

**В. П. ЯРЦЕВ, А. В. СУЗЮМОВ, В. М. ДАНИЛОВ**

# **МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ**



**Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

**В. П. ЯРЦЕВ, А. В. СУЗЮМОВ, В. М. ДАНИЛОВ**

# **МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ**

Рекомендовано Научно-техническим советом  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»  
в качестве монографии

*Научное электронное издание*



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2024

УДК 674-419.3

ББК 38.35

Я79

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.**

Я79 Методика прогнозирования долговечности фанеры в строительных изделиях : монография / В. П. Ярцев, А. В. Сузюмов, В. М. Данилов. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 5,0 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2823-5

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

Предназначена для научно-технических работников, аспирантов и студентов, деятельность которых связана с изучением строительных материалов.

УДК 674-419.3

ББК 38.35

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

**ISBN 978-5-8265-2823-5** © Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2024

## ВВЕДЕНИЕ

---

Изучение отечественной и зарубежной литературы по испытаниям и применению фанеры в строительстве показывает, что фанера является одним из прогрессивных строительных материалов, нашедшим широкое применение в различных областях строительства и имеющим перспективу на будущее.

Ознакомление с работами проектных и строительных организаций, а также накопленный опыт использования фанеры для строительных целей подтверждают значительные технико-экономические преимущества фанеры перед пиломатериалами и широко известными в настоящее время листовыми древесными композитами.

Практическое осуществление строительных конструкций из фанеры, натурные наблюдения за ними и испытания показывают, что фанера является исключительно удобным, прочным и экономичным материалом, применение которого намного сокращает время производства работ, уменьшает количество отходов на строительной площадке и позволяет переносить ряд производственных процессов на механизированные предприятия строительной индустрии.

При эксплуатации фанера способна выделять вредные вещества, в частности формальдегид. В связи с этим были разработаны различные мероприятия: применение добавок, защитных покрытий и безопасных связующих, а также использование модификаторов, которые позволяют уменьшить или полностью устранить его выделение.

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.

В процессе изготовления и эксплуатации фанера находится под действием длительных нагрузок, которые приводят к ее деформированию и разрушению. При этом на нее действуют и другие факторы

(температурно-влажностные, агрессивные среды, атмосферные воздействия, солнечная радиация и т.д.), что также сказывается на процессе разрушения фанеры. Так, повышенная температура способствует ускорению любых процессов и реакций, а агрессивные среды ослабляют связи в материале.

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

Термофлуктуационная концепция, которая является основным стержнем рассматриваемых методик в монографии, воспринимает механическое разрушение или деформацию не как мгновенный процесс, а как развивающийся во времени. Здесь основным фактором разрушения является тепловое движение атомов, которое ослабляет межмолекулярные и межатомные связи, а приложенная нагрузка лишь ускоряет данный процесс.

В монографии приведены теоретические сведения о фанере, ее физико-механические, физико-химические и технологические свойства, а также примеры применения. Рассмотрены экспериментальные методы изучения фанеры, а также методы обработки экспериментальных данных. Приведены практические сведения об эксплуатационных характеристиках фанеры марок ФК и ФСФ. Таким образом, монография, кроме предоставления полезных практических данных об основных эксплуатационных характеристиках, формирует необходимые представления о современных и эффективных подходах к вопросам прогнозирования долговечности строительных материалов.

## 1. ФАНЕРА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

---

Фанера – конструкционный материал, получивший широкое применение в строительстве. В отличие от древесины, листы фанеры имеют большую ширину и, благодаря многослойной перекрестной структуре, характеризуются незначительными деформациями усушки в плоскости склеивания. Кроме того, небольшая толщина листов позволяет сравнительно легко придавать им криволинейную форму и изготавливать конструкции с криволинейной поверхностью, обладающие повышенной жесткостью.

По установившемуся к настоящему времени соотношению 1 м<sup>3</sup> фанеры заменяет в среднем 4 м<sup>3</sup> пиломатериалов. При этом следует отметить, что применение в строительстве фанеры, изготовленной из лиственных и некоторых мягких хвойных пород, позволяет экономить высококоротную древесину хвойных пород, высвобождая ее для использования в других отраслях народного хозяйства [1].

Перечисленные технико-экономические преимущества фанеры открывают широкую возможность использования ее для строительных целей – в несущих и ограждающих конструкциях жилых, общественных и сельскохозяйственных зданий, а также для опалубки и временных сооружений.

В диапазоне последних пятнадцати лет наибольший пик роста производства фанеры пришелся на период с 2010 по 2014 год, темпы роста колебались от 8 до 19%. Начиная с 2017 года наблюдается некоторый спад объемов производства, но тем не менее общемировой объем производства в 2019 году составил 156 млн м<sup>3</sup>. Крупнейшим производителем фанеры, занимающим почти четверть рынка, является Китай, объемы производства которого составляют 113,3 млн м<sup>3</sup>. На втором месте располагается США. Объемы производства в этой стране составляют 9,9 млн м<sup>3</sup>. Третье место занимает Россия, объемы производства которой составляют 4,1 млн м<sup>3</sup>. Таким образом, Россия занимает 2,6% от общемирового объема производства фанеры. Наибольший объем российского производства ориентирован на экспорт. Конъюнктура рынка такова, что производство и экспорт фанеры может стать весьма доходной статьей российского бюджета [2].

## 1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВИДЫ ФАНЕРЫ

Условное обозначение фанеры содержит: наименование продукции, марку, сочетание наружных сортов шпона, класс эмиссии, вид обработки поверхности, размеры и обозначение стандарта. В основу классификации положен ряд конструктивных и технологических признаков, определяющих эксплуатационные качества каждого вида фанеры.

Фанеру классифицируют:

1) по степени однородности:

- однородную – изготовленную из одной породы древесины;
- комбинированную – изготовленную из разных пород древесины;

2) в зависимости от содержания пороков в шпоне выделяют пять сортов, их обозначают буквами и цифрами, указывающими сорт лицевой и оборотной стороны рубашек: сорта E, I, II, III, IV – для лиственных пород; Ex, Ix, Iix, IIix, IVx сорта – для хвойных. При обозначении сорта сначала указывают сорт лицевого слоя, затем – оборотного;

3) по степени водостойкости клеевого соединения:

- повышенной водостойкости – склеенную фенолформальдегидными клеями (марка ФСФ);
- средней водостойкости – склеенную карбамидными клеями (марка ФК) и альбумино-казеиновыми клеями (марка ФБА);
- ограниченной водостойкости – склеенную казеиновыми и соевыми клеями (марка ФБ);

4) по степени обработки поверхности:

- шлифованную с одной стороны (1Ш);
- шлифованную с двух сторон (2Ш);
- нешлифованную (НШ);

5) по конструкции листа:

- равнослойную – изготовленную из шпона одинаковой толщины;
- неравнослойную – изготовленную из шпона разной толщины, при этом средний слой выполняется из более толстого шпона низкого качества, а наружные слои – из тонкого высококачественного шпона;
- диагональную – изготовленную из шпона, волокна рубашек которого направлены под углом  $45^\circ$  к волокнам серединок;
- звездообразную – изготовленную из шпона с направлением волокон в соседних слоях под углом  $30$  или  $60^\circ$ ;

б) по толщине:

- до 15 мм – листы;
- свыше 15 (до 45 мм) – плиты;

7) по числу слоев шпона различают трех, пяти и многослойную фанеру.

Новые стандарты ограничивают также максимально допустимую толщину шпона. Для фанеры лиственных пород наружные слои должны быть не толще 3,5 мм, а внутренние – 4 мм. Для фанеры хвойных пород толщина наружных и внутренних слоев не должна превышать 6,5 мм.

Различают следующие виды фанеры, применяемой в строительных изделиях: фанера общего назначения и специальные виды фанеры [3].

#### *Фанера общего назначения*

Фанеру общего назначения выпускают двух марок ФК и ФСФ длиной (шириной) 1200...3050 мм и толщиной 3...30 мм [4, 5].

#### *Специальные виды фанеры*

Березовая фанера – фанера, склеенная из трех и более слоев березового лущеного шпона. Данный вид фанеры выпускается трех марок: ФСФ-Э, ФК-Э и ФБА-Э. Она производится длиной 1270...2440 мм, шириной 1270...1525 мм и толщиной 3...18 мм.

Березовая фанера обладает высокой прочностью и красивой естественной фактурой благодаря качествам самой древесины [5].

Бакелизованная фанера – фанера, склеенная под большим давлением из березового шпона, предварительно пропитанного фенольной (бакелитовой) смолой. Основные отличия от фанеры общего назначения заключаются в ее более высокой плотности (до 1200 кг/м<sup>3</sup>), большей длине листов и более темной окраске – обычно красно-коричневого оттенка. Бакелизованную (бакфанеру) изготавливают длиной 1500...7700 мм, шириной 1250...1550 мм и толщиной 5...18 мм.

Бакфанеру выпускают следующих марок:

- ФБС, ФБС1 – наружные слои шпона пропитываются или намазываются фенолформальдегидными спирторастворимыми смолами, а внутренние слои шпона только намазываются;

- ФБВ, ФБВ1 – наружные слои шпона пропитываются или намазываются фенолформальдегидными водорастворимыми смолами, а внутренние слои шпона только намазываются;

– ФБС-А, ФБС1-А – наружные и внутренние слои шпона намазываются фенолформальдегидными спирторастворимыми смолами.

Индекс «1» у фанеры марок ФБС1, ФБВ1, ФБС1-А означает, что для наружных слоев используют шпон более низкого качества. Для фанеры марок ФБС, ФБВ, ФБС-А используют шпон толщиной 1,15...1,50 мм сорта II для наружных слоев и сорта III – для внутренних. Для фанеры марок ФБС1, ФБВ1, ФБС-А1 используют шпон сорта III толщиной 1,15 – 1,50 мм для наружных слоев и толщиной 1,5...2,0 мм – для внутренних [6].

Фанера хвойная конструкционная – фанера повышенной водостойкости и прочности, марки Ф-1, склеенная с помощью фенолформальдегидного клея. Она изготавливается длиной (шириной) 600...2440 мм и толщиной 5...19 мм [7].

Фанера, облицованная пленкой (ламинированная фанера), – фанера, покрытая с одной или двух сторон бумагосмоляной пленкой на основе фенолоформальдегидной смолы. Для придания шероховатости поверхности с одной или двух сторон может быть нанесен тисненый рисунок в виде сетки. При производстве такой фанеры кромки обязательно обрабатываются водонерастворимыми красками. Ламинированную фанеру выпускают двух марок ФОФ-Б1 (2) и ФОФ-Б-С1 (2) длиной 600...6000 мм, шириной 1200...2440 мм и толщиной 4...30 мм [8].

Фанера, ламинированная полипропиленовым листом «ТИТ», – лист из хвойной или березовой фанеры, ламинированный с двух сторон полипропиленовым листом толщиной 1,2...1,5 мм. Торцы материала обрабатывают полиуретановой пропиткой различных цветов. Фанера имеет марку ФПП и изготавливается из шпона с продольным расположением волокон.

На сегодняшний день производятся изделия длиной (шириной) 2440 мм и толщиной 18...21 мм [9].

Декоративная фанера – фанера, склеенная из листов шпона в процессе горячего прессования, облицованная пленочными покрытиями на основе синтетических смол в сочетании с декоративной бумагой или без нее. Отличительной особенностью изготовления декоративной фанеры является то, что процесс склеивания и отделки осуществляется в прессе за один цикл.

Декоративная фанера подразделяется:

1) по количеству облицованных сторон – на одностороннюю и двухстороннюю;

2) по отделке лицевых поверхностей – на глянцевую и полуматовую;

3) по виду облицовочного покрытия и смолам, применяемым для их изготовления, на марки:

– ДФ-1 – фанера с прозрачным покрытием (бесцветное или окрашенное), не укрывающим текстуру натуральной древесины;

– ДФ-2 – фанера с декоративной бумагой, имитирующей текстуру ценных пород древесины (текстурной бумагой) или другим рисунком;

– ДФ-3 – фанера с прозрачным покрытием повышенной водостойкости (бесцветное или окрашенное), не укрывающим текстуру натуральной древесины;

– ДФ-4 – фанера с покрытием повышенной водостойкости из декоративной бумаги, имитирующей текстуру ценных пород древесины (текстурной бумагой) или другим рисунком;

Для фанеры марок ДФ-1 и ДФ-2 при формировании покрытий используется карбамидомеламиноформальдегидная смола, а для марок ДФ-3 и ДФ-4 – меламиноформальдегидная смола.

Производят декоративную фанеру длиной 1220...2440 мм, шириной 725...1525 мм и толщиной 3...12 мм.

Для ее изготовления применяют шпон из древесины березы, ольхи, липы, осины, тополя. Для внутренних слоев фанеры марки ДФ-2 и ДФ-4 допускается применение шпона из древесины хвойных пород (сосны, ели и лиственницы).

Для лицевых слоев декоративной фанеры марок ДФ-1 и ДФ-3 всех толщин применяют шпон сорта I без ребросклеивания, кроме фанеры толщиной 1,5 мм, для которой используют сорт E. Для обратного слоя односторонней декоративной фанеры допускается применение шпона сорта III.

В качестве подслоя для односторонней или двухсторонней декоративной фанеры используют шпон любого сорта с починкой, причем в нем допускаются отверстия от выпавших сучков диаметром не более 7 мм. Для других внутренних слоев шпон также допускается любого сорта с починкой, с диаметром от выпавших сучков 8...20 мм [10].

Плиты фанерные – клееный материал, изготавливаемый из семи и более слоев шпона, склеенных синтетическими клеями на основе фенолформальдегидных и карбамидоформальдегидных смол. Этот материал отличается от фанеры общего назначения толщиной или схемой сборки формируемого пакета.

Фанерные плиты выпускают длиной 1220...2440 мм, шириной 1220...1525 мм и толщиной 8...68 мм. В зависимости от конструкции выпускают плиты следующих марок:

- ПФ-А – фанерная плита, в которой смежные слои шпона имеют взаимно перпендикулярное направление волокон древесины;
- ПФ-Б – фанерная плита, в которой каждые пять слоев с параллельным направлением волокон древесины чередуются с одним слоем шпона, имеющим перпендикулярное направление волокон;
- ПФ-В – в этой конструкции фанерной плиты все слои шпона имеют параллельное направление волокон, за исключением двух перпендикулярных слоев шпона, расположенных симметрично двум центральным слоям [9].

Плиты фанерные трудногорючие, атмосферостойкие марки ПФА-Т – выпускают двух видов – шлифованные и нешлифованные. Данный строительный материал производят длиной (шириной) 1525...1830 мм и толщиной 3...22 мм [11].

Трубы и муфты фанерные – клееный материал, получаемый методом свивания или прессования нескольких слоев шпона или двухслойной фанеры. В настоящее время в практике нашел применение первый способ. В производстве фанерных труб применяют березовый шпон, из которого изготавливают двухслойную фанеру форматом 1525×525 мм, склеенную бакелитовой пленкой марки А. Из синтетических смол используют смолу марки СФЖ-3011 – для нанесения по длине и на усевые поверхности заготовок и смолу марки СФЖ-309 – для склеивания звеньев труб на конус.

Выпускают фанерные трубы следующих марок:

- Ф-1 – фанерные трубы из двухслойной фанеры (сорт шпона III/III), предназначенные для транспортирования жидкости при рабочем гидростатическом давлении 0,6...1,2 МПа;
- Ф-2 – фанерные трубы из двухслойной фанеры (сорт шпона III/IV), предназначенные для транспортирования жидкости при рабочем гидростатическом давлении 0,3...0,6 МПа;
- Ф-3 – фанерные трубы из двухслойной фанеры (сорт шпона III/IV и IV/IV), применяемые как безнапорные.

Муфты для соединения фанерных труб изготавливают конусные и цилиндрические. Для производства конусных муфт используют двухслойную фанеру сорта III/III и III/IV, цилиндрических – сорта III/IV [12].

Огнезащищенная водостойкая – фанера, изготавливаемая из шпона лиственных и хвойных пород, пропитанного антипиреном и склеенного специальной карбамидомеламиноформальдегидной смолой марки КФ-МТ-В-3 с добавкой хлористого аммония в качестве отвердителя. Выпускают фанеру марки ОЗФ длиной 1525...3100 мм, шириной 1525 мм и толщиной 4...25 мм.

Термореактивная – фанера со средним слоем из электропроводного материала, нагреваемого до 60...80 °С. В качестве электропроводного материала выступает углеволокнистая бумага с сопротивлением 45...90 Ом.

Армированная фанера – клееное изделие, между слоями шпона которого проложена металлическая сетка или поверхность которого облицована с одной или двух сторон тонким слоем (0,4...0,6 мм) металла (сталь, цинк, алюминий). Поверхность металлических листов до склеивания очищают кислотами или обрабатывают песком. Для склеивания применяют модифицированные фенолформальдегидные клеи.

Профилированная фанера – изготавливается по технологии фанеры общего назначения, но в процессе прессования поперечному сечению листа придается сложная форма. Наиболее эффективна трапециевидальная или волнистая конфигурация профиля.

Профилирование фанеры обеспечивает высокую жесткость листа вдоль профиля. Для фанеры, используемой в качестве обшивочного материала, наиболее рационален с точки зрения требуемой жесткости и расходования материала профиль толщиной 6 мм с шагом 120 мм и высотой 40 мм.

Кровельная фанера – получается из обычных листов фанеры, покрываемых одним или двумя слоями толя.

Отделочная фанера – тонкие листы шпона из древесины мелкопористых лиственных пород (березы, ольхи, клена и т.п.) толщиной 0,08 мм, наклеенные на крафт-бумагу.

Композиционная фанера – композиция из двух или трех различных древесных материалов. Возможен вариант с серединкой

из полос, получающихся при форматной обрезке готовой продукции, промежуточных и наружных слоев делового шпона и композиция лущеного шпона с тонкими ДВП [13].

## 1.2. СОСТАВ И СТРУКТУРА ФАНЕРЫ

Само слово «фанера» пришло к нам из немецкого языка (нем. Furnier – шпон, фанера) и обозначает листовой древесный материал.

Фанера представляет собой слоистую клееную конструкцию, состоящую из трех и более листов древесины с взаимно перпендикулярным расположением волокон в смежных слоях [14].

Выделяют три типа изготовления фанеры [15]:

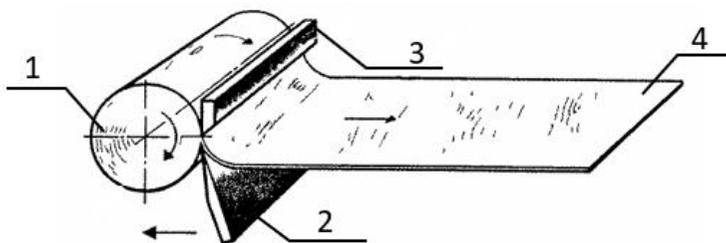
1. Пиленая – фанера, изготовленная путем распиливания пиловочника из древесины ценных пород на тонкие (около 5 мм) полосы. Но из-за большого расхода сырья и в результате низкой производительности пиленая фанера практически не производится.

2. Строганная – фанера из шпона толщиной до 3,5 мм, который получается путем строгания заготовки. Сейчас строганный шпон вырабатывается, как правило, из древесины лиственных пород. Производительность данной технологии высокая, однако уступает технологии лущения.

3. Лущеная – фанера из шпона толщиной 1,2...1,9 мм, полученного путем лущения фанерного кряжа (чурака). Сам процесс представляет собой срезание слоя древесины с вращающегося чурака одновременно по всей его длине (рис. 1.1). Полученное таким методом непрерывное полотно обрезается по формату листа и далее склеивается. Этот метод производства шпона является самым производительным и применяется в наше время для производства фанеры.

Таким образом, современная фанера представляет собой листовой материал, состоящий из трех и более слоев лущеного шпона, склеенного между собой фенолформальдегидными, карбамидными или белковыми клеями [16].

Слои подразделяются на наружные и внутренние. Первые в свою очередь делятся на лицевой и оборотный, качество которых и определяет качество листа фанеры. Лицевой слой содержит меньше пороков древесины и дефектов обработки, чем оборотный и внутренний. Фанера считается изготовленной из той породы древесины, из которой изготовлены ее наружные слои.



**Рис. 1.1. Схема лущения шпона:**

1 – бревно; 2 – нож; 3 – прижим; 4 – лента шпона

Шпон для производства фанеры изготавливают из древесины березы, ольхи, ясеня, ильма, дуба, липы, осины, тополя, клена, ели, сосны, пихты, кедра и лиственницы [17]. Новые стандарты ограничивают максимально допустимую толщину шпона:

- для фанеры лиственных пород наружные слои должны быть не толще 3,5 мм, а внутренние – 4 мм;
- для фанеры хвойных пород толщина наружных и внутренних слоев не должна превышать 6,5 мм.

Обычно фанера производится с нечетным количеством слоев, чтобы обеспечить сбалансированность конструкции, хотя выпускается и четырехслойная фанера, в которой два внутренних слоя имеют параллельное направление волокон [18].

Число слоев по обе стороны от среднего должно быть одинаково, и они должны иметь равную толщину, иначе лист может деформироваться. Чередующиеся слои должны быть параллельны, а соседние перпендикулярны, при несоблюдении этого возможно коробление. Большая часть фанеры толщиной менее 6 мм имеет трехслойную конструкцию, а фанера толщиной  $\geq 6$  мм имеет пять и более слоев. Увеличение количества слоев приводит к снижению деформативности, а также повышению жесткости и стабильности в размерах.

### 1.3. ПРИМЕНЕНИЕ ФАНЕРЫ

Одной из перспективных областей применения фанеры является строительство. Она применяется в деревянных сооружениях каркасного, сборно-щитового и передвижного типов и используется для обшивки стен и потолков.

### 1.3.1. Несущие конструкции жилых и общественных зданий

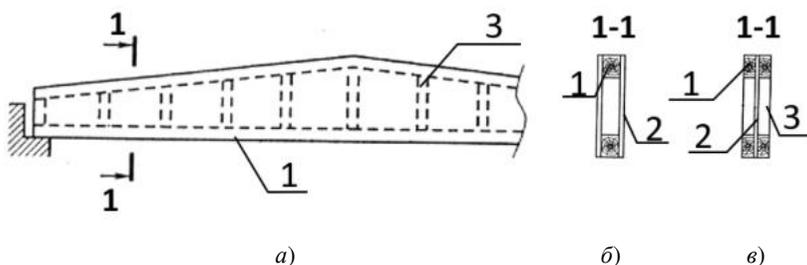
К настоящему времени в России и за рубежом разработано и осуществлено немало интересных решений с использованием фанеры в качестве элемента несущих конструкций:

- балки двутаврового, коробчатого или корытообразного сечения;
- рамы и арки коробчатого или двутаврового сечения;
- распорные своды кругового очертания;
- своды двойной кривизны и сферические купола;
- кровельные щиты;
- цилиндрические резервуары.

Кроме этого, фанеру применяют в качестве фасонки, накладок и прокладок в фермах, рамах и сводах.

Клефанерные балки бывают коробчатого и двутаврового сечения (рис. 1.2) [19]. По длине они могут быть постоянного и переменного сечения.

Стенки клефанерных балок изготавливают из фанеры толщиной 10...12 мм повышенной водостойкости. Направление волокон в наружных слоях фанеры следует принимать параллельным направлению волокон древесины поясов и продольным осям балки. В этом случае стенки работают в направлении наибольшей прочности и гибкости их сечений. Предварительно листы фанеры можно соединить по длине усовым соединением. Для этого кромки листов фанеры скашиваются (усуются), затем на ус наносится клей, и листы склеиваются между собой [20].

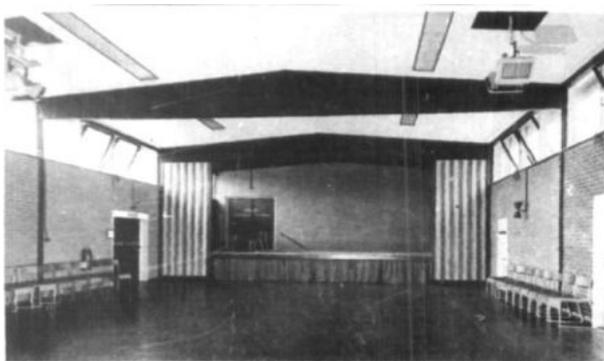


**Рис. 1.2. Клефанерная ребристая балка:**

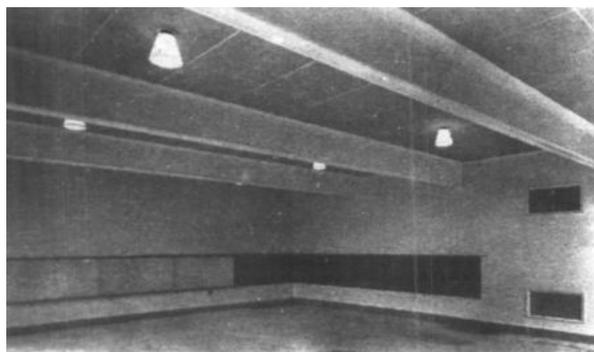
- a* – фасад; *б* – коробчатое сечение; *в* – двутавровое сечение;  
1 – клеедеревянный пояс; 2 – фанерная стенка; 3 – дощатое ребро

Клееные балки двугривного сечения с фанерной стенкой в России применялись в основном для покрытия цехов промышленных предприятий [21]. Склеивание деревянных и фанерных элементов балок производилось фенолформальдегидным клеем ЦНШС-2 с гвоздевой запрессовкой.

За рубежом, например в Англии, для перекрытий общественных зданий (школ, больниц, клубов) часто применяли балки коробчатого сечения, двускатные (рис. 1.3) и с параллельными поясами (рис. 1.4) из деревянного каркаса, оклеенного с двух сторон водостойкой фанерой толщиной 6...9 мм. Каркас разбивает на панели длиной 80...90 см с восходящими раскосами в крайних третях пролета. Пролет балок с параллельными поясами 6...7 м, двускатных – 12...13 м [22].



**Рис. 1.3. Балки двускатные коробчатого сечения**



**Рис. 1.4. Балки коробчатого сечения с параллельными поясами**

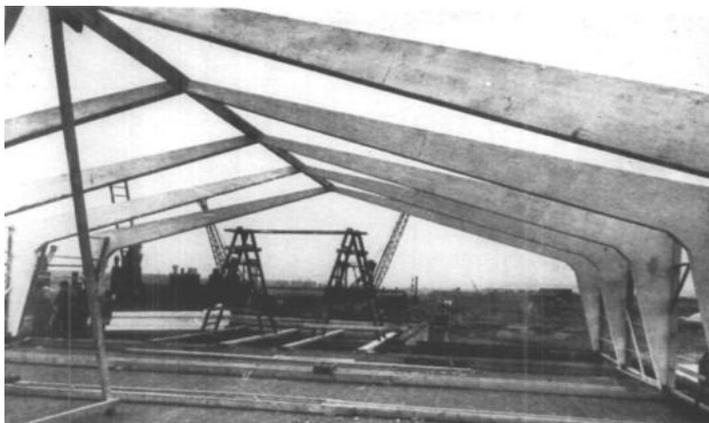
Особого внимания заслуживают клееные двутавровые балки с параллельными деревянными поясами и волнистой фанерной стенкой, главной особенностью которых является отсутствие каких-либо вспомогательных элементов для передачи скалывающих усилий от полок к стенке. Для изготовления балок с волнистой фанерной стенкой (рис. 1.5) в ФРГ предложен специальный агрегат, в котором непрерывно движущиеся доски поясов склеиваются ускоренным способом с фанерной стенкой, для этой цели в пазы, вырезанные в досках, подается непрерывная фанерная лента, которая под влиянием подающего усилия искривляется в пазах, принимая волнообразную форму. Отношение ширины паза к длине волны обычно принимается равным 1:12, толщина стенки колеблется в пределах 3...6 мм при высоте балок соответственно 140...380 мм, собственный вес балок на 1 пог. м составляет 2...7 кг.

Клееные фанерные балки с волнистой стенкой применяются для перекрытий общественных и сельскохозяйственных зданий.

Широко распространенными несущими фанерными конструкциями в практике зарубежного строительства являются рамы коробчатого сечения (рис. 1.6). Их достоинствами являются: легкость, транспортабельность, простота и малая трудоемкость в изготовлении и монтаже, изящный внешний вид и экономичность [23]. Рамы пролетом в свету 9...15 м состоят из деревянного каркаса, оклеенного с двух сторон водостойкой фанерой толщиной 4...6 мм.

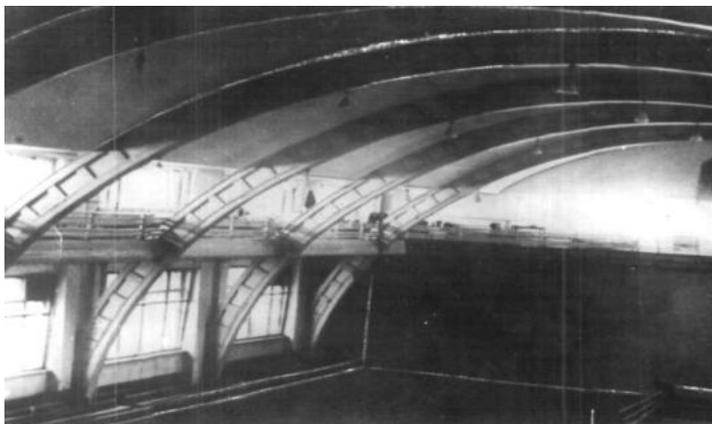


**Рис. 1.5. Балки с волнистой фанерной стенкой**



**Рис. 1.6. Трехшарнирные рамы коробчатого сечения**

Конструкции рамного и арочного типа бывают не только коробчатого, но и двутаврового сечения, например, в г. Новосибирске спортивный зал общества «Динамо» перекрыт арками двутаврового сечения с фанерными стенками (рис. 1.7) пролетом 22,6 м. Отношение стрелы подъема к пролету 1:2. Несмотря на то, что для стенок арок была применена обычная неводостойкая фанера, арки, эксплуатирующиеся свыше 20 лет, находятся в хорошем состоянии, по сравнению с конструкциями, имеющими закрытое коробчатое сечение.



**Рис. 1.7. Арки с фанерной стенкой**

Конструкции двутаврового сечения более удобны для наблюдения за состоянием клеевых швов, более просты в изготовлении и безопасны в противопожарном отношении. По архитектурным соображениям чаще применяются конструкции с закрытым сечением, особенно в общественных зданиях, где интерьер имеет первостепенное значение. Фанера в этом отношении является весьма удобным материалом, давая ровную, гладкую поверхность с красивым рисунком, температурно-влажностные условия в таких помещениях обычно не способствуют загниванию.

Оригинальным конструктивным решением является оклеивание брусчатых ферм фанерой с двух сторон (рис. 1.8). Это снижает расход древесины благодаря уменьшению количества элементов решетки, повышает несущую способность ферм и в то же время удешевляет их, по сравнению с обычными деревянными фермами, а небольшой вес ферм позволяет ставить их на легкие стены.

Способность листов фанеры принимать криволинейную форму позволяет широко использовать ее для сводов кругового очертания. В США для перекрытий общественных зданий проектировали клееные слоистые своды пролетом 4,9 м, состоящие из двух фанерных листов с прокладкой из картонной сотовой серединки толщиной 28,6 мм. Толщина верхнего листа фанеры 8 мм, нижнего – 6,3 мм. Листы фанеры размером 1220×5200 мм склеивают из двух частей посредством стыкования «на ус», распор свода воспринимается металлическими затяжками. В 1957 году в г. Москве был построен спортивный павильон размером в плане 30×14 м и высотой 7,3 м из криволинейных фанерных щитов кругового очертания толщиной 110 мм (рис. 1.9).



**Рис. 1.8. Брусчатые фермы, оклеенные водостойкой фанерой**



**Рис. 1.9. Спортивный павильон,  
перекрытый фанерными криволинейными щитами**

Преимуществом этой постройки является отсутствие сколь угодно существенной снеговой нагрузки (снег сдувается с гладкой поверхности фанерных арок). Продольными ребрами щитов служили клееные деревянные арки из брусков, к которым приклеивали листы березовой водостойкой фанеры шириной 1,5 м и толщиной 5...6 мм. Для обеспечения устойчивости между продольными гнутыми ребрами ставили фанерные диафрагмы. Для теплоизоляции в промежутке между листами фанеры были уложены пенополистирол или минеральная вата. Вес одного щита не превышал 200 кг. В коньке щиты скрепляли встык с помощью накладок. Благодаря использованию легких сборных фанерных конструкций здание было построено за 4,5 месяца, и его стоимость оказалась невысокой.

Широкое применение находят также и безреберные фанерные своды, построенные по аналогичному принципу. Этими сводами покрываются жилые дома и сельскохозяйственные постройки (зернохранилища, овощные погреба и т.п.). Сверху своды окрашиваются масляной краской или покрываются гидроизоляцией. Эксплуатация сводов более 10 лет показала их надежность и долговечность.

Более крупные сводчатые конструкции из фанеры были применены на строительстве товарного склада в г. Портленд, штат Орегон (США). Отдельные части свода (сегменты) (рис. 1.10) шириной 2,44 м и пролетом 18,3 м склеивали из листов фанеры толщиной 20,6 мм. Листы, образующие свод, предварительно соединяли в полосу длиной на весь пролет, затем полосы прибавляли гвоздями к верхним поясам металлодеревянных ферм, служивших диафрагмами [23].

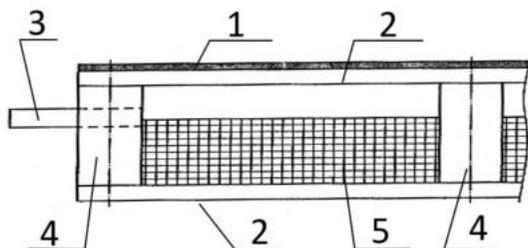


**Рис. 1.10. Элементы фанерного свода пролетом 18,5 м**

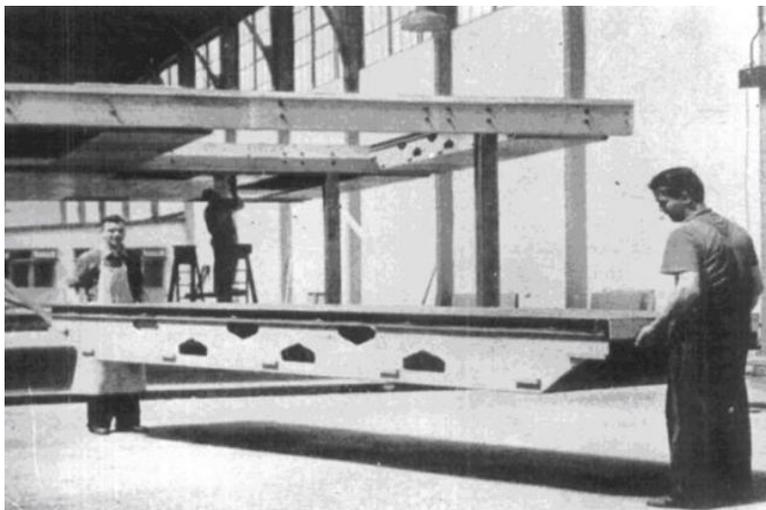
Панельные конструкции из фанеры совмещают функции ограждающих и несущих конструкций. К ним относятся панели стен и покрытия.

Клееные панели покрытия состоят из деревянного каркаса и прикрепленных к нему с двух сторон фанерных обшивок. Внутреннее пространство заполняется теплоизоляционным материалом. Обычно ширина панели 1,2...1,5 м, длина 3 и 6 м, а с клееными ребрами – более 6 м, толщина до 200 мм (рис. 1.11) [24].

Целесообразность применения клефанерных панелей определяется малой массой при высокой несущей способности, что обеспечивается совмещением в фанерной обшивке ограждающих и несущих функций.



**Рис. 1.11. Клефанерная панель покрытия:**  
 1 – рубероид; 2 – фанера; 3 – деревянные нагели;  
 4 – дощатые или клееные ребра; 5 – утеплитель



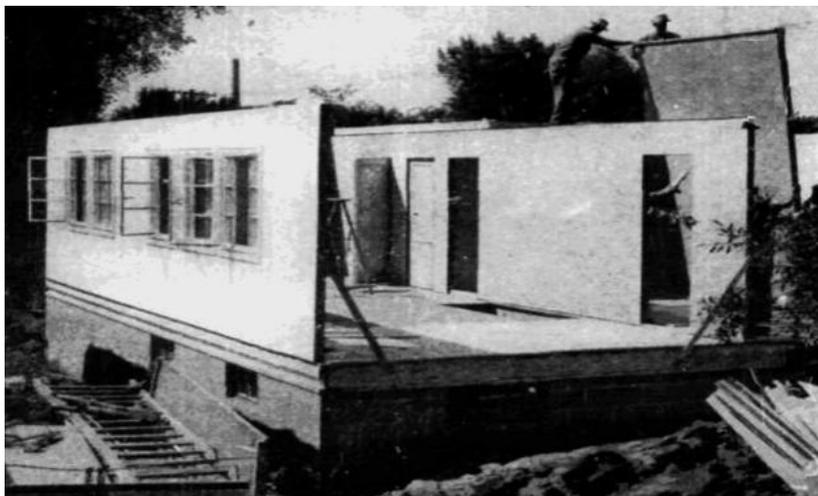
**Рис. 1.12. Клееный щит сборного междуэтажного перекрытия**

В Англии организовано заводское изготовление комбинированных щитов (рис. 1.12). В поперечном сечении щит представляет короб размером с деревянным каркасом  $1,17 \times 0,40$  м. Основную нагрузку несут днище из перфорированных листов твердых древесноволокнистых плит и вертикальные фанерные стенки толщиной 9,5 мм и высотой 40,6 см. Внутри щиты имеют утепление. Они обладают значительной жесткостью и в связи с этим широко применяются в строительстве школ, больниц, детских учреждений, санаториев.

### **1.3.2. Применение фанеры в жилищном строительстве**

За рубежом, особенно в США и Канаде, фанера широко применяется в жилищном строительстве, почти 30% фанеры, выпускаемой в США, идет на строительство коттеджей, внутреннюю отделку помещений и заводское домостроение.

На рисунке 1.13 показано сооружение сборного жилого дома из готовых крупных фанерных панелей. Наружные стеновые панели сделаны из фанеры толщиной 8,0 и 9,5 мм, приклеенной резорциновым клеем к ребрам сечением  $51 \times 76$  мм. Внутри панелей к наружным листам приклеивают слой стекловолкна толщиной 2,5 см, а к внутренним – древесноволокнистую плиту толщиной 2,5 см.



**Рис. 1.13. Сборка домов из крупных фанерных панелей**

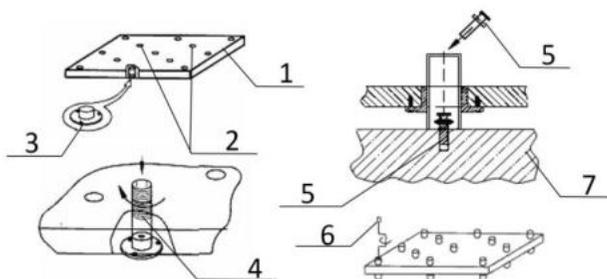
Между слоем стекловолокна и плитами остается воздушный зазор. Коэффициент теплопроводности такой стены  $0,131 \text{ ккал}/(\text{°C}\cdot\text{ч}^2)$ , т.е. в 1,5 раза меньше, по сравнению с обычными дощатыми оштукатуренными каркасными стенами. В то же время фанерные стены на 45% легче дощатых и на их установку 6 рабочих затрачивают 2 ч, а полностью (без внутренней отделки) дом собирается за один день.

Фанера, употребляемая в полах, служит обычно основанием для настилки паркета (рис. 1.14), плиток, линолеума и т.п. В этих случаях толщина фанерных листов берется не менее 16 мм. В последнее время фанера стала употребляться и для устройства чистого пола. Для этого к деревянным щитам толщиной 16 мм, изготовленным из низкосортной древесины и отходов, приклеивается шпон или фанера толщиной 3,2...3,5 мм из твердых лиственных пород (дуба, березы, клена, ясеня) так, чтобы направление волокон приклеиваемого шпона и планок щита было взаимно перпендикулярным. Щиты размером  $280 \times 1840 \text{ мм}$  укладываются «в шпунт». Фанерные полы также могут устраиваться и на бетонном основании, в этом случае полосы фанеры, предварительно обработанные с нижней стороны песком или наждачной бумагой, приклеиваются к основанию специальной битумной мастикой [25].



**Рис. 1.14. Паркет из фанеры**

В настоящее время появилась технология, получившая название «регулируемый пол» (рис. 1.15), благодаря которой можно сделать пол буквально за считанные дни и даже часы, ровно, красиво и без грязи. Предлагаемая конструкция, наиболее оптимальная при смене пола с невысокой высотой помещения, имеет ряд преимуществ: высота подъема пола не более 3 см; между бетоном и фанерой образуется воздушная прослойка, являющаяся дополнительной тепло- и звукоизоляцией; фанера не соприкасается с бетонным полом, вследствие чего не гниет и не вспучивается, увеличивая тем самым срок службы покрытия пола; отсутствуют мокрые процессы, а значит, нет мусора и грязи.



**Рис. 1.15. Элементы пола по «регулируемой фанере»:**

- 1 – водостойкая фанера; 2 – отверстия; 3 – пластиковая втулка;  
 4 – болт-стойка; 5 – дюбель-гвоздь; 6 – ключ для вращения болтов;  
 7 – ж/б перекрытие

Технология регулируемых полов заключается в том, что вместо лаг применяются пластиковые втулки с внутренней резьбой, вставляющиеся в предварительно засверленные отверстия в фанере. Во втулки вкручиваются пластиковые болты-стойки. Листы фанеры устанавливаются на основание, жестко закрепляются через болты металлическими дюбель-гвоздями и выравниваются путем вращения болтов специальным ключом, затем в разбежку настиляется второй слой фанеры, который крепится к первому саморезами. Испытания показали, что такие полы выдерживают нагрузку не менее  $3 \text{ т/м}^2$  (0,03 МПа), минимальный срок их службы – 50 лет, в том числе для административных и спортивных сооружений.

В жилищном строительстве фанера широко применяется также для изготовления щитовых дверей, состоящих из деревянного каркаса-обвязки, заполнения и обшивки. В качестве обшивки используется тонкая фанера, а заполнения – отходы фанерного производства.

Значительное количество фанеры употребляется для внутренней отделки помещений – кухонь, кабинетов, спален и т.д. На отделку помещений идет фанера из твердых лиственных пород: дуба, березы, ясени, клена, ореха. Для отделки кухонь и санитарных узлов широко употребляется декоративная, цветная фанера и фанера, покрытая водупорными пленками. Поскольку высота жилых помещений невелика, то при их отделке панелям придают вертикальное членение, что устраняет неприятное ощущение низкого потолка. Стыки фанерных листов обычно закладываются алюминиевыми и латунными кантами или покрываются тонкими фанерными рейками, в угловых сопряжениях применяются гнутые фанерные или металлические вставки.

Недавно для экранирования сотовой связи в помещениях группой японских разработчиков под руководством Хидео Ока, инженера-электронщика из университета Ивате (г. Мориока), был предложен новый материал, который назвали «противомобильная» фанера [26]. Технология получила название «магнитное дерево» – древесная масса замешивается с ферритовым порошком и в виде начинки помещается между двумя тонкими деревянными пластинами. Как показали испытания, кожух из такой фанеры толщиной 4 мм поглощает 97% излучений на стандартных частотах мобильной телефонии 900 и 1800 МГц. Увеличение толщины фанеры приводит к усилению экранирующих свойств.

Фанера применяется также и для устройства кровли. Листы фанеры, употребляемые для кровли, прибиваются прямо к дощатым стропилам простыми или оцинкованными гвоздями. При этом швы перекрываются внахлестку либо закрываются узкими полосками фанеры с предварительной промазкой битумной мастикой. Фанерные кровли обычно окрашиваются масляной краской или покрываются гидроизоляцией.

### 1.3.3. Сельскохозяйственные постройки из фанеры

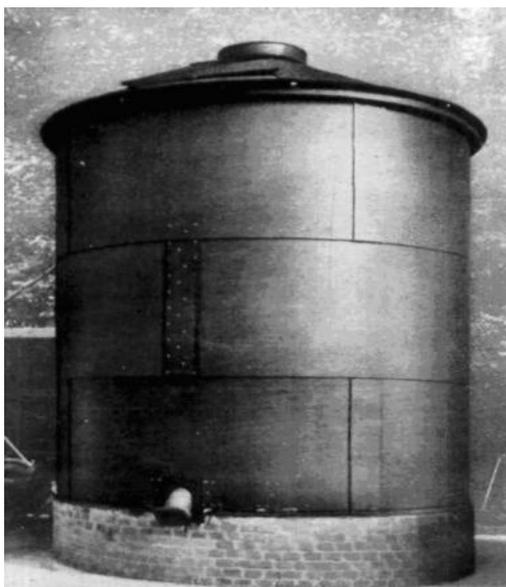
В сельском хозяйстве, где весьма часто приходится иметь дело с постройкой временных помещений и с переносом или перевозкой их на новые места (например, устройство помещений в полевых станах, в местах выпаса скота и т.п.), важны такие показатели, как возможность быстрой сборки-разборки и транспортабельность. По сравнению с дощатыми конструкциями, тяжелыми и не выдерживающими перевозок, фанерные конструкции очень выгодны. Выбор толщины листов фанеры для сельскохозяйственных построек [27], степень ее водостойкости, чистота обработки поверхности зависят от назначения построек. Для свинарников и овощехранилищ обычно берется фанера повышенной водостойкости, а для курятников или складов молока – фанера с чистой и ровной поверхностью.

Способность фанеры сравнительно легко образовывать криволинейные поверхности позволяет широко использовать ее для таких конструкций, как зернохранилище (рис. 1.16), силосные башни, топливные резервуары и т.д. В послевоенный период фанерные зернохранилища получили большое распространение в США и Канаде. К концу 1949 года в США насчитывалось 12 фирм, выпускающих различные фанерные зернохранилища вместимостью от 70 до 165 м<sup>3</sup>. Общая емкость фанерных зернохранилищ, закупленных только одной корпорацией по кредиту товаров широкого потребления, составила 290 тыс. м<sup>3</sup>.

Эксплуатация фанерных зернохранилищ более 10 лет, испытания и наблюдение за ними показали достаточную надежность и долговечность этих сооружений. В Англии были проведены испытания опытной силосной башни из фанеры, высотой 3,80 м и диаметром 3,10 м, смонтированной из водостойких фанерных колец шириной 1,37 м и толщиной 5...9 мм, имеющих манжеты для болтовых соединений (рис. 1.17).



**Рис. 1.16. Фанерные зернохранилища**



**Рис. 1.17. Опытная силосная башня из фанеры**

Склеивание колец производилось в поле токов высокой частоты, рабочие поверхности колец имели пленочные покрытия из бумаги, пропитанной смолой. Такое покрытие предохраняет фанеру от агрес-

сивных воздействий и, в случае хранения в башне зерна, не придает ему неприятного запаха. Конусообразная крыша башни сделана из фанеры толщиной 5 мм, склеенной карбамидной смолой. Наблюдение за башней в течение 1953–1954 гг. показало ее хорошие эксплуатационные качества и надежность в работе.

Помимо крупных с/х сооружений (коровников, птичников, свинарников и т.д.), в которых широко используется фанера, в США и других странах получили распространение различные мелкие сельскохозяйственные постройки – фанерные кормушки, курятники с фанерной кровлей, индюшатники и т.п. На рисунке 1.18 показан общий вид фанерного курятника, построенного на опытной сельскохозяйственной станции в США (штат Вирджиния).

Гипросельхозом были разработаны интересные решения конструкций с применением фанеры, в частности, клеефанерные ворота, запроектированные по предложению доктора технических наук А. Б. Губенко и инженера В. А. Замараева. Ворота состоят из деревянного каркаса, оклеенного с двух сторон водостойкой фанерой толщиной 4...6 мм. Жесткость таких ворот значительно превышает жесткость обычных ворот, к тому же они гораздо легче и дешевле. Производство таких ворот было организовано на Нелидовском домостроительном комбинате.



Рис. 1.18. Фанерный курятник

### 1.3.4. Опалубка из фанеры

В России водостойкая фанера применяется для опалубки, начиная с 1940 г.

Деревянная (дощатая) опалубка проще в изготовлении и значительно дешевле, но доски имеют небольшие размеры по ширине, поэтому в дощатой опалубке получается много швов, которые впоследствии при усушке древесины превращаются в щели, оставляющие следы на бетонируемой поверхности. Деревянные опалубочные щиты и деревянные формы на гвоздях расшатываются от ударов при распалубливании и обычно выходят из строя после пяти-, десятикратного использования.

Фанерная опалубка в известной степени свободна от указанных недостатков. Она обладает небольшим весом, достаточной прочностью и жесткостью (например, жесткость фанерного листа при изгибе в 50 раз больше жесткости равновесного стального листа). Большие размеры листов фанеры ведут к уменьшению числа стыков и швов в 75 раз, по сравнению с древесиной. Незначительное сцепление фанеры с бетоном облегчает распалубливание и способствует повышению оборачиваемости фанерной опалубки. Особенно целесообразно применение фанерной опалубки при бетонировании криволинейных поверхностей больших размеров.

Для повышения оборачиваемости и уменьшения сцепления с бетоном рабочую поверхность фанеры часто покрывают защитными пленками из пластмассы и смазывают легкими минеральными маслами, также фанеру пропитывают антисептиками. Такая обработка повышает оборачиваемость опалубки до 100 и более раз при использовании ее в сравнительно суровых условиях.

Стоимость фанерной опалубки несколько выше, чем дощатой, зато ее оборачиваемость в 2–3 раза больше. Экономия труда на фанерной опалубке по сравнению с дощатой при установке и разборке составляет 25...75%, а при отделке поверхности бетона 4...12%.

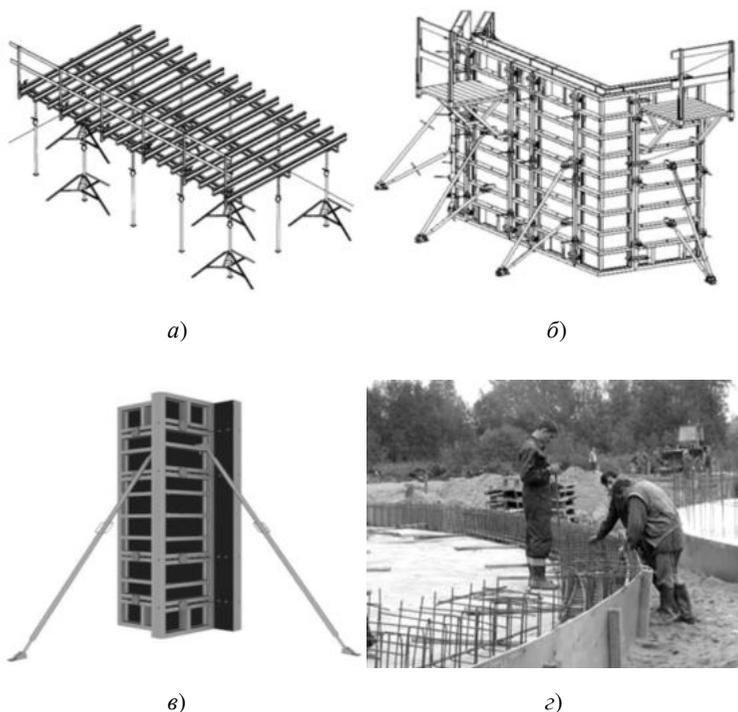
Высококачественная фанера, используемая в качестве палубы, может выдерживать более 100 циклов бетонирования, а алюминиевый каркас – более 350 циклов. Требуемая толщина фанеры зависит от предельно допустимой нагрузки, которая в свою очередь определяется видом цемента, температурой и плотностью бетонной смеси, высотой опалубочной формы и другими факторами.

Опалубки из фанеры почти полностью предотвращают пропадание влаги, а открытые поверхности накрывают влажной парусиной или пленкой либо опрыскиваются водой. Эти мероприятия поддерживают бетон во влажном состоянии в жаркую погоду в течение всего периода затвердевания. Для бетонирования в зимних условиях опалубка должна обеспечивать как сохранность влаги, так и удержание тепла. В этом отношении фанерные формы особенно хороши. При температуре между 4 и 1 °С фанерные формы достаточно надежны без применения изоляции, кроме как по углам и в местах открытых участков бетона, где потери тепла больше. При более низких температурах применяют дополнительные меры по теплоизоляции. Если фанерная опалубка повреждена до такой степени, что экономичному ремонту не подлежит, то палуба из фанеры может быть использована в качестве утильсырья, например, в качестве вставок в опалубку как рама жесткого основания, а также там, где опалубка не убирается.

Разработанные типовые конструкции инвентарной щитовой фанерной опалубки для бетонирования колонн, стен и перекрытий представлены на рис. 1.19.

Стеновая опалубка (рис. 1.19, *а*) – опалубочные щиты, собираемые в панели практически любых размеров и конфигураций. Благодаря широкому диапазону размеров щитов, а также наличию компенсирующего элемента и угловых щитов она может быть приспособлена к любой планировке. Палуба щитов (ламинированная фанера) конструктивно защищена герметиком и профилем, что позволяет увеличить срок службы фанеры и не допускать выступов на поверхности бетона.

Опалубка перекрытий (рис. 1.19, *б*) – набор опалубки любых размеров и конфигураций с возможностью комбинировать детали и компоненты в процессе работы. Данная конструкция позволяет производить опалубливание перекрытий любой конфигурации в плане прямоугольной, консольной и даже круглой. Причем для этого достаточно стандартного набора и не требуется ни одной специальной детали. Продольные и поперечные балки опалубки перекрытий можно телескопообразно монтировать, что обеспечивает быструю подгонку под любую конфигурацию, высоту и нагрузку перекрытий. На верхнюю деревянную часть балки накладываются листы фанеры, образующие опалубку для заливки бетона.



**Рис. 1.19. Опалубка с применением фанеры в качестве палубы:**  
*а* – стенная; *б* – для перекрытий; *в* – под колонны;  
*г* – для конструкции со сложной геометрией

Опалубка колонн (рис. 1.19, *в*) – комплект опалубки сечением от 20×20 см до 100×100 см. Облегченные опалубочные щиты для колонн позволяют быстро монтировать и снимать опалубочные конструкции. Для опалубки колонн применяются универсальные щиты размером 0,7×3,0 м, 0,8×3,0 м, 1,2×3,0 м и специальные шкворни. Сборка щитов в «мельницу» позволяет изменять размеры бетонируемых колонн от 0,2 до 1,0 м. Можно использовать и линейные щиты необходимых проектных размеров, которые соединяются с помощью металлических угловых элементов и центрирующих замков. Колонны оборудованы подкосами для установки, рихтовки и распалубки навесными подмостями для бетонирования. Ресурс использования щитов составляет 300 циклов при условии использования фанеры с двух сторон.

Для изготовления нетиповой, штучной, нестандартной продукции применяют опалубку с деревянными бортами из ламинированной фанеры. Это позволяет в короткие сроки переналадить производство на выпуск небольшой серии изделий, создать форму сложной геометрии (рис. 1.19, з).

Приведенные в настоящем разделе многочисленные примеры использования фанеры в строительных конструкциях и деталях показывают, что фанера может с успехом применяться в различных областях строительства, отличающихся подчас довольно суровыми температурно-влажностными условиями, при этом применение фанеры является экономически выгодным, поскольку сокращается время производства работ и объем пиломатериалов. Однако опыт эксплуатации фанерных конструкций недостаточно обобщен, поскольку появляются новые виды клеев, открывающие новые возможности использования фанеры в строительных конструкциях. Это обстоятельство побуждает потребителей проводить исследования долговечности фанеры, чтобы на их основе дать соответствующие рекомендации.

## **1.4. СВОЙСТВА ФАНЕРЫ**

### **1.4.1. Физико-химические и технологические свойства**

Фанеру можно охарактеризовать как материал, который легко поддается склеиванию, резанию, сверлению, покраске и лакированию, соединению гвоздями и винтами, а также быстро монтируется и легко комбинируется с другими материалами. Ее прочностные, теплопроводные и экологические характеристики гораздо выше показателей прочих древесно-плитных материалов, таких как ДСП, ДВП и МДФ. Кроме того, естественная текстура придает фанере изящный вид.

Свойства фанеры зависят от применяемой древесины и клея, которым слои древесины соединяются друг с другом, а также от взаимного расположения последних. Применение для склеивания шпона синтетических клеев (формальдегидов) позволяет придавать фанере высокую прочность и водостойкость.

Благодаря своим высоким эксплуатационным показателям и малой себестоимости в некоторых случаях фанеру гораздо выгоднее использовать при производстве, чем металл и пластик. Например, бакелизированная фанера, изготавливаемая только из березового шпона с пропиткой слоев спирто- и водорастворимыми смолами пред-

ставляет собой высокопрочный, упругий, водостойкий материал, способный конкурировать даже с низколегированными сталями. Помимо этого, бакелизированная фанера способна работать 10 – 15 лет при температурах от  $-50$  до  $+50$  °С, а также в воде и в тропическом климате.

Изготовление фанеры при температуре более  $+80$  °С (при которой погибают плодовые тела грибов, грибницы и споры), а также использование при производстве формальдегидных составляющих способствуют повышению высокой биологической стойкости материала. Наиболее эффективным способом увеличения биостойкости фанеры является введение в клей или шпон антисептиков. Химическая защита от загнивания одновременно защищает материал от жуков-точильщиков и других насекомых.

В наибольшей степени на прочность фанеры (особенно при сжатии) влияет влажность. Однако установлено, что фанера обладает меньшей влагоемкостью, чем древесина. Равновесной влажности древесины 15% соответствует равновесная влажность фанеры 12%.

Абсолютная влажность фанеры марок ФСФ и ФК должна быть 5...10%, а марки ФБА – 6...15%. Влажность фанеры, облицованной строганым шпоном, должна быть  $8 \pm 2\%$ .

Режим эксплуатации, при котором влажность фанеры не превышает 20%, обеспечивает конструктивную защиту фанеры от гниения. Это достигается полной водонепроницаемостью кровли, изоляцией конструкций от бетонных и каменных элементов, устройством пароизоляции и т.д.

Водостойкая фанера – более формоустойчивый материал, чем натуральная древесина, ее деформации набухания в плоскости листа незначительны. Тем не менее она обладает рядом существенных недостатков: при переменных влажностных воздействиях в ее клеевых швах возникают значительные внутренние напряжения, во влажной среде прочность фанеры снижается, а древесина шпонов загнивает, несмотря на наличие грибоустойчивых клеевых прослоек. Отмеченные недостатки устраняются полностью или в большей степени при модифицировании фанеры фенолоспиртами [28].

Внедрение огнезащищенной фанеры конструкционного назначения в гражданское строительство [29, 30] является весьма эффективным направлением снижения пожарной опасности объектов. Эффективность огнезащиты фанеры, как правило, достигается за счет приме-

нения комплексных антипиренов (огнезащитные составы на основе фосфоро-, азотно- и галогенсодержащих соединений) [31].

Значительно повышает свойства фанеры покрытие ее различными материалами:

- специальный состав на основе фенольной смолы, нанесенный на ее внешние стороны, увеличивает износоустойчивость фанеры;

- облицовывание стекловолкнистыми материалами позволяет получать высокую прочность при изгибе вдоль волокон наружных слоев шпона (не менее 60 МПа), устойчивость к истиранию, ударным нагрузкам и атмосферным воздействиям;

- покрытие поливинилхлоридными, поливинилфтористыми пленками, наряду с высокими эстетическими качествами, придает фанере свето- и водостойкость, устойчивость к действию химических реагентов, высокую твердость и стойкость к истиранию;

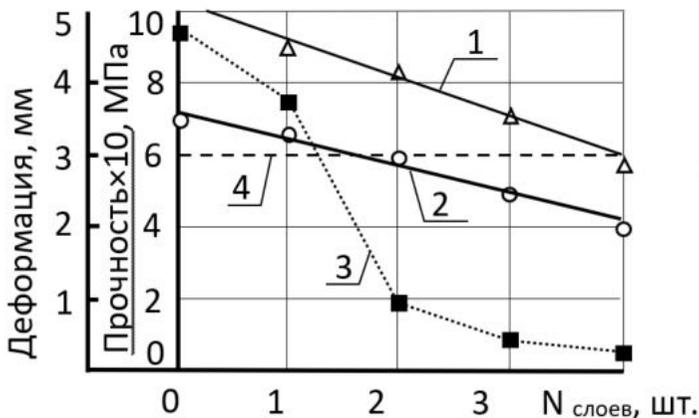
- облицовывание пробковой крошкой придает высокие тепло- и звукоизоляционные свойства и может применяться в строительстве для изготовления холодильных устройств;

- армирование листами металла и сетками позволяет повысить прочность и жесткость материала без заметного увеличения массы, а листовой резиной – повысить эластичность фанеры и уменьшить ее воздухо- и влагопроницаемость.

#### **1.4.2. Физико-механические свойства**

Несмотря на общность происхождения с цельной древесиной фанера как искусственно созданный листовый конструкционный материал отличается от древесины не только большей однородностью своего строения, стабильной формой, но и иными упругими и прочностными свойствами.

Большое влияние на прочность фанеры оказывают клеевые прослойки. Клеевое вещество, нанесенное в виде тонкой пленки на соединяемые поверхности, затвердевает и прочно связывает между собой склеенные материалы. При этом клей как бы образует мост между двумя кусками древесины и этот мост закрепляется и переплетается с древесиной с помощью капилляров. Таким образом, при работе с фанерой мы имеем весьма сложный слоистый материал [32], состоящий из древесного шпона, прочность которого зависит от направления волокон, клеевой прослойки и некоторой части шпона, капилляры которого заполнены клеем. Каждый из этих трех составных элементов принимает неотъемлемое участие в работе фанеры.



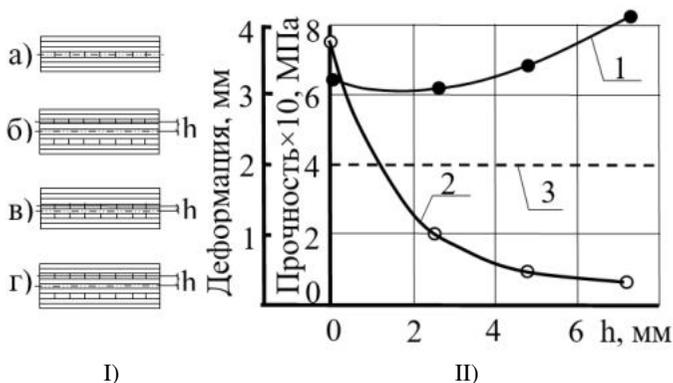
**Рис. 1.20. Зависимость свойств фанеры от количества поперечных слоев в структуре:**

- 1 – предел прочности при растяжении;
- 2 – предел прочности при сжатии; 3 – деформация;
- 4 – предел допустимой деформации (ПДД)

Вследствие перекрестной структуры фанера обладает меньшей анизотропией свойств, чем природная древесина. Модуль упругости при статическом изгибе вдоль волокон наружных слоев фанеры марки ФСФ составляет [33]: березовой – 9000 МПа; лиственничной – 7000 МПа; бакелизированной фанеры марки ФВС – 12 000 МПа.

Чем больше фанера имеет слоев – тем лучше, она при этом более стабильна в размерах, менее склонна к деформациям и обладает повышенной жесткостью. При увеличении числа слоев влияние пороков древесины становится менее ощутимым вследствие повышения однородности материала в продольном и поперечном направлениях. Помимо количества слоев (рис. 1.20), большое влияние на характеристики и структуру фанеры оказывает их месторасположение (рис. 1.21) [34].

Однако результаты испытаний, проведенных В. М. Хрулевым [35], показали, что с увеличением слойности разница в прочности на разрыв вдоль волокон у фанеры разных сортов уменьшается. Также выявлено, что влияние слойности на прочность фанеры в пределах одного сорта проявляется в большей степени в высококачественной фанере.



**Рис. 1.21. Влияние места расположения поперечных слоев в структуре фанеры (I) на ее свойства (II):**

$a - h = 0$ ;  $b - h = 2,4$  мм;  $v - h = 4,8$  мм;  $г - h = 7,2$  мм;

1 – предел прочности при изгибе; 2 – деформация; 3 – ПДД

Известно, что с уменьшением толщины шпона и увеличением количества слоев улучшаются механические свойства фанеры. Например, с уменьшением толщины шпона заметно возрастает прочность фанеры на растяжение. Этот рост более отчетливо виден у фанеры, склеенной фенолформальдегидными и резорциновыми смолами.

Зависимости прочностных и упругих свойств фанеры от ориентации волокон древесины по отношению к направлению нагрузки показывают, что прочность фанеры на растяжение и сжатие при угле наклона волокон (УНВ), равном  $45^\circ$ , является наименьшей, в то время как сопротивляемость сдвигу достигает максимума (рис. 1.22).

Прочность фанеры на скалывание зависит от ориентации сдвигающего усилия по отношению к волокнам наружных шпонов [36]. Установлено, что для фанеры из шпона толщиной 1,5 мм прочность на скалывание при направлении внешней силы под углом  $45^\circ$  к волокнам рубашек в среднем на 25% выше ее значения для случая, когда растягивающее усилие действует вдоль или поперек волокон наружных шпонов.

В то время как прочность деревянных элементов с пороками древесины снижается в 3 – 8 раз, прочность многослойной фанеры, склеенной из шпона с максимально допустимым содержанием пороков, снижается в 1,5–2 раза [37]. На рисунке 1.23 представлен график изменения предела прочности шпона с наличием здоровых сучков при растяжении, в зависимости от ширины образца.

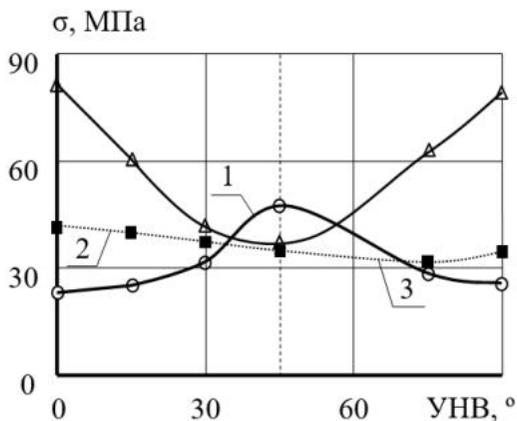


Рис. 1.22. Анизотропия прочности березовой фанеры:  
1 – при растяжении; 2 – при сжатии; 3 – при изгибе

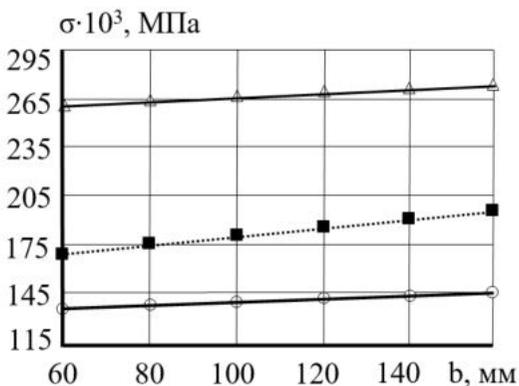


Рис. 1.23. Предел прочности шпона со здоровыми сучками при растяжении:  
Δ – Ø сучков 20 мм; ■ – Ø сучков 30 мм; ○ – Ø сучков 40 мм

Результаты работ по упрочнению сухого лушеного шпона показали, что технические свойства фанеры из лиственных и хвойных пород древесины могут быть существенно улучшены. При внедрении в производство новых технологических решений предел прочности при скалывании по клеевому слою при статическом изгибе и растяжении может быть увеличен на 15...20%, а плотность повышена на 10%.

В настоящее время ЦНИИФ проводит работы по созданию новых синтетических низкотоксичных смол, в том числе бесфенольных, обеспечивающих высокие технические показатели фанеры. Такая фанера найдет широкое применение в строительстве.

### **1.4.3. Санитарно-гигиенические характеристики фанеры. Борьба с токсичностью**

Существенным недостатком фанеры с применением фенолоформальдегидных смол является выделение фенола и формальдегида, вредно действующих на организм человека. Уровень токсичности фанерной продукции в последнее время является одним из основных показателей, характеризующих ее качество.

По степени выделения свободного формальдегида фанера разделена на две группы: Е-1 и Е-2 (табл. 1.1).

В России и ряде стран Западной Европы поставили запрет на использование в жилищном строительстве фанеры, которая выделяет в атмосферу формальдегид в количествах, превышающих 0,1 ppm (0,125 мг/м<sup>3</sup>).

В связи с этим разрабатываются различные мероприятия по снижению токсичности фанеры. Например, фанера группы Е-2 требует разных видов облицовки. В настоящее время ЦНИИФом разработан ряд фенолоформальдегидных смол с пониженным содержанием свободного фенола и формальдегида, которые обеспечивают требования стандартов на продукцию повышенной водостойкости.

АОЗТ ЦНИИ фанеры города Санкт-Петербурга разработала бесфенольную водостойкую диановую смолу СДЖ-Н на основе новых нетрадиционных и нетоксичных материалов [38]. Фанерная продукция на основе данной смолы обладает большей водостойкостью и атмосферостойкостью, по сравнению с продукцией на основе фенолформальдегидных смол, а по токсичности она соответствует классу Е-1 (табл. 1.2).

#### **1.1. Выделение свободного формальдегида из фанеры**

Группа фанеры	Е-1	Е-2
Содержание формальдегида на 100 г абс. сухой фанеры, мг	До 10	10...30
Выделение формальдегида из фанеры, мг/м <sup>3</sup>	0,12	0,12...1,00

## 1.2. Основные показатели фанеры в зависимости от вида смолы

Показатель фанеры	Фенольные смолы по ГОСТ 3961.1–96		Смола СДЖ-Н		
	СФЖ-3013	СФЖ-3014	ОАО «Фан-Плит»	ЗАО «Пермский»	ЗАО «Череповецкий ФМК»
Предел прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в воде в течение 1 ч, МПа	Не менее 1,5	Не менее 1,5	2,8	3,0	3,5
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Не менее 60		80	90	95
Выделение токсичных веществ, мг/м <sup>3</sup> : – фенол – формальдегид	По данным Госсанэпиднадзора РФ				
	0,35	0,25	Отс.	Отс.	Отс.
	0,45	0,35	0,003	0,003	0,003
Эмиссия формальдегида из готовой фанеры по методу «Перфоратор», мг/100 г	Не более 10		1,5	2,4	3,0

Освоение разработанной смолы СДЖ-Н позволит деревообрабатывающим предприятиям получать фанеру ФСФ класса Е-1, в том числе и большеформатную, а также исключить из технологического процесса высокотоксичный компонент фенол.

Воронежской государственной лесотехнической академией изучена степень снижения концентрации формальдегида в клеевых конструкциях при введении адсорбентов формальдегида [39]. В качестве адсорбентов наполнителей использовали отходы деревообрабатывающих производств. Полученные данные помещены в табл. 1.3.

К физико-механическому преимуществу введения в смолу отработанных наполнителей относится возрастание прочностных показателей, а к технологическому – использование в качестве традиционных отвердителей клеевых композиций.

Введение вышеперечисленных наполнителей способствует изготовлению готового изделия класса Е-1.

### 1.3. Химико-механические показатели фанеры при использовании различной рецептуры клеев

Химико-механические показатели	Рецепты клеев			
	Контроль без наполнителя	ДО № 1	ДО № 2	Каолин
Показатель предела прочности при скалывании по клеевому слою (после вымачивания в воде 24 ч), МПа	1,512	1,64	1,619	1,533
Содержание формальдегида, мг/100 г плиты	21,18	18,08	16,58	20,72

### 1.5. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФАНЕРЫ

Начиная с 1935 г. для склеивания фанеры стали применять синтетические смолы, и в ряде стран развернулись научно-исследовательские работы в области изучения долговечности клеев и сопротивляемости фанеры действию различных тепловлажностных факторов [40 – 48].

В ЦНИИСК проводились многочисленные испытания строительной многослойной фанеры, склеенной фенолформальдегидными, карбамидными и комбинированными белковыми клеями. Для исследования сопротивляемости фанеры действию природных факторов ее листы укладывали на крышу или прикрепляли вертикально к стенам здания, а образцы закапывали наполовину в грунт, помещали в чаны с водой, продолжительное время вымачивали в воде и попеременно вымачивали и высушивали в комнатных условиях. Каждые две недели образцы осматривали для установления состояния клеевого шва.

В результате проведенных испытаний было установлено, что наименее долговечной является фанера, склеенная казеиновым и альбуминовым клеями. Хорошие результаты показали образцы фанеры, склеенные фенолформальдегидными смолами, у них прочность клеевых швов существенно не снизилась во всех испытаниях.

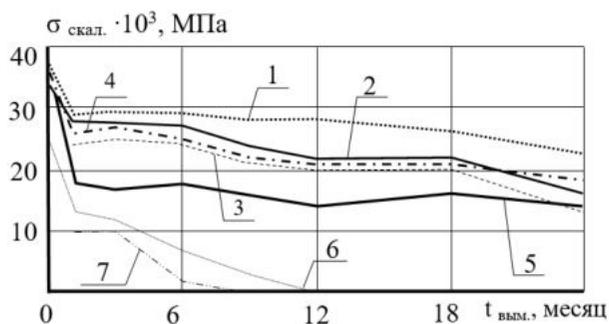
Обширные испытания были начаты в Мэдиссовской лесопромышленной лаборатории в США, где фанерные образцы выдерживали на открытом воздухе и подвергали воздействию различных темпера-

турно-влажностных факторов, создаваемых искусственно в лабораторных условиях [49].

Как показали результаты испытаний, при длительном вымачивании (рис. 1.24) произошло ослабление прочности склейки всех видов фанеры, сопровождавшееся повышением процента разрушения по древесине. При этом для большей части образцов понижение прочности клеевой прослойки происходило медленнее, чем понижение прочности древесины.

В условиях переменной влажности воздуха процент разрушения соединений по древесине оказался ниже, чем в опытах с постоянной высокой влажностью воздуха, что является следствием быстрого разрушения клея при действии переменных факторов.

В 1939 году одна из крупнейших фирм США по производству синтетических клеев «Борден компани» (Нью-Йорк) начала обширные испытания фанеры для определения долговечности соединений на синтетических смолах. Результаты испытаний, продолжавшиеся более 16 лет, показали, что разрушение фанеры на открытом воздухе происходит не по клею, а по слою древесины, непосредственно прилегающему к клеевому шву. Чем плотнее древесина, тем сильнее напряжения на границе клеевой пленки. Толщина шпона оказывает здесь весьма существенное влияние – образцы, склеенные из более толстого шпона, начинали расслаиваться гораздо раньше, чем из тонкого.



**Рис. 1.24. Зависимость прочности склейки от продолжительности вымачивания в воде комнатной температуры фанеры, склеенной:**

- 1 – МФС-1 с меламином; 2 – вакуумированной;
- 3 – не вакуумированной; 4 – МФС, С-1; 5 – клеями альбумино-казеиновыми;
- 6 – клеями казеино-альбуминовыми

Изменчивость показателей прочности клевого шва зависит в основном от свойств древесины, клеевой прослойки и граничной плоскости между древесиной и клеем [50, 51]. В зависимости от того, как будет происходить разрушение – по древесине, по клею или по древесине-клею, влияние одного из указанных факторов будет преобладающим.

Опыт показывает, что изменчивость результатов испытаний при разрушении по древесине меньше, чем при разрушении по клею, и особенно по древесине-клею. Это дает основание полагать, что наибольшей изменчивостью обладает граничная плоскость между древесиной и клеем [52 – 54], свойства которой зависят от физических и химических факторов последних.

Уменьшение площади клевого шва путем сближения отверстия и пропилов, вследствие неравномерности распределения напряжений, дает незначительный эффект по длине клевого шва.

Результаты испытаний фанеры на попеременное вымачивание–высушивание показали [55], что это испытание гораздо более суровое, чем простое вымачивание, и что механические воздействия, вызванные попеременным вымачиванием–высушиванием, оказываются разрушительнее, чем растворяющее и гидrolитическое действие воды. Попеременное вымачивание–высушивание по характеру воздействий близко к условиям выдерживания фанеры на открытом воздухе. Правда в первом случае отсутствуют такие факторы, как облучение солнцем, замораживание и т.п. Однако по сравнению с продолжительным вымачиванием, попеременное вымачивание–высушивание оказывается наиболее эффективным.

Длительное воздействие на фанеру различных неблагоприятных факторов оказывает значительное влияние не только на прочность склейки, но и на показатели прочности и упругости фанеры при растяжении и сжатии. Как установлено исследованиями В. М. Хрулева [56], эти показатели снижаются не только за счет ослабления древесины, но также и за счет уменьшения той доли прочности фанеры, которая обеспечивалась монолитностью соединения слоев. Следовательно, чем выше качество склейки, тем меньше будет снижаться прочность фанеры при воздействии различных температурно-влажностных факторов и тем меньше будут деформироваться конструкции, находящиеся на открытом воздухе при изменении температуры и влажности воздуха. Снижение прочности фанеры от действия температурно-

влажностных факторов следует учитывать при расчете фанерных конструкций [56 – 58].

Сопоставление результатов длительных испытаний фанеры позволяет сделать следующие выводы:

- для обеспечения долговечности фанерных конструкций, находящихся на открытом воздухе, должна применяться фанера, склеенная высококачественными фенолформальдегидными смолами. При этом не исключается появление трещин в рубашках фанеры. Для уменьшения трещинообразования в рубашках водостойкой фанеры, возможно, следует применять более тонкий шпон;

- для употребления в несущих конструкциях, находящихся под укрытием, но не защищенных от атмосферных влияний (повышенная влажность воздуха, низкая температура и т.п.), пригодна фанера, склеенная менее качественными фенолформальдегидными, а также карбамидными смолами, как с усиливающими добавками, так и без добавок. Использование фанеры, склеенной альбумино-казеиновыми клеями, в подобных случаях не может быть рекомендовано ввиду возможности случайного увлажнения и загнивания клеевой прослойки;

- для конструкций и сооружений, находящихся длительное время в воде, может применяться фанера, склеенная только синтетическими клеями при условии достаточно хорошей защиты от биологических и механических воздействий на древесину. Необходимо учитывать, что механическая прочность при длительном вымачивании снижается в значительной степени, в силу чего наилучшим типом фанеры для подводных сооружений является бакелизированная фанера. Рубашки этой фанеры пропитаны смолой, вследствие чего водопоглощение ее намного меньше, по сравнению с обычной рядовой фанерой, а снижение механической прочности при длительном вымачивании происходит в значительно меньших размерах;

- длительное воздействие на фанеру различных неблагоприятных факторов оказывает значительное влияние не только на прочность склейки, но и на показатели прочности и упругости фанеры при растяжении и сжатии. Как установлено проведенными исследованиями, эти показатели снижаются не только за счет ослабления древесины, но также и за счет уменьшения той доли прочности фанеры, которая обеспечивалась монолитностью скрепления слоев. Следовательно, чем выше качество склейки, тем меньше будет снижаться прочность фанеры при воздействии различных тепловлажностных факторов, и тем

меньше будут деформироваться конструкции, находящиеся на открытом воздухе.

Приведенные выше сведения об испытаниях фанеры на долговечность показывают, что интерес к фанере как материалу, имеющему широкие перспективы для использования в различных отраслях промышленности и строительства, непрерывно возрастает. При этом совершенствуются методы испытаний, а также разрабатываются принципиально новые способы оценки долговечности фанеры и качества клеевых соединений.

## **1.6. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ**

Применяя фанеру в конструкциях, находящихся в естественных условиях, важно знать, сколько времени она будет удовлетворять эксплуатационным требованиям. Это необходимо для определения долговечности и капитальности конструкций и сооружений в целом. Наиболее достоверные сведения в данном случае можно получить лишь путем проведения длительных испытаний фанерных образцов и конструкций в предполагаемых условиях их эксплуатации [56]. Эти данные составляют основу, из которой можно исходить при оценке долговечности фанерных конструкций.

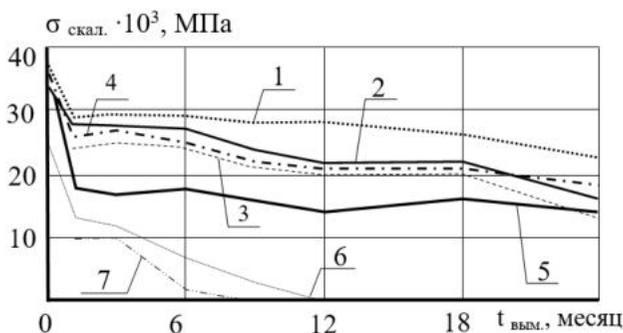
Длительные испытания фанеры служат основным, наиболее надежным критерием сравнения с более простыми ускоренными методами испытаний. В настоящее время имеются данные длительных испытаний (продолжительностью более 10 лет) [56] основных типов клеев – синтетических, животных, растительных и неорганических. Эти данные составляют основу, из которой можно исходить при оценке долговечности фанерных конструкций, и нуждаются в поправках, связанных с появлением новых видов клеев и улучшением старых марок.

Наиболее достоверными, с точки зрения потребителя, являются длительные испытания фанеры в естественных условиях. Однако результаты их справедливы лишь для данной местности и для определенного времени. Поэтому, стремясь поставить испытания на научную основу, исследователи часто абстрагируются от естественных условий, заменяя их отдельно взятыми факторами, действующими в строго определенных границах, контролируемых с помощью приборов. Многие считают, что такая методика испытаний является наилучшей,

так как каждый отдельный фактор, будучи изолирован от влияния других составных факторов погоды, может быть тщательно изучен и проверен.

Однако работа во многих отраслях науки показала, что два или более явно независимых фактора, действующих совместно, часто дают результат, отличный от результата, который получается, если каждый фактор действует отдельно. А в природных условиях многие факторы взаимосвязаны, например температура и влажность воздуха. Кроме того, невозможно учесть все факторы, составляющие климат (погоду) в том или ином районе. Поэтому целесообразность проведения лабораторных испытаний заключается не в том, чтобы искусственным путем воспроизвести действие погоды, а чтобы изучить частные случаи эксплуатационных условий [52, 55, 56], например – длительное вымачивание (работа затопленных понтонов и переправ), попеременное вымачивание и высушивание в комнатных условиях (эксплуатация полов и т.д.) (рис. 1.25).

В ранних работах проблема долговечности рассматривалась на основе представлений классической механики о пластических деформациях. При этом разрушение твердых тел считалось критическим событием, наступающим, когда действующие в материале напряжения достигают некоторой предельной величины.



**Рис. 1.25. Зависимость прочности склейки пятислойной фанеры от продолжительности попеременного вымачивания–высушивания в комнатных условиях, склеенной:**

- 1 – С-1; 2 – МФС-1 вакуумированный; 3 – МФС-1 не вакуумированный;
- 4 – С-35; 5 – МФС-1 с меламином; 6 – альбумино-казеиновый;
- 7 – казеино-альбуминовый

Впоследствии долговечность стали рассматривать как часть общей теории надежности, и ее расчеты проводились с использованием математического аппарата теории вероятностей, а также теории множеств. Сложность этого подхода заключается в ограниченных возможностях получения достаточного статистического материала.

Большой вклад в изучение долговечности фанеры и древесины внес В. М. Хрулев. Им была изучена долговечность клеевых соединений по данным ускоренного теплового старения.

Говоря о том, что на реакции деструкции клея влияет множество побочных факторов, В. М. Хрулев делает вывод, что их объединяет общая зависимость скорости процессов от температуры:

$$k = \alpha e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1.1)$$

где  $k$  – константа скорости реакции,  $\text{с}^{-1}$ ;  $E$  – энергия активации или средняя избыточная энергия молекул, вступающих в элементарный акт реакции, кал/моль (кДж/моль);  $R$  – универсальная газовая постоянная, кал/К (кДж/(моль·К), моль;  $T$  – абсолютная температура, К;  $\alpha$  – предэкспоненциальный или частотный фактор, примерно соответствующий частоте колебаний молекул в тепловом процессе,  $\text{с}^{-1}$ .

Преобразуя уравнение (1.1) в уравнение (1.2), он получает формулу, которую можно использовать для прогноза долговечности клеевых соединений:

$$\lg \tau = \lg \frac{1}{K} = \frac{E}{2,3RT} - \lg a, \quad (1.2)$$

где  $\tau$  – время изменения прочности клеевого соединения до заданной величины.

Оценка долговечности В. М. Хрулева производилась следующим образом. Строился график (рис. 1.26) изменения прочности клеевого соединения при различных постоянных температурах, действующих в течение более или менее продолжительного времени.

Параллельно оси абсцисс на уровне, соответствующем заданной прочности, проводилась прямая, отсекающая от кривых на графике участки с возрастающими абсциссами. Значения  $\lg \tau$  (4–5 точек) по данным рис. 1.26 откладывали на графике (рис. 1.27), построенном в координатах  $\lg \tau - 103/T$ . Если они ложатся на прямую, формула (1.1) приме-

нима. По графику (рис. 1.27) или аналитически определяют параметры, входящие в уравнение (1.2) и, таким образом, узнают время снижения прочности до заданной величины (долговечность соединения).

Уравнение (1.2) используют не только для графического, но и для аналитического экстраполирования данных ускоренного старения, причем в отдельных случаях может не приниматься во внимание некоторое искажение нормального процесса термической деструкции, вызванное влиянием побочных факторов.

Для оценки долговечности выводился переводный коэффициент по формуле (1.3), который в дальнейшем логарифмировался (формула (1.4)).

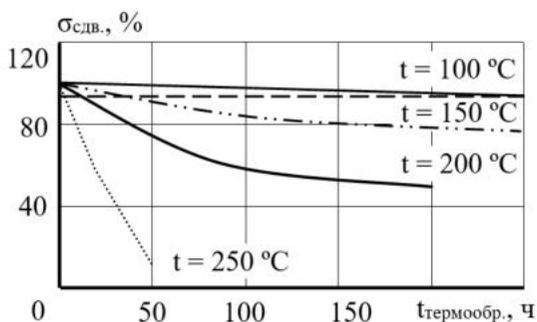


Рис. 1.26. Изменение прочности клеевых соединений образцов при термообработке

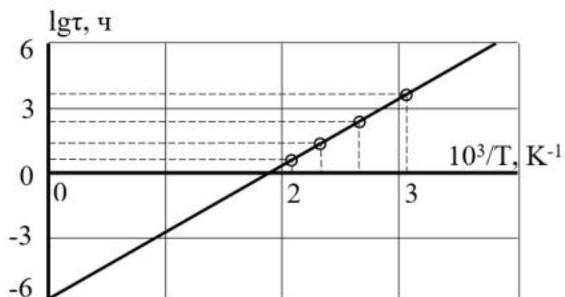


Рис. 1.27. Зависимость логарифма долговечности клеевого соединения стальных образцов от температуры экспонирования при заданном снижении прочности соединения до 95%

Определив продолжительность снижения какого-либо показателя до заданной величины по данным ускоренного испытания ( $\tau_y$ ) делим его на величину  $c$  получали предполагаемую долговечность  $\tau_3$ :

$$c = \frac{K_3}{K_y} = \frac{\alpha e^{-\frac{E}{RT_3}}}{\alpha e^{-\frac{E}{RT_y}}} = e^{\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_3} \right)}, \quad (1.3)$$

где  $K_3$ ,  $T_3$  – константа скорости реакции, температура в условиях эксплуатации;  $K_y$ ,  $T_y$  – константа скорости реакции, температура при испытаниях на ускоренное старение при повышенной температуре.

$$\lg c = \frac{E}{2,3R} \left( \frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_3} \right), \quad (1.4)$$

где  $E/2,3R$  – тангенс угла наклона прямой (рис. 1.28).

На рисунке 1.28 показаны кривые ускоренного теплового старения, полученные В. М. Хрулевым в результате испытаний образцов из березовой фанеры. Образцы выдерживали в шкафу при температуре 50, 60, 70 и 100 °С, затем увлажняли в воде комнатной температуры и испытывали на прочность.

По экспериментальным точкам строили кривые вида

$$y = e^{-bx}, \quad (1.5)$$

где  $y$  – относительная прочность клеевых соединений;  $x$  – продолжительность нагревания.

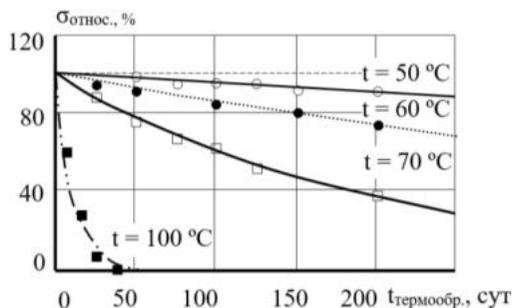


Рис. 1.28. Изменение прочности клеевых соединений фанеры при термообработке

Логарифмируя эти функции при значениях относительной прочности 0,9; 0,8; 0,6, получали зависимость логарифма долговечности от температуры ускоренного старения (рис. 1.29). График позволяет установить, на сколько суток экспонирования изделий при данной температуре прочность клеевых соединений снизится до заданной величины. Точность прогноза долговечности во многом зависит от того, насколько обоснованно установлена величина допустимого снижения прочности. В нагруженных соединениях эта величина определяется запасом прочности или условиями предельного состояния. При этом должна быть установлена связь между коэффициентом длительности нагружения и условиями работы клеевого соединения.

В ненагруженных соединениях допустимое снижение прочности определяется условиями сохранения формы изделия или устанавливается с расчетом, чтобы остаточная прочность была достаточной для восприятия влажностных напряжений. По опыту стандартизации методов испытаний фанеры остаточная прочность клеевых соединений при длительном тепловом старении не должна быть ниже 0,15 [59].

При экстраполяции данных ускоренного теплового старения важное значение имеет наклон прямых (рис. 1.27, 1.29), зависящий от энергии активации процесса деструкции. По величине энергии активации можно судить о разрушении химических или физических связей в соединении.

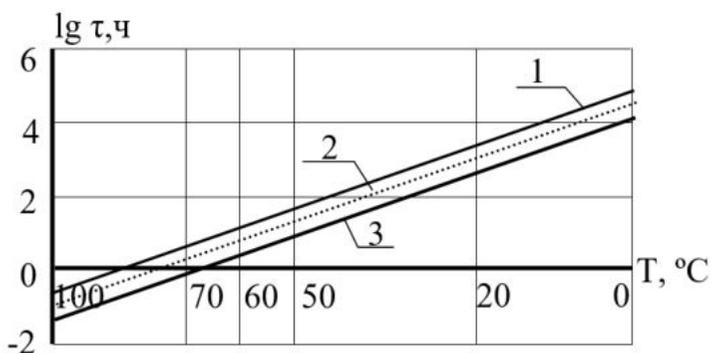


Рис. 1.29. Зависимость логарифма долговечности клеевого соединения фанеры от температуры среды при снижении прочности соединения до 0,6 (1); 0,8 (2) и 0,9 (3) от первоначальной

В частности, значение энергии активации, подсчитанное по данным рис. 1.29, составляет 22,8 ккал/моль (95,46 кДж/моль), что свидетельствует о химической деструкции карбамидного полимера, поскольку энергия физических связей не превышает 10 ккал/моль (41,87 кДж/моль). Когда соединения разрушаются преимущественно по древесине (при испытании образцов, склеенных фенолформальдегидными и резорцино-формальдегидными клеями), энергия активации, определенная по графику логарифма долговечности, достигает 29...31 ккал/моль (121,41...129,79 кДж/моль), что соответствует значениям энергии активации термической деструкции целлюлозы и ее производных.

Экстраполируя данные ускоренных испытаний на область температур, близких к нормальной, можно судить о предполагаемой долговечности клеевых соединений в реальных условиях эксплуатации, а зная фактическое снижение прочности клеевых соединений за некоторый период эксплуатации, – оценить точность прогноза.

Несмотря на близость (в ряде случаев) фактической и прогнозируемой долговечности клеевых соединений, следует признать, что приведенные сведения можно рассматривать лишь как предпосылки для более всестороннего исследования. Необходимо учитывать большее число факторов, влияющих на результаты длительного и ускоренного старения. В частности, нельзя пренебрегать изменением характера разрушения клеевых соединений в процессе старения (по клею или по древесине). При разрушении преимущественно по древесине наклон экстраполяционной прямой будет зависеть от энергии активации деструкции целлюлозы. Но в процессе испытаний характер разрушения может измениться, вызывая разрушение преимущественно по клею. При этом наклон прямой должен измениться вследствие изменения энергии активации.

В другом случае – при ускоренном старении соединение может разрушаться только по клею, а при длительном экспонировании в нормальных условиях изменение прочности соответствующих соединений будет зависеть преимущественно от свойств древесины. Здесь также возможно расхождение данных прогноза и фактической долговечности.

Экстраполируя данные ускоренного старения на область нормальных температур, трудно, а порой и невозможно учесть сезонное изменение влажности воздуха (речь идет только о закрытых помеще-

ниях). Между тем соединения чувствительны к изменению влажности воздуха, поэтому в зависимости от содержания влаги в воздухе, а соответственно в древесине, процесс старения может замедляться или ускоряться.

Ивановым Ю. М. также были сделаны попытки в изучении длительной прочности фанеры и древесины. Исследования проводились в соответствии с концепцией температурно-временной зависимости прочности. Время до разрушения материала в условиях постоянной температуры определялось по формуле

$$t = Ae^{-\alpha\sigma}, \quad (1.6)$$

где  $t$  – время до разрушения, с;  $A$ ,  $\alpha$  – постоянные;  $\sigma$  – напряжение, МПа.

На основании уравнения (1.7) строили график зависимости  $\sigma$  от  $\lg t$

$$\lg t = \lg A - \alpha\sigma / 2,3. \quad (1.7)$$

В результате получали прямую, отсекающую на оси напряжений  $\sigma_0 = 103\%$ , а на оси логарифмов  $\lg A = 17,1$ . За 100% принимали кратковременную прочность по данным машинных испытаний ( $\sigma_{вр100}$ ). В процессе машинных испытаний напряжение в образце возрастает от 0 до  $\sigma_{вр100}$  в течение времени  $t'_1$ . Необходимо также знать время действия неизменного напряжения ( $t_1$ ), определяемого по формуле [60]

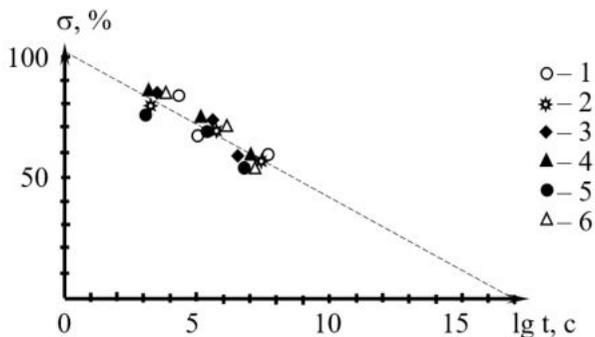
$$t_1 = \frac{\sigma_{вр100}}{38,1W}. \quad (1.8)$$

В процессе исследований были получены графики для волокна на основе целлюлозы и древесины. Автором высказано предположение о возможности использования этих графиков (рис. 1.30) для фанеры, так как она имеет неразрушенную структуру древесины. Полученные данные представлены в табл. 1.4.

Ивановым Ю. М. был также введен коэффициент длительного сопротивления материала для случая действия постоянной нагрузки в нормальных условиях эксплуатации в течение заданного периода времени [61]:

$$k_{дл} = \left(1 - \frac{\lg t}{\lg A}\right) \cdot 1,03, \quad (1.9)$$

где  $\lg A = 17,1$ .



**Рис. 1.30. График длительной прочности древесины и фанеры:**

- 1 – опытные точки (фанера) для среза вдоль волокон наружных слоев шпона (влажность 8%); 2 – то же (влажность 30%); 3 – срез поперек волокон (8%); 4 – то же (30%); 5 – скалывание в плоскости фанерного листа (8%); 6 – растяжение вдоль волокон наружных слоев шпона (8%)

#### 1.4. Влияние вида нагрузки на прочность и долговечность фанеры

Материал	Вид нагрузки	$\sigma$ , Па	$lgt$ , с
Фанера ФСФ, сорта II / II	Срез вдоль волокон наружных слоев	$0,75 \times 10^7$	7,468
	Срез поперек волокон наружных слоев	$0,79 \times 10^7$	7,560
	Скалывание в плоскости фанерного листа	$0,179 \times 10^7$	7,0504
	Растяжение вдоль волокон наружных слоев шпона	$5,33 \times 10^7$	6,1838

Позднее, в Канаде, были проведены испытания длительной прочности древесины (образцов клееных балок) при растяжении поперек волокон [62]. При этом было обнаружено отклонение опытных точек вниз от прямой  $lgt-\sigma$  (длительной прочности). Этот факт указывал на значительное прогрессирующее укорочение логарифма времени разрушения, по сравнению с прямой I.

Из рисунка 1.31 видно, что для растяжения поперек волокон  $lgt' < lgt$  и равен  $10,214 \pm 0,696$ . Данная величина была также получена из общего уравнения (1.10) кинетической концепции прочности и уравнения (1.11):

$$t = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}} ; \quad (1.10)$$

$$\lg t = \lg A - \alpha \sigma . \quad (1.11)$$

Подставив уравнение (1.10) в (1.11), получаем уравнение

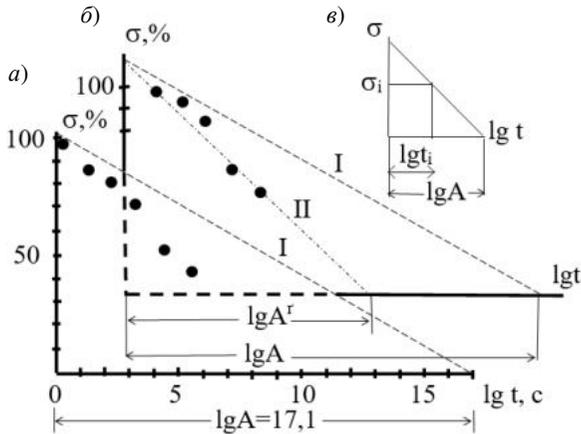
$$\lg A = \frac{U_0}{2,3RT} - \lg \tau_0 . \quad (1.12)$$

Из полученного уравнения вытекает, что при заданной температуре  $\lg A$  зависит только от кинетических параметров  $U_0$  и  $\lg \tau_0 = 13$ . При этом  $U_0$  (уравнение (1.13)) определяли из машинных испытаний абсолютно сухой древесины на растяжение поперек волокон при разной температуре:

$$U_0 = 2,3R(\lg t_i - \lg \tau_0) \frac{T_1 \sigma_2 - T_2 \sigma_1}{\sigma_2 - \sigma_1} . \quad (1.13)$$

В результате были получены следующие значения:

$$U_0 = 126,87 \pm 6,17 \text{ кДж/моль и } \lg A' = 9,644 \pm 1,101 .$$



**Рис. 1.31. Экспериментальные данные о прочности крупных образцов клееной древесины дугласовой пихты на растяжение поперек волокон (а, б) со схемой укорочения  $\lg$  времени до разрушения  $t_i$  (б)**

Следует также отметить, что укорочение  $t$  возникает и в тех случаях, когда растягивающие поперек волокон напряжения сопутствуют другим видам напряжения. К таким случаям можно отнести скалывание вдоль волокон.

Метод, описанный в данном пункте, имеет ряд недостатков. Во-первых, испытания проводили только при одной температуре, а известно, что она оказывает большое влияние на прочность и долговечность материала. Во-вторых, неправильно определяются константы  $U_0$  и  $\tau_0$ . Так, например,  $\tau_0$  априори принимается равной  $10^{-13}$  с. Однако доказано, что для большинства материалов она значительно больше  $10^{-13}$  с. Кроме того, формула (1.10) содержит четвертую константу ( $T_m$ ) (см. далее).

Следующий путь к построению теории долговечности основан на: изучении физико-химических свойств; параметров объектов и процессов, происходящих в них; физической природы и механизма разрушения. При этом используются уравнения, отражающие физические закономерности. Согласно кинетической концепции разрушение твердого тела рассматривается не как критическое событие, а как постепенный кинетический термоактивационный процесс, развивающийся в механически напряженном теле во времени с момента приложения к нему нагрузки, в том числе меньше критической [63 – 67].

Развитие кинетической концепции обязано в первую очередь фундаментальным работам школы С. Н. Журкова. В отличие от механических представлений, учитывающих лишь конкуренцию между приложенной силой и силами межатомных связей, она рассматривает тепловое движение атомов как решающий фактор процесса механического разрушения [68].

Вначале был установлен универсальный характер временной зависимости прочности согласно формулам:

$$\sigma = \beta \lg \left( \frac{a}{\tau} \right); \quad (1.14)$$

$$\tau = a \exp(-\beta\sigma). \quad (1.15)$$

Он гласит, что для разрушения материала необходимо время, в течение которого в нагруженном теле протекают процессы, приводящие к его разделению на части. Экспериментально изучив и роль

температуры, т.е. ее влияние на константы  $a$  и  $\beta$ , Журков пришел к носящей его имя формуле для долговечности ( $\tau$ ):

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (1.16)$$

где  $\tau$  – долговечность, с;  $\tau_0$  – период колебания атомов в твердом теле, с;  $U_0$  – эффективная энергия активации разрушения, кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-чувствительная константа, кДж/(моль·МПа);  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К [69, 70].

Такая формула была получена ранее и другими авторами, но не был вскрыт физический смысл ее констант и механизм разрушения.

Структура формулы говорит о том, что вклад нагрузки в разрушение связей отражается величиной  $\gamma\sigma$  (работа механического поля), а остальную часть работы производит тепловое движение, доля которого равна  $U$ , согласно формуле  $U = U_0 - \gamma\sigma$ . Фундаментальную трактовку получили две константы  $\tau_0$  и  $U_0$ . Оказалось, что для различных тел  $\tau_0 = 10^{-12} \dots 10^{-13}$  с, что близко к периоду колебаний атомов, а  $U_0$  для металлов совпадает с энергией их испарения (или сублимации), т.е. энергией разрыва связей одного атома со всеми соседями. Следует отметить, что для полимерных тел такие простые соотношения не пригодны, так как их механическое разрушение есть термохимическая деструкция, лишь ускоренная механическим полем. Следовательно, величина  $U_0$  равна энергии активации термодеструкции  $E_a$  и различается для разных карбоцепных полимеров из-за различия кинетики их деструкции [70].

Таким образом, при любых температурах механическое разрушение является происходящим во времени механотермическим процессом, реализуемым через элементарные акты разрыва межатомных (химических) связей. Время само по себе роли не играет оно лишь увеличивает количество тепловых флуктуаций, необходимых для реализации тех процессов разрыва связей, которые препятствуют критическому событию. При этом время ожидания критического события определяется по формуле

$$\tau_{кр} = \tau_{\infty} \exp\frac{U}{RT}. \quad (1.17)$$

Однако это событие может не наступить, так как благодаря тепловому движению разорванные связи рекомбинируют.

В механическом поле процесс разрыва связей ускоряется. При этом роль нагрузки заключается в уменьшении энергии связей, изменении расстояния между кинетическими единицами, а также в фиксации их перемещений, в частности в затруднении рекомбинации радикалов. Итак, направленность приложенной силы обеспечивает необратимость процесса вследствие накопления этих разрывов. Во всем диапазоне приложенных нагрузок произведение  $\gamma\sigma$  оказалось значительно меньше  $U_0$ . Следовательно, главный разрушающий фактор – это тепловые флуктуации, т.е. энергия разрушения тела в большей мере черпается из запаса тепловой энергии, чем из работы внешних сил [70, 71].

Из формулы (1.14) вытекает неизменность состояния вещества и постоянство констант во всем диапазоне температур и нагрузок. Однако для каждого вещества существует предельная температура, достигнув которой, происходит распад его на фрагменты. Этой предельной температуре отвечает положение полюса. Френкелем С. Я. в предисловии к монографии Г. М. Бартенева «Прочность и механизм разрушения полимеров» дано обоснование того, что  $1/T_m \neq 0$  и  $\tau_m \neq 10^{-13}$  с. Так как  $U$  не является истинной энергией активации, а  $\gamma$  чувствительна к структуре, то из разложения в ряд функции  $U(T, \sigma)$  следует зависимость обеих констант от температуры. По мнению С. Я. Френкеля  $\tau_m$  соответствует колебаниям химически несвязанных атомов или молекул в реальных решетках. Однако структура полимера дискретна, т.е. в реальном процессе разрушения участвуют разные релаксационные процессы, определяемые перемещением или распадом элементов структуры разной величины. Поэтому  $\tau_m$  оказывается разбросанным в большом диапазоне времен, а не равно  $10^{-13}$  с.

В формуле (1.14) должна быть четвертая константа  $T_m$ , что не отражается ни на трактовке роли и вклада теплового движения и работы внешних сил, ни на физическом смысле  $U_0$  и  $\gamma$  (см. (1.18)).

$$\tau = \tau_m \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{R}(T^{-1} - T_m^{-1})\right], \quad (1.18)$$

где  $\tau$  – время до разрушения (долговечность), с;  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $\tau_m$ ,  $U_0$ ,  $\gamma$  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.

Структура формулы (1.18) говорит о том, что отсчет обратной температуры идет не от  $1/T = 0$ , а от  $1/T_m$ , т.е. существует некоторая предельная температура, выше которой материал не работает, причем его долговечность  $\tau_m$  минимальна.

Итак, кинетическая концепция распространяется на полимеры и на полимерные композиции, механическое разрушение которых также происходит через деструкцию полимерного компонента, при этом она работает как при хрупком, так и при хрупко-эластичном и эластичном поведении полимеров.

Концепция Журкова о механизме разрушения полимеров и формула (1.18) дают основу для регулирования физических констант, которые определяют работоспособность полимерных материалов в соответствии с принципом температурно-временной силовой эквивалентности. При этом для каждого материала существуют три границы прочностной работоспособности: силовая (прочность), временная (долговечность) и температурная (термостойкость), действие которых качественно одинаково. Отсюда можно сделать вывод, что они определяются небольшой группой одних и тех же физических констант, связанных с составом, строением и структурой полимера. Поэтому повышение или понижение любого из параметров работоспособности можно компенсировать изменением любого из двух других. Однако для одновременного повышения всех этих трех параметров необходимо направленно регулировать указанные выше константы: повышать  $T_m$ ,  $\tau_m$ ,  $U_0$  и понижать  $\gamma$ .

При деформировании материала характерной границей является возникновение недопустимо большой деформации, т.е. потеря конструкционной определенности (размягчение материала, потеря формы или образование шейки). При этом границами деформационной работоспособности являются: «предел текучести», теплостойкость и деформационная долговечность. Так же как аналогичные им прочностные границы они взаимосвязаны правилом температурно-временной силовой эквивалентности.

## 2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАНЕРЫ

Согласно поставленной цели и задачам, приведены основные виды воздействий и параметров для фанеры в строительных изделиях (табл. 2.1).

### 2.1. Воздействия и параметры для фанеры в строительных изделиях

Виды строительных изделий из фанеры	Состав изделий и характеристики материалов	Виды воздействий и параметры
Фанерные трубы марки Ф-1	Два листа березового шпона сорта II/III, склеенные смолой СФЖ-3011; $\delta_{\text{шпона}} = 0,55, 0,8, 1,15$ ; $\gamma = 700 \dots 800 \text{ кг/м}^3$	Жидкие агрессивные среды (вода, кислые и щелочные среды), климатические факторы
Верхняя обшивка клефанерной панели ( $L = 12 \text{ м}$ )	Фанера марки ФСФ; сорт шпона I/II; $\delta = 10 \text{ мм}$	Монтажная нагрузка, напряжения от поперечного изгиба, климатические факторы, воздействие ультрафиолета
Нижняя обшивка клефанерной панели ( $L = 12 \text{ м}$ )	Фанера марки ФК; сорт шпона II/III; $\delta = 6 \text{ мм}$	Напряжения от поперечного изгиба, температурный диапазон от $+15$ до $+60 \text{ }^\circ\text{C}$
Наружная обшивка стеновых панелей ( $L = 6 \text{ м}$ )	Фанера марки ФСФ; сорт шпона I/II; $\delta = 10 \text{ мм}$	Климатические факторы, напряжения скальванию, температурный диапазон от $-40$ до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$
Внутренняя обшивка клефанерных панелей ( $L = 6 \text{ м}$ )	Фанера марки ФК; сорт шпона II/III; $\delta = 6 \text{ мм}$	Напряжения скальванию, температурный диапазон от $+20$ до $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ (вблизи труб отопительных котлов)

Продолжение табл. 2.1

Виды строительных изделий из фанеры	Состав изделий и характеристики материалов	Виды воздействий и параметры
Клеефанерная стенка балки ( $L = 12$ м)	Фанера марки ФСФ; сорт шпона II/III; $\delta = 9$ мм	Напряжения от поперечного изгиба, температурный диапазон от +15 до +80 °С (вблизи труб отопительных котлов), воздействия агрессивных сред
Клеефанерная стенка рамы ( $L = 18$ м)	Фанера марки ФСФ; сорт шпона II/III; $\delta = 12$ мм	Напряжения от поперечного изгиба, температурный диапазон от +15 до +60 °С, воздействия агрессивных сред
Клеефанерная стенка арки ( $L = 40$ м)	Фанера марки ФСФ; сорт шпона II/III; $\delta = 15$ мм	Напряжения от поперечного изгиба, температурный диапазон от +15 до +60 °С, температурно-влажностные воздействия
Элементы покрытия фанерного пола	Фанера марки ФСФ, ФК; сорт шпона II/III; $\delta = 9$ мм	Напряжения от поперечного изгиба, деформирование сжатием и пенетрацией, температурно-влажностные воздействия
Элементы опалубки из фанеры	Фанера марки ФСФ; сорт шпона III/IV; $\delta = 4$ мм	Деформирование сжатием и пенетрацией, климатические воздействия, воздействие ультрафиолета, температурный диапазон от -50 до +50 °С

Исходя из данных табл. 2.1, выбраны объекты исследования, физико-механические характеристики которых представлены ниже.

## 2.1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1.1. Выбор материала

В качестве объекта исследования выбрана фанера с различным количеством слоев, марок ФК и ФСФ, широко применяемая в строительстве (рис. 2.1). Ее физико-механические характеристики приведены в табл. 2.2.

Подготовка образцов осуществлялась следующим образом. С помощью дисковой пилы пластины заданных размеров выпиливали из различных участков фанерного листа, а затем тщательно шлифовали боковые кромки.



Рис. 2.1. Семислойная фанера марки ФК

### 2.2. Физико-механические характеристики исследуемой фанеры

Марка по водостойкости	ФК				ФСФ
	Число слоев шпона	3	5	7	9
Сорт шпона, лицевой/оборотный	I/II	II/III	III/IV	II/III	II/III
Конструкция листа	Равно- слойная		Неравно- слойная		Равно- слойная
Степень обработки поверхности	НШ				
Допустимая влажность, %	5...10				
Класс эмиссии формальдегида	Е-1				Е-2
Предел прочности при скалывании, МПа, не менее	0,6; 1,5				

Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	30	40
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	55	60
Твердость, МПа	20	
Гарантийный срок хранения, лет	3	5

*Примечание:* марки и физико-механические свойства фанеры приведены в соответствии с ГОСТ 3916.1–2018 и ГОСТ 3916.2–2018.

### 2.1.2. Выбор агрессивных сред

В качестве жидких агрессивных сред использовали водные растворы неорганических кислот: азотной (10%), серной (10%), ортофосфорной (100%), а также щелочи – каустической соды (10%); машинное масло; растворитель 646; водопроводную и соленую (концентрация 30%) воду.

### 2.1.3. Выбор модификаторов

В качестве модификаторов использовали органические дисперсии эмукрил М и эмульсию 252, имеющие следующие характеристики:

– эмукрил М (ТУ 6-36-5800146-264–91, изм. 1) является продуктом эмульсионной сополимеризации акриловых мономеров и представляет собой жидкости молочно-белого цвета. Раствор характеризуется плотностью ( $1,055 \pm 0,004$  г/см<sup>3</sup>); показателем активности водородных ионов (7,0...8,5 ед. рН); массовой долей летучих мономеров ( $40 \pm 1\%$ ), нелетучих веществ (не более 0,005%) и железа (не более 0,01%). Эмукрил М используется в качестве составной части упрочняющих и красящих составов в производстве бумажных и текстильных материалов, а также в производстве шелковых тканей, нетканых материалов и ковров. Готовый продукт фасуют в полимерные, полиэтиленовые и металлические с антикоррозионным покрытием емкости или другую тару по согласованию с потребителем. Хранить эмукрил М следует при температуре не ниже +2 °С;

– эмульсия 252 (ТУ 224-078-05800142–2001) – водная эмульсия сополимера и эфира акриловой кислоты в виде молочно-белой

жидкости без механических примесей. Характеризуется стойкостью к действию электролитов; средним размером частиц (0,1 мкм); минимальной температурой пленкообразования (+20 °С); показателем активности водородных ионов (не менее 5,5 ед. рН); массовой долей нелетучих веществ (не менее  $50 \pm 1\%$ ) и остаточных мономеров (не более 0,1%); динамической вязкостью (не более 3,0 Па·°С при температуре 25 °С). Эмульсия 252 используется для каширования алюминия и бумаги, грунтования, изготовления строительных клеев и клеевых материалов; в производстве строительных красок для внутренней и наружной отделки; в качестве связующего для нетканых материалов и текстильных покрытий, а также штукатурок и шпатлевок на основе минеральных компонентов. Упаковывают эмульсию 252 в полиэтиленовую тару. Хранить эмульсию 252 необходимо в упакованном виде не более 6 месяцев в закрытых складских помещениях при температуре не ниже +50 °С, во избежание образования коагулюма, и не выше +350 °С – для предотвращения образования полимерной пленки.

## **2.2. ПРИБОРЫ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

Согласно поставленной цели и задачам, приведены основные виды испытаний фанеры:

– длительные испытания фанеры при разрушении поперечным изгибом: условия работы изделий из фанеры несущих конструкций жилых, общественных и промышленных зданий;

– длительные испытания фанеры при деформировании сжатием и пенетрацией: условия работы фанерных элементов полов и изделий из фанеры несущих конструкций жилых, общественных и промышленных зданий;

– испытания на прочность и долговечность фанеры при воздействии жидких сред: условия работы фанерных элементов полов и опалубки, изделий из фанеры сельскохозяйственных сооружений, складов реактивов промышленных зданий, а также понтонов, переправ и низководных мостов;

– испытания при воздействии тепло- и фотостарения на прочность и долговечность фанеры: условия работы изделий из фанеры ограждающих (кровли, стен, дверей, ворот) и несущих конструкций жилых, общественных и промышленных зданий;

– испытания при воздействии климатических факторов (циклических температурно-влажностных) на константы, определяющие долговечность фанеры: условия работы фанерных элементов опалубки и изделий из фанеры, ограждающих конструкции жилых, общественных и промышленных зданий.

Условия работы фанерных элементов и изделий обусловлены технологическими процессами, объемно-планировочным и конструктивным решением здания, микроклиматом помещений, характеристиками района строительства, а также особыми условиями эксплуатации.

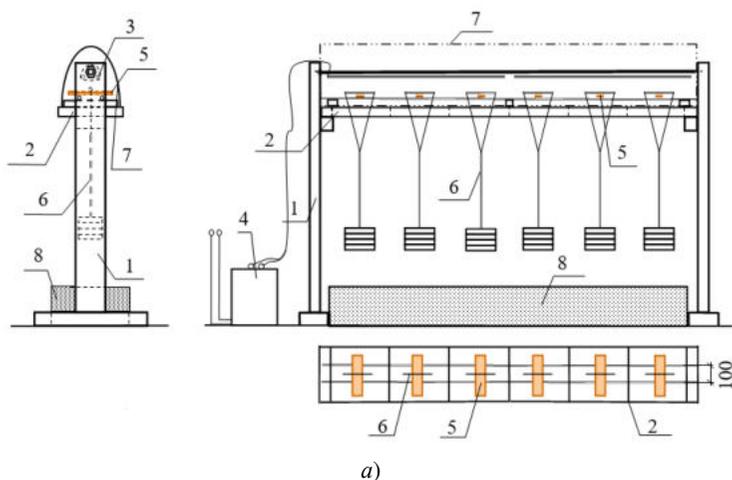
### **2.2.1. Установка для испытаний на кратковременную и длительную прочность при разрушении поперечным изгибом**

Испытания на кратковременную и длительную прочность при разрушении поперечным изгибом проводили на шестипозиционном стенде, схема и конструкция которого показаны на рис. 2.2.

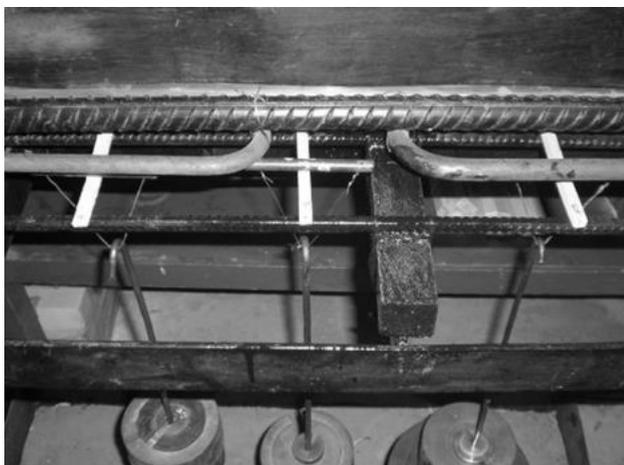
Стенд состоит из станины 1, на которой установлена рама 2 с закрепленными на ней двумя круглыми арматурными стержнями диаметром 12 мм. Расстояние между стержнями составляет 100 мм. Для создания необходимой температуры испытания использовали стержневые и U-образные ТЭНы 3, напряжение на которые подавали с помощью ЛАТРа 4. Для создания равномерного температурного поля и снижения теплопотерь на раме закрепляли кожух 7. Температуру образца 5 фиксировали с точностью  $\pm 1$  °С в месте прикладываемой нагрузки 6 с помощью спиртового термометра или термопары с цифровым мультиметром DT-838.

Для устранения влияния механических колебаний при разрушении образцов использовали демпфирующее устройство-емкость, заполненную песком 8, сверху которого уложен резиновый ковер  $\delta = 20$  мм.

При проведении длительных испытаний в натуральных условиях колебания температуры учитывали с помощью спиртового термометра.



a)



b)

**Рис. 2.2. Шестипозиционный стенд для испытаний на поперечный изгиб:**

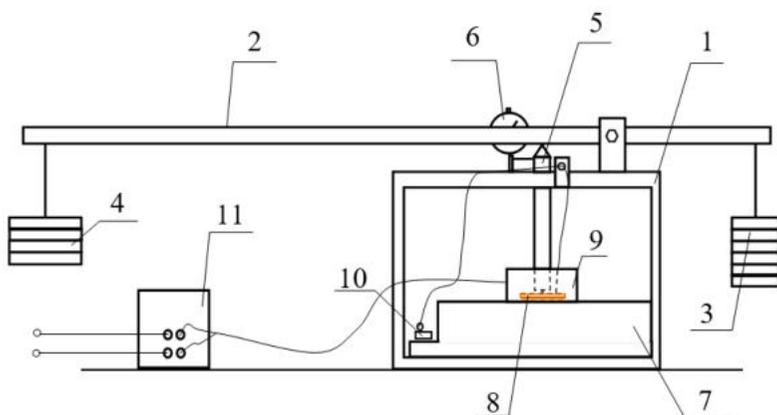
*a* – схема установки; *b* – конструкция;

*1* – станина; *2* – рама; *3* – ТЭНы; *4* – ЛАТР; *5* – образец;

*6* – нагружающее устройство с грузом; *7* – кожух; *8* – лоток с песком

### 2.2.2. Установка для испытаний на долговечность при деформировании длительным сжатием и пенетрацией

Испытания на долговечность при деформировании длительным сжатием и пенетрацией проводили на установке, схема и конструкция которой показана на рис. 2.3. Основными элементами установки являются: металлическая рама 1, нагружающее устройство 5 и рычаг 2 с противовесом 3. Нагружающее устройство состоит из направляющего цилиндра и свободно перемещающегося поршня. Образец 8 устанавливали между опорной площадкой плиты 7 и нижней плоскостью нагружающего устройства 5. Нагрузку 4 прикладывали непосредственно на рычаг 2, уравновешенный противовесом 3. Для измерения величины деформации к поршню жестко прикреплен индикатор часового типа 6 – ИЧ-10. Температуру вокруг образца поддерживали с помощью кольцевой печи 9 и ЛАТРа 11. Измерение температуры осуществляли термопарой с цифровым мультиметром DT-838 10 или спиртовым термометром с точностью измерения  $\pm 1$  °С.



а)

**Рис. 2.3. Установка для испытаний на долговечность  
при деформировании сжатием и пенетрацией:**

*а* – схема установки; *б* – конструкция;

1 – станина; 2 – рычаг; 3 – противовес; 4 – груз; 5 – нагружающее устройство;

6 – индикатор перемещений; 7 – опорная плита; 8 – образец;

9 – кольцевая печь; 10 – термопара с мультиметром; 11 – ЛАТР



б)

Рис. 2.3. Окончание

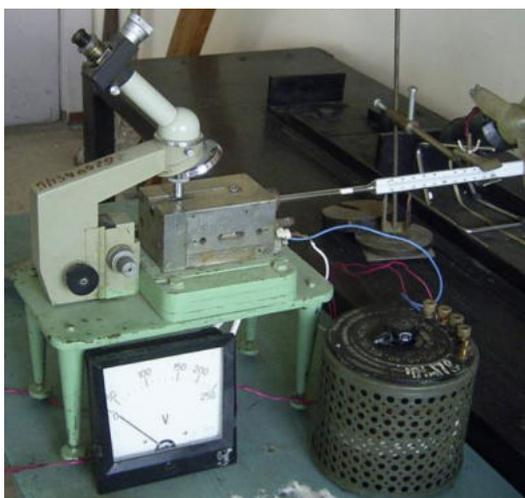
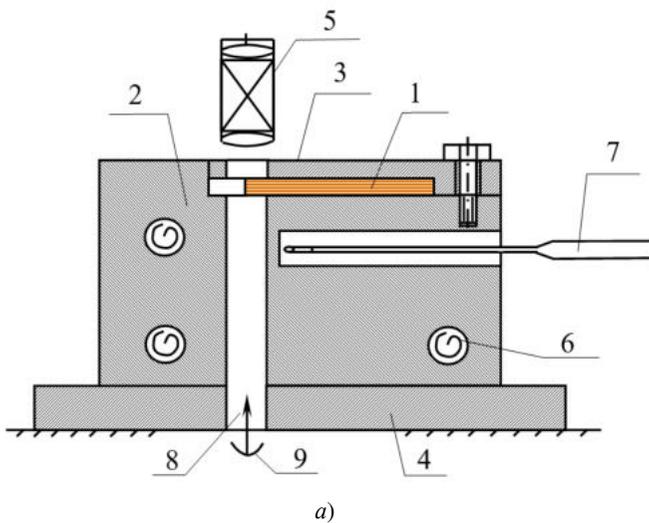
### 2.2.3. Прибор для определения коэффициента линейного термического расширения

Испытания для определения коэффициента линейного термического расширения проводили на оптическом dilatометре, схема и конструкция которого показаны на рис. 2.4.

Основными элементами dilatометра являются: криотермокамера 2 и микроскоп с окуляр-микрометром Биолам МОВ-1-15Х5, установленные на теплоизолированном основании 4. Термокамера состоит из массивного тугоплавкого металлического корпуса, электронагревательных элементов 6 и стальной планки 3, которая закрепляется в пазе корпуса с помощью винта и служит для фиксации образца 1.

Для освещения грани образца под термокамерой расположен источник света 9, а сквозь весь корпус прорезан канал, по которому луч через смотровое отверстие 8 в планке размером 1×10 мм попадает в объектив микроскопа.

Нагрев термокамеры осуществляли автотрансформатором ЛАТР 1М220В-9А до температуры 100 °С с постоянной скоростью 1,65 °С/мин. Скорость нагрева термокамеры, а, следовательно, и напряжение 80 В на выходе ЛАТРа были приняты по рекомендациям, изложенным в работе [72]. Температуру в термокамере контролировали вблизи образца через специальное отверстие с помощью спиртового термометра 7. На каждой ступени нагрева окуляр-микрометром 5 снимали отсчет удлинения образца с точностью 0,0001 мм.



**Рис. 2.4. Прибор для определения коэффициента линейного термического расширения:**

*a* – схема установки; *б* – конструкция;

1 – образец; 2 – термокамера; 3 – прижимная планка; 4 – основание;  
 5 – микроскоп с окуляр-микрометром; 6 – нагреватель; 7 – термометр;  
 8 – смотровая щель; 9 – источник света

#### 2.2.4. Оборудование для испытаний на тепловое старение и УФ-облучение

Испытания на тепловое старение проводили в сушильном шкафу ШС-2, представленном на рис. 2.5.

Температуру контролировали с помощью спиртового термометра с точностью измерения  $\pm 1$  °С.

Стойкость фанеры к действию УФ-облучения исследовали с использованием специальной камеры искусственного фотостарения (рис. 2.6), оснащенной лампами ПРК. Установка состоит из сушильного шкафа, центробежного вентилятора, воздуховодов и внешней балластной нагрузки.



Рис. 2.5. Сушильный шкаф ШС-2



**Рис. 2.6. Общий вид камеры искусственного фотостарения**

Центробежный вентилятор соединен с сушильным шкафом воздуховодами. В качестве источника ультрафиолетового излучения используется ртутная лампа высокого давления – ДРТ 1000ЖИЦУ.0675610.006 – мощностью потребления 1 кВт с лучистым потоком в диапазоне волн 240...320 нм 128 Вт. Для задания рабочего тока лампы применяется балластный резистор сопротивлением 15 Ом, максимальной мощностью 3 кВт. Для охлаждения лампы и удаления озона, образующегося у поверхности лампы, через систему воздухопроводов предусмотрена вытяжная вентиляция с центробежным вентилятором ВЦ4-75-2,5. Лицевая сторона камеры снабжена специальной светоотражающей панелью из алюминиевой фольги для защиты от вредного УФ-излучения. Она также выполняет функцию жалюзи при закладке образцов, поднимаясь и опускаясь по специальным направляющим.

### **2.2.5. Приборы для изучения структуры фанеры электронно-оптическим методом**

Исследования влияния модификации на структуру фанеры проводили на оптическом Neofon 2 (увеличение до 1000 раз) и электронном ПЭМ 125-К (увеличение до 30 000 раз) микроскопах, представленных на рис. 2.7 и 2.8.

Принцип действия оптического микроскопа основывается на свойствах флюоресцентного излучения. Помещаемый на предметный столик микроскопа объект освещается световым пучком, который рассеивается на верхней и нижней поверхностях образца, а также поглощается и преломляется в его теле.



**Рис. 2.7. Оптический микроскоп Neofon 2**



**Рис. 2.8. Электронный микроскоп ПЭМ 125-К**

Различие в оптических свойствах отдельных участков объекта обуславливает разную интенсивность прошедших через него лучей и дает «теневое» изображение объекта.

Для получения изображения в электронном микроскопе используются специальные магнитные линзы, управляющие движением электронов в колонне прибора с помощью магнитного поля. Микроскоп представляет собой рабочую камеру и колонну, в которых создается высокий вакуум, и электронную пушку, создающую расширяющийся электронный поток, на пути которого установлена электромагнитная линза, позволяющая производить его фокусировку на исследуемом образце. Периферийный поток электронов сепарируется апертурной диафрагмой, что улучшает резкость изображения. Поле изображения ограничивается полевой диафрагмой. Прошедший через образец поток расширяется и перефокусируется для получения нужного по масштабу изображения на люминисцентном экране. Затем изображение фиксируется фоточувствительным материалом в фотокамере.

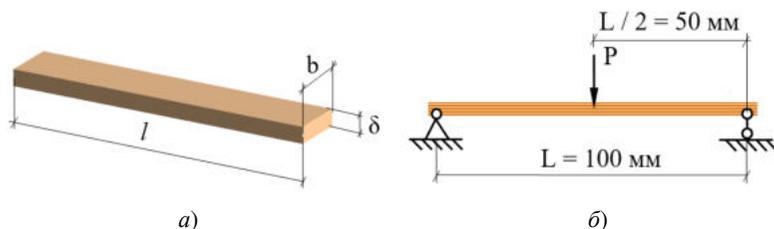
## **2.3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ**

### **2.3.1. Методика проведения кратковременных и длительных испытаний при разрушении поперечным изгибом**

Длительные испытания при разрушении поперечным изгибом проводили в режиме заданных постоянных напряжений и температур (в интервале от 16 до 80 °С) по следующей методике. Образцы выдерживали при заданной температуре в течение часа (термостатировали), помещали в испытательную секцию установки и нагружали до определенной величины. В результате испытаний фиксировали время от момента начала нагружения до разрушения образца.

При проведении кратковременных испытаний образцы ступенчато нагружали до их полного разрушения. В итоге фиксировали максимальную нагрузку, выдерживаемую материалом. В одинаковых условиях для получения одной точки испытывали шесть образцов. За конечный результат принимали их среднее арифметическое значение.

Образцы выпиливали в виде пластин прямоугольной формы (рис. 2.9, а) длиной  $l = 120 \dots 130$  мм и шириной  $b = 10$  и 20 мм, в зависимости от толщины  $\delta$  фанеры. Перед испытанием толщину и ширину образца измеряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм в месте предполагаемого приложения нагрузки.



**Рис. 2.9. Вид образца (а) и расчетная схема (б) для испытаний при разрушении поперечным изгибом**

Расчетная схема для кратковременных и длительных испытаний при разрушении поперечным изгибом представлена на рис. 2.9, б. Напряжения, возникающие в образцах, определяли по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3PL}{2(b\delta^2)}, \quad (2.1)$$

где  $M = (PL)/4$  – изгибающий момент, Н·м;  $W = (b\delta^2)/6$  – момент сопротивления изгибу, м<sup>3</sup>;  $P$  – нагрузка, приложенная к образцу, Н;  $L$  – рабочая длина образца (расстояние между опорами), м;  $b$ ,  $\delta$  – ширина и толщина образца соответственно, м.

### **2.3.2. Методика проведения испытаний на долговечность при деформировании длительным сжатием и пенетрацией**

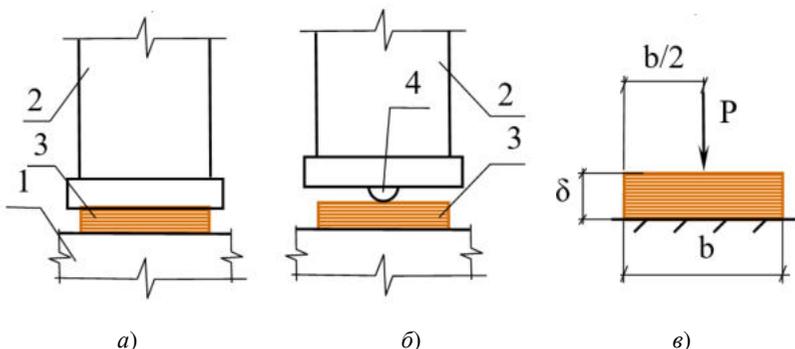
Образцы для испытаний на пенетрацию выпиливали в виде пластин прямоугольной формы шириной 20 мм, для испытаний на сжатие – квадратной формы 10×10 и 20×20 мм, в зависимости от толщины фанеры.

Схема нагружения образцов для испытаний на долговечность при деформировании сжатием и пенетрацией представлена на рис. 2.10, а, б.

Напряжения, возникающие в материале при деформировании сжатием, вычисляли по формуле (2.2), согласно расчетной схеме, представленной на рис. 2.10, в

$$\sigma_i = P_i / S = P_i / b^2, \quad (2.2)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $P$  – величина прикладываемой нагрузки, Н;  $S$  – площадь образца, м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина образца, м.



**Рис. 2.10.** Схема нагружения образцов для испытаний на долговечность при деформировании сжатием (а) и пенетрацией (б) и расчетная схема при деформировании сжатием (в):

1 – опорная плита; 2 – нагружающее устройство;

3 – образец; 4 – шарик  $\varnothing 6$  мм

Твердость материала при деформировании пенетрацией определяли по формуле

$$H = \frac{P}{\pi dh}, \quad (2.3)$$

где  $H$  – твердость, МПа;  $P$  – величина прикладываемой нагрузки, Н;  $h$  – глубина погружения индентора (шарика), м;  $d$  – диаметр отпечатка, м.

Испытания образцов на долговечность при деформировании сжатием и пенетрацией проводили по нижеследующей методике.

До приложения нагрузки образцы термостатировали в течение часа. Затем при заданных температуре и напряжении (твердости) с помощью секундомера фиксировали время погружения индентора на заданную глубину  $h$  при деформировании пенетрацией или достижении заданной деформации  $\varepsilon$ , при деформировании сжатием. Для серии образцов фиксировали изменение величины деформации через определенные промежутки времени с помощью индикатора часового типа. Эксперимент проводили при температурах 18...20, 40, 60 °С и трех напряжениях (твердости). Для получения одной точки в одинаковых условиях испытывали 5–6 образцов. За конечный результат принимали их среднее арифметическое значение.

### 2.3.3. Методика проведения испытаний при воздействии жидких сред

Испытания проводили на водопоглощение фанеры по массе и набухание по толщине. Для проведения испытаний использовали предварительно взвешенные квадратные образцы размерами 20×20 мм, которые погружали полностью в емкость с водой при температуре  $20 \pm 2$  °С. Через определенные промежутки времени образцы извлекали из воды, протирали фильтровальной бумагой и фиксировали изменение массы и толщины с помощью электронных весов ВЛКТ-500-М и штангенциркуля.

На основании этих измерений производили вычисление водопоглощения и набухания по следующим формулам:

$$W = \frac{m_n - m_k}{m_n} \cdot 100, \quad (2.4)$$

где  $W$  – водопоглощение по массе образца, %;  $m_n$ ,  $m_k$  – масса образца до и после испытания, г;

$$H = \frac{\delta_n - \delta_k}{\delta_n} \cdot 100, \quad (2.5)$$

где  $H$  – набухание по толщине образца, %;  $\delta_n$ ,  $\delta_k$  – толщина образца до и после испытания, мм.

Для различных агрессивных сред (пункт 2.1.2) проводили испытания на кратковременную и длительную прочность (долговечность) фанеры, а также определялось набухание по ее толщине и поглощение среды.

Для определения химической стойкости фанеры образцы выдерживали заданное время в агрессивной среде, а затем подвергали испытаниям на кратковременную и длительную прочность при поперечном изгибе.

### 2.3.4. Методика определения коэффициента линейного термического расширения

Определение коэффициента линейного термического расширения проводили по нижеследующей методике.

Образец помещали в паз корпуса термокамеры и закрывали стальной планкой. Затем совмещали перекрестье нитей окуляр-

микрометра с торцевой гранью образца. Включали нагрев камеры дилатометра с постоянной скоростью 1,65 °С/мин и, при определенных температурах (до 100 °С) с помощью окуляр-микрометра фиксировали линейное удлинение образца. Для получения одной точки испытывали не менее трех образцов. Образцы выпиливали в виде пластины прямоугольной формы длиной  $l = 38$  мм и шириной  $b = 10$  мм.

### **2.3.5. Методика проведения испытаний при климатических воздействиях**

Испытания в натуральных условиях проводили на долговечность при разрушении поперечным изгибом на установке, аналогичной шестипозиционному стенду, приведенному на рис. 2.2. От прямого воздействия дождя и снега образцы изолировали специальным навесом. Колебания температуры фиксировали с помощью спиртового термометра. В процессе испытаний при разных напряжениях определяли долговечность (время до разрушения образца).

Испытания на тепловое старение и УФ-облучение проводили следующим образом. В течение заданного времени образцы подвергали тепловой обработке (температура прогрева – 50 и 80 °С) или выдерживали определенное время под лампами ПРК. После старения их охлаждали при комнатной температуре, после чего подвергали испытаниям на кратковременную прочность при разрушении поперечным изгибом, а также на водопоглощение и набухание.

Последовательность проведения испытаний на водопоглощение и набухание, а также кратковременную прочность при разрушении поперечным изгибом приведены в пунктах 2.3.3 и 2.3.1 соответственно.

Испытания при воздействии замораживания-оттаивания проводили следующим образом. Образцы замачивали в воде в течение часа при температуре  $20 \pm 2$  °С, затем замораживали в морозильной камере в течение 3...5 ч при температуре –20 °С. Замороженные образцы вытаскивали из морозильной камеры и оттаивали при комнатной температуре в течение 18...20 ч. После оттаивания их подвергали испытаниям на долговечность при разрушении поперечным изгибом по методике, предлагаемой в пункте 2.3.1.

### **2.3.6. Методика изучения структуры фанеры электронно-оптическим методом**

Испытания на оптическом микроскопе производили в следующей последовательности:

- 1) подготовка образцов, включающая в себя получение тонких срезов толщиной менее 1 мм площадью 10×10 мм;
- 2) размещение образца на предметном столике микроскопа и фокусировка;
- 3) фотосъемка изображения.

Цену деления шкалы окуляра определяли следующим образом. На предметный столик микроскопа помещали объект-микрометр (ОМ), изображение которого совмещается с изображением шкалы окуляра. После чего подсчитывается число делений ОМ, укладывающихся в некоторое число делений шкалы окуляра при полном совпадении крайних выбранных рисок. Таким образом, цена деления окулярной шкалы равна  $x = (m_{\text{ОМ}}/n_{\text{ок}}) \cdot 0,01$  (где  $m_{\text{ОМ}}$  и  $n_{\text{ок}}$  – число делений ОМ и окуляра).

Испытания на электронном микроскопе производили в следующей последовательности:

- 1) подготовка образцов, включающая травление древесного шпона фанеры 10%-ным раствором серной кислоты, что позволило получить рельефную поверхность модифицированной фанеры за счет разложения под воздействием кислоты древесинного вещества;
- 2) посыпка образца специальной угольной пылью и его установка в микроскопе;
- 3) фотосъемка изображения.

## **2.4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

### **2.4.1. Статистическая обработка экспериментальных данных**

Значительный разброс отдельных значений времени критического события при испытаниях на долговечность ставит вопрос о достоверности результатов. Для одинаковых образцов, испытываемых в идентичных условиях, этот разброс может достигать одного, а то и двух десятичных порядков. Вследствие этого для получения надежных результатов экспериментальные данные подвергаются статистической обработке [73].

Исходя из выше сказанного, применительно к нашей работе, расчет ведут в следующей последовательности.

На первом этапе определяли среднее арифметическое  $\lg\tau$  по формуле

$$\lg\tau_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^N \lg\tau_i}{n}. \quad (2.6)$$

Затем рассчитывали величину ориентировочного стандартного отклонения  $S$  по формуле

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x)}{N - 1}. \quad (2.7)$$

По приложению II работы [73] для  $N - 1 = 5$  находили критерий точности  $t_\beta = 2,57$ , для определения которого доверительную вероятность  $\beta$  принимали равной 0,95. После чего рассчитывают величину отклонения  $\varepsilon_\beta$  по формуле

$$\varepsilon_\beta = t_\beta \sqrt{\frac{S}{n}}. \quad (2.8)$$

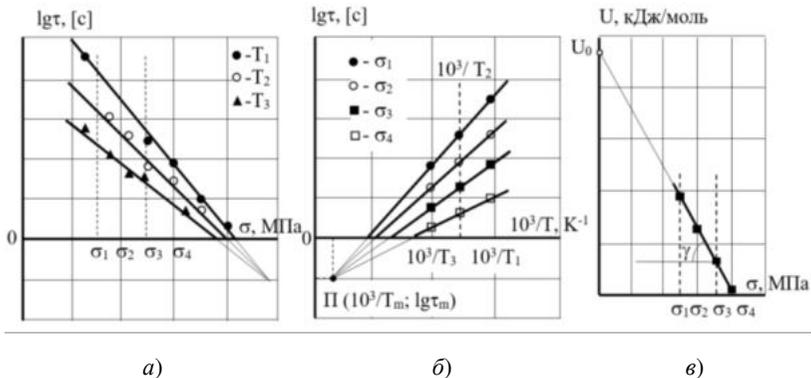
Исходя из полученных выше величин, доверительный интервал получили в следующем виде:  $I = (x - \varepsilon_\beta; x + \varepsilon_\beta)$ .

#### **2.4.2. Определение физических термофлуктуационных констант графоаналитическим методом**

В процессе испытаний материалов на долговечность строили температурно-временные зависимости прочности, которые в полулогарифмических координатах имеют линейный характер и образуют семейства прямых. Возможны три типа зависимостей: «прямой» и «обратный» пучки, а также параллельные прямые [70].

Для большинства материалов, в том числе и для фанеры, при разрушении наблюдается зависимость в виде классического «прямого» пучка, описываемого уравнением (1.16) и представленного на рис. 2.11.

Определение физических термофлуктуационных констант для зависимости в виде «прямого» пучка, полученного при разрушении, осуществляется графоаналитическим способом по схеме, показанной на рис. 2.11.



**Рис. 2.11. Схема определения физических констант для «прямого пучка» на примере разрушения при поперечном изгибе**

Согласно схеме, полученные экспериментальные значения выстраивались в координатах логарифма долговечности  $\lg \tau$  от напряжения  $\sigma$  (рис. 2.11, а), а затем перестраивали в виде зависимости логарифма долговечности от обратной температуры  $10^3/T$ , из которой определяли по положению полюса  $\Pi$  физические константы  $\tau_m$  и  $T_m$  (рис. 2.11, б). Затем по формуле (2.9) для каждого напряжения вычисляли значения энергии активации и строили график зависимости полученных значений  $U$  от напряжения  $\sigma$  (рис. 2.11, в). Экстраполяцией прямой на ось ординат получали максимальную энергию активации  $U_0$ , а определяя тангенс угла наклона прямой, – величину структурно-механической константы  $\gamma$ .

$$U(\sigma) = 2,3R \frac{\Delta \lg \tau}{\Delta(10^3/T)}. \quad (2.9)$$

Для оценки работоспособности из уравнения (1.18) можно выразить два оставшихся параметра: прочность (уравнение 2.10) и термостойкость (уравнение 2.11).

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left( U_0 - \frac{2,3RT}{1-T/T_m} \lg \frac{\tau}{\tau_m} \right); \quad (2.10)$$

$$T = \left( \frac{1}{T_m} + \frac{2,3R}{U_0 - \gamma \sigma} \lg \frac{\tau}{\tau_m} \right)^{-1}. \quad (2.11)$$

При деформировании фанеры долговечность описывается уравнением

$$\theta = \theta_m \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (2.12)$$

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.

Процесс деформирования также подчиняется принципу температурно-временной силовой эквивалентности. Физические константы, входящие в уравнение (2.12), определяются графоаналитическим способом, так же как при разрушении.

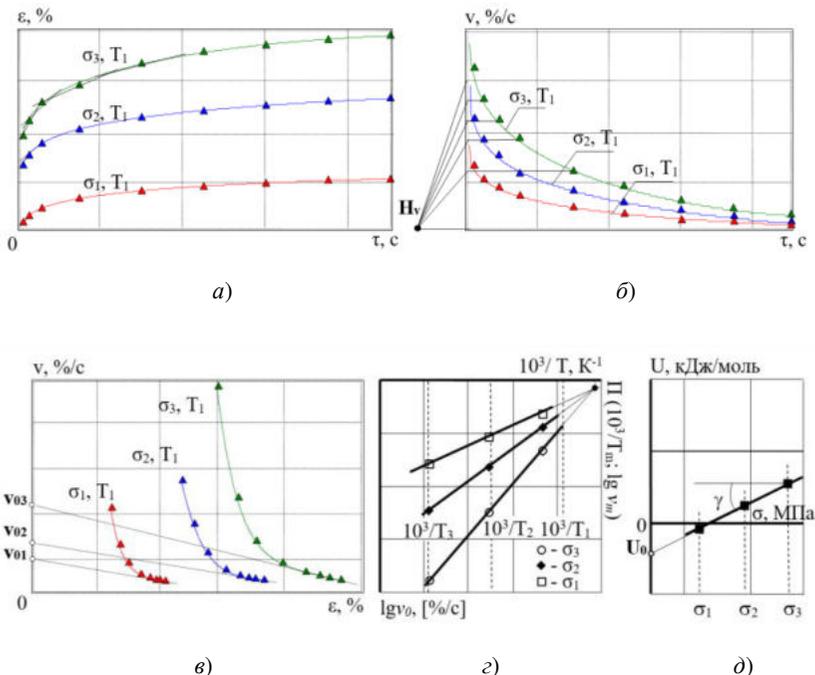
### 2.4.3. Определение физических и эмпирических термофлуктуационных констант методом графоаналитического дифференцирования

При проведении испытаний, согласно методике 2.3.2, были получены кинетические кривые (рис. 2.12, а), построенные в виде зависимостей относительной деформации от времени деформирования ( $\varepsilon$ – $\tau$ ), описываемых уравнением вида Аррениуса:

$$v = v_0 \exp \left( - \frac{U}{RT} \right), \quad (2.13)$$

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

Для определения констант уравнения к кинетическим кривым ( $\varepsilon$ – $\tau$ ) проводили касательные. После этого по оси абсцисс на расстоянии 20 мм влево от оси ординат (рис. 2.12, б) отмечали полюс  $H_v$ , через который параллельно касательным проводили прямые до пересечения с этой осью.



**Рис. 2.12. Схема определения констант методом графоаналитического дифференцирования**

В результате этих несложных операций получили зависимость скорости деформирования от времени ( $v-\tau$ ), масштаб ( $M_v$ ) которой определили по формуле

$$M_v = \frac{M_\varepsilon}{M_\tau H_v}, \quad (2.14)$$

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

Полученные зависимости перестраивали в координаты скорости деформирования от деформации ( $v-\varepsilon$ ) (рис. 2.12, в) и экстраполяцией линейных участков кривых на ось ординат  $v$ , определяли кажущиеся начальные скорости  $v_0$ . По значениям начальных скоростей строили (рис. 2.12, г) зависимость логарифма скорости деформирования от об-

ратной температуры ( $\lg v_0 - 103/T$ ), из которой для каждой прямой определяли энергию активации деформирования по формуле

$$U = 2,3R \frac{\Delta(\lg v_0)}{\Delta(10^3/T)}. \quad (2.15)$$

По полученным значениям  $U$  строился график (рис. 2.12, д) в координатах энергии активации от напряжения ( $U-\sigma$ ), экстраполируя который на ось  $U$ , определяли максимальную энергию активации деформирования  $U_0$  [70, 71], а по тангенсу угла наклона значение  $\gamma$ .

Зависимость скорости деформирования от обратной температуры представляет семейство веерообразных прямых, сходящихся в полюс  $\Pi$  и описывается уравнениями (2.16) и (2.17) соответственно «прямому» и «обратному» пучкам.

$$v = v_v \exp \left[ -\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (2.16)$$

где  $v$  – скорость деформирования материала, %/с;  $v_m$  – предельная скорость деформирования материала, %/с;  $U_0$  – константа скорости деформирования, кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-механический фактор, кДж/(моль·МПа);  $T_m$  – предельная температура существования материала, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $T$  – температура, К.

$$v = v_v^* \exp \left[ -\frac{U_0^* - \gamma\sigma}{RT} \left( \frac{T_m^*}{T} - 1 \right) \right], \quad (2.17)$$

где  $v^*$ ,  $T^*$ ,  $U_0^*$  и  $\gamma^*$  – эмпирические константы.

Физические и эмпирические константы, входящие в эти уравнения, определялись с помощью программы Graffdiff, основанной на приведенной выше методике.

#### 2.4.4. Математическое планирование эксперимента

Математическое планирование эксперимента проводили по аналогии с планированием, применяемым для механической долговечности термо- и пенопластов.

Выявлено, что на долговечность  $\tau$  основное влияние оказывают два главных параметра – напряжение  $\sigma$  и температура  $T$ . В связи с этим приняли решение варьировать эти переменные, взяв в качестве функции отклика независимую нормально распределенную величину  $\lg\tau$ .

Данный метод варьирования позволяет получить необходимую информацию при минимальном количестве испытываемых образцов и создать методику оценки механической долговечности материала [73, 74]. Суть метода заключается в следующем:

1. При определенной температуре для фанеры находили значение напряжения, при котором ее долговечность составляла около 10 с. После чего полученное значение напряжения уменьшали таким образом, чтобы долговечность материала увеличилась до трех часов.

2. Аналогичное исследование повторяли при выбранной максимальной и минимальной температурах и строили график зависимости  $\lg\tau-\sigma$  для этих температур. Интервалы напряжений и температур выбирались таким образом, чтобы можно было экспериментально определить  $\lg\tau$  при одном напряжении и двух температурах, а затем при другом напряжении и тех же температурах.

3. Далее по формулам (2.18) и (2.19) переводили напряжение и температуру в условные единицы  $(-1, +1)$  и составляли план варьирования переменных (табл. 2.3).

### 2.3. План полного факторного эксперимента $2^2$

№ опыта	Матрица планирования			$y_i$ ( $\lg\tau$ )
	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	
1	+1 ( $\sigma_{\max}$ )	+1 ( $T_{\max}$ )	+1	$y_1$
2	+1 ( $\sigma_{\max}$ )	-1 ( $T_{\min}$ )	-1	$y_2$
3	-1 ( $\sigma_{\min}$ )	+1 ( $T_{\max}$ )	-1	$y_3$
4	-1 ( $\sigma_{\min}$ )	-1 ( $T_{\min}$ )	+1	$y_4$

$$x_1 = \frac{\sigma - \sigma_{\text{cp}}}{h_1}, \text{ причем } x_1 = \pm 1 \text{ при } \sigma = \sigma_{\text{max}} \text{ или } \sigma = \sigma_{\text{min}}, \quad (2.18)$$

где  $\sigma$  – любое напряжение из исследуемого интервала;  $\sigma_{\text{cp}}$  – среднее значение напряжения ( $\sigma_{\text{cp}} = (\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}})/2$ );  $h_1$  – шаг варьирования ( $h_1 = (\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}})/2$ ).

$$x_2 = \frac{T - T_{\text{cp}}}{h_2}, \text{ причем } x_1 = \pm 1 \text{ при } \sigma = \sigma_{\text{max}} \text{ или } \sigma = \sigma_{\text{min}}, \quad (2.19)$$

где  $T$  – любая температура из исследуемого интервала;  $T_{\text{cp}}$  – среднее значение температуры ( $T_{\text{cp}} = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}})/2$ );  $h_2$  – шаг варьирования ( $h_1 = (\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}})/2$ ).

4. Полученную математическую модель приводили к «уравнению вида» по формуле

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2, \quad (2.20)$$

где  $y = \lg \tau$ ;  $x_1$  и  $x_2$  – напряжение и температура;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты уравнения, определяемые по формулам:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{4}; & b_1 &= \frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4}{4}; \\ b_2 &= \frac{y_1 - y_2 + y_3 - y_4}{4}; & b_3 &= \frac{y_1 - y_2 - y_3 + y_4}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

5. Значимость коэффициентов оценивали по величине доверительного интервала  $\Delta b_i$ , который вычисляли на основании критерия Стьюдента, выбранного с учетом числа степеней свободы и уровня значимости  $t$ , а также стандартного отклонения определения коэффициента  $S'_{b_i}$ :

$$\Delta b_i = \pm t S'_{b_i}; \quad (2.22)$$

$$S'_{b_i} = \pm \sqrt{S_{b_i}^2}; \quad (2.23)$$

$$S_{b_i}^2 = \frac{S^2\{y\}}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (2.24)$$

$$S^2\{y\} = \frac{\sum (\lg y_i - \lg \bar{y})^2}{N-1}, \quad (2.25)$$

где  $\sum_{u=1}^N x_{iu}^2$  – сумма квадратов столбцов в матрице планирования;

$S_{b_i}$  – дисперсия определения коэффициента;  $S^2\{y\}$  – дисперсия, характеризующая ошибку опыта;  $N$  – число опытов.

6. Если величина доверительного интервала  $\Delta b_i$  превышает абсолютное значение коэффициента  $b_i$ , то он незначим, и оценка адекватности модели проводится по критерию Фишера [75], по формуле

$$F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S^2\{y\}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2 / (N-n)}{S^2\{y\}}, \quad (2.26)$$

где  $S_{\text{ост}}^2$  – остаточная дисперсия;  $S^2\{y\}$  – дисперсия, характеризующая ошибку опыта;  $\Delta y_i$  – отклонение расчетных значений  $\lg t$  от экспериментальных для каждого опыта;  $N$  – число опытов;  $n$  – число слагаемых в модели.

В противном случае она проводится по сопоставлению экспериментальных и расчетных данных.

Ниже приведен пример математических моделей для определения долговечности фанеры марки ФК, выполненных экспериментально по плану табл. 2.2.

Расчет ведем для разрушения поперечным изгибом (случай I) и деформирования пенетрацией (случай II).

Исходные данные:

– случай I:

$$\sigma_{\max} = 145 \text{ МПа}, \quad T_{\max} = 80 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \sigma_{\min} = 110 \text{ МПа}, \quad T_{\min} = 20 \text{ }^\circ\text{C};$$

– случай II:

$$H_{\max} = 22,47 \text{ МПа}, \quad T_{\max} = 55 \text{ }^\circ\text{C}, \quad H_{\min} = 18,73 \text{ МПа}, \quad T_{\min} = 22 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Расчет уровней варьирования переменных на примере случая I:

$$\sigma_{cp} = \frac{145+110}{2} = 127,5 \text{ МПа}; \quad h_1 = \frac{145-110}{2} = 17,5 \text{ МПа},$$

тогда  $x_{1\max} = \frac{145-127,5}{17,5} = +1; \quad x_{1\min} = \frac{110-127,5}{17,5} = -1.$

$$T_{cp} = \frac{80+20}{2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}; \quad h_1 = \frac{80-20}{2} = 30 \text{ }^\circ\text{C},$$

тогда  $x_{2\max} = \frac{80-50}{30} = +1; \quad x_{2\min} = \frac{20-50}{30} = -1.$

Полученные уровни варьирования переменных  $x_1$  и  $x_2$  в условных и натуральных единицах сводили в табл. 2.4.

На основе данных таблицы 2.4 и формулы (2.20) составляем уравнения математических моделей, приведенных ниже:

Для случая I:

$$b_0 = 1,94; \quad b_1 = 1,61; \quad b_2 = -0,6; \quad b_3 = 0,37.$$

Уравнение математической модели

$$y = 1,94 - 1,61x_1 - 0,6x_2 + 0,37x_1x_2. \quad (2.27)$$

Для случая II:

$$b_0 = 2,26; \quad b_1 = -1,15; \quad b_2 = -0,99; \quad b_3 = 0,13.$$

Уравнение математической модели

$$y = 2,26 - 1,15x_1 - 0,99x_2 + 0,13x_1x_2. \quad (2.28)$$

Рассчитав по формулам (2.22) – (2.25) величину доверительного интервала и сопутствующие ему величины, проверяли значимость коэффициента  $b_3$ :

Для случаев I и II:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = 4; \quad S\{y\} = 0,07; \quad S'_{b_i} = 0,04; \quad t = 3,18; \quad \Delta b_i = 0,11.$$

Коэффициент  $b_3 = 0,37 (0,13)$  значим, так как он  $> \pm 0,11$ . Поэтому проводили проверку адекватности модели по сопоставлению экспериментальных и расчетных данных. В таблице 2.5 приведены значения  $\lg t$  для моделей 2.27 и 2.28.

Из таблицы 2.5 видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что говорит об адекватности полученных математических моделей.

При этом отрицательный знак коэффициентов при  $x_1$  и  $x_2$  говорит о понижении долговечности с увеличением температуры и напряжения, а по коэффициентам  $b_2$  и  $b_1$  можно выявить, какой фактор оказывает наибольшее влияние.

Так, для фанеры ФК, согласно полученным математическим моделям, наибольшее влияние на долговечность при сжатии и поперечном изгибе оказывает напряжение.

#### **2.4. Уровни варьирования переменных (план полного факторного эксперимента) для фанеры марки ФК**

№ опыта	$x_1$		$x_2$		$x_1 x_2$	$y_i$ ( $\lg t$ )
	Условный масштаб	Натуральный масштаб	Условный масштаб	Натуральный масштаб		
I. Долговечность при разрушении поперечным изгибом						
1	+1	145	+1	80	+1	0,25
2	+1	145	-1	20	-1	1,98
3	-1	110	+1	80	-1	2,29
4	-1	110	-1	20	+1	4,52
II. Долговечность при деформировании пенетрацией						
1	+1	22,47	+1	55	+1	0,10
2	+1	22,47	-1	22	-1	0,57
3	-1	18,73	+1	55	-1	2,58
4	-1	18,73	-1	22	+1	4,52

## 2.5. Сравнение расчетных и экспериментальных значений $\lg \tau$

Метод определения $\lg \tau$	№ опыта			
	1	2	3	4
Разрушение фанеры марки ФК поперечным изгибом				
Экспериментально	0,23	1,98	2,31	4,52
По модели 2.28	0,25	1,98	2,29	4,52
Деформирование фанеры марки ФК пенетрацией				
Экспериментально	0,12	0,48	2,61	4,54
По модели 2.27	0,10	0,57	2,58	4,52

Далее строили математическую модель в области, где справедливо обобщенное уравнение Журкова (1.16), описывающее данные экспериментальные зависимости. Для этого преобразовывали уравнение (1.16) в уравнение

$$\lg \tau = \lg \tau_m - 0,43 \frac{U_0}{RT_m} + 0,052U_0 \frac{10^3}{T} + 0,43 \frac{\gamma\sigma}{RT_m} - 0,052\gamma\sigma \frac{10^3}{T}. \quad (2.29)$$

Затем задались коэффициентами  $b_0, b_1, b_2, b_3$  (2.30) и преобразовали уравнение (2.29) в уравнение (2.31).

$$b_0 = \lg \tau - 0,43 \frac{U_0}{RT_m}; \quad b_1 = 0,43 \frac{\gamma}{RT_m}; \quad b_2 = 0,052U_0; \quad b_3 = 0,052\gamma; \quad (2.30)$$

$$\lg \tau = \lg \tau_m - 0,43 \frac{U_0}{RT_m} + 0,052U_0 \frac{10^3}{T} + 0,43 \frac{\gamma\sigma}{RT_m} - 0,052\gamma\sigma \frac{10^3}{T}. \quad (2.31)$$

Рассмотрим расчет математической модели на примере случая I при напряжениях меньше 130 МПа и случая II при твердости меньше 20 МПа.

Для случая I:

$$\tau_m = 10^{-2,75} \text{ с}; T_m = 1010 \text{ К}; U_0 = 209 \text{ кДж/моль};$$

$$\gamma = 1,4 \text{ кДж/(моль}\cdot\text{МПа)},$$

коэффициенты равны:  $b_0 = -13,34; b_1 = 0,71; b_2 = 10,7; b_3 = 0,717$ .

Для случая II:

$$\tau_m = 10^{-2,15} \text{ с}; T_m = 445 \text{ К}; U_0 = 560 \text{ кДж/моль};$$

$$\gamma = 24 \text{ кДж/(моль}\cdot\text{МПа)},$$

коэффициенты равны:  $b_0 = -66,57; b_1 = 27,61; b_2 = 28,67; b_3 = 12,29$ .

Принимаем для уравнения (2.31) значения неизвестных  $y = \lg t$ ,  $x_1 = \sigma$ ,  $x_2 = 10^3/T$  и получаем математические модели в виде формул (2.32) и (2.33) для случая I и II соответственно.

$$y = -13,34 + 0,71x_1 + 10,7x_2 - 0,72x_1x_2; \quad (2.32)$$

$$y = -30,74 + 24,34x_1 + 13,05x_2 - 11,05x_1x_2. \quad (2.33)$$

Коэффициент  $b_3$  значим, следовательно, модель отражает справедливость зависимости (2.29). По совпадению расчетных и экспериментальных данных, представленных в виде табл. 2.6, проверяли адекватность полученных математических моделей.

## 2.6. Сравнение расчетных и экспериментальных значений $\lg t$

Исследуемая величина	Метод определения	1	2	3	4	5
I. Долговечность фанеры марки ФК при разрушении поперечным изгибом для температуры 20 °С и напряжении меньше 130 МПа						
$\sigma$ , МПа	Экспериментально	110	115	120	125	130
$\lg t$	Экспериментально	4,20	3,40	2,55	1,75	0,95
	По модели	4,15	3,27	2,39	1,51	0,64
II. Долговечность фанеры марки ФК при деформировании пенетрацией для температуры 20 °С и твердости меньше 20 МПа						
$H$ , МПа	Экспериментально	18,00	18,50	19,00	19,5	20,00
$\lg t$	Экспериментально	6,00	4,75	4,00	3,3	2,50
	По модели	5,57	4,85	4,13	3,4	2,68

Из таблицы 2.6 видно, что зависимость (2.29) адекватно описывает эксперимент, следовательно, применение полученных из этого уравнения математических моделей (формулы (2.32) и (2.33)) позволяет рассчитать коэффициенты (2.29) в широком диапазоне нагрузок и температур.

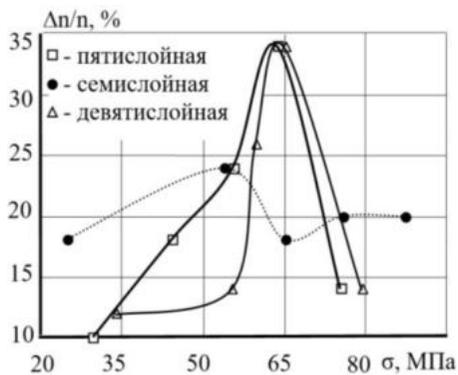
## 2.5. ОЦЕНКА РАЗБРОСА ПРОЧНОСТИ ФАНЕРЫ

Фанера, являясь композитным материалом, имеет сложную неоднородную структуру, поэтому в процессе ее разрушения наблюдается значительный разброс, который для прочности может достигать сотен процентов.

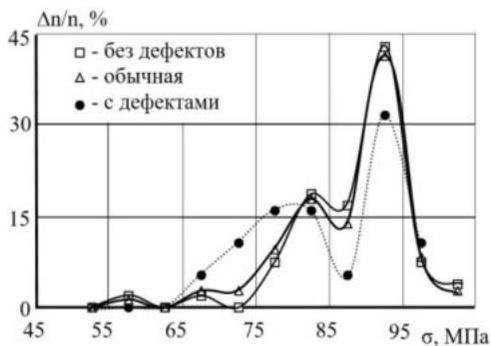
Разброс отдельных измерений зависит от множества внешних и внутренних факторов. К внешним относят технологические неточности при изготовлении образцов, колебание приложенной нагрузки, нестабильность теплового режима в процессе испытаний. Однако решающая роль принадлежит внутренним факторам, к которым относятся дефекты (остаточные напряжения, поры, микротрещины и т.д.), имеющиеся в материале, а также распределение их по объему.

Для оценки разброса величины разрушающего напряжения при поперечном изгибе было испытано по 70 образцов фанеры различных марок, толщины и сорта шпона. Условия испытания (температура, влажность, скорость нагружения) поддерживали строго постоянными. По полученным результатам построены кривые распределения прочности, представленные на рис. 2.13.

Из рисунка 2.13 видно, что для пятислойной фанеры кривая распределения прочности имеет форму, близкую к классической (Гауссовской). На кривой присутствует один пик, вызванный наличием дефектов, присущих данному материалу в результате переработки или механической обработки (царапины, трещины). Дефекты беспорядочно распределены по образцу и имеют разные размеры. При увеличении количества слоев площадь кривой распределения прочности не меняется, исключение составляет семислойная фанера с большим количеством внешних дефектов. Для данной фанеры пик становится менее выраженным, что свидетельствует об увеличении количества дефектов в единице объема материала.



a)



b)

**Рис. 2.13. Кривые распределения прочности для фанеры марок ФК (a) и ФСФ (б)**

Следует также отметить, что фанера марки ФСФ менее чувствительна к дефектам. При этом кривая имеет два явно выраженных пика, что объясняется наличием дефектов не только в шпоне, но и в полимерной прослойке.

Из полученных данных видно, что для фанеры характерна большая величина разброса. Эту величину необходимо учитывать при прогнозе и повышении долговечности изделий из фанеры.

### **3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ФАНЕРЫ В ПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ**

---

#### **3.1. О ВЕЛИЧИНЕ ПРЕДЕЛА ДЛИТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФАНЕРЫ**

Согласно термофлуктуационной концепции прочности при напряжении, равном нулю, долговечность конечна. Это значит, что разрушение может произойти при любой сколь угодно малой нагрузке, и даже при ее отсутствии. Однако в ряде теорий предполагается, что существует некоторое конечное напряжение, при котором долговечность становится бесконечно большой. Это напряжение называется безопасным или пределом длительного сопротивления, который для древесины составляет 0,5–0,6 временного сопротивления разрушению. Для полимерных материалов величина безопасного напряжения мала и экспериментально не обнаруживается. Физическая природа предела длительного сопротивления связана с атермическим механизмом разрушения межклеточного вещества древесины. При напряжениях выше предела длительного сопротивления древесинное вещество разрушается по термофлуктуационному механизму.

Основу фанеры составляет древесина, поэтому для нее должны проявляться те же закономерности при силовом нагружении, что и для древесины. Однако возникает вопрос о влиянии структуры на предел длительного сопротивления фанеры.

Проведены длительные испытания фанеры в режиме заданных постоянных напряжений и температур. Экспериментально полученная кривая длительного сопротивления представлена на рис. 3.1. Она имеет асимптотический характер, как и у древесины. Величина предела длительного сопротивления фанеры составляет 0,6...0,7 временного сопротивления разрушению, что существенно больше, чем у древесины.

Повышение предела длительного сопротивления у фанеры, по-видимому, связано с многослойной структурой материала и ступенчатым механизмом его разрушения.

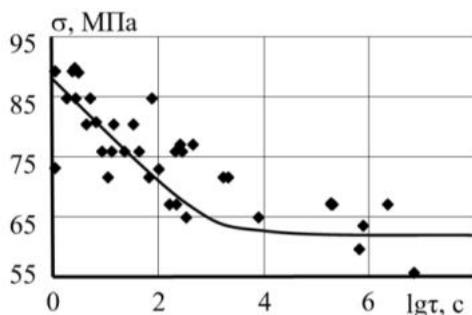


Рис. 3.1. Кривая длительного сопротивления фанеры марки ФСФ

### 3.2. ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ФАНЕРЫ

В процессе эксплуатации фанера находится под действием длительных нагрузок и температур, которые приводят к разрушению материала.

Для изучения термофлуктуационных закономерностей разрушения фанеры были проведены длительные испытания при поперечном изгибе. Этот вид нагружения является наиболее распространенным при эксплуатации строительных изделий и конструкции из фанеры. Испытания проводили в режиме заданных постоянных напряжений и температур. Установка и методика проведения экспериментов описаны в пунктах 2.2.1 и 2.3.1.

Полученные экспериментальные данные для многослойной фанеры марок ФК и ФСФ в координатах логарифм долговечности  $lgt$  от напряжения  $\sigma$  и обратной температуры  $10^3/T$  представлены на рис. 3.2 и 3.3. Из рисунков видно, что полученные линейные зависимости образуют семейства прямых (пучки), сходящихся в одну точку (полкус).

Графоаналитическим способом из экспериментальных зависимостей (рис. 3.2 – 3.4) определены физические константы (пункт 2.4.2) уравнения (1.18), значения которых представлены в табл. 3.1.

Как видно из таблицы, для испытанных марок фанеры предэкспонента  $\tau_m$  значительно больше периода колебаний атомов в твердом теле ( $10^{-13}$  с) [70]. Это объясняется тем, что фанера имеет сложное строение, следовательно, путь трещины увеличивается за счет клеевых прослоек.

Для фанеры, в отличие от древесины [76, 77] и большинства других древесных композитов [78, 79], проявляется сложный механизм разрушения [80, 81]. На рисунках 3.2 и 3.3 (за исключением 3.2, в) образуются двойные семейства с площадками перехода. По-видимому, для напряжений  $\leq 80$  МПа (марка ФСФ) и  $\leq 130$  МПа (марка ФК) происходит ее послойное разрушение (рис. 3.5, б),  $a \geq 80$  (марка ФСФ) и  $\geq 130$  МПа (марка ФК) фанера работает как монолитный материал (рис. 3.5, а).

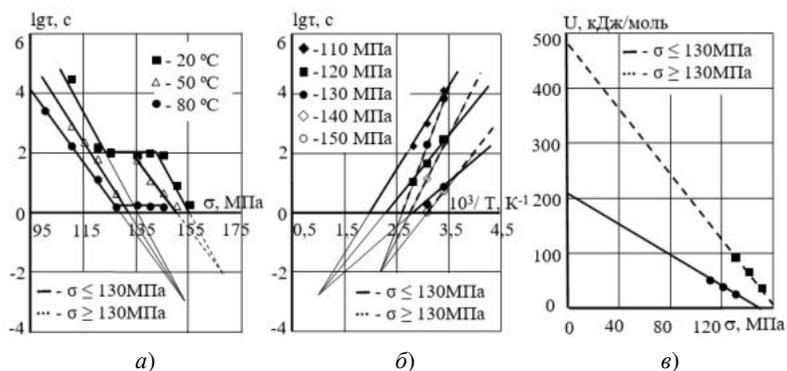


Рис. 3.2. Зависимости долговечности от напряжения (а) и обратной температуры (б), а также эффективной энергии активации от напряжения (в) при разрушении поперечным изгибом фанеры марки ФК

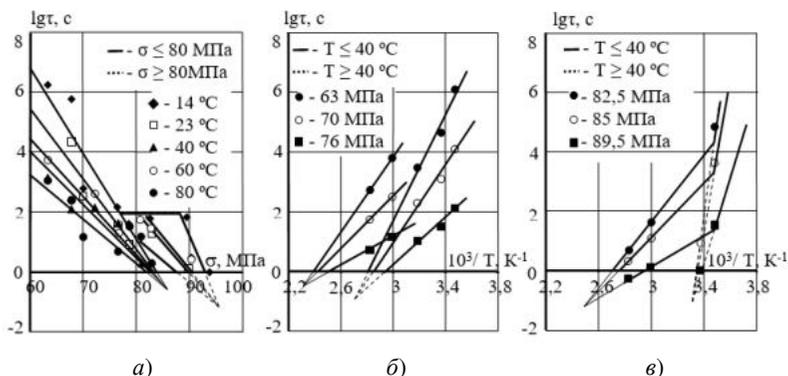


Рис. 3.3. Зависимости долговечности от напряжения (а), а также долговечности от обратной температуры в интервале напряжений  $\leq 80$  МПа (б) и  $\geq 80$  МПа (в) при разрушении поперечным изгибом фанеры марки ФСФ

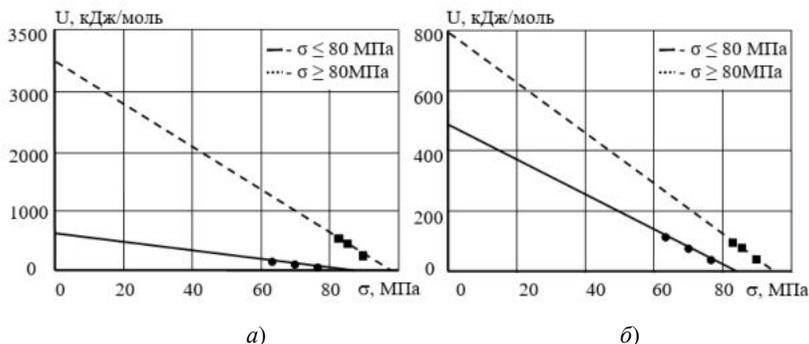


Рис. 3.4. Зависимости эффективной энергии активации от напряжения для фанеры марки ФСФ при разрушении поперечным изгибом

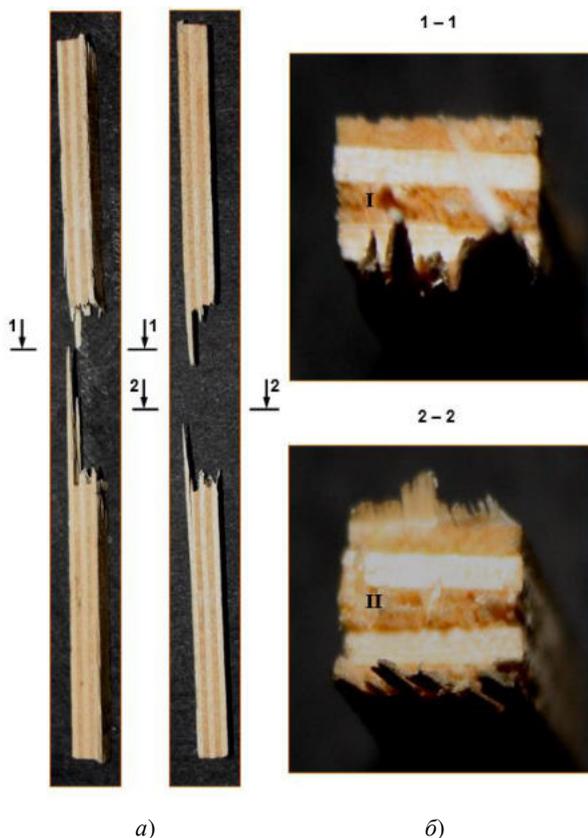
### 3.1. Значения физических констант при разрушении поперечным изгибом фанеры различных марок

Марка фанеры	Температура, °C	Напряжение, МПа	Физические константы			
			$\tau_m$ , с	$T_m$ , К	$U_0$ , кДж/моль	$\gamma$ , кДж/(МПа·моль)
ФСФ	$\leq 40$	$\leq 80$	$10^{-0,88}$	369	633	7,00
		$\geq 80$	$10^{-1}$	303	3518	45,00
	$\geq 40$	$\leq 80$	$10^{-0,4}$	431	486	5,60
		$\geq 80$	$10^{-1,1}$	400	790	8,00
ФК	—	$\leq 130$	$10^{-2,75}$	1010	209	1,40
		$\geq 130$	$10^{-1,81}$	435	480	2,86

Следует отметить, что фанера марки ФСФ по-разному работает в интервалах температур до и после 40 °C, что, по-видимому, связано с изменением состояния смолы, которая доотверждается при повышенных температурах.

Сложный механизм разрушения проявляется на величинах энергии активации (рис. 3.4) и других физических констант. Величины энергии активации  $U_0$  указывают на разрыв химических связей [70]. При больших напряжениях (послойном разрушении)  $U_0$  близка величине максимальной энергии активации смолы [82], тогда как при

малых напряжениях (монолитном разрушении) она равна максимальной энергии активации целлюлозы. Кроме того, для фанеры марки ФК характерны большие величины энергии активации, что вызвано явлением кратности [83, 84] – одновременно происходит разрушение не одной, а нескольких связей. Температура полюса  $T_m$  фанеры соответствует критическим температурам разложения связующего и древесины. Значения структурно-механической константы  $\gamma$  также подтверждает изменение механизма разрушения фанеры при определенных граничных напряжениях.



**Рис. 3.5. Сложный механизм разрушения фанеры марки ФК при поперечном изгибе:**

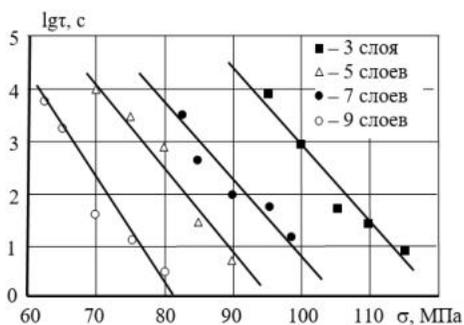
*а* – разрушение фанеры как монолитного материала ( $\sigma \geq 130$  МПа);

*б* – послойное разрушение фанеры ( $\sigma \leq 130$  МПа)

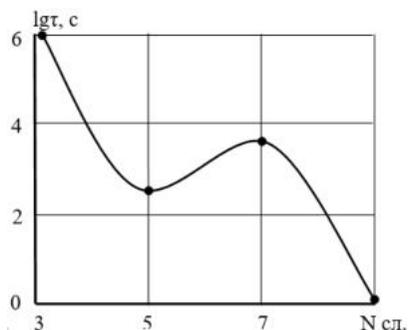
### 3.3. ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА СЛОЕВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ФАНЕРЫ

Количество слоев фанеры оказывает существенное влияние на ее прочность и стабильность механических характеристик. Изучение их влияния на долговечность фанеры марки ФК проводили при длительном поперечном изгибе в режиме заданных постоянных напряжений и температур. Установка и методика проведения экспериментов описаны в пунктах 2.2.1 и 2.3.1.

Экспериментальные данные для фанеры марки ФК при постоянной температуре  $18 \pm 1$  °С с разным количеством слоев представлены на рис. 3.6.



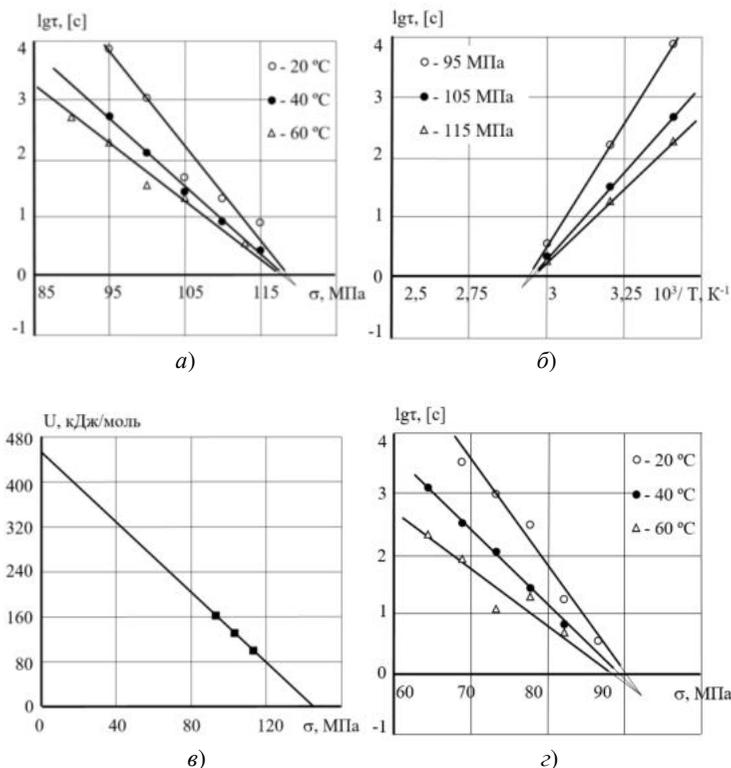
а)



б)

Рис. 3.6. Зависимости при разрушении поперечным изгибом фанеры марки ФК долговечности от напряжения (а) и количества слоев при напряжении 80 МПа (б)

Из рисунка 3.6, а видно, что зависимость долговечности от напряжения для фанеры марки ФК с разным количеством слоев имеет характер параллельных прямых, что указывает на постоянство константы  $\gamma$ , определяющей физическую структуру фанеры. С увеличением количества слоев (рис. 3.6, б) происходит нелинейное падение долговечности фанеры, что, по-видимому, связано с кинетикой деструкции клеевой прослойки и увеличением количества дефектов в шпонах [56].



**Рис. 3.7. Зависимости при разрушении поперечным изгибом:**  
 а – долговечности от напряжения для трехслойной фанеры марки ФК;  
 б – долговечности от обратной температуры для трехслойной фанеры марки ФК;  
 в – эффективной энергии активации от напряжения для трехслойной фанеры марки ФК;  
 г – долговечности от напряжения для пятислойной фанеры марки ФК;  
 д – долговечности от обратной температуры для пятислойной фанеры марки ФК;  
 е – эффективной энергии активации от напряжения для пятислойной фанеры марки ФК

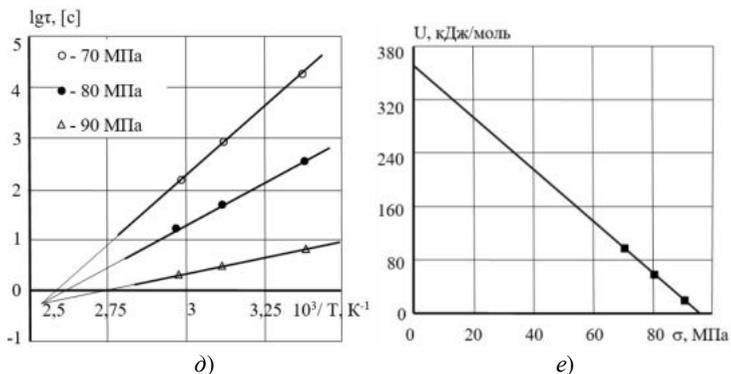


Рис. 3.7. Окончание

Для трех- и пятислойной фанеры длительные испытания проведены при вариации заданных постоянных температур. Область заданных постоянных напряжений ограничили 120 МПа, т.е. основным семейством прямых долговечности в эксплуатационной зоне нагрузок. Экспериментальные данные представлены на рис. 3.7. Полученные зависимости в координатах  $\lg\tau-\sigma$  и  $\lg\tau-10^3/T$  представляют собой семейства прямых (пучки) и описываются уравнением (2.8).

Графоаналитическим способом по программе Constanta.exe определены значения физических констант (табл. 3.2), входящих в уравнение (1.18).

Из таблицы 3.2 видно, что с увеличением количества слоев величины энергии активации  $U_0$  и структурно-механической константы  $\gamma$  увеличиваются, а температура полюса  $T_m$  падает (см. табл. 3.2).

### 3.2. Значения физических констант при разрушении поперечным изгибом фанеры марки ФК различной слоистости

Количество слоев	Физические константы			
	$\tau_m, с$	$T_m, К$	$U_0, кДж/моль$	$\gamma, кДж/(МПа \cdot моль)$
3	$10^{-0,18}$	444,00	297,50	2,44
5	$10^{-0,29}$	395,00	371,00	3,73

Увеличение  $U_0$ , по-видимому, связано с количеством клея между шпонами, определяющего кинетику его термодеструкции [85, 86]. Увеличение  $\gamma$  связано с ростом вероятности образования дефектов в массе шпона, что и приводит к снижению однородности структуры.

Константа  $\tau_m$ , определяющая период колебания кинетических единиц, изменяется несущественно с ростом количества слоев. Небольшое снижение, по-видимому, связано с увеличением изотропности в многослойной среде. По уравнению (1.15) рассчитаны величины долговечности при заданном напряжении и температуре, которые также представлены в табл. 3.2.

### **3.4. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ФАНЕРЫ**

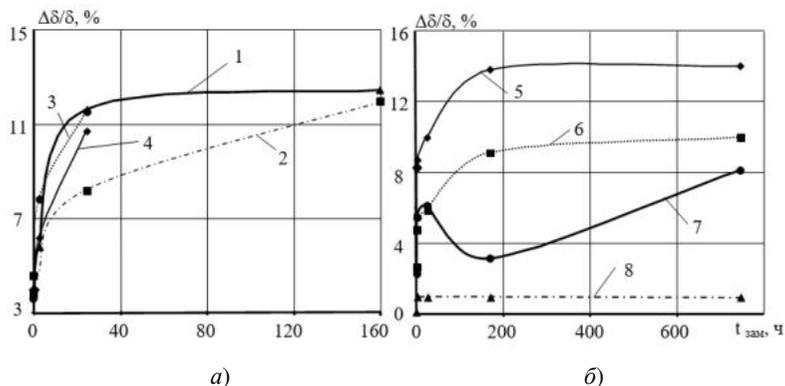
В условиях эксплуатации фанера подвергается воздействию различных агрессивных сред. При этом происходит существенное изменение ее механических свойств. Эти изменения могут быть связаны с появлением эффекта П. А. Ребиндера вследствие снижения энергии образования свободных поверхностей или вызваны химическими реакциями, протекающими в материале [87].

#### **3.4.1. Влияние жидких агрессивных сред на прочность фанеры**

Для прогноза работоспособности фанеры в реальных условиях эксплуатации изучено влияние жидких агрессивных сред на набухание и прочность. Испытания проводили при воздействии различных по природе жидкостей (пункт 2.1.2). Методика проведения экспериментов описаны в пункте 2.3.3.2, результаты испытаний приведены на рис. 3.8.

Из рисунка 3.8 видно, что фанера при воздействии жидких сред существенно набухает. При этом наиболее сильно – в кислотах, щелочи и пресной воде. Так, в серной и соляной кислотах набухание фанеры через 24 ч составляет – 12%, в щелочи – 11%, в пресной воде – 10%.

В машинном масле и соленой воде набухание фанеры значительно меньше. Из всех исследуемых жидкостей только в органическом растворителе Р-646 фанера практически не набухает.



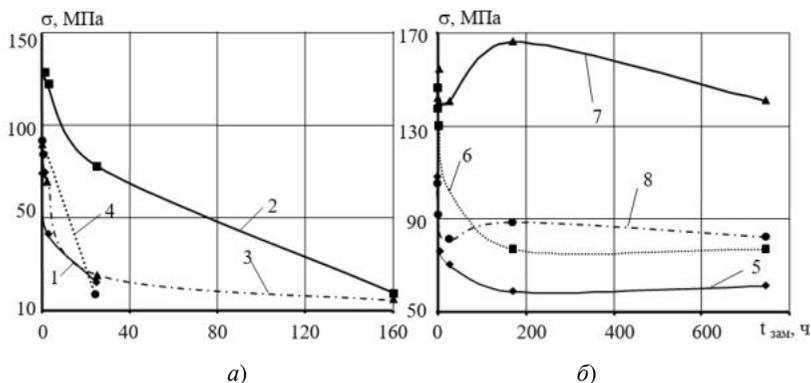
**Рис. 3.8. Влияние агрессивных сред на набухание фанеры марки ФК:**  
 1 – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 2 – ортофосфорная кислота; 3 – HCl; 4 – NaOH; 5 – пресная вода;  
 6 – соленая вода; 7 – машинное масло; 8 – растворитель 646

В процессах набухания фанеры наблюдали и другие физико-химические явления. Так, после двух часов замачивания образцов в NaOH происходит изменение их цвета с желтого на коричневый и размягчение; после 24 ч замачивания – коробление образцов. При замачивании фанеры в кислотах наблюдается расслоение образцов с полным разрушением клеевого слоя. При этом в ортофосфорной кислоте это явление проявляется на 5 день, а в соляной и серной кислотах – уже через 24 ч, что приводит к полной потере несущей способности материала.

Снижение прочности связано как с химической активностью среды, так и с величиной набухания материала, т.е. чем больше жидкости входит в фанеру, тем сильнее снижается ее прочность. Последнее объясняется ослаблением межмолекулярных взаимодействий в структуре материала [88, 89].

На рисунке 3.9 показаны зависимости прочности при изгибе от времени выдержки в различных жидкостях. Из рисунка видно, что исследованные жидкие среды оказывают существенное влияние на прочностные свойства фанеры.

При этом во всех средах резкая потеря прочности наблюдается после выдержки 24 ч, а далее наступает стабилизация. Наибольшая потеря прочности фанеры при максимальном набухании происходит в кислотах и щелочи. Как указывалось выше, в кислотах происходит расслоение образцов, а в щелочи – размягчение и коробление.



**Рис. 3.9. Влияние агрессивных сред на прочность фанеры марки ФК при поперечном изгибе:**

1 – NaOH; 2 – ортофосфорная кислота; 3 – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 4 – HCl; 5 – пресная вода; 6 – соленая вода; 7 – машинное масло; 8 – растворитель 646

### 3.3. Влияние агрессивной среды и длительности замачивания на прочность фанеры марки ФК при поперечном изгибе

Агрессивная среда	Прочность образцов, оставшаяся после воздействия агрессивной среды, %					
	Длительность замачивания					
	15 мин	30 мин	2 ч	24 ч	7 дн	31 дн
Водопроводная вода	69	61	51	57	40	39
Соленая вода	99	93	88	70	52	52
Растворитель 646	73	71	62	55	59	55
Машинное масло	96	104	94	95	113	95
Щелочь	54	48	30	16	–	–
Ортофосфорная кислота	77	76	74	50	10	–
Серная кислота (концентрация 10%)	56	54	45	12	10	–
Соляная кислота (концентрация 10%)	57	57	53	17	–	–

Особенно сильное влияние оказывает серная кислота. Так, уже через 2 ч в 10%-ном растворе серной кислоты теряется 55% прочности, а через 24 ч – 88%, после чего образец расслаивается.

Пресная и соленая вода (содержащая 30% соли) оказывает меньшее влияние. Резкая потеря прочности наблюдается после выдержки 2 ч, а затем падение стабилизируется.

Минимальное воздействие на прочностные свойства фанеры оказывают органический растворитель Р-646 и машинное масло. При действии растворителя через 24 ч прочность падает на 18% и далее не меняется. Машинное масло приводит к падению прочности на 7% после 15 мин выдержки, а далее наблюдается ее рост. Через месяц потеря прочности при действии растворителя составляет 45%, а машинного масла – 5%. Нарастание прочности, по-видимому, связано с химическим взаимодействием машинного масла с карбамидным клеем. В таблице 3.3 приводятся значения остаточной прочности (%) фанеры после воздействия различных агрессивных сред.

#### **3.4.2. Влияние жидких агрессивных сред на долговечность фанеры**

Изучение влияния действия жидких сред на долговечность фанеры (ФСФ) проводили при длительном поперечном изгибе в режиме заданных постоянных напряжений и температур. Установка и методика проведения экспериментов описаны в пунктах 2.2.1 и 2.3.3.

Полученные экспериментальные данные в координатах логарифм долговечности от напряжения (обратной температуры) представлены на рис. 3.10.

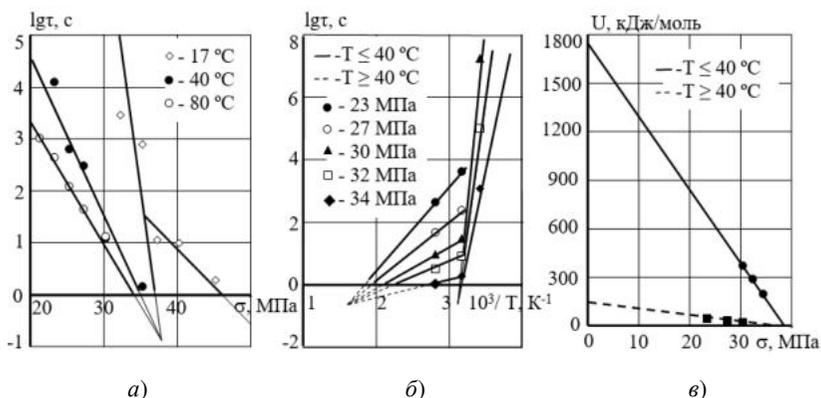
Из рисунка видно, что характер зависимостей ( $\lg t - \sigma$ ) после воздействия жидкой агрессивной среды (рис. 3.10, *a*) сохраняется, однако на семействе веерообразных прямых пропадает «переходная площадка», а в интервале больших напряжений дополнительный пучок вырождается в прямую.

Из полученных зависимостей (рис. 3.10, *б, в*) графоаналитическим способом определены физические константы (пункт 2.4.2) уравнения (1.18), значения которых представлены в табл. 3.4.

Из таблицы 3.4 видно, что выдержка в агрессивной среде приводит к существенному изменению большинства констант. После действия ортофосфорной кислоты происходит экстремальное изменение максимальной энергии активации разрушения  $U_0$ , температуры

полюса  $T_m$  и структурно-механической константы  $\gamma$  в исследованном интервале температур и малом интервале напряжений. Величина предэкспоненты  $\tau_m$  меняется незначительно.

Сохраняется явление кратности после агрессивных воздействий, что, по-видимому, связано с конгломерацией химических связей фанеры при воздействии кислоты. Такое поведение констант указывает на изменение механизма разрушения фанеры после действия агрессивной среды и приводит к значительному снижению ее долговечности.



**Рис. 3.10. Зависимости при разрушении поперечным изгибом фанеры марки ФСФ после воздействия ортофосфорной кислоты в течение 3 сут:**

*a* – долговечности от напряжения; *б* – долговечности от обратной температуры; *в* – эффективной энергии активации от напряжения

### 3.4. Значения физических констант при разрушении поперечным изгибом фанеры марки ФСФ после воздействия ортофосфорной кислоты в течение 72 ч

Температура, °С	Физические константы			
	$\tau_m$ , с	$T_m$ , К	$U_0$ , кДж/моль	$\gamma$ , кДж/(МПа·моль)
≤ 40	$10^{-0,63}$	323	1752	45
≥ 40	$10^{-0,57}$	610	138	3,88

### 3.4.3. Влияние теплового старения и УФ-облучения на прочность и долговечность фанеры

Фанера в процессе хранения и эксплуатации подвергается длительному воздействию повышенных температур и солнечных лучей, приводящих к старению, т.е. к изменению ее физико-механических характеристик [90]. В связи с этим для надежного прогнозирования долговечности фанеры необходимо изучить влияние старения.

Для этого фанеру подвергали воздействию теплового старения и УФ-облучения. Приборы и методика для проведения испытаний описаны в пунктах 2.2.4 и 2.3.5. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 3.11 и 3.12.

Из рисунков видно, что влияние повышенной температуры и УФ-облучения одинаково проявляются на прочности фанеры.

В процессе теплового старения (рис. 3.11) при температуре 50 °С происходит значительное упрочнение фанеры, что ранее [77] наблюдали и для древесины. Следует также отметить, что основной рост прочности фанеры наблюдается после 30 ч теплового старения и к 40 ч он составляет почти 30% от первоначальной. При температуре 80 °С прочность фанеры ведет себя несколько иначе. После 5 ч прогрева она повышается и превышает начальную прочность более чем на 20%, а затем снова падает, возвращаясь к исходной величине. В интервале от 20 до 80 ч выдержки при 80 °С наблюдается процесс стабилизации прочности фанеры, что характеризуется ее незначительными потерями (порядка 3...5%).

Воздействие УФ-облучения также сказывается на повышении прочности фанеры (рис. 3.12). Это, по-видимому, связано с так называемым экранирующим эффектом: верхний шпон защищает и предохраняет полимерный слой от разрушения, а сама древесина после воздействия ультрафиолета становится прочнее.

Для определения предельной температуры старения (размягчения или разложения) проэкстраполировали линейную зависимость ( $\sigma-T$ ) на ось абсцисс при напряжении, равном нулю (рис. 3.13). Аналогично определили напряжения при температуре, равной 0 °С. Полученные результаты представлены в табл. 3.5.

Из таблицы видно, что исходная прочность (при 0 °С) и температура разложения (клея) после УФ-облучения увеличиваются, что также необходимо учитывать при проектировании фанеры в строительных изделиях.

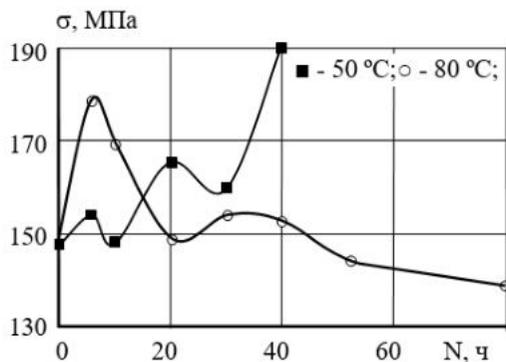


Рис. 3.11. Влияние времени теплового старения на прочность фанеры марки ФК при поперечном изгибе

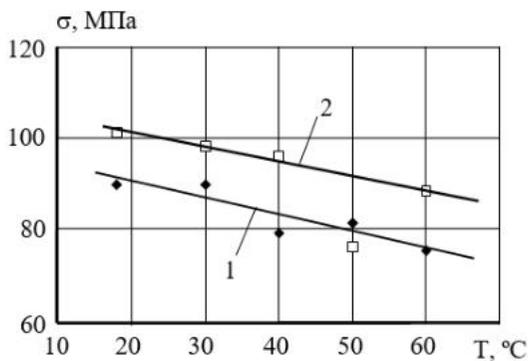


Рис. 3.12. Влияние температуры на прочность фанеры марки ФК при поперечном изгибе до (1) и после УФ-облучения (2)

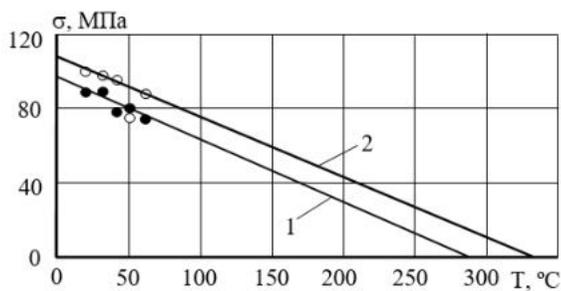


Рис. 3.13. Влияние температуры на прочность фанеры марки ФК при поперечном изгибе до (1) и после УФ-облучения (2)

### 3.5. Влияние УФ-облучения на критические параметры (прочность и термостойкость) фанеры марки ФК при поперечном изгибе

Параметры	До УФ-облучения	После УФ-облучения
$t$ , °С при $\sigma = 0$ МПа	286	333
$\sigma$ , МПа при $t = 0$ °С	97	108

#### 3.4.4. Влияние циклов замораживания-оттаивания на долговечность фанеры

Фанера в процессе эксплуатации в строительных изделиях подвержена таким воздействиям, как переменное замораживание-оттаивание, что негативно сказывается на ее работе и сроке службы.

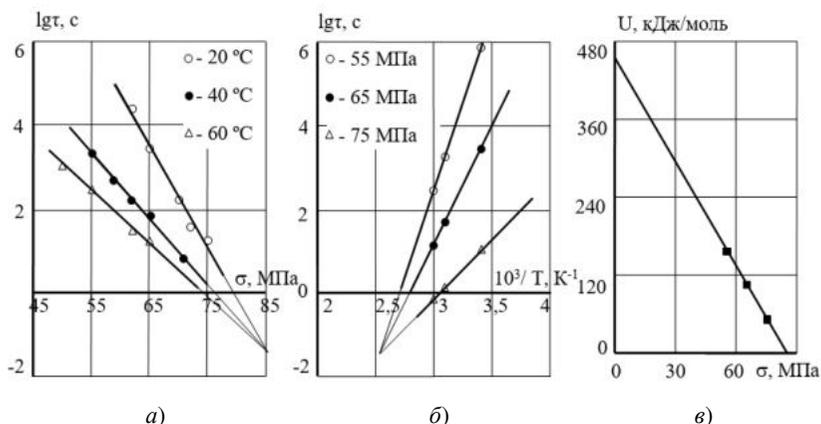
Исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на долговечность материала проводили на пятислойной фанере марки ФСФ. Перед замораживанием образцы замачивали в воде в течение 1 ч, а затем выдерживали на морозе до полного их промерзания. Оттаявшие образцы высушивали и после заданного числа циклов замораживания-оттаивания испытывали на долговечность при поперечном изгибе в режиме заданных постоянных напряжений и температур, фиксируя время до разрушения образца. Установка и методика проведения экспериментов описаны в пунктах 2.2.1 и 2.3.5.

Полученные экспериментальные данные в координатах логарифм долговечности от напряжения (обратной температуры) представлены на рис. 3.14.

Из рисунка видно, что характер зависимостей после воздействия 60 циклов замораживания-оттаивания сохраняется, и семейства полученных веерообразных прямых описываются уравнением (1.18). Рассчитанные графоаналитическим способом физические константы (пункт 2.4.2) представлены в табл. 3.6.

Из таблицы видно, что после длительных циклических температурно-влажностных воздействий характер разрушения меняется. Ранее предполагалось, что при малых напряжениях и больших температурах при разрушении фанеры поперечным изгибом определяющим являются свойства смолы (связующего), а не древесного шпона (целлюлозы).

После 60 циклов замораживания-оттаивания связующее разрушается в результате хемодеструкции и нагрузка воспринимается древесным шпоном.



**Рис. 3.14. Зависимости долговечности от напряжения (а) и обратной температуры (б), а также эффективной энергии активации от напряжения (в) при разрушении поперечным изгибом фанеры марки ФСФ после 60 циклов замораживания-оттаивания**

### **3.6. Значения физических констант при разрушении поперечным изгибом пятислойной фанеры марки ФСФ после 60 циклов замораживания-оттаивания**

$\tau_m, \text{c}$	$T_m, \text{K}$	$U_0, \text{кДж/моль}$	$\gamma, \text{кДж/(МПа}\cdot\text{моль)}$
$10^{-1,45}$	394,0	455,0	5,1

Это подтверждается величинами физических констант после температурно-влажностных воздействий. Максимальная энергия активации  $U_0$ , температура полюса  $T_m$  и структурно-механический коэффициент  $\gamma$  близки к величинам коэффициентов исходной фанеры (табл. 3.1). Причиной разрушения материала при многократном замораживании-оттаивании, по-видимому, является расширение воды, содержащейся в порах древесины при замерзании. Следовательно, потеря прочности, прежде всего, вызвана влиянием воды при отрицательных температурах. Также при замораживании-оттаивании насыщение водой и отрицательные температуры деструктурируют связующее, разрушая химические связи, и долговечность снижается. По-видимому, кроме тепловой и механической энергии, в процессе разрушения фанеры при циклических температурно-влажностных воздействиях большой вклад вносит химическая энергия воды.

Таким образом, можно сделать вывод, что вода [91] оказывает большое влияние на связующее и древесину, следовательно, в строительных изделиях фанеру необходимо изолировать от контакта с водой. Для этого на ее поверхность необходимо наносить защитные гидрофобные покрытия или пропитывать специальными модификаторами.

### **3.5. ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФАНЕРЫ**

Главными недостатками фанеры являются ее низкая влагостойкость. Циклические и ангармонические температурно-влажностные воздействия приводят к интенсивной деструкции фанеры.

Эффективным способом повышения механических свойств фанеры за счет водостойкости является модификация пропиткой мономерами. В качестве модификаторов древесины хорошо зарекомендовали себя органические растворы эмукрил М и эмульсия 252. Пропитка древесины и последующая термическая обработка позволяют повысить ее водостойкость, прочность и долговечность [92 – 98]. Поэтому в качестве модификаторов фанеры были взяты эти жидкости (пункт 2.1.3).

Для отработки технологии пропитки изучен процесс набора массы фанеры в эмукриле М и эмульсии 252. Исследования проводили на образцах фанеры марки ФК размерами 120×10×6 мм. Наиболее заметный прирост массы происходит через 2 ч, затем процесс замедляется и стабилизируется после 72 ч. Изменение массы фанеры в зависимости от времени пропитки органическими жидкостями показано на рис. 3.15.

Структурные исследования на оптическом и электронном микроскопах при 1000-кратном увеличении показали, что полимерные эмульсии (эмукрил М и эмульсия 252) при пропитке заполняют в древесине клеточные пустоты, образуя после полимеризации сложный каркас из полимерной арматуры (рис. 3.16).

Диффузионные исследования модифицированной фанеры (рис. 3.17) подтвердили результаты микроскопических. Установлено, что пропитка фанеры эмукрилом М и эмульсией 252 приводит к снижению коэффициента диффузии более чем в 3 раза. Это подтверждает механизм образования арматурного каркаса внутри древесного шпона.

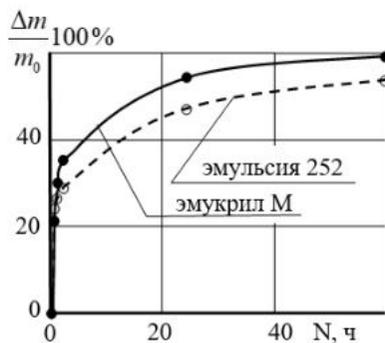
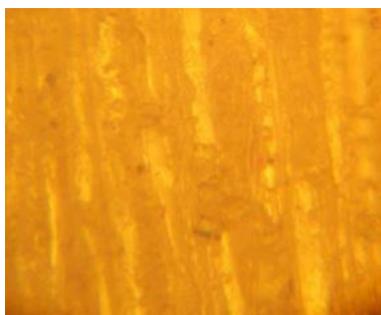
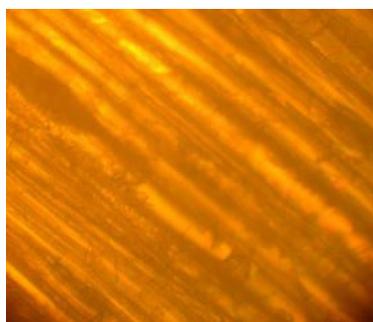


Рис. 3.15. Изменение массы (%) фанеры в зависимости от времени пропитки модификаторами

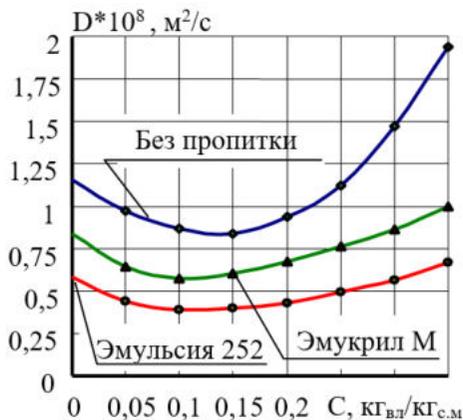


a)



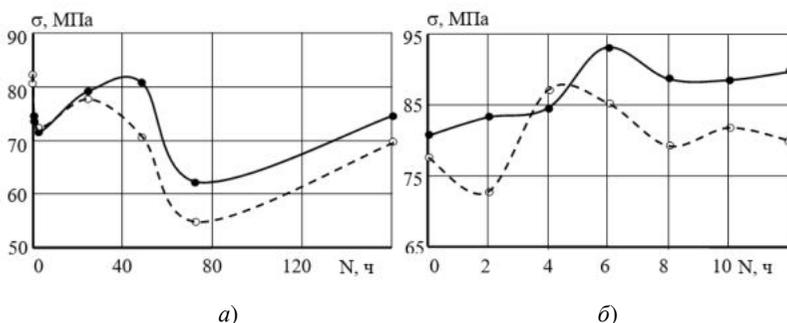
б)

Рис. 3.16. Оптические микрофотографии структуры древесного шпона фанеры (увеличение X1000): a – исходного; б – модифицированного эмульсией 252



**Рис. 3.17. Зависимость эффективного коэффициента диффузии влаги в шпоне фанеры в функции влагосодержания при пропитке модификаторами**

Для оценки влияния модификации на механические свойства фанеры при разных временах пропитки определили ее кратковременную прочность при поперечном изгибе (рис. 3.18, а). Из рисунка видно, что прочность фанеры после пропитки в течение 70 ч существенно падает, а после 130 ч достигает исходной величины. В процессе термообработки при 80 °С (рис. 3.18, б) в течение 6...7 ч – прочность возрастает на 10...20%.



**Рис. 3.18. Зависимость прочности фанеры марки ФК при поперечном изгибе от времени пропитки модификаторами без термообработки (а) и с термообработкой при  $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б):**  
 ● – эмукрил М; ○ – эмульсия 252

Для исследованных модификаторов по массе поглощения и механическим характеристикам установлен оптимальный режим пропитки фанеры марки ФК. Длительность пропитки эмульсией М и эмульсией 252 составляет соответственно 48 и 24 ч. После термообработки, по-видимому, происходит реакция полимеризации, которая приводит к увеличению прочности фанеры. Оптимальное время термообработки для фанеры, модифицированной эмульсией М, составляет 6 ч, а для обработанной эмульсией 252 – 4 ч.

## 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФАНЕРЫ В ПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

---

### 4.1. О ТЕПЛОВОМ РАСШИРЕНИИ ФАНЕРЫ

В процессе эксплуатации фанера подвергается воздействию переменных температур. При этом происходит изменение ее размеров, вызывающее в материале значительные термические напряжения [99]. В связи с этим возникает необходимость изучения поведения материала в свободном состоянии при нагревании с заданной скоростью (дилатометрии).

Установка и методика проведения экспериментов описаны в пунктах 2.2.3 и 2.3.4.

Полученные экспериментальные результаты для исследованных марок фанеры представлены на рис. 4.1 и 4.2.

Из рисунка 4.1 видно, что для фанеры марки ФСФ зависимость имеет экспоненциальный характер. По своему виду она аналогична кривой ползучести. Для фанеры марки ФК (рис. 4.1) дилатометрическая кривая имеет экстремум при 80 °С. Дилатометрические кривые можно разбить на два участка. Для фанеры марки ФСФ первый участок соответствует температуре  $\leq 55$  °С. На этом участке происходит резкое удлинение образцов, после чего наступает стабилизация процесса (второй участок) [99]. Для фанеры марки ФК резкое удлинение наблюдается до 80 °С а выше начинается сужение образца. После воздействия на образцы фанеры марки ФСФ циклов замораживания-оттаивания (рис. 4.2) интервал резкого удлинения сокращается до 30 °С, а при температуре  $\geq 80$  °С фанера начинает сужаться. Последнее, по-видимому, связано с доотверждением фенолформальдегидной смолы. Из рисунков 4.1 и 4.2 видно, что после воздействия циклов замораживания-оттаивания существенно увеличивается тепловое расширение фанеры, что необходимо учитывать в процессе эксплуатации изделий из нее.

В процессе эксплуатации фанера часто подвергается воздействию солнечного света. Дилатометрические испытания проводили после облучения лампами ПРК в течение определенного количества часов. Полученные результаты представлены на рис. 4.3.

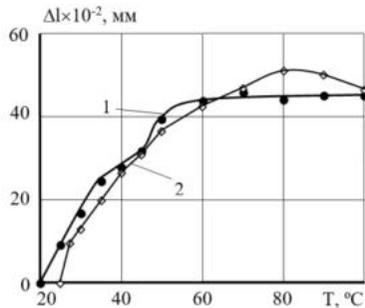


Рис. 4.1. Дилатометрические кривые для фанеры марки ФСФ (1) и FK (2) при скорости нагрева 1,65 °C/мин

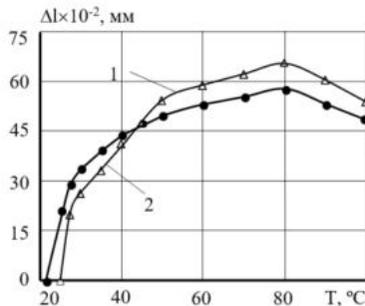


Рис. 4.2. Дилатометрические кривые для фанеры марки ФСФ после 30 (1) и 60 (2) циклов замораживания–оттаивания при скорости нагрева 1,65 °C/мин

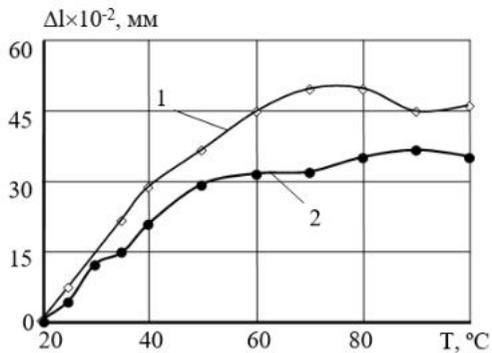


Рис. 4.3. Дилатометрические кривые для фанеры марки FK до (1) и после (2) УФ-облучения при скорости нагрева 1,65 °C/мин

Из рисунка видно, что после УФ-облучения вид дилатометрической кривой не меняется, однако процесс расширения замедляется, на что указывает падение величины коэффициента термического расширения (табл. 4.1).

Дилатометрия позволяет определять структурные переходы, которые характеризуются температурами перехода от одной величины коэффициента термического расширения к другой. Как видно из рис. 4.4, для фанеры это температура 40 и 70 °С. После УФ-облучения температура перехода смещается в более высокую область температур – 50, 90 °С. Это, по-видимому, связано со слоистой структурой материала.

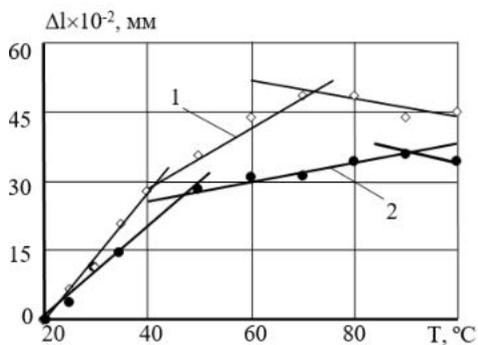
Результаты исследования фанеры различной слоистости представлены на рис. 4.5.

При температуре  $\leq 70$  °С для всех толщин происходит резкое удлинение образцов, после чего наступает стабилизация процесса для девятислойной и сужение – для пяти- и семислойной фанеры. Последнее, как отмечено выше, связано с доотверждением полимерной составляющей.

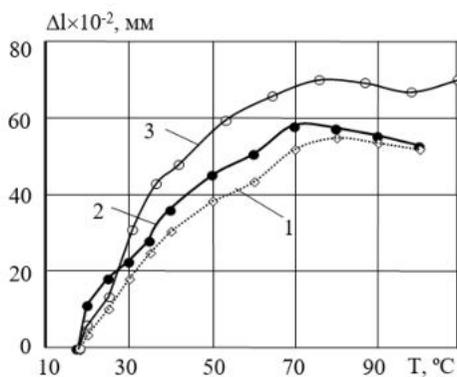
#### 4.1. Коэффициенты линейного термического расширения ( $\alpha_{\text{ср}}$ ) фанеры

Марка	Внешние воздействия	Количество слоев	$\alpha_{\text{ср}} \cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$
ФК	–	5	2,090
		7	2,030
		9	2,570
	УФ-облучение	5	1,820
ФСФ	–	5	1,483
	30 циклов замораживания-оттаивания	5	2,324
	60 циклов замораживания	5	2,287

*Примечание:* коэффициент линейного термического расширения древесины –  $3,96 \cdot 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$



**Рис. 4.4. Определение температур перехода для фанеры марки ФК до (1) и после (2) УФ-облучения при скорости нагрева 1,65 °С/мин**



**Рис. 4.5. Дилатометрические кривые при скорости нагрева 1,65 °С/мин для фанеры марки ФК: 1 – пятислойной; 2 – семислойной; 3 – девятислойной**

Из полученных кривых рассчитали коэффициенты линейного термического расширения по формуле

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного термического расширения, 1/°С;  $l_0$  – первоначальная длина образца, мм;  $\Delta l$  – удлинение образца (мм) при изменении температуры на величину  $\Delta T$ , °С.

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

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 \Delta T_1 + \dots + \alpha_n \Delta T_n}{\Delta T_1 + \dots + \Delta T_n}. \quad (4.2)$$

Усредненные значения коэффициента линейного термического расширения приведены в табл. 4.1.

Из таблицы видно, что для древесины различных пород  $\alpha_{\text{ср}}$  находится в пределах  $(3 \dots 5) \cdot 10^{-6}$ ,  $1/^\circ\text{C}$ . Коэффициент линейного термического расширения фанеры в 1,5–2 раза меньше, чем у древесины, что, очевидно, связано с их структурой. По-видимому, у древесины расширяются трубчатые клетки, а у фанеры – целиком шпон.

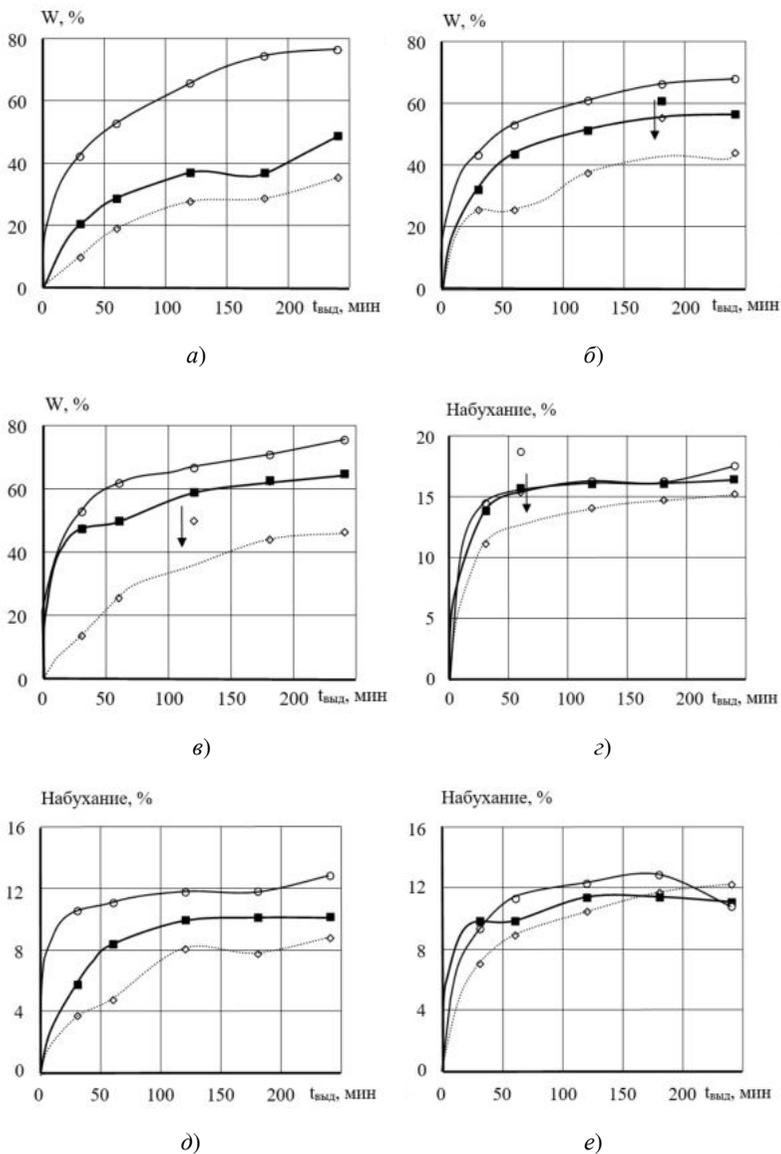
Слоистость не оказывает существенного влияния на коэффициент линейного термического расширения фанеры. Так, увеличение его величины (в 1,2 раза) наблюдается только для девятислойной фанеры.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что фанера еще менее чувствительна к температуре, чем древесина и ее применение также не требует устройства температурных швов в крупногабаритных зданиях.

## 4.2. ВЛИЯНИЕ ТЕРМО- И ФОТОСТАРЕНИЯ НА НАБУХАНИЕ ФАНЕРЫ

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 композитом жидких сред и набухания. Вода существенно влияет на физико-механические характеристики древесных композитов. Кроме того, она является наиболее распространенной жидкой средой, поэтому изучение процессов набухания проводили в ней.

Испытания фанеры марки ФК проводились в воде при постоянных температурах (18, 40 и 60  $^\circ\text{C}$ ) до и после воздействия теплостарения и УФ-облучения (в течение 50 ч) на образцах размерами  $20 \times 20 \times (16 \dots 17)$  мм. По результатам построены кинетические кривые в координатах набухание (водопоглощение) от времени выдержки в воде (рис. 4.6). Кривые имеют экспоненциальный вид.



**Рис. 4.6. Влияние старения на фанеру марки ФК при:**

*a* – водопоглощения до старения; *б* – водопоглощения после УФ-облучения;

*в* – водопоглощения после термостарения; *г* – набухания до старения;

*д* – набухания после УФ-облучения; *е* – набухания после термостарения

Из рисунка 4.6 видно, что наиболее сильно процессы набухания и водопоглощения протекают на начальном участке (в течение 50...100 мин), после чего они замедляются или наступает стабилизация. При этом на скорость процессов сильно влияет температура воды. Так, при ее нагреве до 60 °С величина водопоглощения для фанеры увеличивается в 2 раза.

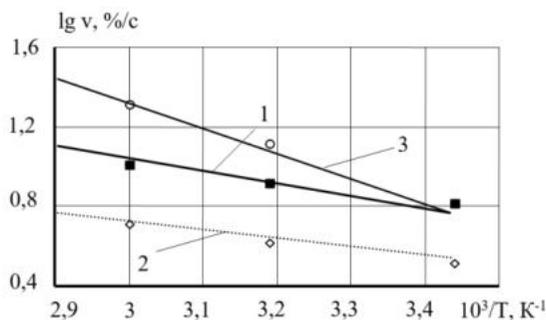
После теплостарения и УФ-облучения поведение фанеры в воде меняется. Так, при комнатной температуре после термостарения величина водопоглощения увеличивается в 1,3–1,5 раза, а после УФ-облучения водопоглощение фанеры почти не меняется.

При нагреве воды до 60 °С как после термостарения, так и УФ-облучения характерно падение величины водопоглощения. При этом минимальное водопоглощение наблюдается после УФ-облучения. При набухании материалы ведут себя аналогично.

Из полученных результатов следует, что в фанере после старения происходит нарушение связей в клеевой прослойке. Однако с повышением температуры они, по-видимому, рекомбинируют, в результате чего водопоглощение и набухание фанеры падают.

### 4.3. ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА СКОРОСТЬ НАБУХАНИЯ ФАНЕРЫ

Для определения характеристик водопоглощения фанеры графоаналитическим способом [100] построены зависимости скорости набухания от обратной температуры (рис. 4.7).



**Рис. 4.7. Зависимость скорости набухания фанеры марки ФК в воде от обратной температуры:**

1 – до старения; 2 – после УФ-облучения; 3 – после термостарения

#### 4.2. Значения физических констант, характеризующих скорость набухания фанеры марки ФК

Воздействие	$E$ , кДж/моль	$lgv$	$E/lgv$
–	19,96	2,5	7,98
УФ-облучение	19,96	2,2	9,07
Теплостарение	21,95	4,6	4,77

Из рисунка 4.7 видно, что до и после старения они представляют собой прямые линии и описываются уравнением вида Аррениуса (2.13), где  $v$  – скорость водопоглощения,  $v_0$  – предэкспоненциальный множитель, а  $U_0$  – энергия активации процесса водопоглощения.

Предэкспонента определяется экстраполяцией прямых на ось ординат (скорость набухания), а энергия активации определяется как тангенс угла наклона прямой. Полученные значения констант набухания представлены в табл. 4.2.

Из таблицы видно, что константы, характеризующие скорость набухания, меняются в зависимости от вида воздействия. Для фанеры наиболее опасным является тепловое старение. По соотношению  $E/lgv$  видно, что наиболее стабильна фанера к УФ-облучению.

Полученные результаты позволяют прогнозировать скорость набухания фанеры до и после старения.

#### 4.4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФАНЕРЫ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ

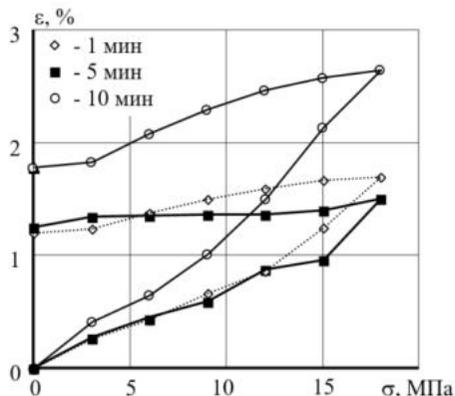
В процессе эксплуатации фанера наряду с древесными композициями подвергается многократным деформациям сжатия. Основной характеристикой сопротивления сжимающим нагрузкам является модуль деформации (упругой, полной и остаточной).

Деформационную долговечность твердого тела в основном определяет величина остаточной деформации, которая зависит от многих факторов: уровня приложения нагрузки, длительности ее действия, температуры и т.д.

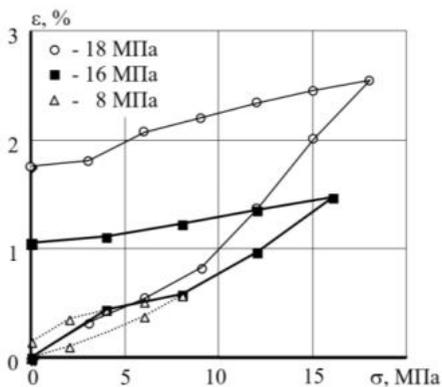
Для изучения влияния заданной полной деформации на остаточную, а также скорости нагружения на основные деформационно-силовые параметры испытания фанеры проводили при сжатии в режиме заданных скоростей нагружения или разгрузки, в процессе которых фиксировали изменение деформации  $\epsilon$  при изменении напряжения  $\sigma$ .

Полученные зависимости (рис. 4.8) представляют собой петли гистерезиса, т.е. при одних и тех же значениях напряжения  $\sigma$  деформация при нагружении существенно меньше, чем при разгрузке.

После разгрузки в образце остаточная деформация колеблется от 2,5 до 23,0% (в зависимости от уровня полной деформации). Однако, если полная деформация фанеры составляет 4...5%, то после снятия нагрузки она полностью исчезает.



а)



б)

**Рис. 4.8. Зависимости деформации от напряжения фанеры марки ФК при разной длительности нагружения (а) и разной величине нагрузки (б)**

Площадь внутри петли гистерезиса соответствует механической энергии, большая часть которой переходит в тепловую. Из оставшейся части работы большая доля идет на увеличение упругой работы образца и энергии деформации, а небольшая ее часть запасается в виде свободной энергии высокоэластичной деформации [101]. При этом с увеличением деформации растет отношение работы, перешедшей в тепло, ко всей работе. Следует отметить, что в пределах упругости оно близко к нулю. Итак, при многократно действующих переменных нагрузках в результате больших механических потерь возникает разогрев материала. Он может привести к снижению прочности и химическим изменениям в материале [102]. Поэтому механические потери должны быть сведены к минимуму.

Из рисунка 4.8 видно, что площадь петли гистерезиса зависит как от напряжения, так и скорости нагружения. Скорость нагружения варьировали изменением длительности и величины ступеней нагружения. Полученные результаты приведены в табл. 4.3.

#### 4.3. Влияние скорости нагружения на деформационно-силовые параметры фанеры марки ФК

Деформационно-прочностные характеристики	Факторы					
	Величина ступенчатой нагрузки, кг			Длительность ступенчатого нагружения, мин		
	2	3	4	10	5	1
Скорость нагружения, кг/мин	0,2	0,3	0,4	0,3	0,6	3,0
Максимальные напряжения $\sigma$ , МПа	6,4	14,4	12,8	14,4	14,4	14,4
Максимальная деформация $\varepsilon_{\max}$ , %	9,0	42,5	28,0	42,5	30,0	27,0
Остаточная деформация $\varepsilon_{\text{ост}}$ , %	2,5	25,0	19,0	25,0	21,0	16,0
Квазиупругая деформация ( $\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\text{ост}}$ ), %	6,5	17,5	9,0	17,5	9,0	11,0
Площадь петли гистерезиса $A$ , %·МПа	8,0	180,0	121,6	180,0	151,2	151,2

Из таблицы 4.3 видно, что для фанеры повышение ступенчатой нагрузки при сохранении длительности ее действия практически не влияет на деформационные характеристики материала. Их величина в большей степени зависит от величины минимального напряжения. Особенно сильно это проявляется на величинах квазиупругой деформации и площади петли гистерезиса.

Длительность постоянной ступени нагружения приводит к уменьшению всех экспериментально полученных деформационных характеристик. При этом данный фактор наиболее сильно сказывается на площади петли гистерезиса, а на величины максимальной и квазиупругой деформации начинает оказывать влияние только при длительности нагружения более 5 мин.

#### **4.5. ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФАНЕРЫ ПРИ СЖАТИИ**

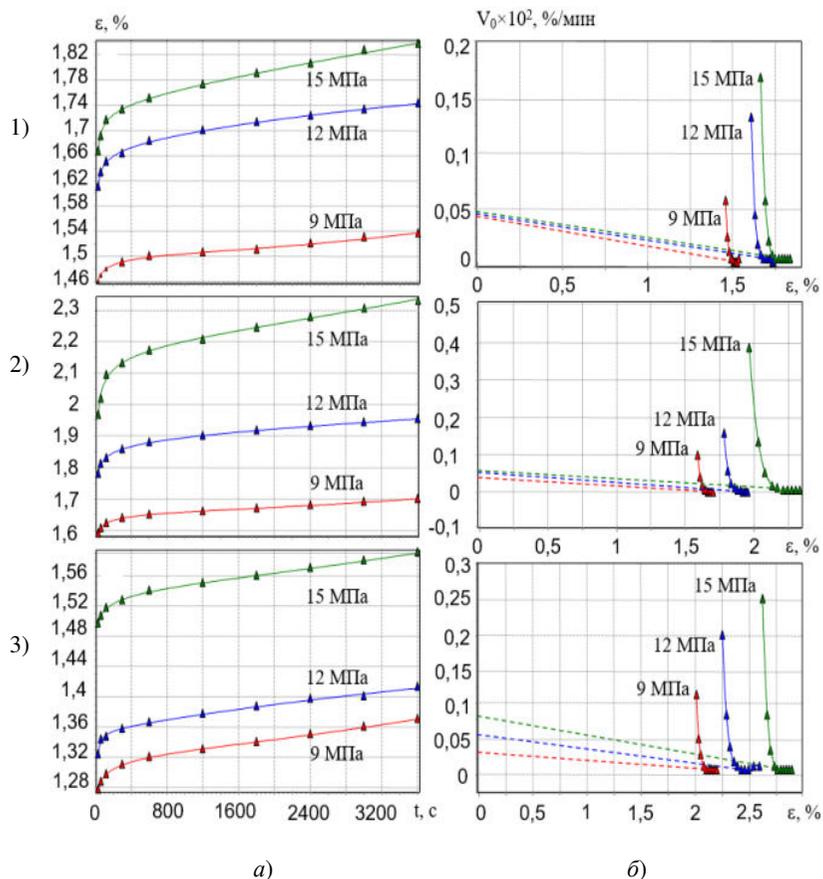
Скорость деформирования твердых тел можно оценить по тангенсу угла наклона отдельных участков кинетической кривой [70]. Однако эта величина меняется во времени и зависит от температуры. Так, для исследованных видов фанеры с повышением нагрузки и температуры скорость деформирования растет. А для ее оценки 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 2.13, где  $U_0$  является энергией активации процесса деформирования. Этими константами можно характеризовать деформационную способность материала.

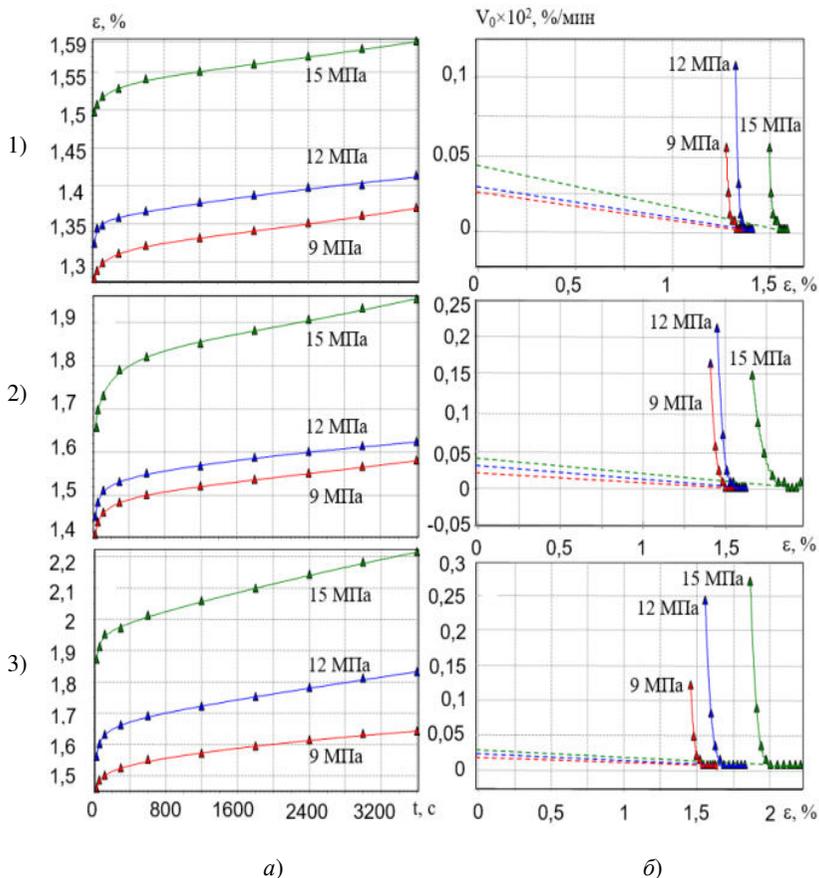
Испытания проводили в режиме постоянных температур. Установка описана в пункте 2.2.2. Схема проведения испытаний изложена в пункте 2.3.2. Для трех видов фанеры различной слоистости были построены кинетические кривые в координатах деформация от времени в режиме постоянных напряжений и температур. Полученные зависимости представлены на рис. 4.9 – 4.11.

Полученные кривые можно разбить на два участка. Сначала наблюдается значительный рост деформации, а затем наступает стабилизация процесса.

Из рисунков видно, что на величину деформации большое влияние оказывают температура и величина нагрузки.



**Рис. 4.9.** Зависимости деформации от времени действия нагрузки (а) и логарифма скорости деформирования от деформации (б) для пятислойной фанеры марки ФК при температуре 20 °С (1), 40 °С (2) и 60 °С (3)



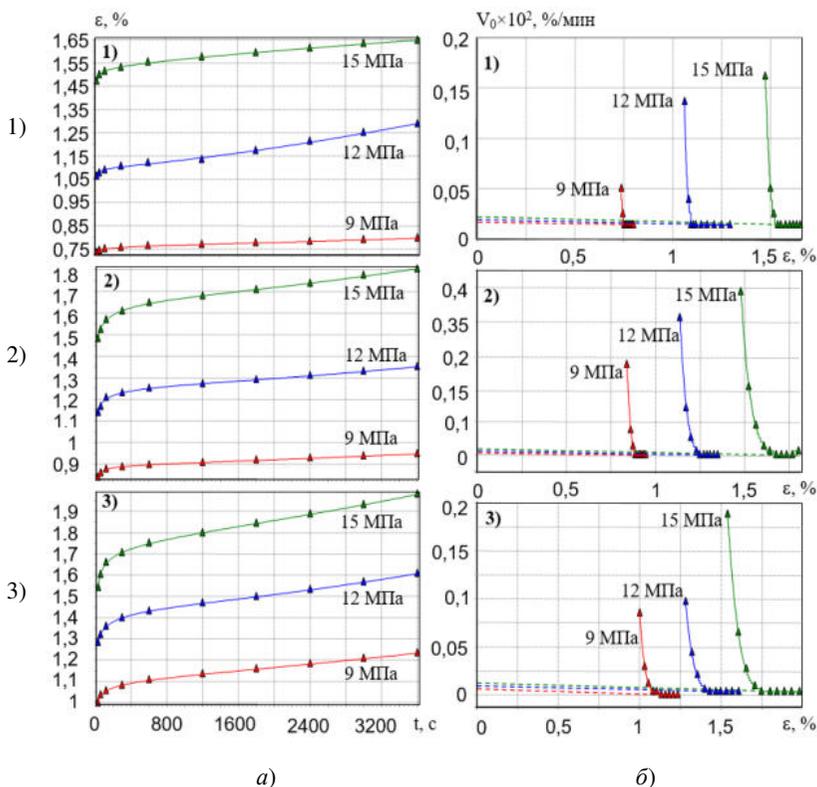
**Рис. 4.10.** Зависимости деформации от времени действия нагрузки (а) и логарифма скорости деформирования от деформации (б) для семислойной фанеры марки ФК при температуре 20 °С (1), 40 °С (2) и 60 °С (3)

Обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась методом графоаналитического дифференцирования с помощью программы GrafDiffer.

Для определения деформационных характеристик фанеры были построены зависимости скорости деформирования от обратной темпе-

ратуры (рис. 4.12). Они представляют собой семейства веерообразных прямых, сходящихся в точку, и описываются уравнениями (2.17) и (2.18).

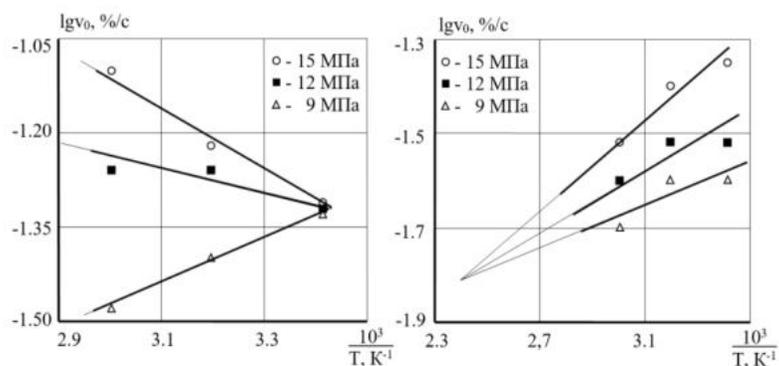
Следует отметить, что характер зависимости зависит от слоистости фанеры и с увеличением количества слоев он меняется от обратного пучка (для пятислойной фанеры) к прямому (для 7- и 9-слойной фанеры). Значения констант, входящих в уравнения (2.17) и (2.18), представлены в табл. 4.4.



**Рис. 4.11. Зависимости деформации от времени действия нагрузки (а) и логарифма скорости деформирования от деформации (б) для девятислойной фанеры марки ФК при температуре 20 °С (1), 40 °С (2) и 60 °С (3)**

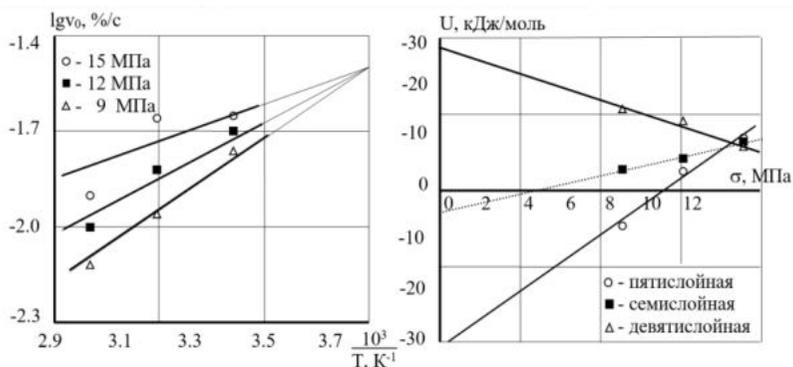
#### 4.4. Значения физических и эмпирических констант при деформировании сжатием фанеры марки ФК

Слоистость фанеры	$\lg v_m, \%/c$	$U_0, \text{кДж/моль}$	$\gamma, \text{кДж/(моль}\cdot\text{МПа)}$	$T_m, \text{K}$
5	-1,32	-31,8	-2,8	292
7	-1,81	-4,0	-0,9	417
9	-1,5	27,8	1,2	270



а)

б)



в)

г)

Рис. 4.12. Зависимость скорости деформирования от обратной температуры для пяти- (а), семи- (б) и 9-слойной фанеры марки ФК (в), а также зависимость энергии активации скорости деформирования от напряжения для всех трех видов фанеры (г)

#### 4.6. ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФАНЕРЫ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ

В процессе эксплуатации фанера подвергается контактному воздействию твердых предметов. Поэтому, помимо прочности и деформируемости материала, большое значение имеет его твердость (или сопротивляемость погружения индентора в тело). В связи с этим были проведены испытания фанеры при пенетрации от длительного действия нагрузки.

Пенетрация (т.е. вдавливание в полимер стального шарика) вызывает в материале сложное напряженное состояние. При этом наблюдается одновременное протекание процессов разрушения и деформирования, а также действие концентраторов напряжений, возникающих в вершине индентора [103]. Кроме того, процесс осложняется изменением напряжения, оно убывает по мере увеличения глубины вдавливания [104]. Ранее уже была изучена твердость полимеров и древесных материалов с позиции кинетического подхода [105]. В данной работе изучали процессы внедрения индентора в фанеру при вариации напряжений и температур испытания.

В результате испытаний фиксировали время достижения (деформационную долговечность) материалом заданной твердости (соответствующей погружению индентора в тело на 1 мм). Испытания проводили в режиме заданных постоянных напряжений и температур. Методика проведения экспериментов описана в пункте 2.3.2, а установка в пункте 2.2.2 Испытания проводили с использованием метода математического планирования эксперимента.

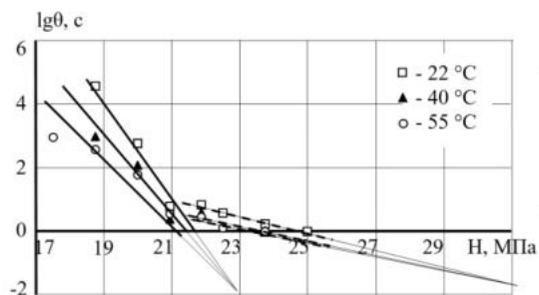
Полученные результаты представлены на рис. 4.13 и 4.14.

Из рисунков 4.13 и 4.14 видно, что, как и при поперечном изгибе, зависимости представляют собой семейства всевозможных прямых, сходящихся в полюс. При этом они имеют вид «прямого пучка».

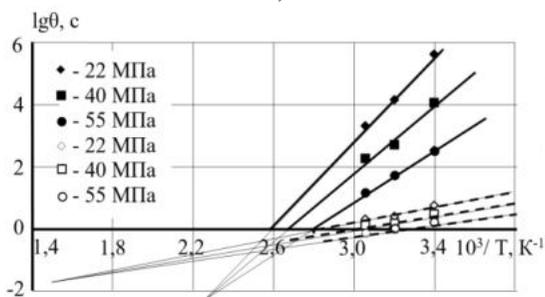
Для описания данных зависимостей использовали уравнение (2.12) для «прямого пучка».

Графоаналитическим способом были определены физические константы, входящие в уравнение (2.12). Их значения приведены в табл. 4.5.

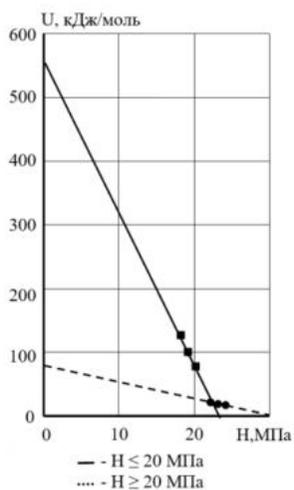
Величина максимальной энергии активации увеличивается более чем в 2 раза, что указывает на ведущую роль деформационных процессов при данном виде нагрузки.



a)

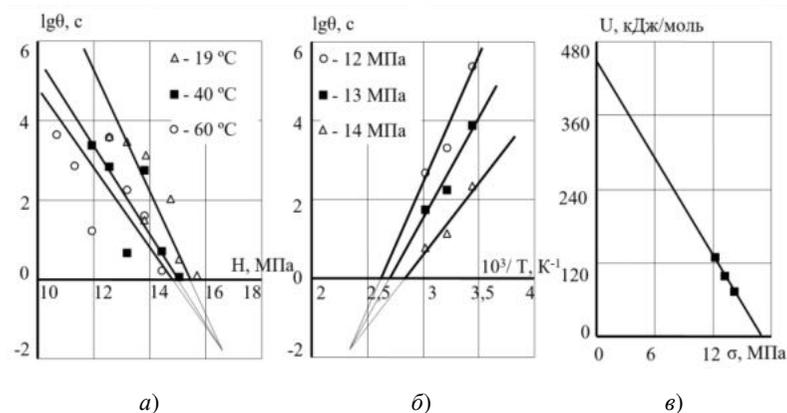


б)



в)

Рис. 4.13. Зависимости долговечности от твердости (а) и обратной температуры (б), а также эффективной энергии активации от твердости (в) при пенетрации для фанеры марки ФК



**Рис. 4.14. Зависимости долговечности от твердости (а) и обратной температуры (б), а также эффективной энергии активации от твердости (в) при пенетрации для фанеры марки ФСФ**

#### 4.5. Значения физических констант при пенетрации для фанеры различных марок

Марка фанеры	Твердость, МПа	Физические константы			
		$\tau_m, c$	$T_m, K$	$U_0, \text{кДж/моль}$	$\gamma, \text{кДж/(МПа}\cdot\text{моль)}$
ФК	$\leq 20$	$10^{-2,15}$	445	560	24,00
	$\geq 20$	$10^{-1,6}$	662	78	2,26
ФСФ	—	$10^{-1,76}$	430	442	27,00

Из таблицы видно, что для фанеры марки ФК при пенетрации, так же как и при поперечном изгибе, наблюдается сложный механизм разрушения. Для твердости  $\geq 20$  МПа определяющим является разрушение,  $a \leq 20$  МПа деформационные процессы.

Ведущая роль деформационных процессов проявляется на величинах констант:  $\gamma$  возрастает почти в 8 раз, на 1,5 порядка увеличивается  $\tau_m$ , величина  $T_m$  падает в 1,5 раза. Большие величины  $U_0$  и  $\gamma$  объясняются тем, что деформирование материала связано с перемещением сегментов друг относительно друга, что требует одновременного разрыва нескольких десятков ван-дер-ваальсовых связей.

## 5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

### 5.1. ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ФАНЕРЫ

Ранее было установлено, что при эксплуатации изделий из древесины и древесных пластиков в атмосферных условиях наблюдается снижение их долговечности. Некоторые конструкции и изделия из фанеры также подвергаются перепадам температуры и влажности. В связи с этим для прогнозирования долговечности фанеры необходимо изучить влияние климатических факторов в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Испытания фанеры проводили при поперечном изгибе в натуральных условиях в режиме заданных постоянных напряжений по методике, приведенной в пункте 2.3.5.

Полученные экспериментальные результаты в координатах  $\lg t - \sigma$  представлены на рис. 5.1. Каждая точка на графике является усредненным результатом шести измерений. Из рисунка 5.1 видно, что для данного материала полученную в натуральных условиях зависимость прочности от логарифма долговечности можно разбить на два прямолинейных участка. Для сравнения эта зависимость была нанесена на зависимость долговечности от напряжения при ряде постоянных температур (рис. 3.3, а).

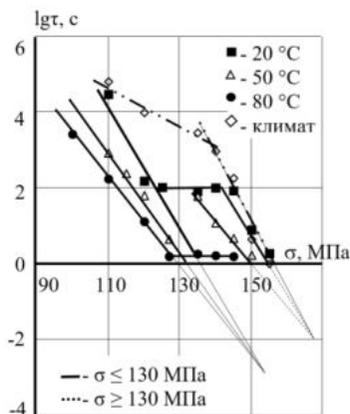


Рис. 5.1. Зависимость долговечности от напряжения при поперечном изгибе для фанеры ФК в условиях колебаний температур

Как указывалось выше, для фанеры характерен сложный механизм разрушения. При больших напряжениях определяющим являются свойства клея (связующего), при малых – древесного шпона (целлюлозы). Первый участок соответствует напряжениям  $\geq 130$  МПа, а второй –  $\leq 130$  МПа.

Физические константы, входящие в уравнение (1.17), были определены графоаналитическим способом и представлены в табл. 5.1.

Уравнение (1.15) справедливо только при постоянных температурах, поэтому для определения долговечности в режиме переменных температур были определены поправки, соответствующие данным интервалам напряжений. Для заданных напряжений и температур находили теоретические значения долговечности, а из графика (рис. 3.2) – экспериментальные. Затем для каждой точки рассчитывали разницу между величинами долговечности ( $\Delta t = t_T - t_3$ ).

Величина поправки для напряжений  $\geq 130$  МПа определяется как среднеарифметическое этих значений. А во втором диапазоне ( $\leq 135$  МПа) поправка является прямолинейной функцией вида  $A = a\sigma + b$ , где  $a$  и  $b$  – постоянные величины, см. табл. 5.1. Чтобы учесть величину, поправки уравнение (1.18) преобразуется в уравнение (5.1).

### 5.1. Поправки для фанеры марки ФК при колебаниях температуры

$T_p, K$	$\sigma, MPa$	Теоретическая долговечность $lgt_T, c$	Долговечность $lgt_3, c$	$\Delta i = lgt_T - lgt_3, c$	$\Delta$
$\sigma \geq 135 MPa$					
279	155	0,63	0,35	0,28	0,6
280	145	2,49	2,00	0,49	
	140	3,43	2,80	0,63	
	135	4,38	3,40	0,98	
$\sigma \leq 135 MPa$					
280	130	0,86	3,70	-2,84	0,1145 $\sigma$ - 12,64
	120	2,73	4,20	-1,47	
279	115	3,99	4,45	-0,46	
	110	4,98	4,70	0,28	

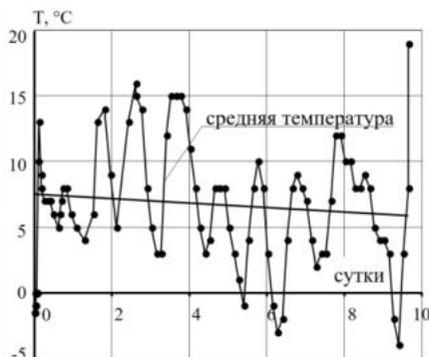


Рис. 5.2. График суточных колебаний температур

$$\lg \tau = \lg \tau_m + \frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) - \Delta. \quad (5.1)$$

Полученные данные позволяют прогнозировать прочность и долговечность фанеры не только в широком интервале постоянных температур, но и при ее колебаниях.

Влияние влажности также можно учитывать с помощью поправок. На рисунке 5.3 представлены зависимости долговечности от напряжения для фанеры до и после воздействия воды. Зависимость для фанеры с переменной влажностью также имеет линейный характер.

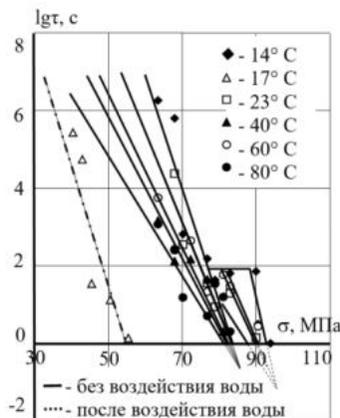


Рис. 5.3. Зависимость долговечности от напряжения после воздействия воды для фанеры марки ФСФ при поперечном изгибе

## 5.2. Поправка для фанеры марки ФСФ после воздействия воды

Температура $T$ , К	Напряжения $\sigma$ , МПа	Истинная долго- вечность $\lg\tau_t$ , с	Долго- вечность $\lg\tau_s$ , с	$\Delta i = \lg\tau_t - \lg\tau_s$ , с	$\Delta$
291	60	6,628	-1,35	7,978	8,437
	65	5,612	-2,90	8,512	
	70	3,997	-4,50	8,497	
	75	2,680	-6,08	8,760	

Поэтому, как и при колебаниях температуры, для заданных напряжений находили теоретические значения долговечности, а из графика (рис. 5.3) – экспериментальные. Для каждой точки рассчитывали разницу между величинами долговечности ( $\Delta\tau = \tau_t - \tau_s$ ) и среднее значение для исследованного интервала напряжений (табл. 5.2).

Полученные результаты позволяют прогнозировать долговечность фанеры в широком интервале напряжений при колебаниях температуры и влажности.

### 5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ ОТ ДЕЙСТВИЯ ЖИДКИХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД ПРИ РАСЧЕТЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ФАНЕРЫ

Расчет длительной прочности при действии жидких агрессивных сред можно учитывать с помощью поправок в виде функциональных зависимостей

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left( U_0 - \frac{2,3 RT}{1 - T/T_m} \lg \frac{\tau}{\tau_m} \right) \frac{f(t)}{100}. \quad (5.2)$$

Функциональные зависимости напряжения от длительности действия сред приведены в табл. 5.3.

Исходя из приведенных выше данных, можно сделать вывод: вода, кислоты и щелочь наибольшее влияние оказывают на связующее, а растворитель и машинное масло – на древесину. Следовательно, изделия из фанеры необходимо изолировать от контакта с водой, щелочью и кислотами, нанося на ее поверхность защитные гидрофобные покрытия.

### 5.3. Влияние агрессивных сред на длительную прочность фанеры марки ФК при поперечном изгибе

Жидкая среда	Функциональные зависимости напряжения от длительности действия активных сред
Растворитель	$274,31/t + 57,13$
Машинное масло	$99,7\exp(- (4,61 \cdot 10^{-7})t)$
Водопроводная вода	$75,12t^{-0,065}$
Соленая вода (концентрация 30%)	$125,07t^{-0,086}$
Каустическая сода (концентрация 10%)	$107,18t^{-0,267}$
Ортофосфорная кислота	$73,96 \cdot 0,9998^t$
Азотная кислота (концентрация 10%)	$144,48 t^{-0,29}$
Серная кислота (концентрация 10%)	$137,82t^{-0,3}$

### 5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-СИЛОВОГО ФАКТОРА ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Ярцевым В. П. в работе [70] было показано, что термофлуктуационные константы материалов  $U_0$  и  $T_m$ , связанные только с атомно-молекулярным строением и структурой при достижении предельных состояний материала (или изделия), одинаковы при разных видах нагрузки.

Величина  $\tau_m$  в некоторых случаях зависит от размеров объекта, определяя путь максимальной трещины.

Константа  $\gamma$ , являющаяся структурно-силовым фактором, связана с видом напряженного состояния. Одинаковое относительное изменение  $\gamma$  при изменении вида нагрузки [70, 71] для любых материалов открывает пути перехода от оценки образа к прогнозу долговечности строительных изделий путем экспериментального определения для них  $\gamma$ .

Поскольку в любом напряженном состоянии для строительной фанеры константы  $\tau_m$ ,  $U_0$ ,  $T_m$  одинаковы, константу  $\gamma$  можно определить по методике, исключаяющей вариацию температуры. Для этого необходимо провести испытания строительного изделия при температуре  $T^*$  (обычно соответствующей комнатной температуре), заключенной в интервале температур эксплуатации.

Если же в этом интервале структура материала меняется, то следует провести 2–3 испытания при другой температуре  $T^{**}$ . Уравнение долговечности при заданной температуре  $T^*$  принимает следующий вид:

$$\tau = A^* \exp(-\beta^* \sigma), \quad (5.3)$$

где  $A^*$  и  $\beta^*$  – физические константы, определяемые по формулам (5.4) и (5.5) соответственно.

$$A^* = \tau_m \exp[(U_0 / RT^*)(1 - T^* / T_m)]; \quad (5.4)$$

$$\beta^* = (\gamma / RT^*)(1 - T^* / T_m). \quad (5.5)$$

Изделия из фанеры при температуре  $T^*$  испытывают до разрушения (или заданной деформации) при разных постоянных нагрузках.

Полученные экспериментальные результаты обрабатывают в координатах  $\lg t - \sigma$ . Из угла наклона экспериментальной прямой находим коэффициент  $\beta^*$ , а из отрезка по оси ординат (при  $\sigma = 0$ ) – величину  $A^*$ . Зная эти коэффициенты для изделия при заданной комнатной температуре, а также величину структурно-механической константы  $\gamma$  для образцов фанеры из механических испытаний, при простом виде нагрузки (поперечном изгибе) можно определить  $\gamma^*$  для изделия по формуле

$$\gamma^* = 2,3\beta^* RT^* / (1 - T^* / T_m). \quad (5.6)$$

По этой формуле можно рассчитать структурно-механическую константу  $\gamma^*$  для изделия и прогнозировать его долговечность, если семейство прямых при разных напряжениях для материала в координатах  $\lg t - \sigma$  пересекается в одной точке (полусе) при очень малых временах, образуя так называемый «прямой пучок».

Для прогноза долговечности строительных изделий из фанеры, работающих при статическом нагружении, необходимо разработать

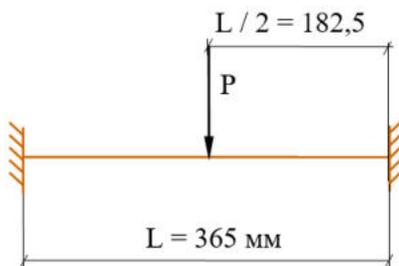
специальные стенды, моделирующие условия их работы под нагрузкой. Предварительно оценивается напряженное состояние изделия в процессе эксплуатации.

Согласно приведенной выше методике, спрогнозируем долговечность верхней обшивки клефанерной панели.

Согласно расчетной схеме (рис. 5.4, *a*), верхняя обшивка клефанерной панели представляет собой пластину, жестко заземленную с двух сторон. Доминирующий вид нагрузки, действующей на обшивку, это местный поперечный изгиб.

На рисунке 5.4, *б* показан общий вид испытательного стенда, через рычажное устройство которого создавался местный изгиб от монтажной нагрузки.

Испытания верхней обшивки клефанерной панели проводили при комнатной температуре. Обшивка панели изготовлена из пятислойной фанеры марки ФСФ. Вид панели до и после испытания представлен на рис. 5.5.

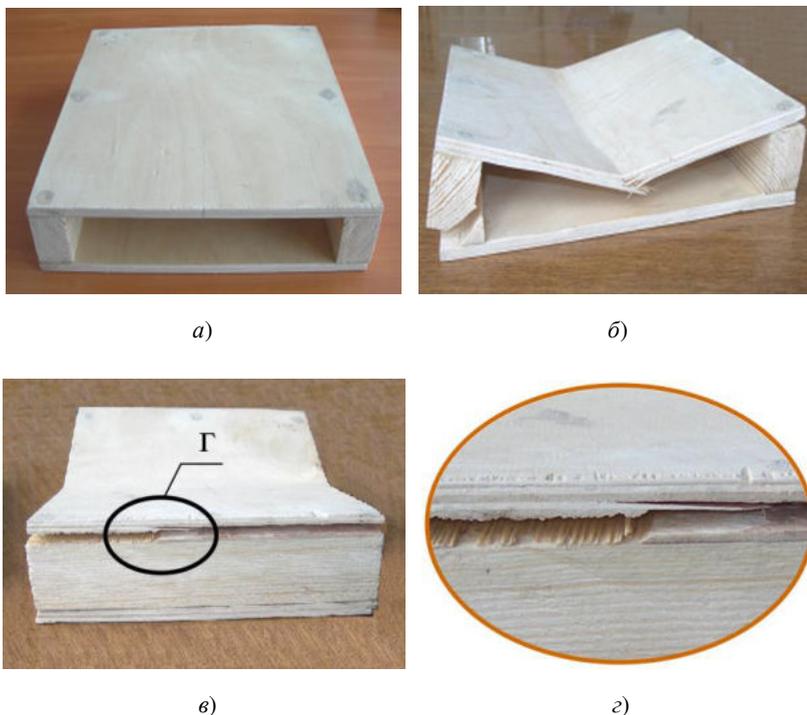


*a)*



*б)*

**Рис. 5.4. Расчетная схема для испытания (*a*) и общий вид испытательного стенда (*б*)**



**Рис. 5.5. Вид модели клефанерной панели до (а) и после (б – д) испытания**

Для построения зависимости долговечности от нагрузки первоначально определялась критическая нагрузка, которая ступенчато наращивалась до момента разрушения. Далее в процессе испытания к изделиям прикладывались нагрузки меньше критических и строилась зависимость долговечности от напряжения при комнатной температуре (рис. 5.6), имеющая линейный характер. Каждая точка на этой зависимости является усредненным результатом трех измерений. Все экспериментальные зависимости сходятся в одной точке на оси ординат. По рисунку 5.6 находим  $\beta^* = 1,5$ ,  $\beta = 1$ , а по уравнению (5.7) – структурно-механическую константу изделия  $\gamma^* = 5,6$

$$\frac{\beta}{\beta^*} = \frac{\gamma}{\gamma^*}. \quad (5.7)$$

Подставляя  $\gamma^*$  и оставшиеся константы из табл. 3.2 в формулу (1.15), получаем уравнение долговечности (5.8) для верхней обшивки клефанерной панели.

$$\lg \tau = 1,86 \cdot 10^{-3} \sigma T - 0,73\sigma - 0,123T + 48,33. \quad (5.8)$$

#### **5.4. УТОЧНЕНИЕ ТЕРМОАКТИВАЦИОННОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ФАНЕРЕ**

В связи с тем, что температура и другие внешние воздействия резко влияют на прочность и долговечность фанеры, методика прогнозирования ее долговечности основана на термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования.

Прогнозирование долговечности фанеры в строительных изделиях:

1. Определяется характер зависимостей разрушения (или деформирования) и описывающие их уравнения, а также константы, входящие в эти уравнения.

2. Для фанеры в конкретном изделии или конструкции определяется характер силового воздействия, т.е. вид действующего статического нагружения.

3. Определяются напряжения  $\sigma$ , возникающие в материале, устанавливается температура эксплуатации  $T$ , а также внутренние и внешние факторы, влияющие на долговечность (агрессивные среды, климатические факторы и т.д.).

4. При установленных параметрах  $\sigma$  и  $T$  по уравнению (2.6) рассчитывается теоретическая долговечность фанеры (время ее работы до потери формы или разрушения).

5. С помощью поправок определяется реальная долговечность материала с учетом изменения вида нагружения, влияния климатических факторов и агрессивной среды. Поправки определяются по изменению констант, входящих в уравнения (2.6) и (2.12). Климатические воздействия учитываются введением поправок от суточных колебаний температуры и влажности, а также годовых переходов через  $0^\circ\text{C}$  (смотри пункты 5.1 и 5.2).

Кроме долговечности, можно прогнозировать и оставшиеся два параметра работоспособности фанеры (прочность и термостойкость). Для этого используются уравнения: для прочности и термостойкости (2.10) и (2.11).

Прогнозирование прочности целесообразно в случае подбора сечения изделия или элемента конструкции. При этом расчет ведется в следующей последовательности:

- 1) определяется вид нагрузки, действующий на материал;
- 2) задаемся долговечностью и температурой эксплуатации;
- 3) по уравнению (2.9) определяется длительная прочность материала;
- 4) по полученным значениям напряжения подбирается сечение изделия или элемента конструкции.

Ниже приведены примеры прогнозирования долговечности фанеры в строительных изделиях.

### 5.5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Проведем прогноз долговечности на примере клефанерной панели покрытия (рис. 5.7). Обшивка панели выполнена из фанеры марки ФСФ. Расчетная схема представлена на рис. 5.8.

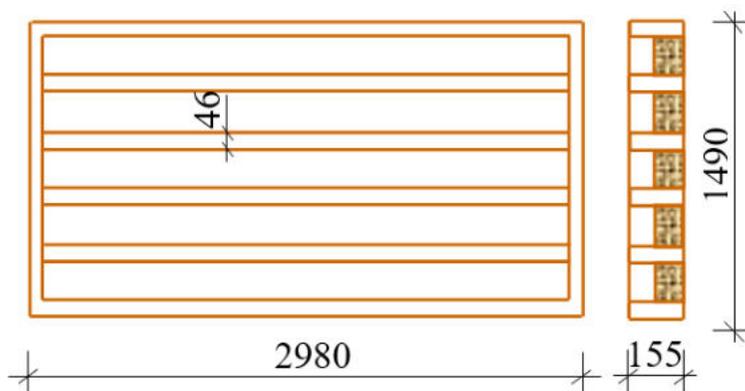


Рис. 5.7. Панель покрытия

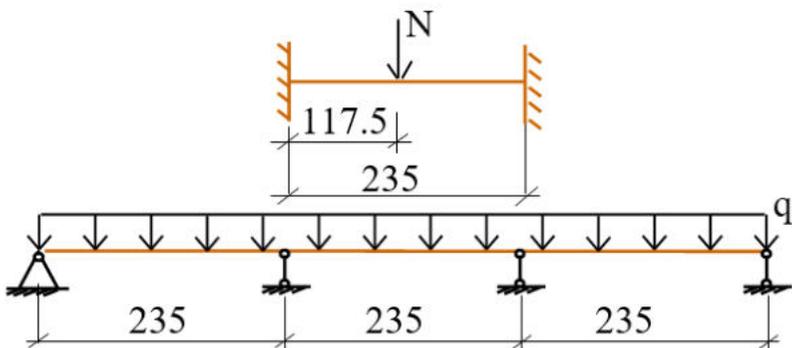


Рис. 5.8. Расчетные схемы для расчета обшивки панели покрытия

Толщину верхней обшивки  $\delta$  подбираем по уравнению (5.9) от действия монтажной нагрузки ( $P = 1$  кН).

$$\delta = \sqrt{\frac{3Pcn}{4\sigma b}}. \quad (5.9)$$

Для этого задаемся долговечностью (продолжительностью монтажа) и температурой (максимальной для летнего периода). Итак, принимаем  $\tau = 5$  ч, т.е.  $\lg \tau = 4,26$  с;  $T = 32$  °С.

Напряжение, при котором произойдет разрушение в этих условиях, определяем по уравнениям:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3Pcn}{4b\delta^2} = \frac{3 \cdot 1000 \cdot 0,235 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6}}{4b\delta^2} \leq \sigma_p \text{ (МПа)}; \quad (5.10)$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3Pcn}{4b\delta^2} = \frac{1}{7} \left( 633 - \frac{4,6 \cdot 4,2 \cdot 0,305}{1 - \frac{0,305}{0,369}} \lg \frac{10^{4,26}}{10^{-0,88}} \right) = 65,48 \text{ (МПа)}. \quad (5.11)$$

Тогда  $\delta = \sqrt{\frac{3,03 \cdot 10^{-6}}{b}} = 1,80 \cdot 10^{-3}$  м. Принимаем обшивку из фанеры марки ФСФ толщиной 3 мм.

Срок службы обшивки в процессе эксплуатации определяется с учетом значения распределенной нагрузки ( $q = 1,25 \cdot 1 = 1,25$  кН/м), действующей на материал (табл. 5.4.) Сбор нагрузки ведется на полосу длиной 1 м.

Напряжения, действующие в материале, определяются по формуле

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W} = \frac{0,0063 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 4,2 \text{ (МПа)}, \quad (5.12)$$

где  $M = \frac{ql^2}{11} = \frac{1,25 \cdot 0,235^2}{11} = 0,0063$  кН·м;

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{1 \cdot 0,003^2}{6} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

#### 5.4. Влияние агрессивных сред на длительную прочность фанеры марки ФК при поперечном изгибе

Вид нагрузки	Нормативная нагрузка, кН/м <sup>2</sup>	$\gamma_f$	Расчетная нагрузка, кН/м <sup>2</sup>
Сбор нагрузки на верхнюю обшивку			
Постоянная: три слоя рубероида	0,1	1,3	0,13
Временная снеговая: $S = S_0 \mu k k_1$	$S = 1 \cdot 1 \cdot 0,7 = 0,7$ $k = 1,2 - 0,1 \cdot 4 = 0,7 \cdot 0,8$	1,6	1,12
$\Sigma$			1,25
Сбор нагрузки на нижнюю обшивку			
Постоянная: – минераловатная плита $\gamma = 150 \text{ кг/м}^3, \delta = 100 \text{ мм};$ – собственный вес нижней обшивки	$150 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} = 0,15$ $700 \cdot 0,015 \cdot 10^{-2} = 0,011$	1,3 1,3	0,195 0,014
$\Sigma$	0,161		0,21

### 5.5. Долговечность обшивок панели покрытия из фанеры

Конструкция	Марка фанеры	Толщина обшивки, мм	Параметры		Долговечность $l_{гт}$ , с		
			$\sigma$ , МПа	$T$ , К	без учета колебания температур	с учетом колебания температур	$l_{гтср}$
Верхняя обшивка	ФСФ	3,0	4,20	293	21,08	20,94	21,01
				258	35,55	35,41	35,48
		6,0	1,05	293	21,88	21,74	21,81
				258	36,88	36,74	36,81
Нижняя обшивка	ФК	1,5	2,90	293	22,95	–	–
		3,0	0,73	293	23,33	–	–

Задаваясь температурами эксплуатации, определяем долговечность обшивки из фанеры марки ФСФ с помощью уравнений (1.17) и (5.1). Расчет ведем при двух температурах:  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (средняя за летний период),  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (средняя за зимний период). Полученные результаты сведены в табл. 5.5. Для сравнения в ней приведены результаты для двух толщин.

Нижняя обшивка работает на изгиб от собственного веса и веса утеплителя. Задаемся толщиной нижней обшивки 1,5 мм. Нагрузку, действующую на материал ( $q = 0,21\text{ кН/м}$ ), определяем по табл. 5.4, а напряжения ( $\sigma = 2,9\text{ МПа}$ ) – по формуле (5.12).

Задаваясь температурами эксплуатации, определяем долговечность обшивки фанеры марки ФСФ с помощью уравнения (1.17). В связи с работой обшивки при положительных температурах расчет ведем при средней комнатной температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Полученные результаты сведены в табл. 5.5.

Из таблицы видно, что панель покрытия, в зависимости от вида фанеры, при правильной эксплуатации прослужит более 100 лет. Для увеличения срока службы панели нужно увеличить толщину обшивки.

На основании рассмотренных выше примеров, в зависимости от различных условий эксплуатации, была определена приблизительная долговечность фанеры в строительных изделиях (табл. 5.6).

## 5.6. Прогнозируемая долговечность фанеры в строительных изделиях

Вид конструкции	Вид нагрузки	Марка фанеры (δ, мм)	σ, МПа	T, °С	Прогнозируемая долговечность t, г		
					А	Б	В
Верхняя обшивка панели покрытия	Поперечный изгиб	ФСФ (3)	50,0	+20	83	15	11
			66,0	-15	87	12	9
Нижняя обшивка панели покрытия	Поперечный изгиб	ФК (3)	56,0	+20	97	–	–
Клеефанерная стенка балки (L = 12 м)	Поперечный изгиб	ФСФ (9)	49,5	+20	111	–	–
Клеефанерная стенка рамы (L = 18 м)	Поперечный изгиб	ФСФ (12)	51,0	+20	46	–	–
Клеефанерная стенка арки (L = 40 м)	Поперечный изгиб	ФСФ (12)	50,0	+20	83	–	–
Элементы пола по лагам	Поперечный изгиб	ФСФ (3)	50,5	+20	62	15	–
		ФК (3)	43,0		66	–	–
	Пенетрация	ФСФ (3)	9,2	+20	43	24	–
		ФК (3)	15,6		36	–	–

*Примечания:*

А – без воздействия внешних факторов;

Б – при воздействии воды;

В – с учетом климатических факторов (переменных температур и влажности; многократного замораживания-оттаивания).

## 5.6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

1. Фанеру, а также изделия и конструкции из нее необходимо оберегать от контакта с водой, а также от воздействия растворов щелочей и кислот. Для этого на поверхность следует наносить гидрофобные покрытия или применять различные облицовочные материалы. Без покрытия и облицовки фанеру можно использовать в зданиях, содержащих растворители и машинное масло.

2. Фанера широко используется в полах зданий и испытывают длительные сжимающие нагрузки. Большое значение для нее имеют такие характеристики, как твердость и истираемость, поэтому в качестве чистого пола следует применять фанеру с наружными слоями из шпона высокого сорта, обладающей максимальной твердостью.

3. Для несъемной опалубки лучше всего использовать ламинированную фанеру. Облицовочный слой улучшает внешний вид и защищает от воздействия влаги и агрессивных сред.

4. Наличие дефектов (например, сучков) приводит к увеличению разброса прочности, поэтому при использовании фанеры как конструкционного материала необходимо предъявлять повышенные требования к качеству шпона.

5. При проектировании изделий и конструкции из фанеры необходимо учитывать, что она по-разному работает при напряжениях до  $0,85 \sigma_{\text{разр}}$  и выше, а при использовании фенолформальдегидного клея еще и при температурах до  $40^\circ\text{C}$  и выше.

6. Фанеру можно использовать для строительных изделий, подвергающихся действию УФ-облучения и термостарения. Под их действием ее долговечность только увеличивается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В монографии приведены теоретические сведения о фанере, ее физико-механические, физико-химические и технологические свойства, а также примеры применения. Рассмотрены экспериментальные методы изучения фанеры, а также методы обработки экспериментальных данных. Приведены практические сведения об эксплуатационных характеристиках фанеры марок ФК и ФСФ.

Разрушение и деформирование фанеры происходит по термофлуктуационному механизму. При этом, в отличие от древесины и других древесных композитов (ДВП, ДСП, ламината и т.д.), зависимости долговечности от напряжения и температуры образуют двойные семейства с площадками перехода. Сложный характер разрушения и деформирования в различных интервалах напряжений проявляется на величинах физических констант фанеры. При больших напряжениях (послойном разрушении)  $U_0$  близка к величине максимальной энергии активации смолы, тогда как при малых напряжениях (монолитном разрушении) она равна максимальной энергии активации целлюлозы. Температура полюса  $T_m$  в этих интервалах напряжений соответствуют критическим температурам разложения связующего и древесины. Значения структурно-механической константы  $\gamma$  также указывают на изменение характера разрушения фанеры при определенных граничных напряжениях. Данные физические константы позволяют прогнозировать долговечность фанеры при разрушении поперечным изгибом и деформировании сжатием и пенетрацией.

Изученное влияние жидких агрессивных сред на прочность и долговечность фанеры показывает, что наибольшая потеря прочности фанеры при максимальном набухании происходит в кислотах и щелочи, что приводит к расслоению образцов в кислотах и размягчению (короблению) в щелочи. Характер зависимостей долговечности от напряжения и температуры после воздействия жидкой среды сохраняется, но пропадает «переходная площадка», а в интервале больших напряжений дополнительный пучок вырождается в прямую. Выдержка в агрессивной среде приводит к существенному изменению большин-

ства физических констант фанеры и значительному снижению ее долговечности.

Тепловое старение и УФ-облучение не оказывают существенного влияния на коэффициент линейного термического расширения фанеры. Он меньше, чем у древесины в 1,5 – 2 раза, т.е. фанера еще менее чувствительна к температуре, и ее применение также не требует устройства температурных швов в крупногабаритных зданиях.

Структурные изменения в фанере, возникающие под действием старения, проявляются на ее водопоглощении. После теплостарения и УФ-облучения в клеевой прослойке фанеры разрушенные связи рекомбинируют, что приводит к падению водопоглощения.

Тепловое старение и УФ-облучение оказывают одинаковое влияние на прочность фанеры. В процессе длительного теплового старения (при +50 °С) и УФ-облучения фанера упрочняется. При тепловом старении это можно объяснить доотверждением связующего, а при УФ-облучении – экранирующим эффектом (верхний шпон защищает и предохраняет полимерный слой от разрушения, а сама древесина после воздействия УФ-облучения становится прочнее).

После длительных циклических температурно-влажностных воздействий меняется характер разрушения фанеры. Причиной разрушения при многократном замораживании-оттаивании является расширение воды в порах древесины при замерзании. Так же насыщение водой и отрицательные температуры деструктируют связующее, разрушая химические связи.

Данная монография 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, позволяет 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. Иванов, Ю. М. Вопросы уменьшения и использования древесных отходов в строительстве. Материалы совещания по проблемам промышленного использования отходов древесины / Ю. М. Иванов. – М. : Изд-во А. Н. СССР, 1956. – 425 с.

2. Назаренко, И. Н. Состояние и перспективы развития фанерного производства / И. Н. Назаренко, М. В. Назаренко // Управленческий учет. – 2022. – № 1–2. – С. 299 – 310. – DOI: 10.25806/uu1-22022299-310

3. Орлов, А. Т. Производство фанеры, руководящие технико-технологические материалы (РТТМ) / А. Т. Орлов, Т. В. Шевандо. – СПб. : АОЗТ ЦНИИФ, 2000. – 80 с.

4. ГОСТ 3916.1–2018. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород. Технические условия : межгосударственный стандарт : дата введения 2019-04-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). – Изд. официальное. – М. : Стандартиформ, 2019. – 19 с.

5. ГОСТ 3916.2–2018. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона хвойных пород. Технические условия : межгосударственный стандарт : дата введения 2019-04-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). – Изд. официальное. – М. : Стандартиформ, 2019. – 19 с.

6. ГОСТ 11539–2014. Фанера бакелезированная. Технические условия : межгосударственный стандарт : дата введения 2016-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). – Изд. официальное. – М. : Стандартиформ, 2015. – 7 с.

7. ТУ 13-5747575-14-01–92. Фанера хвойная конструкционная. Технические условия : дата введения 1992-05-01 / Российский институт стандартизации. – Изд. официальное. – М. : Госстандарт СССР, 1994. – 23 с.

8. ГОСТ Р 53920–2010. Фанера облицованная. Технические условия : национальный стандарт Российской Федерации : дата введе-

ния 2011-11-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – М. : Стандартинформ, 2011. – 11 с.

9. Справочник по производству фанеры / А. А. Веселов, Л. Г. Галюк, Ю. Г. Доронин и др. – М. : Лесная промышленность, 1984. – 432 с.

10. ГОСТ 14614–79. Фанера декоративная. Технические условия : государственный стандарт СССР : дата введения 1980-01-01 / Комитет стандартизации и метрологии. – Изд. официальное. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 11 с.

11. ТУ 5518-002-00273235–96. Плиты фанерные трудногорючие. Атмосферостойкие. Технические условия – Изд. официальное. – М. : Госстандарт СССР, 1998.

12. ГОСТ 7017–64. Трубы и муфты фанерные. Технические условия : государственный стандарт СССР / Комитет стандартизации и метрологии. – Изд. официальное. – М. : Изд-во стандартов, 1967. – 23 с.

13. Бирюков, В. Г. Технология специальных видов фанерной продукции. Текст лекции для студентов заочного обучения специальности 2602.00 «Технология деревообработки» / В. Г. Бирюков. – М. : МГУ, 1998. – Ч. 3. – 60 с.

14. Сузюмов, А. В. Прогнозирование работоспособности фанеры в ограждающих и несущих строительных конструкциях : дис. ... маг. тех. наук : 270100.01 / Сузюмов Александр Владимирович ; науч. рук. В. П. Ярцев ; ТГТУ. – Тамбов, 2005. – 99 с.

15. Савина, А. П. Фанера и фанерные изделия / А. П. Савина, Н. П. Сизова. – М. : Стандартиз, 1969. – 168 с.

16. Микульский, В. Г. Строительные материалы : учебник / В. Г. Микульский. – М. : Изд-во АСВ, 1996. – 274 с.

17. Смирнов, А. В. Фанерное производство / А. В. Смирнов. – М. : Гослесбумиздат, 1949. – 488 с.

18. Шевандо, Т. В. Фанера для строительных конструкций / Т. В. Шевандо // Строительные материалы. – 2003. – № 5. – С. 32 – 35.

19. Об одном способе рационального использования анизотропии при проектировании клефанерных балок с плоской стенкой /

В. Грачев, Ю. Найштут, Б. Махиев, А. Хапин // Строй-инфо. – 2008. – № 10.

20. Губенко, А. Б. Изготовление клееных деревянных конструкций и строительных деталей / А. Б. Губенко. – М. : Гослесбумиздат, 1957. – 40 с.

21. Губенко, А. Б. Клееные деревянные конструкции в строительстве / А. Б. Губенко. – М. : Госстройиздат, 1957. – 54 с.

22. Губенко, А. Б. Применение фанеры в строительстве в США и Европе / А. Б. Губенко // Бюллетень строительной техники. – 1946. – № 17-18.

23. Губенко, А. Б. Клефанерные конструкции (проектирование и изготовление) / А. Б. Губенко. – ИТЭИН Госплана СССР, 1946. – 34 с.

24. Иванов, Ю. М. Производство и применение строительной фанеры. Справочник американской техники и промышленности / Ю. М. Иванов. – Изд. американск., акц. общества «Амторг», 1945. – Т. 3 – 24 с.

25. Губенко, А. Б. Применение фанеры в строительстве / А. Б. Губенко. – М. : Стройиздат, 1948. – 58 с.

26. Laminated impregnated magnetic wood manufacturing methods and magnetic characteristics from DC to 13.5 GHz band / H. Oka, H. Hayakawa, H. Osada, A. Kano, H. Taniuchi, O. Sawabe // IEEE Transactions on Magnetics. – 2002. – V. 38. – P. 3327 – 3328. – DOI: 10.1109/TMAG.2002.803118

27. Хрулев, В. М. Сельскохозяйственные постройки из фанеры / В. М. Хрулев // Городское и сельское строительство. – 1957. – № 8-9.

28. Зайвий, В. А. Исследование свойств фанеры модифицированной фенолоспиртами / В. А. Зайвий // Пластификация и модификация древесины. – 1970. – С. 249-252.

29. Мишин, И. Н. Огнезащищенная фанера конструкционного назначения / И. Н. Мишин // Плиты и фанера: Обзор, информ. – 1986. – № 5.

30. Испытания огнезащитных свойств покрытий по методу фанерных образцов // Информационный сборник ЦНИРШО «Способы и средства огнезащиты древесины». – Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР. – 1952.

31. Кириллов, А. Н. Прочность антипирированного шпона и фанеры / А. Н. Кириллов, В. Г. Бирюков, И. Н. Мишин. – М. : ВНИПИЭИлеспром, 1968. – 11 с.

32. Preston, S. B. The Effect of Synthetic Resin Adhesives on the Strength and Physical properties of Wood Veneer Laminates / S. B. Preston. – Yale School of Forestry & Environmental Studies Bulletin Series, 1987. – 80 p.

33. Хрулев, В. М. О расчетных характеристиках фанеры при растяжении и сжатии / В. М. Хрулев // Деревообрабатывающая промышленность. – 1959. – № 12. – С. 14 – 16.

34. Саенко, В. Т. Исследование и разработка новых видов фанеры конструкционного назначения из древесины лиственницы : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / В. Т. Саенко ; Моск. лесотехн. ин-т. – М., 1981. – 21 с.

35. Хрулев, В. М. Исследование долговечности и прочности строительной фанеры : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.00.00 / В. М. Хрулев ; Акад. строительства и архитектуры СССР. Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций. – М., 1959. – 24 с.

36. Лобанов, Ю. А. Сопротивление фанеры срезу и скалыванию по клеевому шву : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.00.00 / Ю. А. Лобанов ; Моск. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. – М., 1971. – 15 с.

37. Сафонов, А. Ф. Влияние сучков на физико-механические свойства шпона и фанеры : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / А. Ф. Сафонов ; Моск. лесотехн. ин-т. – М., 1974. – 23 с.

38. Новое в производстве фанеры и фанерной продукции // Сб. трудов ЦНИИФ. – М. : Лесн. пром-ть. – 1985. – 125 с.

39. Лавлинская, О. В. Разработка клеевых композиций для производства фанеры пониженной токсичности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / О. В. Лавлинская ; Воронежская государственная лесотехническая академия. – Воронеж, 2004. – 16 с.

40. Хрулев, В. М. Оценка долговечности клеевого соединения по данным ускоренного теплового старения / В. М. Хрулев, Ю. Ю. Славин // Заводская лаборатория – 1965. – № 10.

41. Gillespie, R. H. Accelerated Aging of Adhesives in Plywood-Type Joints / R. H. Gillespie // Forest Products Journal. – 1965. – V. 15, No. 19.

42. Хрулев, В. М. Долговечность клеевых соединений древесины / Хрулев В. М. – М. : Гослесбумиздат, 1962.
43. Knight, R. A. G. Adhesives for Wood / R. A. G. Knight. – Chemical publishing CO. INC., 1952. – 234 p.
44. Wangaard, F. F. Summary of Information on the Durability of Water-Resistant Woodworking Glues / F. F. Wangaard. – USDA, 1946.
45. Клеящие карбамидные смолы с наполнителями / Р. З. Томкина, А. Н. Михайлов, И. Р. Израилева, Т. В. Яшин // Деревообрабатывающая промышленность. – 1956. – № 11.
46. Линьков, И. М. Исследование прочности водостойкой фанеры / И. М. Линьков, В. А. Кучеренко // Деревообрабатывающая промышленность. – 1969. – № 10. – С. 7–8.
47. Хрулев, В. М. Испытания фанеры / В. М. Хрулев. – М. : Гослесбумиздат, 1960.
48. Бектобекова, Ж. В. Разработка способов и средств интенсификации технологии и режимов склеивания бакелизированной фанеры : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Ж. В. Бектобекова ; Моск. лесотехн. ин-т. – М., 1989. – 20 с.
49. Wood, L. W. Relation of Strength of Wood to Duration of Load / L. W. Wood. – Madison, Wis. : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1951.
50. Хрулев, В. М. Старение клеевых прослоек и оценка стойкости клеевых соединений древесины / В. М. Хрулев // Известия ВУЗов, Лесной журнал. – 1968. – № 6. – С. 86 – 88.
51. Бирюкова, И. Я. Износостойкая опалубочная фанера для производства арболита : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / И. Я. Бирюкова ; Моск. лесотехн. ин-т. – М., 1989. – 19 с.
52. Хрулев, В. М. Долговечность водостойкой фанеры, обработанной защитными составами. В сб. № 6 Механическая обработка древесины / В. М. Хрулев. – М. : ЦНИИТИЭИЛеспром, 1968. – Вып. I.
53. Орлов, Г. И. Прочность клеевых соединений сосновой фанеры : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / Г. И. Орлов ; Сиб. технологический ин-т. – Красноярск, 1990. – 24 с.
54. Филиппович, А. А. Клеящие свойства синтетических смол в производстве фанеры : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / А. А. Филиппович ; Сиб. технологический ин-т. – Красноярск, 1990. – 20 с.

55. Хрулев, В. М. Влияние скорости разбухания на прочность клеевых соединений древесины / В. М. Хрулев // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 1968. – № 6. – С. 13–14.

56. Хрулев, В. М. Долговечность и контроль качества клеевых соединений древесины в строительных изделиях и конструкциях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.00.00 / В. М. Хрулев ; Новосиб. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. – Новосибирск, 1968. – 29 с.

57. Кондрючая, А. А. Повышение качества фанеры на основе модифицированных фенолформальдегидных смол : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / А. А. Кондрючая ; Красноярская технол. акад. – Красноярск, 1996. – 19 с.

58. Бирюков, В. Г. Технология огнезащищенной фанеры конструкционного назначения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.21.05 / В. Г. Бирюков ; Моск. лесотехн. ин-т. – М., 1991. – 40 с.

59. Хрулев, В. М. Новый метод испытания клеевых швов на ускоренное старение / В. М. Хрулев, Г. И. Шустерзон, В. Н. Новиков // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 1972. – № 4. – С. 11 – 13.

60. Иванов, Ю. М. О методе оценки длительной прочности древесины и фанеры / Ю. М. Иванов, Ю. А. Лобанов // *Известия вузов. Строительство*. – Новосибирск. – 1977. – № 9. – С. 25 – 30.

61. Иванов, Ю. М. Длительная прочность древесины при растяжении поперек волокон / Ю. М. Иванов, Ю. Ю. Славин // *Известия вузов. Строительство*. – Новосибирск. – 1986. – № 10. – С. 22 – 26.

62. Madsen, B. Duration of Load Tests for Wood in Tension Perpendicular to Grain / B. Madsen // *Forest Products Journal*. – 1975. – V. 25, No. 8. – P. 48 – 54.

63. Рахимов, Р. З. Состояние и задачи исследований работоспособности полимерных композитов / Р. З. Рахимов, В. А. Воскресенский // ИВУЗ: Строительство. – Новосибирск. – 1976. – № 10. – С. 89 – 93.

64. Бартенев, Г. М. О зависимости микротвердости аморфных твердых тел от температуры и длительности действия нагрузки / Г. М. Бартенев, И. В. Разумовская, Д. С. Сандитов // *Заводская лаборатория*. – 1969. – № 1. – С. 105 – 107.

65. Каргин, В. А. Краткий очерк по физико-химии полимеров / В. А. Каргин, Г. Л. Слонимский. – М. : Химия, 1967. – 232 с.

66. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – М. : Химия, 1968. – 540 с.

67. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М. : Изд-во «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1974. – 560 с.

68. Ратнер, С. Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С. Б. Ратнер, В. П. Ярцев. – М. : Химия, 1992. – 320 с.

69. Ратнер, С. Б. Прочность, долговечность и надежность конструкционных пластмасс / С. Б. Ратнер, В. П. Ярцев. – М. : НИИТЭХИМ, 1983. – 74 с.

70. Ярцев, В. П. Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / В. П. Ярцев ; Тамбовский Государственный технический университет. – Тамбов, 1998. – 42 с.

71. Киселева, О. А. Прогнозирование работоспособности древесностружечных и древесноволокнистых композитов в строительных изделиях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / О. А. Киселева ; Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Воронеж, 2003. – 20 с.

72. Андрианов, К. А. Применение метода графоаналитического дифференцирования к изучению механизма разрушения и прогнозу долговечности пенополистирола при пенетрации / К. А. Андрианов, Д. А. Санников // Сб. по материалам VII науч. конф. Тамбов – 2002. – Ч. 1. – С. 68–69.

73. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экспериментальных результатов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 339 с.

74. Мартынов, К. Я. Исследование ускоренного старения древесностружечных плит методом математического планирования эксперимента / К. Я. Мартынов, В. М. Хрулев // ИВУЗ: Строительство. Новосибирск. – 1984. – № 12. – С. 78 – 81.

75. Фишер, Р. А. Статистические методы для исследователей / Р. А. Фишер. – М. : Госстатиздат, 1958. – 268 с.

76. Лукаш, А. А. Совершенствование технологии фанеры из древесины осины : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / А. А. Лукаш ; Ленингр. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова. – Ленинград, 1988. – 16 с.

77. Сашин, М. А. Прогнозирование и повышение долговечности и длительной прочности древесины в строительных изделиях и конструкциях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / М. А. Сашин ; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2006. – 22 с.
78. Власов, О. Е. Строительная физика. Состояние и перспективы развития / О. Е. Власов. – М. : Госстройиздат, 1961. – 146 с.
79. Ильинский, В. М. Строительная теплофизика. Ограждающие конструкции и микроклимат зданий / В. М. Ильинский. – М. : Высшая школа, 1974. – 320 с.
80. Бунина, Л. О. Исследование взаимосвязи предельных параметров деформирования кристаллических полимеров : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 02.00.07 / Л. О. Бунина ; Науч.-исслед. физ.-хим. ин-т им. Л. Я. Карпова. – М., 1974. – 26 с.
81. Бартенев, Г. М. Строение и механические свойства неорганических стекол / Г. М. Бартенев. – М. : Стройиздат, 1966. – 216 с.
82. Бартенев, Г. М. Физика полимеров / Г. М. Бартенев, С. Я. Френнель. – М. : Химия, 1990. – 442 с.
83. Сузюмов, А. В. Закономерности разрушения и деформирования фанеры / А. В. Сузюмов, О. А. Киселева, В. П. Ярцев // Сб. ст. магистрантов по материалам науч. конф. – 2005. – Вып. 1, ч. 2. – С. 91 – 94.
84. Термостойкость фенолоформальдегидных и эпоксифенольных полимеров с фосфорноокислородсодержащими добавками в поверхностном слое / А. А. Мальгин, С. А. Трифонов, С. И. Кольцов и др. // Пластические массы. – 1985. – № 8. – С. 15 – 17.
85. Ратнер, С. Б. Влияние наполнения на физикохимические константы полимерных материалов, определяющие их сопротивление разрушению / С. Б. Ратнер, В. П. Ярцев // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 264, № 3. – С. 39 – 41.
86. Ратнер, С. Б. Кратность энергии активации разрушения стеклопластиков энергии деструкции стекла / С. Б. Ратнер, В. П. Ярцев, В. К. Андреева // Высокмолекулярные соединения. – 1982. – Т. (Б) XXIV, № 8. – С. 39 – 41.
87. Ярцев, В. П. Влияние температуры отверждения на прочность фенопластов / В. П. Ярцев // Пластические массы. – 1981. – № 8. – С. 29–30.

88. Ратнер, С. Б. Влияние твердых наполнителей на прочность и долговечность конструкционных пластмасс / С. Б. Ратнер, В. П. Ярцев // Деформативность и долговечность конструкционных пластмасс : тез. докл., Рига. – 1981. – С. 17–18.

89. Ярцев, В. П. Прогнозирование работоспособности полимерных материалов в деталях и конструкциях зданий и сооружений : учебное пособие / В. П. Ярцев. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2001. – 149 с.

90. Сашин, М. А. Прочность и химическая стойкость модифицированной древесины / М. А. Сашин, О. А. Киселева, В. П. Ярцев // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2004. – Вып. 4.

91. Ситамов, С. Влияние жидких сред и вида напряженного состояния полимеров на их прочность и долговечность / С. Ситамов, А. И. Хукматов // Пластические массы. – 1986. – № 9. – С. 25 – 27.

92. Бартнев, Г. М. Прочность и разрушение высокоэластических материалов / Г. М. Бартнев, Ю. С. Зуев. – М. : Химия, 1964. – 320 с.

93. ГОСТ 14359–69. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования : государственный стандарт СССР : дата введения 1970-01-01 / Комитет стандартизации и метрологии. – Изд. официальное. – М. : Издательство стандартов, 1979. – 20 с.

94. Павлова, С. И. Композиционные материалы с повышенной химической стойкостью на основе древесины / С. И. Павлова, Н. А. Екименко // Пластические массы. – 1990. – № 3. – С. 35 – 37.

95. Казанский, В. М. Морозостойкость строительных материалов при разных температурах замораживания / В. М. Казанский, В. А. Новоминский // Строительные материалы. – 1988. – № 9. – С. 22 – 24.

96. Сашин, М. А. Влияние модификаторов на свойства древесины / М. А. Сашин, О. А. Киселева // IX науч. конф. ТГТУ : Пленарные докл. и краткие тезисы. – Тамбов. – 2004.

97. Химическая модификация древесины : сб. ст. – Рига : Зинатне, 1975. – 196 с.

98. Киселева, О. А. О технологических режимах модификации древесины пропиткой / О. А. Киселева, М. А. Сашин, В. П. Ярцев // XI науч. конф. ТГТУ : статьи. – Тамбов. – 2006.

99. Ярцев, В. П. Прогнозирование и повышение надежности и долговечности древесных пластиков в строительных конструкциях /

В. П. Ярцев, О. А. Киселева. – Отчет о научно-исследовательской работе, 2003. – 100 с.

100. Глухова, Л. Г. Повышение водостойкости композиций фенольной смолы с вискозными волокнами / Л. Г. Глухова, С. Е. Артеменко, М. П. Береза // Пластические массы. – 1981. – № 3. – С. 12–13.

101. Аскадский, А. А. Деформация полимеров / А. А. Аскадский. – М. : Химия, 1973. – 448 с.

102. Мадорский, С. Термическое разложение органических полимеров / С. Мадорский. – М. : Мир, 1967. – 328 с.

103. Киселева, О. А. Закономерности длительного деформирования древесных пластиков при одноосном сжатии и пенетрации / О. А. Киселева, В. П. Ярцев, А. В. Сузюмов // Пластические массы. – 2005. – № 4. – С. 43–45.

104. Кинетическая природа микротвердости полимеров / М. С. Кац, В. Р. Регель, Т. П. Санфирова, А. И. Слуцкер // Механика полимеров. – 1973. – № 1. – С. 22–28.

105. Кинетическая природа микротвердости полимеров / О. А. Киселева, В. П. Ярцев, М. А. Сашин, А. В. Сузюмов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – № 6. – С. 84–86.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. ФАНЕРА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ</b> .....	5
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВИДЫ ФАНЕРЫ .....	6
1.2. СОСТАВ И СТРУКТУРА ФАНЕРЫ .....	12
1.3. ПРИМЕНЕНИЕ ФАНЕРЫ .....	13
1.3.1. Несущие конструкции жилых и общественных зданий .....	14
1.3.2. Применение фанеры в жилищном строительстве .....	21
1.3.3. Сельскохозяйственные постройки из фанеры .....	25
1.3.4. Опалубка из фанеры .....	28
1.4. СВОЙСТВА ФАНЕРЫ .....	31
1.4.1. Физико-химические и технологические свойства .....	31
1.4.2. Физико-механические свойства .....	33
1.4.3. Санитарно-гигиенические характеристики фанеры. Борьба с токсичностью .....	37
1.5. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФАНЕРЫ .....	39
1.6. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ .....	43
<b>2. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАНЕРЫ</b> .....	57
2.1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	59
2.1.1. Выбор материала .....	59
2.1.2. Выбор агрессивных сред .....	60
2.1.3. Выбор модификаторов .....	60
2.2. ПРИБОРЫ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ .....	61
2.2.1. Установка для испытаний на кратковременную и длительную прочность при разрушении поперечным изгибом .....	62
2.2.2. Установка для испытаний на долговечность при деформировании длительным сжатием и пенетрацией .....	64
2.2.3. Прибор для определения коэффициента линейного термического расширения .....	65
2.2.4. Оборудование для испытаний на тепловое старение и УФ-облучение .....	67

2.2.5. Приборы для изучения структуры фанеры электронно-оптическим методом.....	68
2.3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ .....	70
2.3.1. Методика проведения кратковременных и длительных испытаний при разрушении поперечным изгибом .....	70
2.3.2. Методика проведения испытаний на долговечность при деформировании длительным сжатием и пенетрацией.....	71
2.3.3. Методика проведения испытаний при воздействии жидких сред.....	73
2.3.4. Методика определения коэффициента линейного термического расширения .....	73
2.3.5. Методика проведения испытаний при климатических воздействиях.....	74
2.3.6. Методика изучения структуры фанеры электронно- оптическим методом.....	75
2.4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ...	75
2.4.1. Статистическая обработка экспериментальных данных....	75
2.4.2. Определение физических термофлуктуационных констант графоаналитическим методом.....	76
2.4.3. Определение физических и эмпирических термофлуктуационных констант методом графоаналитического дифференцирования.....	78
2.4.4. Математическое планирование эксперимента .....	80
2.5. ОЦЕНКА РАЗБРОСА ПРОЧНОСТИ ФАНЕРЫ .....	88
<b>3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ФАНЕРЫ В ПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ.....</b>	<b>90</b>
3.1. О ВЕЛИЧИНЕ ПРЕДЕЛА ДЛИТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ФАНЕРЫ.....	90
3.2. ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ФАНЕРЫ .....	91
3.3. ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА СЛОЕВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ФАНЕРЫ.....	95
3.4. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ФАНЕРЫ.....	98
3.4.1. Влияние жидких агрессивных сред на прочность фанеры .....	98
3.4.2. Влияние жидких агрессивных сред на долговечность фанеры .....	101

3.4.3. Влияние теплового старения и УФ-облучения на прочность и долговечность фанеры .....	103
3.4.4. Влияние циклов замораживания-оттаивания на долговечность фанеры .....	105
3.5. ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФАНЕРЫ .....	107
<b>4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФАНЕРЫ В ПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ .....</b>	<b>111</b>
4.1. О ТЕПЛОВОМ РАСШИРЕНИИ ФАНЕРЫ .....	111
4.2. ВЛИЯНИЕ ТЕРМО- И ФОТОСТАРЕНИЯ НА НАБУХАНИЕ ФАНЕРЫ .....	115
4.3. ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА СКОРОСТЬ НАБУХАНИЯ ФАНЕРЫ .....	117
4.4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФАНЕРЫ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ .....	118
4.5. ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФАНЕРЫ ПРИ СЖАТИИ .....	121
4.6. ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФАНЕРЫ ПРИ ПЕНЕТРАЦИИ.....	126
<b>5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ .....</b>	<b>129</b>
5.1. ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ФАНЕРЫ.....	129
5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ ОТ ДЕЙСТВИЯ ЖИДКИХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД ПРИ РАСЧЕТЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ФАНЕРЫ.....	132
5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНО-СИЛОВОГО ФАКТОРА ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ .....	133
5.4. УТОЧНЕНИЕ ТЕРМОАКТИВАЦИОННОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ФАНЕРЕ .....	137
5.5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ .....	138
5.6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.....	142
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>144</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>147</b>

Научное электронное издание

ЯРЦЕВ Виктор Петрович  
СУЗЮМОВ Александр Владимирович  
ДАНИЛОВ Владислав Михайлович

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ ФАНЕРЫ  
В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Монография

Редактор Л. В. Комбарова  
Графический и мультимедийный дизайнер Т. Ю. Зотова  
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбарово

ISBN 978-5-8265-2823-5



Подписано к использованию 17.10.2024.  
Тираж 100 шт. Заказ № 113

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