

**КИСЕЛЕВА Олеся Анатольевна**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ И ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ  
КОМПОЗИТОВ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж 2003

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
*Ярцев Виктор Петрович*

**Официальные оппоненты:** заслуженный деятель науки и  
техники РФ, доктор технических  
наук, профессор  
*Харчевников Виталий Иванович*

кандидат технических наук, доцент  
*Ушаков Игорь Иванович*

**Ведущая организация** "Тамбовгражданпроект"

Защита состоится 3 июля 2003 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.033.01 в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 394006, г. Воронеж, ул. XX-летия Октября, д. 84, ауд. 20, корпус 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



***V.V. Власов***

---

---

Подписано в печать 21.05.2003

Формат 60 × 84 / 16. Гарнитура Times New Roman.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем: 1,16 усл. печ. л.; 1,25 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 356

Издательско-полиграфический центр

Тамбовского государственного технического университета

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

**Актуальность работы.** Древесные пластики нашли широкое применение в строительных изделиях, ограждающих и несущих конструкциях. Одним из преимуществ данных материалов является существенная экономия деловой древесины. Кроме того, древесностружечные (ДСП) и древесноволокнистые плиты (ДВП) обладают хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, а также высокими механическими характеристиками.

В древесных композитах наблюдается высокая неоднородность распределения компонентов по объему. Такое строение осложняет изучение их механических характеристик.

В настоящее время при проектировании строительных конструкций используется эмпирический метод предельных состояний, а все осложнения учитываются поправочными коэффициентами. Это приводит к многократному запасу прочности и деформативности материала. При изучении прочностных и деформационных характеристик древесных композитов неизученным остается вопрос их работы во времени под действием длительных нагрузок и температур. Для древесностружечных и древесноволокнистых плит резко проявляется температурно-временная зависимость прочности, предела текучести и отсутствует безопасное напряжение (напряжение, при котором долговечность становится бесконечно большой).

Для разработки методики прогнозирования длительной прочности и долговечности древесных композитов необходимо использовать термофлуктуационную концепцию разрушения и деформирования, развитие которой обязано, в первую очередь, фундаментальным работам школы С.Н. Журкова. Она рассматривает тепловое движение атомов как решающий фактор процесса механического разрушения, а роль нагрузки заключается в уменьшении энергии связей.

Согласно термофлуктуационной концепции и принципа температурно-временной-силовой эквивалентности для каждого материала существуют три границы работоспособности: силовая (прочность или предел текучести), временная (долговечность), и температурная (термостойкость или теплостойкость). Повышение или понижение одной из них компенсируется изменением любой из двух других.

Актуальность данной работы обусловлена применением нового подхода к изучению закономерностей разрушения и деформирования, а также прогнозированию основных параметров работоспособности древесных композитов, связанным с изучением поведения констант материала, определяющих эти параметры. Предложенный метод позволит кроме нагрузки, действующей на конструкцию или материал, учитывать влияние температуры и времени их действия, а также наличие дополнительных факторов (концентраторов напряжения, климатических воздействий и агрессивных сред).

Работа выполнена в рамках научно-технической программы "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники" подпрограммы "Архитектура и строительство" по теме "Прогнозирование и повышение надежности и долговечности древесных плит в строительных конструкциях" (шифр темы по программе – 02.03.228).

**Целью работы** является разработка методики прогнозирования работоспособности древесных композитов в строительных изделиях в широком диапазоне напряжений и заданном интервале температур.

Исходя из этого, в работе поставлены следующие задачи:

- исследование закономерностей разрушения и деформирования древесноволокнистых и древесностружечных плит различной плотности и твердости в широком интервале напряжений и температур при различных видах нагружения;

- выявление аналитических зависимостей для расчета физических и эмпирических констант материалов, определяющих основные параметры их работоспособности: прочности (предела текучести), долговечности и термостойкости (теплостойкости);

- исследование влияния состава (дисперсности и размера наполнителя, количества связующего, наличия облицовки) на физические и эмпирические константы и основные параметры работоспособности древесных композитов;

- изучение влияния концентраторов напряжений на закономерности разрушения и работоспособность древесных плит;

- изучение влияние климатических факторов на константы, определяющие работоспособность древесных композитов;

- изучение влияния воды и агрессивных сред на работоспособность древесных композитов;
- разработка методики прогнозирования работоспособности древесных композитов;
- выдача рекомендаций по использованию вида и марки плит для конкретных строительных изделий и конструкций.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- выявлены термофлуктуационные закономерности разрушения и деформирования древесноволокнистых и древесностружечных плит при разных видах нагружения;

- впервые получены величины физических констант древесных композитов, определяющих их работоспособность при разрушении и деформировании;

- получены экспериментальные результаты по влиянию концентраторов напряжения, агрессивных сред и климатических факторов на закономерности разрушения древесных плит, величины физических и эмпирических констант, определяющих их работоспособность;

- получены поправки, учитывающие изменение температуры и влажности в процессе эксплуатации, а также действие многократного замачивания и замораживания-оттаивания на работоспособность древесных композитов;

- разработана методика прогнозирования основных параметров работоспособности древесных композитов в строительных изделиях и конструкциях в широком диапазоне эксплуатационных параметров (времени, напряжений и температур).

**Достоверность полученных экспериментальных результатов** обеспечивается проведением экспериментов с достаточной воспроизводимостью; статистической обработкой с заданной вероятностью и необходимым количеством повторных испытаний; сопоставлением результатов полученных разными методами, а также сравнение их с аналогичными результатами, полученными другими авторами. Достоверность теоретических решений проверялась их сравнением с экспериментальными результатами.

**Практическое значение работы.** Разработана методика прогнозирования работоспособности (долговечности, длительной прочности или текучести, термостойкости или теплостойкости) древесных композитов при разных видах нагружения в широком диапазоне основных эксплуатационных параметров и при наличии различных осложняющих факторов. Ее внедрение позволит снизить материалоемкость конструкций (сокращает расход древесных плит на 20 ... 30 %), повысить их надежность. Даны рекомендации по применению древесностружечных и древесноволокнистых плит в конкретных строительных изделиях, несущих и ограждающих конструкциях.

**Внедрение результатов.** Теоретические разработки и результаты экспериментальных исследований использованы на предприятии ОАО "Тамбовстройпроект" и ОАО "СМП-534". Ряд положений используются в учебном процессе Тамбовского государственного технического университета при изучении дисциплин "Строительные материалы", "Конструкции из дерева и пластмасс".

Апробация работы. **Основные положения работы** докладывались на:

**II и III международных научно-технических конференциях "Надежность и долговечность строительных материалов"** (Волгоград, 2000 и 2003); **VI–VII научных конференциях ТГТУ (Тамбов, 2001–2002); IV международной конференции "Теплофизические измерения в начале XXI века"** (Тамбов, 2001); **седьмых академических чтениях РААСН "Современные проблемы строительного материаловедения"** (Белгород, 2001); **международной научно-технической конференции "Композиционные строительные материалы"** (Пенза, 2002); **международной научно-технической конференции "Эффективные строительные конструкции"** (Пенза, 2002); **IV международной научно-практической конференции "Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов"** (Пенза, 2002).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 16 печатных трудов, среди них 12 статей, 3 тезиса докладов и методические указания к лабораторным работам.

**Автор защищает:**

- результаты исследований по влиянию состава (дисперсности и размера наполнителя, количества связующего, наличия облицовки) ДСП и ДВП, вида нагружения и наличия концентратора напряжений на закономерности разрушения и деформирования древесных плит, а также физические и эмпирические константы, определяющие их работоспособность;

- результаты исследований по влиянию агрессивных сред и климатических факторов на работоспособность древесных композитов;

- результаты исследований по влиянию вида материала (ДСП и ДВП) и его плотности на коэффициент линейного термического расширения;

–методику прогнозирования работоспособности древесностружечных и древесноволокнистых плит в несущих и ограждающих строительных конструкциях;

–рекомендации по применению древесностружечных и древесноволокнистых плит в несущих и ограждающих строительных конструкциях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и содержит 208 страниц машинописного текста, включая 48 таблиц, 85 рисунков, список литературы из 148 наименований и 3 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели исследований и основные положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе проведен анализ литературных данных.**

В строительстве среди древесных пластиков наибольшее распространение получили древесностружечные и древесноволокнистые плиты. Они применяются для внутренней отделки помещений, устройства чистых полов, а также в качестве элементов несущих и ограждающих конструкций (щитовые двери, панели покрытия, стеновые панели, опалубка, стойки и т.д.).

Изучением физико-механических свойств древесностружечных и древесноволокнистых плит занимались такие ученые, как В.Д. Бекетов, Е.Д. Мерсов, И.Г. Корчаго, С.Л. Ребрин, И.А. Отлев, Г.М. Шварцман, В.М. Хрулев, В.И. Харчевников, Е.М. Разиньков, А.А. Поздняков и др.

При изучении прочностных характеристик древесных плит получены предельные значения прочности при различных видах нагружения (поперечный изгиб, сжатие, растяжение, пенетрация и т.д.). Показано, что данные материалы отличаются большой анизотропией механических свойств.

Деформирование плит изучалось при поперечном изгибе от совместного действия нагрузки, температуры и влажности. При этом для прогноза срока службы В.М. Хрулевым и С.М. Кондрашовым получены уравнения в зависимости от уровня нагружения, температуры и относительной влажности. Изучалось также деформирование ДСП при переменном циклическом увлажнении и высушивании.

В процессе изготовления и эксплуатации древесностружечные и древесноволокнистые плиты находятся под действием длительных нагрузок, которые приводят к их деформированию и разрушению. При этом на них действуют и другие факторы (температурно-влажностные, агрессивные среды, атмосферные воздействия, солнечная радиация и т.д.), что также сказывается на процессе разрушения. Необходимо отметить, что в некоторых работах были предприняты попытки изучения длительной прочности древесины и фанеры. Однако авторы использовали ошибочные представления о неизменности или отсутствии ряда физических констант.

Большое количество работ посвящено изучению водопоглощения ДСП и ДВП. Здесь основное внимание уделялось набуханию и разбуханию плит, механизму проникновения влаги и характеристикам водостойкости. При этом остается неизученным влияние воды на механизм разрушения древесных композитов. Изучены и другие физические свойства древесных пластиков.

Э.М. Гусейновой приводятся данные по влиянию климатических факторов на предел прочности при статическом изгибе. В.М. Хрулевым и К.Я. Мартыновым получены уравнения для ускоренного старения древесностружечных плит на карбомидном и фенолоформальдегидном связующем. Однако для прогнозирования работоспособности наибольший интерес представляет их влияние на длительную прочность и долговечность плит.

Во **второй главе** описаны методические вопросы.

В качестве объектов исследований взяты древесноволокнистые и древесностружечные плиты различной плотности (ДВП – мягкое, твердое и сверхтвердое; ДСП плотностью 650, 700, 800 и 850 кг/м<sup>3</sup>).

Для проведения длительных и кратковременных испытаний при разных видах нагружения использовали шестипозиционный стенд, установку рычажного типа, а также разрывную машину 2167 Р-50. Линейное термическое расширение древесных плит определяли с помощью оптического дилатометра.

Изучено влияние размеров и дисперсности наполнителя древесностружечных плит на величину разброса прочности, а также влияние различных факторов (вида предельного состояния, вида нагрузки, длительности испытаний, наличия концентраторов напряжений) на разброс значений долговечности. Установлено, что для ДСП наблюдается разброс прочности в 2–4 раза, а долговечности – более двух порядков. Уменьшить величину разброса для композитных материалов сложно. Поэтому при прогнозировании прочности и долговечности древесных композитов его величину необходимо учитывать.

Изложены методики определения физических и эмпирических констант при разрушении и деформировании, а также приведены формулы для расчета основных параметров работоспособности (долговечности, прочности (предела текучести), термостойкости (теплостойкости)) и скорости протекания деформационных процессов.

При исследовании долговечности древесностружечных плит использована методика математического планирования эксперимента, разработанная Л.О. Буниной для термопластов. Ее применение позволяет получить необходимую информацию при минимальном количестве испытываемых образцов. Для получения надежных результатов экспериментальные данные подвергались статистической обработке по программам Konstanta и Graffdiffier.

**В третьей главе изучены закономерности разрушения (или деформирования) древесных композитов при разных видах нагружения (поперечном изгибе, сжатии и пенетрации) в широком диапазоне постоянных напряжений и температур. Исследования основаны на термофлуктуационной (кинетической) концепции.**

Развитие кинетической концепции обязано, в первую очередь, фундаментальным работам школы С.Н. Журкова. Она рассматривает тепловое движение атомов как решающий фактор процесса механического разрушения. При этом долговечность  $t$  описывается обобщенной формулой Журкова, физически обоснованной и экспериментально подтвержденной С.Б. Ратнером и В.П. Ярцевым:

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

где при разрушении  $t_m = \tau_m$ , при деформировании  $t_m = \theta_m$  – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц – атомов, групп атомов, сегментов);  $U_0$  – максимальная энергия активации разрушения (размягчения);  $\gamma$  – структурно-механическая константа;  $T_m$  – предельная температура существования твердого тела (термостойкость или теплостойкость).

При нагружении в теле одновременно возникают два процесса: деформирование и разрушение. Они протекают с разной скоростью, и обнаруживается тот процесс, для реализации которого требуется меньше времени. Оба процесса имеют термофлуктуационную природу и описываются одним и тем же уравнением.

Часто формула (1) не оправдывается. Зависимости принимают вид параллельных прямых, которые не сходятся в полюс. В этом случае реализуется формула, полученная Л.О. Буниной,

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

где  $\tau^*$ ,  $U$  – эмпирические константы;  $\beta$  – структурно-силовой фактор.

Наблюдаются также и случаи обращения пучка прямых. Они сходятся в полюс не при предельно высокой, а при предельно низкой температуре. Для описания такой зависимости В.П. Ярцевым предложена формула

$$t = t_m^* \exp \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left( \frac{T_m^*}{T} - 1 \right), \quad (3)$$

где  $t_m^* = (\tau_m^* \text{ или } \theta_m^*)$ ,  $U_0^*$ ,  $\gamma^*$  и  $T_m^*$  – эмпирические константы.

Концепция Журкова о механизме разрушения твердых тел и формулы (1)–(3) дают основу для прогнозирования работоспособности древесных композитов в соответствии с принципом температурно-временной силовой эквивалентности. Из формул (1)–(3) можно выразить силовой параметр ( $\sigma = f(t, T)$ ) и температурный ( $T = f(t, \sigma)$ ).

Изучено влияние состава (дисперсности и размера наполнителя, количества связующего, наличия облицовки) на закономерности разрушения древесных композитов. Для этого при поперечном изгибе в режиме заданных постоянных напряжений и температур проведены длительные испытания древесностружечных и древесноволокнистых плит различной плотности с разными размерами наполнителя. В процессе испытаний фиксировали время разрушения  $\tau$ . В результате получены зависимости в координатах  $\lg\tau - \sigma$ . Пример показан на рисунке 1. Для расчета констант зависимости перестраивали в координаты  $\lg\tau - 10^3/T$ . При этом вид зависимости не меняется.

Для древесностружечных плит плотностью 650, 700 и 850 кг/м<sup>3</sup> зависимости представляют собой семейства веерообразных прямых, сходящихся в точку (полюс) (рисунок 1, а), и описываются уравнением (1). Увеличение однородности и ориентации наполнителя в древесных плитах приводит к изменению характера зависимостей, отражающих процесс разрушения при длительном действии постоянных нагрузок и температур. Наблюдается переход от "прямого пучка" (древесностружечные плиты) к параллельным прямым (ДСП с мелкой стружкой) и далее к "обратному пучку" (твердые древесноволокнистые плиты) (рисунок 1). Последнее, по-видимому, связано с технологической ориентацией.

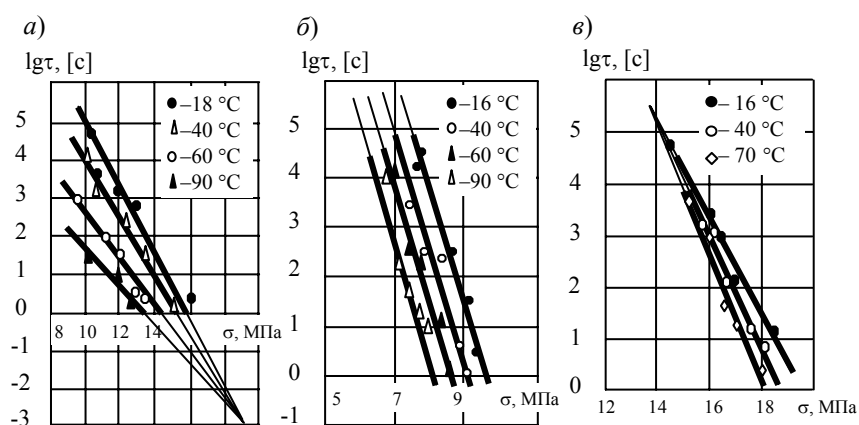


Рисунок 1 – Зависимость долговечности от напряжения при поперечном изгибе для древесных плит плотностью:

а – 700 (ДСП); б – 800 (ДСП с мелкой стружкой); в – 850 (ДВП) кг/м<sup>3</sup>

По полученным зависимостям графоаналитическим способом по программе Konstanta определены физические и эмпирические константы, значения которых представлены в таблице 1.

Для всех испытанных материалов предэкспонента  $\tau_m$  значительно больше периода колебаний атомов в твердом теле  $10^{-12}$  с. Это объясняется тем, что они имеют сложный состав (путь трещины увеличивается за счет огибания частиц наполнителя). Температура полюса  $T_m$  для большинства древесностружечных плит соответствует критической температуре разложения фенолоформальдегидной смолы. Для твердых ДВП предельная температура – эмпирический параметр.

Для древесностружечных плит величина  $U_0$  указывает на разрыв химических связей и близка энергии активации разрушения целлюлозы. Исключение составляет ДСП плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>, для которого энергия активации близка величине  $U_0$  фенолоформальдегидной смолы. Величина  $\gamma$  зависит от качества и однородности стружки. Для твердых древесноволокнистых плит эмпирические константы  $U_0^*$  и  $\gamma^*$  имеют отрицательное значение.

Таблица 1 – Значения физических и эмпирических констант при поперечном изгибе

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Дисперсность древесной стружки	Вид зависимости	Физические и эмпирические константы				
				$\tau_m (\tau^*, \tau_m^*), \text{с}$	$T_m, (T_m^*), \text{К}$	$U_0 (U, U_0^*), \text{кДж/моль}$	$\gamma (\gamma^*), \text{кДж/(МПа} \times \text{моль)}$	$\beta, \text{1/МПа}$
ДС П	<del>650</del>	Разнородная стружка высокой дисперсности		$10^{-3}$	571	194	12,8	–
	<del>700</del>	Однородная стружка высокой дисперсности		$10^{-2,9}$	540	213	11,3	–
	800	Однородная стружка низкой дисперсности		$10^{9,4}$	–	70	–	2,25
	850	Разнородная стружка (включая обзол) высокой дисперсности		$10^{-2}$	454	255	21,6	–
ДВ П	<del>200</del>	–		$\frac{10^{1,8}}{10^{-0,5}}$	$\frac{400}{385}$	$\frac{230}{150}$	$\frac{20}{9,5}$	–
	<del>350</del>	–		$10^{5,85}$	182	–115	–9,16	–
	950	–		$10^9$	263	–588	–32	–

Для мягких ДВП характерен сложный механизм разрушения: при малых напряжениях определяющим является послойное разрушение отдельных фрагментов плиты, а при больших она работает монолитно, что сказывается на величинах максимальной энергии активации и других физических констант. Так, при малых напряжениях  $U_0$  близка величине максимальной энергии активации фенолоформальдегидной смолы, тогда как при больших напряжениях она равна максимальной энергии активации целлюлозы.

Изучено влияние направления силового воздействия на сопротивление разрушению ДСП. Длительные испытания проводили при поперечном изгибе в широком диапазоне постоянных нагрузок и температур. При этом нагрузку прикладывали перпендикулярно и параллельно плоскости плиты. При изменении направления силового воздействия константа  $\tau_m$  меняется несущественно. Предельная температура  $T_m$  падает на 100 °С. Пропорционально изменяются величины  $U_0$  и  $\gamma$  (приблизительно на 30 %).

Изучено влияние вида нагружения (поперечный изгиб, сжатие и пенетрация) на закономерности разрушения древесностружечных плит. При сжатии и пенетрации для ДСП плотностью 700 и 850 кг/м<sup>3</sup> так же, как и при поперечном изгибе, зависимости в координатах  $\lg \tau - \sigma$  имеют вид "прямого пучка". Исключение составляет ДСП плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> с минимальным размером наполнителя, для которого зависимости представляют собой "обратный пучок".

В таблицах 1 и 2 приведены значения физических и эмпирических констант, входящих в уравнения (1)–(3).



Таблица 2 – Влияние вида нагружения на величины констант

Плотность ДСП, кг/м <sup>3</sup>	Вид нагружения	Вид зависимости	Физические и эмпирические константы			
			$\tau_m (\tau_m^*)$ , с	$T_m (T_m)$ , К	$U_0 (U_0^*, U)$ , кДж/моль	$\gamma (\gamma^*)$ , кДж/(МПа×моль)
700	Сжатие		$10^{-0,95}$	368	474	41,8
	Пенетрация		$10^{-1,2}$	435	223	6,96
850	Сжатие		$10^{-1}$	465	186	11,5
800	Сжатие		$10^{6,25}$	189	-7	-5,17
	Пенетрация		$10^{5,75}$	215	-70	-6,9

Из таблиц 1 и 2 видно, что вид нагрузки существенно влияет на величины некоторых прочностных констант. Так для ДСП плотностью 850 кг/м<sup>3</sup> изменение вида нагрузки приводит к изменению только структурно-механической константы  $\gamma$ . Тогда как при сжатии ДСП плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> происходит изменение всех констант. Величина максимальной энергии активации  $U_0$  увеличивается более чем в два раза по сравнению с поперечным изгибом, а  $T_m$  падает и соответствует температуре размягчения фенолоформальдегидной смолы. Такое поведение констант ДСП плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> объясняется преобладающей ролью деформационных процессов. Для ДСП плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> также наблюдается изменение всех констант, что, в первую очередь, связано с изменением вида зависимости.

При пенетрации древесных плит наблюдается сложное переплетение двух процессов: разрушения и деформирования. Для ДСП плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> их роль приблизительно одинакова, а для ДСП плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> на них еще накладывается влияние концентраторов напряжений в вершине индентора.

На работоспособность ДВП большое влияние оказывает их плотность, а ДСП – размеры, дисперсность и качество наполнителя, а также наличие облицовочного слоя. Кроме того, твердые древесностружечные плиты лучше использовать в изделиях, работающих при сжатии, а облицованные – при поперечном изгибе.

На работу древесных плит немалое влияние оказывает наличие концентраторов напряжений, которые приводят к существенному снижению несущей способности. Для крепления данных материалов чаще всего используют соединения на гвоздях или шурупах. При сквозной забивке гвоздя в изделия на основе древесины в нижней их части происходит выкалывание слоя. Для древесностружечных плит при  $d_{гв} = 4$  мм оно достигает недопустимо больших величин. В связи с этим перед забивкой гвоздя в древесностружечных плитах рекомендуется сверлить отверстия диаметром больше на 1 мм  $d_{гв}$ .

Для выявления влияния ослаблений на несущую способность древесных плит при поперечном изгибе в режиме заданных постоянных напряжений и температур были проведены длительные испытания на образцах, имеющих концентратор напряжений (отверстие диаметром 5 мм).

При введении концентратора напряжений для всех исследуемых материалов зависимости  $\lg \tau - \sigma$  и  $\lg \tau - 10^3/T$  имеют вид "обратного пучка". Такое поведение древесных плит, по-видимому, связано с изменением структуры материала в результате его ориентации (технологической или вокруг дефекта в процессе его образования).

Как видно из таблицы 3, при введении концентратора напряжений происходит не только изменение характера зависимостей, но и изменение констант. Создание концентратора напряжений в ДСП

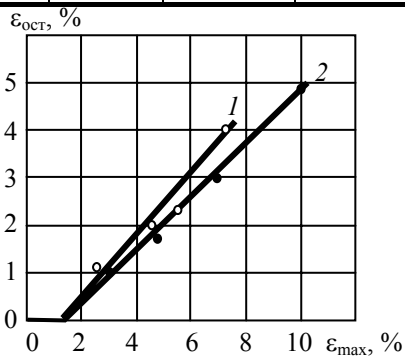
при положительных температурах приводит к незначительному увеличению длительной прочности и долговечности, а в ДВП – к их существенному снижению.

Полученные данные позволяют прогнозировать работоспособность древесностружечных и древесноволокнистых плит при разных видах нагрузки, а также при наличии концентратора напряжений в широком диапазоне напряжений, температур и времени эксплуатации.

**Таблица 3 – Влияние концентратора напряжений на величины констант**

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вид зависимости	Физические и эмпирические константы			
			$\tau_m^* (\tau_m, \tau^*), c$	$U_0 (U_0^*, U), \text{кДж/моль}$	$\gamma (\gamma^*), \text{кДж/(моль} \times \text{МПа)}$	$T_m (T_m^*), \text{К}$
ДС П	800		$10^8$	-152	-33	235
	850		$10^6$	-208	-36	247
ДВП	850		$10^{6,35}$	-129	-13,6	208
	950		$10^6$	-100	-8	232

В процессе различных силовым определяющим является Аскадским, основной сжимающим нагрузкам полной и остаточной). влияние заданной полной 2), а также влияние основные деформационно- что на ДСП плотностью 800 скорость нагружения, а на температура.



**Рисунок 2 – Зависимость остаточной деформации от полной для древесностружечных плит**

эксплуатации материал подвергается воздействиям, из которых сжатие. Как отмечается А.А. характеристикой сопротивления является модуль деформации (упругой, В данной работе рассматривается деформации на остаточную (рисунок температуры и скорости нагружения на силовые параметры ДСП. Установлено, кг/м<sup>3</sup> наибольшее влияние оказывает ДСП плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> –

**Изучены закономерности при длительном сжатии. Вид аналогичен зависимостям, представленным на рисунке 1. Следует отметить, что при изменении процента деформации наклон прямых  $\lg \theta - \sigma$  плавно изменяется.**

**Таблица 4 – Величины эмпирических и физических констант при различных степенях деформации**

Плотность ДСП, кг/м <sup>3</sup>	Деформации, %	Величины физических и эмпирических констант			
		$\theta_m (\theta_m^*), c$	$T_m (T_m^*), \text{К}$	$U_0 (U_0^*), \text{кДж/моль}$	$\gamma (\gamma^*), \text{кДж/(моль} \times \text{МПа)}$
700	3	$10^{-1,5}$	588	115	38,3
	5	$10^{-1,5}$	454	193	37,1
	7	$10^{-1,5}$	417	276	36,3
	10	$10^{-1,35}$	417	334	32,0
	35 (разр.)	$10^{-0,95}$	368	474	41,8
800	3	$10^{7,4}$	238	-1	-86,4

5	$10^{7,2}$	235	-1	-42
7	$10^7$	238	-1	-27,3
10	$10^{7,1}$	208	-1	-9,5
19 (разр.)	$10^{6,25}$	189	-7	-5,17

Из таблицы 4 видно, что при деформировании древесностружечные плиты ведут себя по-разному, что связано с составом и структурой плит. При увеличении процента деформации для ДСП плотностью  $700 \text{ кг/м}^3$  константы  $\theta_m$  и  $\gamma$  остаются постоянными,  $T_m$  падает, а  $U_0$  растет. Для

ДСП плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  эмпирические константы  $\theta_m^*$ ,  $T_m^*$ ,  $U_0^*$  не меняются, а  $\gamma^*$  падает. Следует отметить, что при предельной деформации (разрушении) древесностружечных плит меняются значения всех констант.

М.С. Кацем и Г.М. Бартеневым были предприняты попытки изучения деформирования при пенетрации полимеров с позиции кинетической концепции. По аналогичной методике нами получены зависимости скорости деформирования сжатием древесностружечных плит от обратной температуры (рисунок 3).

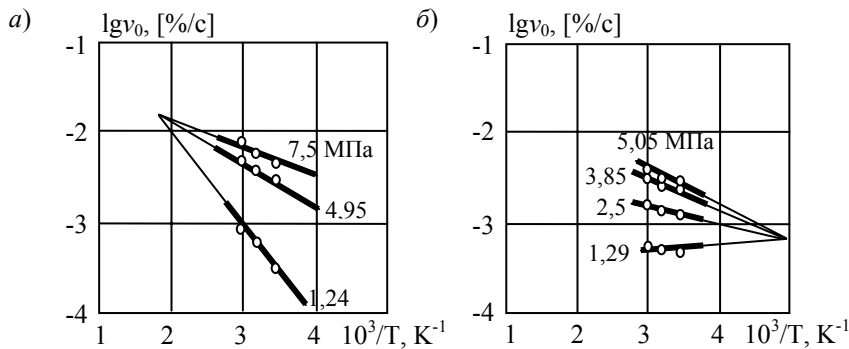


Рисунок 3 – Зависимость логарифма скорости деформирования от обратной температуры для ДСП плотностью,  $\text{кг/м}^3$ :  
***a* – 700; *б* – 800**

Так же, как и закономерности времени разрушения (или деформирования), они представляют собой семейство веерообразных прямых сходящихся в точку, и имеют вид "прямого пучка" для ДСП плотностью  $700 \text{ кг/м}^3$  и "обратного" для ДСП плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$ . Для описания полученных зависимостей уравнение вида Аррениуса было преобразовано по аналогии с обобщенной формулой Журкова и приняло вид:

$$- \text{ для прямого пучка} \quad v = v_{m(d)} \exp \left[ - \frac{U_{0(d)} - \gamma_{(d)} \sigma}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_{m(d)}} \right) \right]; \quad (4)$$

$$- \text{ для обратного пучка } v = v_{m(d)}^* \exp \left[ - \frac{U_{0(d)}^* - \gamma_{(d)}^* \sigma \left( \frac{T_{m(d)}^*}{T} - 1 \right)}{RT} \right], \quad (5)$$

где  $v_{m(d)}$  – начальная кажущаяся скорость деформирования материала;  $U_{0(d)}$  – максимальная энергия активации скорости;  $\gamma_{(d)}$  – структурно-механический фактор;  $T_{m(d)}$  – предельная температура существования твердого тела;  $v_{m(d)}^*$ ,  $U_{0(d)}^*$ ,  $\gamma_{(d)}^*$  и  $T_{m(d)}^*$  – эмпирические константы.

Полученные данные позволяют по уравнениям (4), (5) прогнозировать скорость деформирования сжатием в широком диапазоне заданных параметров эксплуатации (прочности и температуры эксплуатации).

В четвертой главе выявлено влияние скорости нагрева и плотности на термическое расширение, а также влияние различных факторов на работоспособность древесных плит.

Для древесностружечных и древесноволокнистых плит высокой плотности, а также древесины коэффициенты термического расширения практически совпадают. Так, для ДСП плотностью  $850 \text{ кг/м}^3$   $\alpha$  равен  $3,68 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , для ДВП плотностью  $850 \dots 950 \text{ кг/м}^3$  –  $3,14 \dots 3,88 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  и древесины –  $3,96 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Установлено, что зависимость коэффициента термического расширения от плотности для исследованных материалов одина, что позволяет определять величину  $\alpha$  для любого древесного пластика, зная его плотность.

Исследовано влияние жидких агрессивных сред на механические свойства древесных композитов. Наибольшая потеря прочности древесных плит происходит в воде, а также: ДСП в растворе кислот, ДВП в растворе щелочей. Аналогичные результаты приведены С.Л. Ребриным. Незначительное влияние на прочностные свойства древесных плит оказывают растворитель (ацетон и Р-4), бензин и машинное масло. Наличие в воде соли NaCl (35 %) способствует уменьшению набухания ДСП на 25 %, а ДВП на 60 % и приводит к уменьшению падения прочности на 14 %.

Изучены закономерности набухания ДСП во времени при различных постоянных температурах в пресной и соленой воде. Они описываются уравнением вида Аррениуса. Характеристики набухания (предэкспоненциальный множитель и энергия активации набухания), входящие в данное уравнение, зависят от вида материала (его плотности, структуры) и состава воды.

Влияние циклического воздействия воды (как наиболее распространенной среды) изучено с термофлуктуационной позиции разрушения для древесностружечных плит. Характер зависимости времени разрушения от напряжения после воздействия воды сохраняется, однако при этом наблюдаются изменения величин всех констант. Так  $U$  и  $\tau_*$  значительно уменьшаются, а  $\beta$  увеличивается. Существенное изменение структурно-силового фактора  $\beta$ , по-видимому, связано с пластифицирующим (размягчающим смолу) действием воды. При этом количество дополнительных связей в материале уменьшается, что также приводит к падению  $\tau_*$ . Такое поведение констант приводит к значительному снижению работоспособности материала.

Изучено влияние суточных колебаний температуры в интервалах (от плюс 13 до минус 7  $^\circ\text{C}$  и от плюс 5 до минус 25  $^\circ\text{C}$ ) и влажности на долговечность древесностружечных плит. В результате, определена поправка для перехода от лабораторных испытаний при постоянных температурах к реальным условиям эксплуатации. Для ДСП плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  она составила  $10^{2,57} \text{ с}$ .

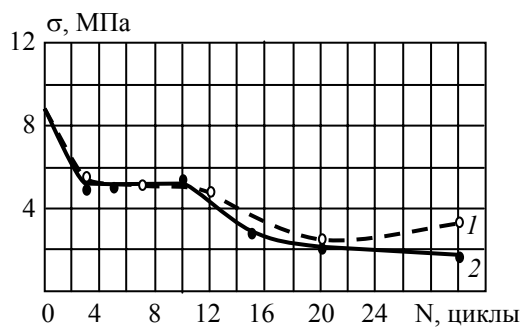


Рисунок 4 – Влияние на прочность ДСП плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  циклов замачивания (1) и замораживания-оттаивания (2)

Исследовано влияние циклов замачивания и замораживания-оттаивания на прочность ДСП при разных видах нагружения. Установлено, что уже после 20 циклов прочность образцов составляет 22 % от первоначальной. Кроме того, для ДСП зависимость при циклическом замачивании без замораживания (до 10 циклов) совпадает с зависимостью при многократном замораживании-оттаивании (рисунок 4). Следовательно, потеря прочности прежде всего вызвана влиянием воды при положительной температуре. Действие замораживания начинает проявляться только после 10 циклов. На основе полученных данных был определен срок службы древесностружечных плит в режиме многократного замораживания-оттаивания. Для ДСП плотностью  $800$  и  $850 \text{ кг/м}^3$  он составляет 3–4 года.

Определена поправка, позволяющая учитывать влияние многократного замораживания-оттаивания на прочностную долговечность древесностружечных плит. Для ДСП плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  после 20 циклов попеременного замораживания-оттаивания она составляет  $10^{10,64}$  с.

Исследовано влияние циклов замораживания-оттаивания (0, 5, 12, 20) на закономерности деформирования пенетрацией и деформационную работоспособность материалов. Установлено, что воздействие многократного замораживания-оттаивания приводит к изменению характера зависимостей, что отражается на величинах физических и эмпирических констант. Неизменной остается только одна константа  $T_{m(d)}$ . Поведение остальных констант ( $U_{0(d)}$ ,  $\gamma_{(d)}$  и  $\lg v_{m(d)}$ ) зависит от вида материала. Для ДСП плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  с увеличением количества циклов значения  $\lg v_{m(d)}$  падают, а  $U_{0(d)}$  и  $\gamma_{(d)}$  растут. Для ДСП плотностью  $850 \text{ кг/м}^3$  значения  $\gamma_{(d)}$  падают, а  $\lg v_{m(d)}$  и  $U_{0(d)}$  увеличиваются.

Полученные данные позволяют прогнозировать работоспособность древесных композитов в реальных условиях (при воздействии агрессивных сред и климатических факторов).

В пятой главе приводится методика прогнозирования работоспособности древесных композитов. Она включает в себя два случая.

### 1. Прогнозирование долговечности:

–определяется характер зависимостей разрушения (или деформирования) и описывающие их уравнения;

–для материала в конкретном изделии или конструкции определяется характер силового воздействия, т.е. вид действующего статического нагружения;

–определяются напряжения  $\sigma$ , возникающие в материале, устанавливается температура эксплуатации  $T$ , а также внутренние и внешние факторы, влияющие на работоспособность (концентраторы напряжений, климатические факторы и т.д.);

агрессивные среды,

–при установленных параметрах  $\sigma$  и  $T$  по уравнениям (1)–(3) рассчитывается теоретическая долговечность работы до потери формы или (долговечность также можно образец которой представлен на

материала (время его разрушения) определить по диаграмме, рисунок 5);

определит по диаграмме, рисунок 5);

–с помощью поправок материала с учетом концентраторов агрессивной среды.

### 2. Прогнозирование

Прогнозировать прочность необходимо подобрать конструкции. При этом расчет ведется в следующей последовательности:

–определяется вид нагрузки, действующий на материал;

–необходимо задаться долговечностью и температурой эксплуатации;

–по диаграммам или уравнениям, вытекающим из уравнений (1)–(3), определяется длительная прочность материала;

–по полученным значениям напряжения подбирается сечение изделия или элемента конструкции.

определяется реальная долговечность изменения вида нагружения, влияния напряжений, климатических факторов, длительной прочности древесных плит. целесообразно в тех случаях, когда сечение изделия или элемента

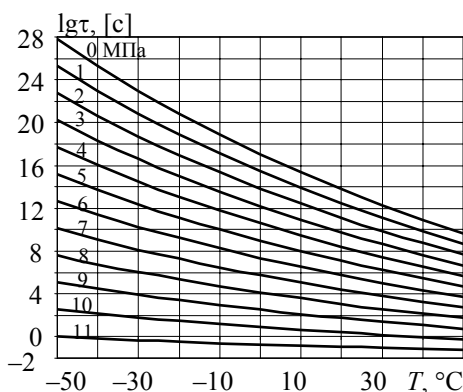


Рисунок 5 – Диаграмма для определения работоспособности ДСП плотностью  $850 \text{ кг/м}^3$  при поперечном изгибе

определяется реальная долговечность изменения вида нагружения, влияния напряжений, климатических факторов,

длительной прочности древесных плит. целесообразно в тех случаях, когда сечение изделия или элемента

В работе приведены примеры прогнозирования работоспособности древесных композитов в строительных изделиях и конструкциях (конструкция пола, несъемная опалубка и панель покрытия), на основании которых в зависимости от различных условий эксплуатации были определены сроки службы (долговечность) древесных композитов. Полученные результаты представлены в таблице 5.

Разработаны рекомендации по применению древесностружечных и древесноволокнистых плит в строительных изделиях и конструкциях:

1 Из исследуемых видов древесностружечных плит ДСП плотностью  $850 \text{ кг/м}^3$  (с крупной стружкой) предпочтительнее в конструкции пола по сплошному подстилающему слою, а ДСП плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  (с мелкой стружкой) – по лагам. Второй материал при поперечном изгибе работает лучше.



2 Для производства несущих элементов конструкций и опалубки рекомендуется применять твердые или сверхтвердые древесностружечные плиты, изготовленные из не содержащей обзола крупной стружки низкой дисперсности. Из исследованных материалов данному условию соответствуют только два (ДСП плотностью 700 и 650 кг/м<sup>3</sup> {с крупной стружкой}).

3 В несъемной опалубке долговечность и длительная прочность выше у облицованного ДСП. При этом облицовочный слой препятствует воздействию влаги и агрессивных сред.

4 Для обшивки панелей покрытия целесообразнее использовать твердые древесноволокнистые плиты. Такая панель дешевле и имеет меньшую массу.

5 Древесностружечные плиты лучше работают при отрицательных температурах, а древесноволокнистые – при положительных. Это необходимо учитывать при проектировании конструкций, работающих в условиях крайнего севера.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 С позиции кинетической (термофлуктуационной) концепции исследованы закономерности разрушения и деформирования древесных композитов в широком диапазоне заданных постоянных напряжений и температур. Выявлены аналитические зависимости, связывающие основные параметры работоспособности – время эксплуатации, напряжение и температуру. Получены величины физических и эмпирических констант материалов, входящие в данные зависимости и определяющие эти параметры.

2 Экспериментально изучено влияние состава (дисперсности и размера наполнителя, количества связующего, облицовки) на закономерности разрушения древесных композитов. Установлено, что уменьшение дисперсности наполнителя в ДСП и его технологическая ориентация в ДВП приводит к изменению вида зависимостей долговечности от напряжения и температуры ("прямой пучок" – параллельные прямые – "обратный пучок"). Для мягких ДВП в исследованном диапазоне нагрузок и температур происходит изменение механизма разрушения, что проявляется в поведении физических констант.

3 Теоретически и экспериментально изучено влияние вида нагружения (поперечный изгиб, сжатие и пенетрация) на закономерности разрушения и деформирования древесностружечных композитов плотностью 700 и 800 кг/м<sup>3</sup>. Установлен различный механизм их разрушения при изгибе и сжатии, что отражается на величинах констант, определяющих работоспособность. Показано, что при пенетрации древесностружечных плит одновременно протекают два процесса: разрушение и деформирование. Для ДСП плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> их роль приблизительно одинакова, а для ДСП плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> на них еще накладывается влияние концентратора напряжений в вершине индентора.

4 Экспериментально изучено влияние концентратора напряжений на закономерности разрушения древесных композитов. Установлено, что для всех исследованных материалов зависимости долговечности от напряжения и температуры имеют вид "обратного пучка". Такое поведение древесных композитов, по-видимому, связано с изменением их структуры в результате ориентации (технологической или вокруг дефекта в процессе его образования).

5 Показано, что величина квазиупругой (обратимой) деформации для ДСП зависит от полной и составляет порядка 2 ... 5 %. На величину остаточной деформации влияют величина ступенчатой нагрузки, длительность ступеней нагружения и температура. Зависимости скорости деформирования ДСП в широком диапазоне заданных постоянных напряжений и температур представляют собой семейства веерообразных прямых в виде "прямого" или "обратного" пучков. Для их описания предложены уравнения (4) и (5). При изменении процента деформации для исследо-

ванных материалов вид зависимости не меняется. Константы, отражающие минимальную долговечность  $\tau_m$  и предельную температуру размягчения  $T_m$ , практически не меняются. Поведение остальных двух констант (максимальной энергии активации деформирования и структурно-механической константы) зависит от вида материала.

6 Исследовано влияние агрессивных сред и воды на прочностные характеристики и закономерности разрушения и деформирования древесных композитов. Показано, что циклическое воздействие воды приводит к изменению всех физических и эмпирических констант, а также существенному снижению работоспособности ДСП. Установлено, что наличие соли NaCl в воде снижает набухание ДВП на 25 %, ДСП на 60 % и приводит к уменьшению падения прочности на 14 %.

7 Изучено влияние климатических факторов (колебания температуры и влажности, циклов замачивания–высушивания и замораживания–оттаивания) на прочностные и деформационные характеристики, закономерности разрушения и деформирования древесных композитов. Установлено, что после замораживания–оттаивания происходит изменение вида зависимости долговечности от напряжения и температуры при деформировании пенетрацией. Для долговечности древесностружечных плит определены поправки, позволяющие учитывать изменение температуры и влажности ( $\Delta\tau = 10^{2,56} \dots 10^{2,58}$  с) и действие многократного замораживания-оттаивания (после 20 циклов –  $\Delta\tau = 10^{10,64}$  с).

8 Установлена единая зависимость коэффициента термического расширения от плотности для всех исследованных материалов, что позволяет определять величину  $\alpha$  для любого древесного композита, зная его плотность.

9 Полученные аналитические зависимости и величины, входящих в них констант, позволяют прогнозировать прочность, долговечность и термостойкость древесных плит при заданных параметрах эксплуатации. Разработана методика прогнозирования работоспособности (долговечности, прочности и термостойкости) в широком диапазоне эксплуатационных параметров (времени, напряжений и температур). Даны рекомендации по применению древесностружечных и древесноволокнистых плит в строительных изделиях, несущих и ограждающих конструкциях.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1 *Ярцев В.П.* Закономерности разрушения твердой древесностружечной плиты в ограждающих конструкциях / В.П. Ярцев, О.А. Киселева // Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций: Материалы II междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, 2000. – Ч. 2. – С. 42–44.

2 *Киселева О.А.* Влияние различных факторов на механизм разрушения ДСП / О.А. Киселева // VI научная конференция ТГТУ: Тез. докл. – Тамбов, 2001. – С. 204–205.

3 *Ярцев В.П.* Влияние дисперсности наполнителя на работоспособность древесностружечных плит различной плотности при поперечном изгибе и сжатии / В.П. Ярцев, О.А. Киселева // Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы седьмых академических чтений РААСН. – Белгород, 2001. – Ч. 2. – С. 425–428.

4 *Ярцев В.П.* Прогнозирование прочности, долговечности и термостойкости нагруженных в постоянном режиме древесных плит / В.П. Ярцев, О.А. Киселева // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск, 2002. – № 1–2. – С. 141–144.

5 *Киселева О.А.* Прочность и долговечность древесностружечных плит / О.А. Киселева, В.П. Ярцев // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2001. Вып. 10. – С. 14–18.



6 Андрианов К.А. Определение начальной и предельной температуры разложения органических утеплителей по механическим испытаниям / К.А. Андрианов, О.А. Киселева, В.П. Ярцев // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. Четвертой междунар. теплофиз. шк. / ТГТУ. – Тамбов, 2001. – Ч. 1. – С. 70–72.

7 Киселева О.А. О разбросе прочности и долговечности древесностружечных плит / О.А. Киселева, В.П. Ярцев // Композиционные строительные материалы: Теория и практика: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2002. – С. 169–172.

8 Киселева О.А. К вопросу о закономерностях деформирования пенополистирола и древесностружечной плиты при сжатии / О.А. Киселева, К.А. Андрианов, В.П. Ярцев // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2002. – С. 10-14.

9 Киселева О.А. Закономерности деформирования твердой древесностружечной плиты / О.А. Киселева, В.П. Ярцев // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: Сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2002. – С. 316–321.

10 Киселева О.А. Исследование механизма разрушения и деформирования древесных пластиков / О.А. Киселева, В.П. Ярцев // VII научная конференция ТГТУ: Пленарные докл. и тез. стендовых докл. – Тамбов, 2002. – Ч. 1. – С. 73–74.

11 Ярцев В.П. Влияние концентратора напряжений на прочность и долговечность древесных пластиков / В.П. Ярцев, О.А. Киселева // Пластические массы. – М., 2002. – № 11. – С. 18–19.

12 Киселева О.А. Влияние направления силового воздействия на физические константы, определяющие долговечность древесностружечных плит / О.А. Киселева, В.П. Ярцев, А.А. Миронов // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов: Сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2002. – С. 118–120.

13 Физико-механические испытания строительных композитных материалов: Метод. указ. к лаб. раб. / Сост.: В.П. Ярцев, О.А. Киселева. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2003. – 24 с.

14 Kiseleva O.A. Influence of fluctuations in temperature on longevity of chip boards / O.A. Kiseleva, A.A. Mironov, V.P. Yartsev // Transactions of the TSTU: Four-Language Scientific-Theoretical and Applied Multidisciplinary Journal. – Tambov, 2003. – Т. 9. № 1. – P. 91–94.

15 Киселева О.А. Прогнозирование долговечности древесных плит в строительных изделиях и конструкциях / О.А. Киселева, В.П. Ярцев // Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций: Материалы III междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград, 2003. – Ч. II. – С. 12–15.

16 Киселева О.А. Влияние плотности на термическое расширение древесных плит / О.А. Киселева, В.П. Ярцев // Актуальные проблемы современного строительства: Сб. тр. / ПГАСА. – Пенза, 2003. – Ч. 2. – С. 63–66.

Таблица 5 – Прогнозируемая долговечность древесных композитов

Вид конструкции	Вид нагрузки	Вид материала (плотностью, кг/м <sup>3</sup> )	Структура	$\sigma$ , МПа	T, °C	Прогнозируемая долговечность, $\tau$ , годы			
						I	II	III	IV
Строительные изделия		ДСП (800)	Однородная стружка низкой дисперсности	Без нагрузки	30 ... –30	–	6 8	50	4 5
		ДСП (850)	Разнородная стружка высокой дисперсности			–	5 0	51	5 1

		ДВП (850)	–		30 ... –30	–	5 0	50	–
Пол по лагам		ДСП (650)	Разнородная стружка высокой дисперсности	3,5	20	5 0	–	2 дня	–
		ДСП (800)	Однородная стружка низкой дисперсности		20	5 0	–	3 мин	–
		ДСП (850)	Разнородная стружка высокой дисперсности		20	5 4	2 0	≈2 0	–
Опалубка "Velox"	Поперечный изгиб	ДСП (700)	Однородная стружка высокой дисперсности	3,89 ... 0,17	30 ... –25	–	–	≈1 5	≈ 1 2
		ДСП (800)	Однородная стружка низкой дисперсности		30 ... –25	–	4 5	Ра зр	1 0 3 д н я
Опалубка из ДСП		ДСП (800)	Однородная стружка низкой дисперсности	1,36 ... 0,17	30 ... –25	–	5 0	15	1 5
		ДСП (850)	Разнородная стружка высокой дисперсности		30 ... –25	–	4 8	≈2 5	≈ 2 2
Панель покрытия: верхняя обшивка		ДВП (850)	–	4	30 ... –25	–	5 0	2	–
		ДВП (950)	–		30 ... –25	–	9	40	–
нижняя обшивка		ДВП (850)	–	2,24	20	–	6 0	–	–
		ДВП (950)	–		20	–	3 1	–	–

**Примечания:** I – без воздействия внешних факторов; II – при влиянии концентратора напряжений (отверстия диаметром 5 мм); III – при циклическом (20 циклов) действии воды; IV – с учетом климатических факторов.