н

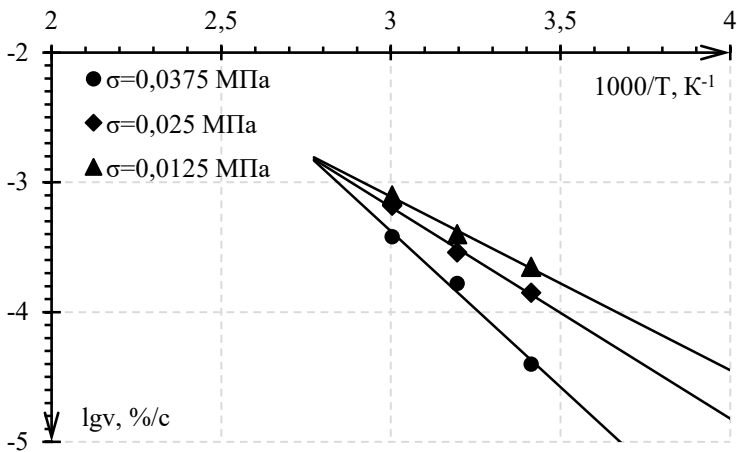


Рис. 47. Зависимость скорости деформирования от обратной температуры для минераловатной плиты Изоруф-Н

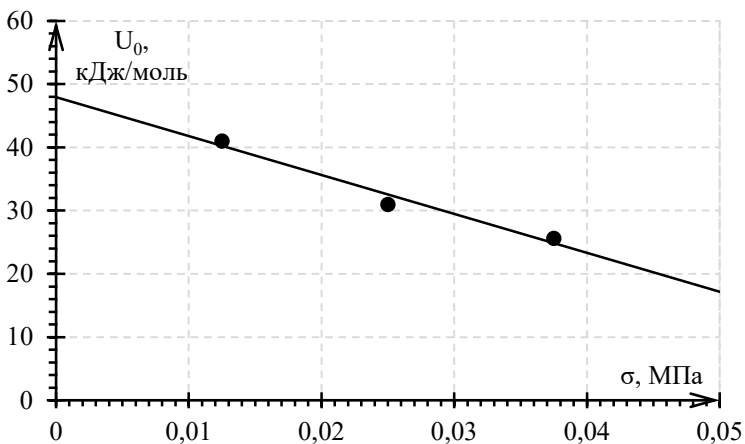


Рис. 48. Зависимость энергии активации скорости деформирования от напряжения для минераловатных плит Изоруф-Н

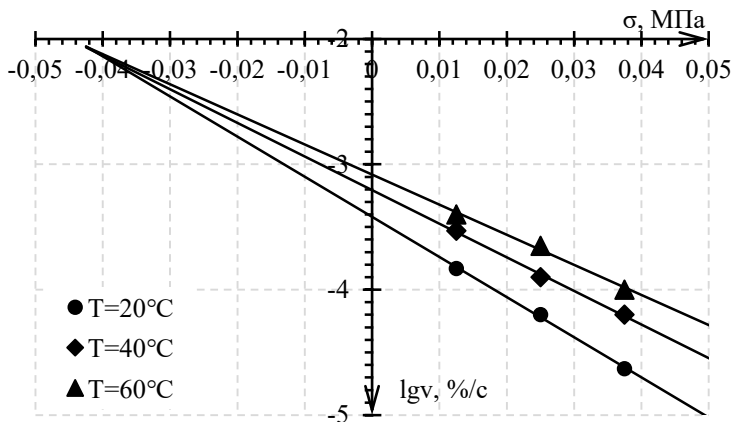


Рис. 49. Зависимость скорости деформирования от напряжения для минераловатной плиты Изоруф-В

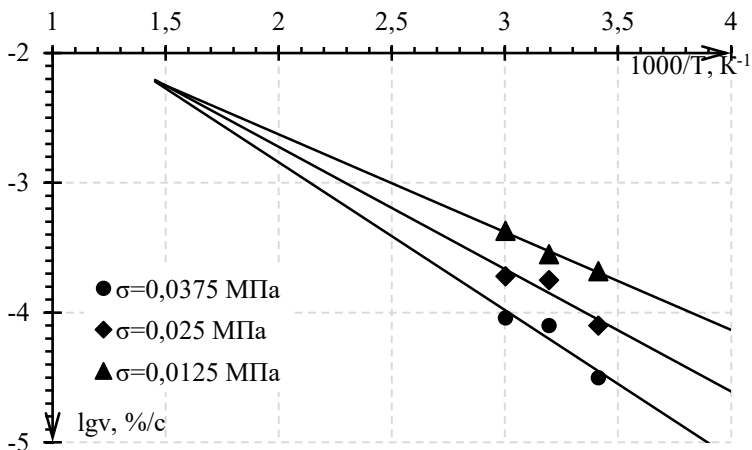


Рис. 50. Зависимость скорости деформирования от обратной температуры для минераловатной плиты Изоруф-В

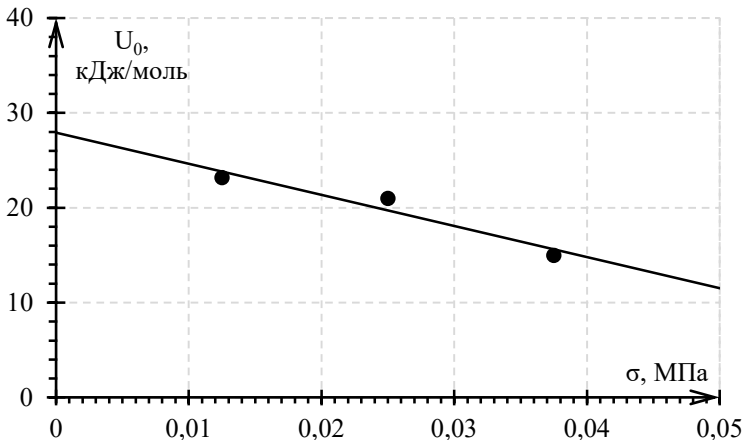


Рис. 51. Зависимость энергии активации скорости деформирования от напряжения для минераловатных плит Изорупф-В

Для описания полученных зависимостей уравнение вида Аррениуса было преобразовано по аналогии с обобщенной формулой Журкова.

Для «прямого» пучка зависимость приняла вид:

$$v = v_{m(д)} \exp \left[ -\frac{U_{0(д)} - \gamma_{m(д)} \sigma}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_{m(д)}} \right) \right]. \quad (43)$$

Для «обратного» пучка зависимость приняла вид:

$$v = v_{m(д)}^* \exp \left[ -\frac{U_{0(д)}^* - \gamma_{(д)}^* \sigma \left( \frac{T_{m(д)}^*}{T} - 1 \right)}{RT} \right], \quad (44)$$

где  $v$  – скорость деформирования материала, %/с;  $v_{m(д)}$  – начальная кажущаяся скорость деформирования материала, %/с;  $U_{0(д)}$  – максимальная энергия активации скорости, кДж/моль;  $\gamma_{(д)}$  – структурно-механический фактор, кДж/(моль·МПа);  $T_{m(д)}$  – предельная температура существования материалов, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К;  $v_{m(д)}^*$ ,  $T_{m(д)}^*$ ,  $U_{0(д)}^*$  и  $\gamma_{(д)}^* \sigma$  – эмпирические константы.

В таблице 4 представлены значения деформационных характеристик.

#### 4. Значения констант при деформировании минераловатных плит

Марка минераловатной плиты	$\lg v_{m(d)}$ ( $\lg v^*$ ), %/с	$T_{m(d)}$ , К	$U_{0(d)} (U)$ , кДж/моль	$\gamma_{(d)}$ , кДж/(моль·МПа)
Изоруф-Н	-2,6	370	48	640
Изоруф-В	-2,2	714	28	320

Полученные данные позволяют по уравнениям (43) и (44) прогнозировать скорость деформирования сжатием в широком диапазоне заданных параметров эксплуатации (прочности и температуре эксплуатации).

#### 3.5. ЗАКОНОМЕРНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Для изучения закономерности разрушения минераловатной плиты при поперечном изгибе в работе были проведены длительные испытания. Испытания проводили при поперечном изгибе в режиме заданных постоянных напряжений и температур. Установка и методика проведения экспериментов описаны в п. 2.2.1.

Полученные экспериментальные данные в координатах логарифм долговечности от напряжения (обратной температуры) представлены на рис. 52 – 57. Из рисунков видно, что полученные для минераловатной плиты линейные зависимости образуют семейства прямых (пучки), сходящихся в одну точку (полюс) и описываемых уравнением (21).

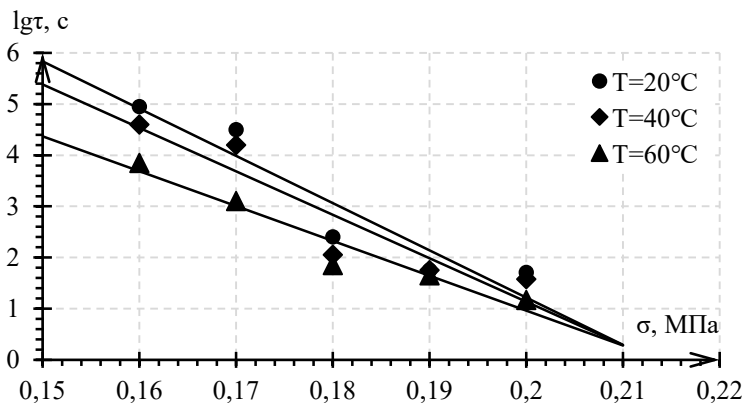


Рис. 52. Зависимость долговечности от напряжения при изгибе для минераловатной плиты Изоруф-Н



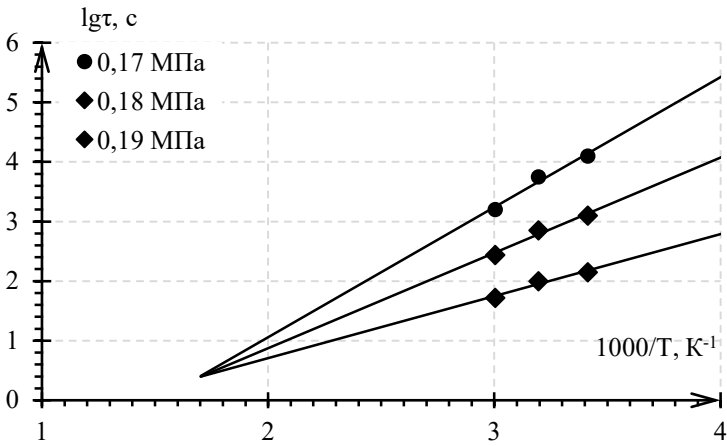


Рис. 53. Зависимость долговечности от обратной температуры при изгибе для минераловатной плиты Изоруф-Н

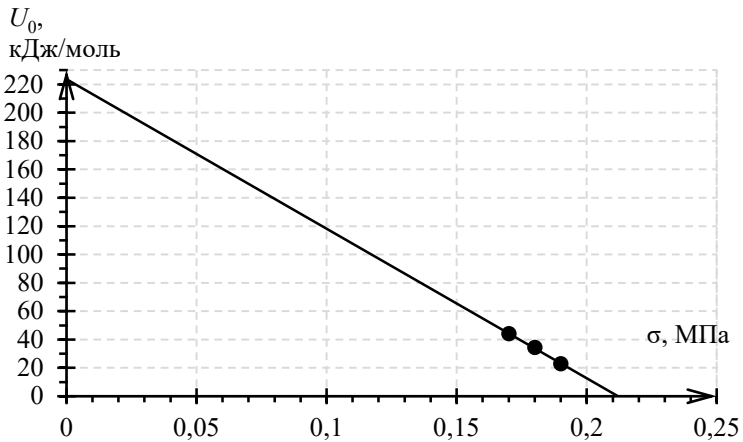


Рис. 54. Зависимость эффективной энергии активации от напряжения для минераловатной плиты Изоруф-Н

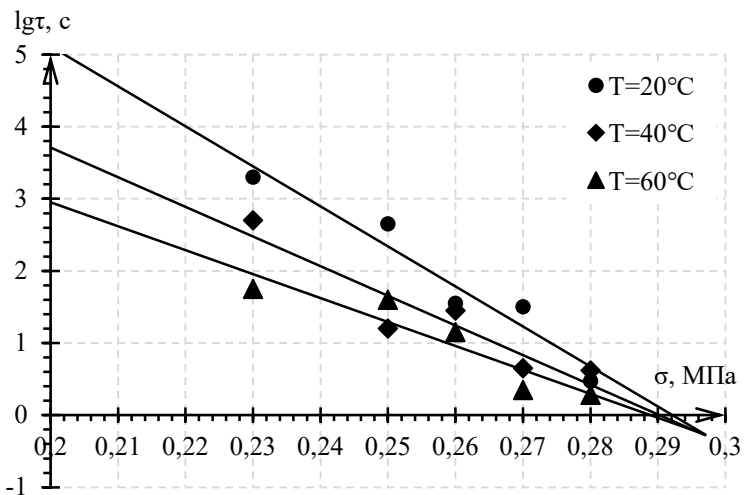


Рис. 55. Зависимость долговечности от напряжения при изгибе для минераловатной плиты Изоруф-В

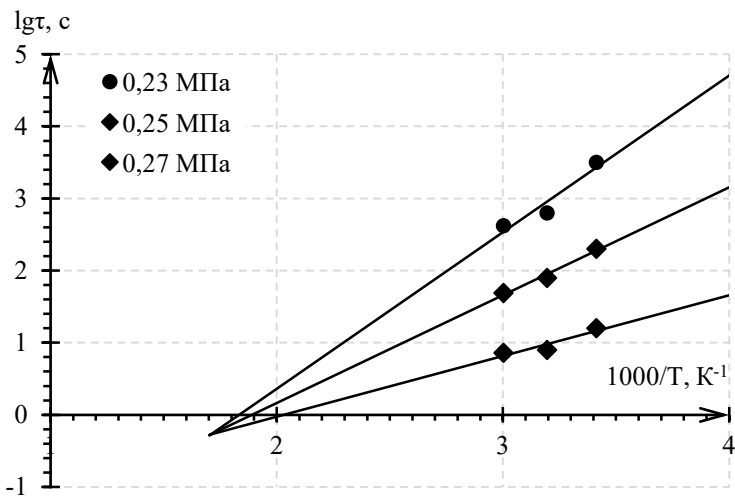


Рис. 56. Зависимость долговечности от обратной температуры при изгибе для минераловатной плиты Изоруф-В

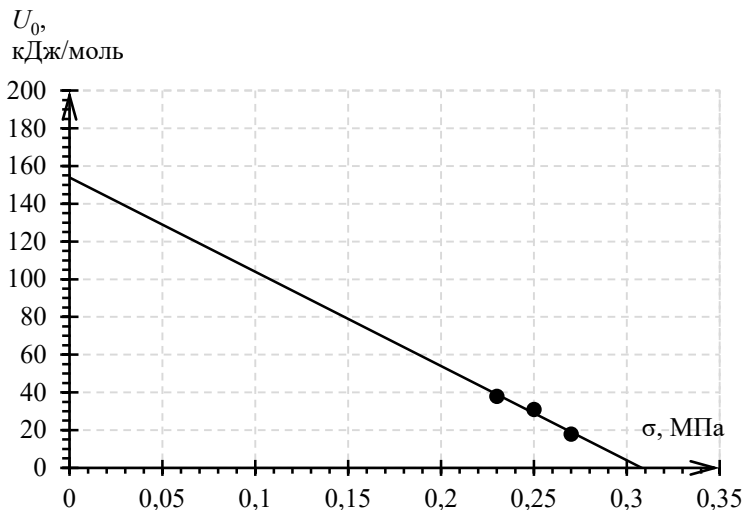


Рис. 57. Зависимость эффективной энергии активации от напряжения для минераловатной плиты Изоруп-В

По полученным зависимостям (рис. 52 – 57) графоаналитическим способом были определены физические константы (п. 2.2.2), значения которых представлены в табл. 5.

Из таблицы видно, что предэкспонента  $\tau_m$  значительно больше периода колебаний атомов в твердом теле ( $10^{-12}$  с). Это, по-видимому, связано со сложным волокнистым строением минераловатных плит. Величина  $T_m$  близка значению температуры разложения синтетического связующего.  $U_0$  соответствует энергии активации разрушения силикатов, а большая величина  $\gamma$  отражает неравномерность распределения нагрузки в волокнистой структуре минераловатной плиты.

### 5. Значения физических констант при поперечном изгибе

Марка минераловатной плиты	Интервал температур, °С	Интервал напряжений, МПа	Физические константы			
			$\tau_m$ , с	$T_m$ , К	$U_0$ , кДж/моль	$\gamma$ , кДж/(МПа·моль)
Изоруп-Н	20...60	0,16...0,2	$10^{0,3}$	588	223	1051
Изоруп-В	20...60	0,23...0,29	$10^{-0,3}$	625	155	500

По уравнениям (21), (27), (28) при заданных параметрах эксплуатации можно рассчитать границы работоспособности, долговечность, длительную прочность и термостойкость.

### 3.6. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ

Проведены исследования изменения теплопроводности минераловатных плит после теплового старения, УФ-облучения и циклов замораживания и оттаивания (рис. 58 – 60). Результаты показали, что теплопроводность минераловатных плит снижается в результате любого вида старения. Это объясняется нарушением структуры материала, уменьшением количества влаги, находящейся в материале при тепловом старении, расслоением минераловатной плиты при замораживании и оттаивании. Построены зависимости величины теплопроводности от количества часов и циклов климатических воздействий.

Изучено изменение теплопроводности минераловатной плиты при воздействии на нее сжимающих усилий (рис. 61). Зависимости теплопроводности от относительной деформации показали увеличение теплопроводности материала с ростом усилия сжатия. Это происходит за счет увеличения плотности материала и уменьшения объема пустот между волокнами (снижения доли воздуха).

Выявлена зависимость влияния замачивания на теплопроводность минераловатных плит (рис. 62). Их погружали в воду и через определенные промежутки времени измеряли водопоглощение и теплопроводность. Установлено, что наиболее интенсивно процесс водопоглощения при температуре воды 20 °С идет на начальном этапе 0 – 30 мин. Затем этот процесс стабилизируется. С увеличением количества воды в материале наблюдается повышение теплопроводности, что объясняется заполнением пустот и повышением плотности материала.

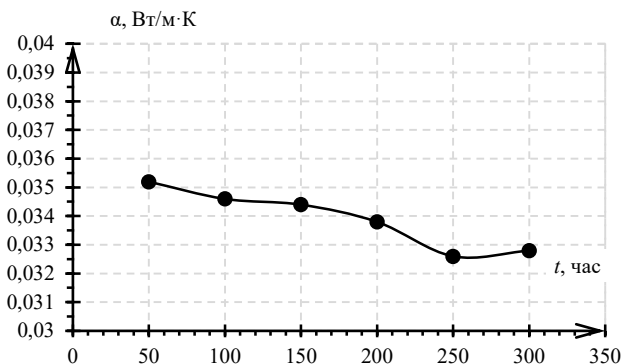


Рис. 58. График изменения теплопроводности минераловатной плиты после УФ-облучения

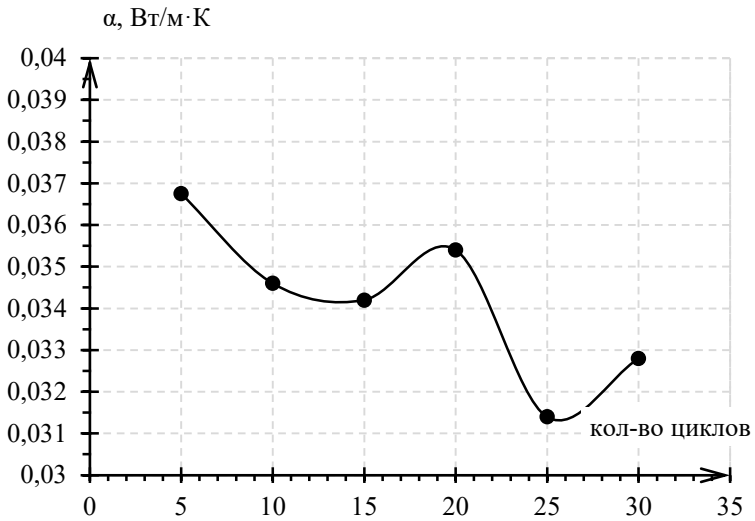


Рис. 59. График изменения теплопроводности минераловатной плиты после циклов замораживания и оттаивания

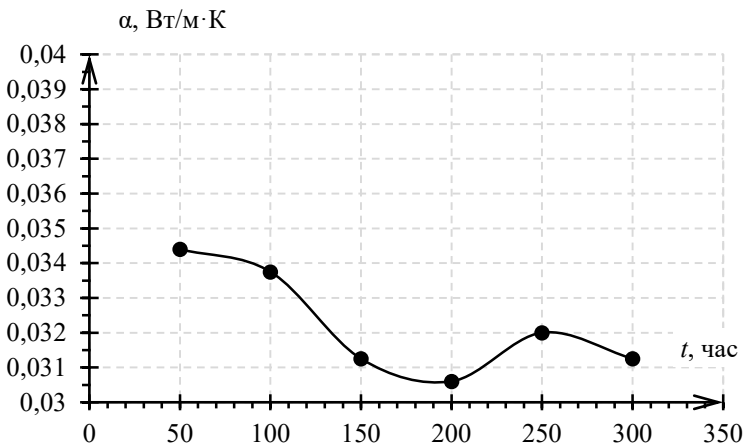
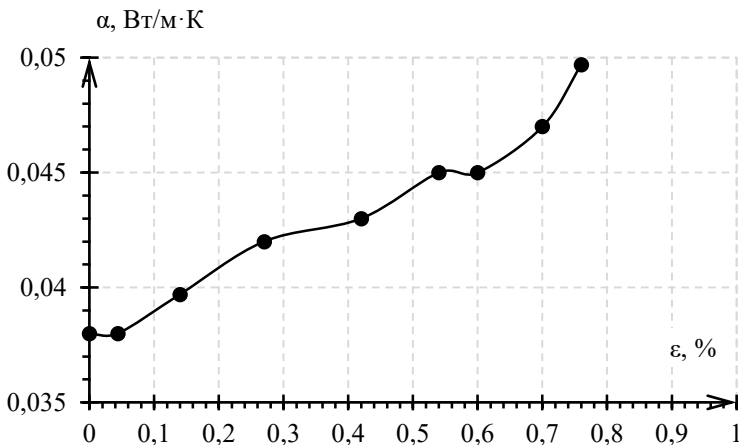
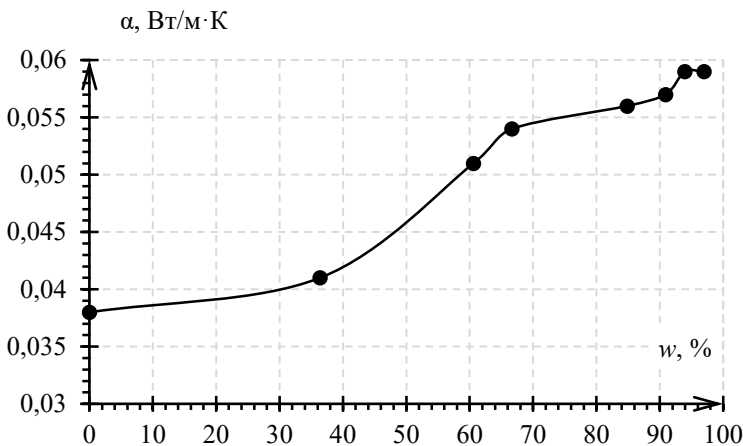


Рис. 60. График изменения теплопроводности минераловатной плиты после теплового старения



**Рис. 61. Зависимость теплопроводности от относительной деформации минераловатных плит**



**Рис. 62. Зависимость теплопроводности от водопоглощения минераловатных плит**

### **3.7. ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛОВАТНОЙ ПЛИТЫ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ**

Испытания проводили при деформировании пенетрацией в режиме постоянных напряжений и температур. Установка и методика проведения экспериментов описана в п. 2.1.2. В процессе проведения

экспериментов через определенные промежутки времени фиксировали изменение глубины погружения индентора. В результате были построены кинетические кривые в координатах глубина погружения индентора от времени ( $h-t$ ). Полученные зависимости представлены на рис. 57 – 62.

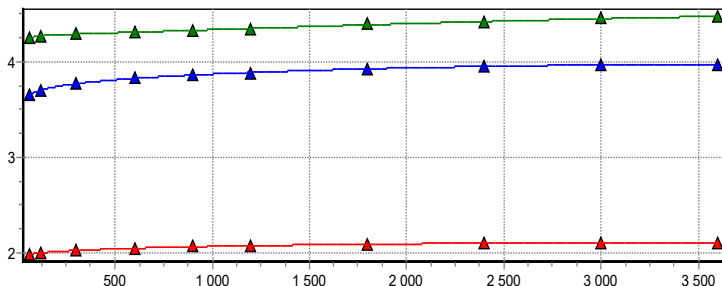


Рис. 63. График зависимости глубины погружения от времени для  $T = 20$  °C

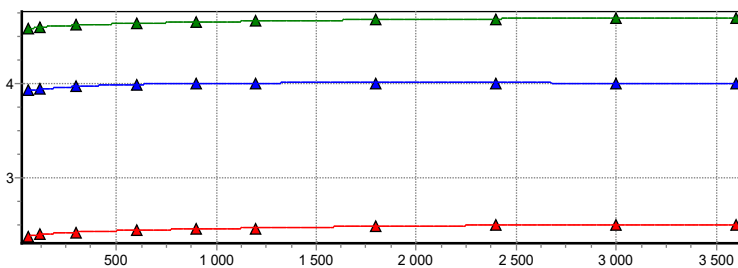


Рис. 64. График зависимости глубины погружения от времени для  $T = 40$  °C

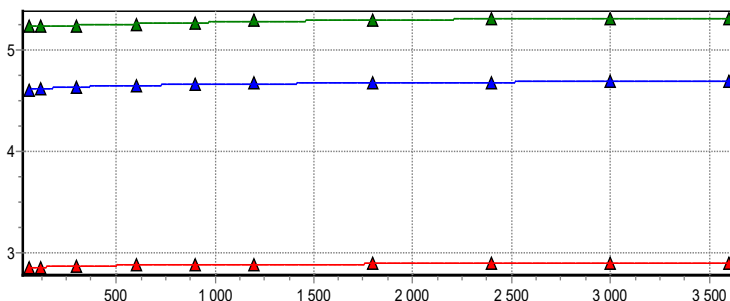


Рис. 65. График зависимости глубины погружения от времени для  $T = 60$  °C

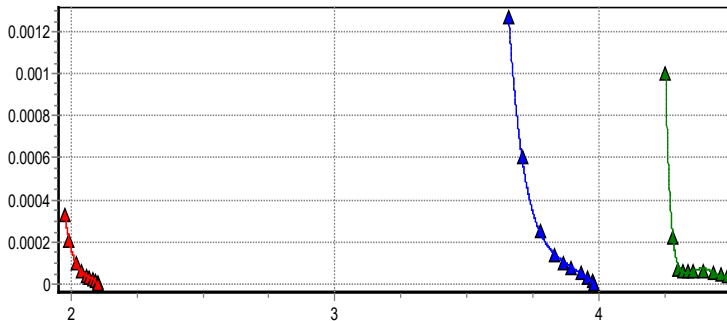


Рис. 66. Графики зависимости скорости погружения от глубины для  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

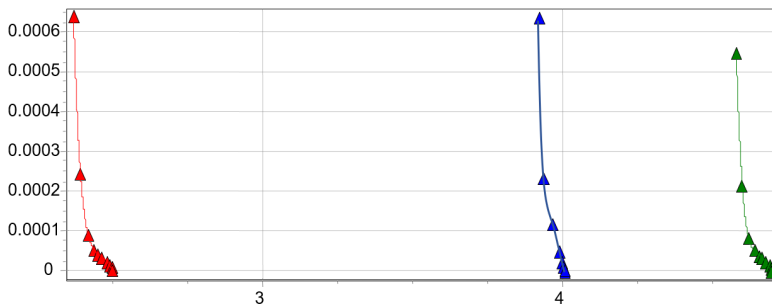


Рис. 67. Графики зависимости скорости погружения от глубины для  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

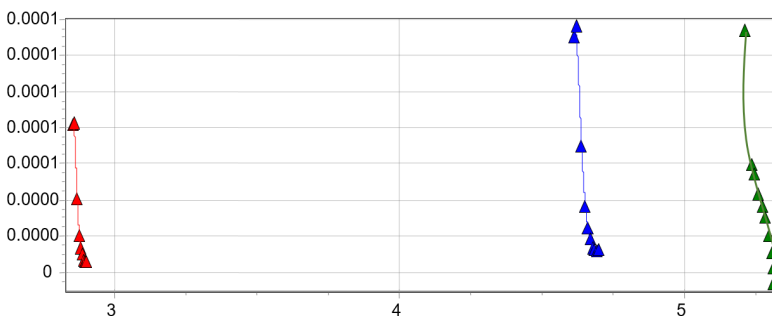


Рис. 68. Графики зависимости скорости погружения от глубины для  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$



## 6. Физические константы минераловатных плит при деформировании пенетрацией

Марка минераловатной плиты	$U_0$ кДж/моль	$\beta$
Изоруф-Н	103	80
Изоруф-В	81	68

Обработка полученных данных осуществлялась методом графо-аналитического дифференцирования. Для определения деформационных характеристик минераловатных плит были построены зависимости скорости деформирования от обратной температуры (рис. 69). Из рисунков видно, что полученные прямые имеют вид параллельных прямых. Значения полученных констант и скорости деформации представлены в табл. 6.

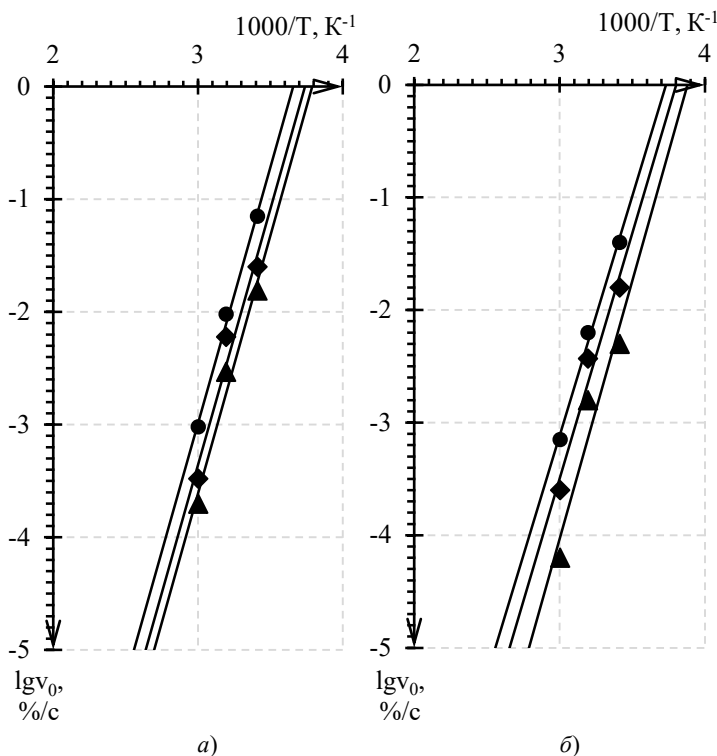


Рис. 69. График зависимости логарифма скорости погружения от температуры для Изоруф-Н (а) и Изоруф-В (б)

Полученные зависимости описываются уравнениями вида Аррениуса для параллельных прямых:

$$v = v^* \exp \frac{U}{RT} \exp(-\beta\sigma), \quad (45)$$

где  $v$  – скорость деформирования материала, %/с;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К;  $v_{m(d)}$ ,  $U_{0(d)}$ ,  $U$ ,  $\gamma_{(d)}$  и  $T_{m(d)}$  – физические константы;  $\beta$  – структурно-механический коэффициент, 1/МПа;  $v^*$  – эмпирическая константа.

Из рисунков 46, 47, 49, 50, 69 видно, что зависимости логарифма скорости деформирования ( $\lg v$ ) от обратной температуры ( $1000/T$ ) представляют собой семейства прямых в виде пучка при сжатии и параллельных при пенетрации. Такое поведение материала объясняется его сложной неравномерной структурой, которая определяется неплотным прилеганием минеральных волокон друг к другу и как следствие того, наличием большого количества пустот, которые и определяют его высокие тепло- и звукоизоляционные параметры.

Полученные константы позволяют по уравнению (45) прогнозировать скорость деформирования пенетрацией в широком диапазоне заданных параметров эксплуатации (напряжении и температуре).

### **3.8. ОСНОВНЫЕ ТЕЗИСЫ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ**

1. Воздействие климатических факторов, таких как тепловое старение, УФ-облучение, циклы замораживания и оттаивания снижает коэффициент теплопроводности минераловатных плит, тем самым улучшая его теплофизические качества.

2. С ростом величины относительной деформации и водопоглощения минераловатной плиты ухудшаются ее теплотехнические характеристики.

3. Минераловатная плита до температуры 40 °С не подвержена термическому расширению.

4. При сжатии и пенетрации интенсивно процесс деформирования минераловатных плит протекает в течение только двух минут.

5. После теплового старения и УФ-облучения видимых изменений внешнего вида материала не происходит. Наиболее заметные изменения внешнего вида материала и размеров образцов наблюдаются после циклов замораживания и оттаивания.

6. При прогнозировании долговечности минераловатных плит возможно использование основных позиций термофлуктуационной концепции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В пособие рассмотрены теоретические сведения о минераловатных плитах, их физико-механические, физико-химические и технологические свойства, а также технология изготовления. Рассмотрены экспериментальные методы исследования минераловатных плит и методы обработки экспериментальных данных, а также приведены практические сведения об эксплуатационных характеристиках минераловатных плит марки «Изоруф-Н» и «Изоруф-Б».

Данное пособие базируется на основных представлениях термофлуктуационной концепции, которая рассматривает отказ работы конструкции (разрушение химических связей), в связи с совместной работой энергии теплового движения атомов и работы внешней силы. Этот принцип был разработан С. Н. Журковым и в дальнейшем значительно доработан советскими и российскими учеными. Рассмотрение долговечности материалов, опираясь на эту концепцию, на данный момент, является достаточно трудоемким методом, но при этом имеет высокую точность. Ввиду высокой трудоемкости этот метод все еще находится в стадии развития и на сегодняшний день получил распространение только в постсоветских странах, в частности в России.

Результаты практических исследований демонстрируют, что комплексный подход к изучению эксплуатационных характеристик является наиболее оптимальным решением. Применение термофлуктуационной концепции повышает точность результатов, так как рассмотрение эксплуатационных параметров при различных диапазонах температур, позволяют давать гораздо более точный прогноз по долговечности материалов. Так рассматриваемые эксплуатационные показатели значительно ухудшаются при высоких температурах по отношению к невысоким температурам. Данная закономерность доказывает основной постулат термофлуктуационной концепции, что повышенные температуры вызывают значительно более высокие энергетические колебания межатомных связей и требуют для их разрыва значительно меньше механической энергии извне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Барабанщиков, Ю. Г.** Строительные материалы и изделия: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю. Г. Барабанщиков. – 5-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2014. – 416 с.

2. **Постовой, А. А.** Анализ качества сэндвич-панелей для обеспечения пожарной безопасности зданий / А. А. Постовой // Молодой исследователь Дона. – № 6(33). – 2021. – С. 77 – 83.

3. **Laboratory tests and modelling of mineral wool insulated steel sandwich panels** [Лабораторные испытания и моделирование стальных сэндвич-панелей с утеплением минеральной ватой] / A. Laukkarinen, J. Vinha, K. Kalbe, J. Kesti, T. Kalamees, E. Honkakoski // E3S Web of Conferences. – 2020. – V. 172.

4. **Пешкова, А. В.** О пешеходной нагрузке на крыши с теплоизоляцией из минераловатных плит и водоизоляционным ковром из рулонных материалов / А. В. Пешкова, А. М. Воронин // Промышленное и гражданское строительство. – № 3. – 2021. – С. 49 – 56.

5. **Simon, T. K.** Effect of water vapor on the compressive strength of a mineral wool insulation board [Влияние водяного пара на прочность на сжатие изоляционной плиты из минеральной ваты] / T. K. Simon, L. Mlinarik, V. Vargha // Journal of Building Physics. – 2015. – V. 39. – P. 285 – 294.

6. **Влияние сжатия на огнезащитные свойства минераловатной плиты при стандартном и углеводородном режимах пожара** / Е. Ю. Черкасов, С. А. Домрачев, А. А. Воронцова, А. В. Митько // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. – № 7(115). – 2021. – С. 97 – 101.

7. **Исследование различных комбинаций утепления пространства между стеной и сэндвич-панелью из минеральной ваты** / Ю. И. Валиахметова, К. В. Важдаев, В. А. Мартяшева и др. // Строительство и техногенная безопасность. – № 19(71). – 2020. – С. 27 – 35.

8. **Nagy, V.** Effect of built-in mineral wool insulations durability on its thermal and mechanical performance [Влияние долговечности закладных минераловатных утеплителей на их теплотехнические и механи-

ческие характеристики] / B. Nagy, T. K. Simon, R. Nemes // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2019. – V.1 39. – P. 169 – 181.

9. **Petrov, A.** Study of the dependence of equilibrium sorption humidity of heat-insulating products on temperature [Исследование зависимости равновесной сорбционной влажности теплоизоляционных изделий от температуры] / A. Petrov, V. Kupriyanov // E3S Web of Conferences. – 2021. – V. 274.

10. **Ярцев, В. П.** Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации : учебное пособие / В. П. Ярцев, О. А. Киселева. – Тамбов : Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2009. – 124 с.

11. **Nagy, B.** Energy and hygrothermal performance of built-in mineral wool thermal insulations [Энергетические и гидротермические характеристики встраиваемых теплоизоляционных материалов из минеральной ваты] / B. Nagy, T. K. Simon // MATEC Web Conf. – 2018. – V. 163.

12. **Желдаков, А. В.** Химическая деструкция минеральной ваты / А. В. Желдаков // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 5. – С. 26 – 33.

13. **Василенко, А. В.** Теплоизоляционный материал на основе отходов производства минеральной ваты / А. В. Василенко // Международный науч-техн конф молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : сб. материалов конференции. – Белгород, 2021. – С. 2913 – 2918.

14. **Сашин, М. А.** Прогнозирование и повышение долговечности и длительной прочности древесины в строительных изделиях и конструкциях : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / М. А. Сашин ; науч. рук. В. П. Ярцев ; ВГАСУ. – Воронеж, 2006. – 173 с.

15. **Киселева, О. А.** Прогнозирование работоспособности древесностружечных и древесноволокнистых композитов в строительных изделиях : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / О. А. Киселева ; науч. рук. В. П. Ярцев ; ВГАСУ. – Воронеж, 2003. – 208 с.

16. **Механизмы** элементарных актов в кинетике электрического разрушения полимеров / А. И. Слущер, В. Л. Гиляров, Ю. И. Поликарпов, Д. Д. Каров // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2007. – Т. 49, № 10. – С. 1790 – 1800.

17. **Характеристики** элементарных актов в кинетике механического разрушения полимеров / А. И. Слуцкер, В. И. Веттегрень, В. Л. Гиляров, Ю. И. Поликарпов // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49, № 9. – С. 1608 – 1617.

18. **Регель, В. Р.** Структурно-динамическая гетерогенность – основа физики разрушения твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т. 8, № 1. – С. 86 – 92.

19. **Ярцев, В. П.** Термоактивационные закономерности разрушения, деформирования и водопоглощения минераловатных плит / В. П. Ярцев, А. М. Дорофеев // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 604 – 607.

20. **Ярцев, В. П.** Влияние климатического старения на эксплуатационные свойства минераловатной плиты / В. П. Ярцев, В. М. Данилов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2022. – № 5(274). – С. 57 – 62.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. МИНЕРАЛОВАТНАЯ ПЛИТА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ .....	5
1.1. Общая классификация теплоизоляционных материалов ...	6
1.2. Основные виды минераловатных плит .....	8
1.3. Физико-механические свойства минераловатных плит ....	10
1.4. Физико-химические и технологические свойства .....	15
1.5. Технология производства минераловатных плит .....	17
1.6. Устройство теплоизоляции с применением минераловатных плит .....	23
2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИНЕРАЛОВАТНОЙ ПЛИТЫ .....	28
2.1. Экспериментальные методы изучения	28
2.1.1. Испытания на кратковременную и длительную прочность при поперечном изгибе .....	28
2.1.2. Испытания на долговечность при пенетрации .....	30
2.1.3. Определение коэффициента линейного теплового расширения .....	31
2.1.4. Камера для сушки, УФ-облучения и теплового старения .....	32
2.1.5. Испытание на сжатие после циклов замораживания и оттаивания .....	34
2.1.6. Испытания на водопоглощение и набухание .....	34
2.1.7. Определение коэффициента теплопроводности и коэффициента термического расширения .....	35
2.1.8. Методика проведения испытаний для определения модуля упругости .....	36
2.2. Обработка экспериментальных данных .....	36
2.2.1. Разброс экспериментальных результатов при определении прочности и долговечности .....	36

2.2.2. Определение физических и эмпирических констант графоаналитическим методом и расчет основных параметров работоспособности .....	37
2.2.3. Определение физических и эмпирических констант графоаналитическим дифференцированием .....	42
2.2.4. Статистическая обработка экспериментальных данных	43
3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ .....	45
3.1. Водопоглощение минераловатных плит .....	46
3.2. Термическое расширение минераловатных плит .....	51
3.3. Особенности работы на сжатие минераловатных плит после воздействия на них климатических факторов .....	52
3.4. Термофлуктуационные закономерности деформирования минераловатной плиты при сжатии .....	56
3.5. Закономерность разрушения при поперечном изгибе .....	63
3.6. Теплотехнические характеристики минераловатных плит	67
3.7. Термофлуктуационные закономерности деформирования минераловатной плиты при пенетрации .....	69
3.8. Основные тезисы по эксплуатационным параметрам минераловатных плит .....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	74
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	75



Учебное электронное издание

ЯРЦЕВ Виктор Петрович  
ДАНИЛОВ Владислав Михайлович

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ

Учебное пособие

Редактирование Е. С. Мордасовой  
Графический и мультимедийный дизайнер Н. И. Кужильная  
Обложка, упаковка, тиражирование Е. С. Мордасовой

**ISBN 978-5-8265-2683-5**



9 785826 526835

Подписано к использованию 16.11.2023.  
Тираж 50 шт. Заказ № 153

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Телефон 8(4752) 63-81-08  
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru