

УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ, УЧИТЫВАЮЩАЯ СКОРОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ

В. П. Гандурин, С. И. Герасимов, В. А. Кузьмин, И. А. Одзерихо

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

При транспортировании взрывоопасных грузов возникает проблема обеспечения безопасности при аварийных механических воздействиях, которые имеют место при авиационных авариях, столкновениях транспортных средств, техногенных катастрофах. Одним из решений этой проблемы является демпфирование энергии удара. В качестве демпфера в защитных конструкциях часто используется древесина. При проектировании этих конструкций широко используется численное моделирование. Для адекватного описания поведения материала при динамических нагрузках необходимо знать параметры модели, учитывающие особенности деформирования.

В работе представлена изотропная упруго-пластическая модель деформирования сосны, березы и осины с параметрами, учитывающие влияние скорости деформации, в диапазоне скоростей деформаций $600 \dots 3000 \text{ с}^{-1}$. Параметры подбирались на основе экспериментальных данных по динамическому сжатию образцов с различной ориентацией волокон по отношению к направлению удара. Проведено численное моделирование с использованием указанной модели и подобранными параметрами с помощью отечественного пакета программ ЛОГОС. Проведена верификация принятой модели по диаграммам деформирования, полученных экспериментально.

Введение

Свойство древесины деформироваться при сжатии в широком диапазоне деформаций (30–40) % при практически постоянном напряжении позволяет отнести ее к материалам, способным амортизировать ударные нагрузки. Как амортизатор древесина не пропускает через себя нагрузку, превышающую предел ее прочности. Поэтому древесину часто используют в качестве ограничителя аварийных ударных нагрузок (демпферов) при транспортировании грузов. Древесина как конструкционный материал обладает рядом положительных свойств: она имеет относительно высокую прочность, небольшую плотность, малую теплопроводность, легко поддается механической обработке. Вместе с тем, древесина имеет и ряд особенностей, одним из которых является анизотропия механических свойств материала. Также механические свойства древесины зависят от многих других факторов: с увеличением влажности проч-

ность древесины снижается; древесина большой плотности имеет более высокую прочность; на прочность древесины влияет процент поздней древесины, наличие пороков, гнили, строение. Эти факторы приводят к достаточно большому диапазону разброса данных о механических свойствах древесины.

При проектировании различных конструкций (в том числе защитных конструкций) широко используется численное моделирование. Для адекватного описания поведения материала при динамических нагрузках необходимо знать параметры модели, учитывающие особенности деформирования.

В настоящей работе представлена изотропная упруго-пластическая модель деформирования с кинематическим упрочнением для сосны, березы и осины с параметрами модели Купера-Саймондса (Cowper-Symonds) при комнатной температуре ($+20 \text{ }^\circ\text{C}$), которые учитывают влияние скорости деформации, для разных углов вырезки образцов. Параметры подбирались на основе экспериментальных данных по динамическому сжатию образцов с различной ориентацией волокон по отношению к направлению нагружения, представленных в [1] с помощью отечественного пакета программ ЛОГОС [2]. Эксперимент проводился на установке [3], реализующей методику Кольского и разрезного стержня Гопкинсона (РСГ).

Постановка и результаты эксперимента

Приведены данные о методике и результатах экспериментов, проведенных в работе [1].

Для исследования свойств сосны, березы и осины были изготовлены образцы в виде цилиндров диаметром $\sim 20 \text{ мм}$ и высотой $\sim 10 \text{ мм}$ с различным направлением вырезки по отношению к оси ствола дерева. Углы между направлением приложения нагрузки и направлением расположения волокон составляли 0° , 30° , 45° , 60° и 90° . Влажность образцов составляла $\sim 10 \%$.

Установка содержала ударник, нагружающий стержень и опорный стержень диаметром 20 мм , изготовленного из алюминиевого сплава Д16Т. Образец располагался между опорным и нагружающим стержнем. Нагружающий стержень имел длину $1,5 \text{ м}$, опорный стержень – $4,5 \text{ м}$, что позволяло регистрировать основной и два дополнительных цикла нагружения.

На рис. 1–3 приведены диаграммы деформирования $\sigma\sim\varepsilon$ образцов березы, сосны и осины с различными углами вырезки при температуре +20 °С, причем каждая порода древесины представлена двумя диаграммами: одна характерна для «упругого» деформирования образцов при малой (600...800 с⁻¹) скорости деформации и сохранении их целостности, другая характеризует поведение материалов в случае их разрушения (при скоростях деформаций 1500...3000 с⁻¹). Диаграммы располагаются на оси деформации условно с разнесением на оси деформации.

В табл. 1 приведены некоторые статические характеристики древесины.

На основе результатов экспериментов [1] и данных других источников [4–9], были определены параметры упруго-пластической модели деформирования с изотропным упрочнением для древесины, учитывающей скорость деформирования. Проведено численное моделирование с использованием указанной модели деформирования образцов древесины в условиях испытаний на установке РСГ.

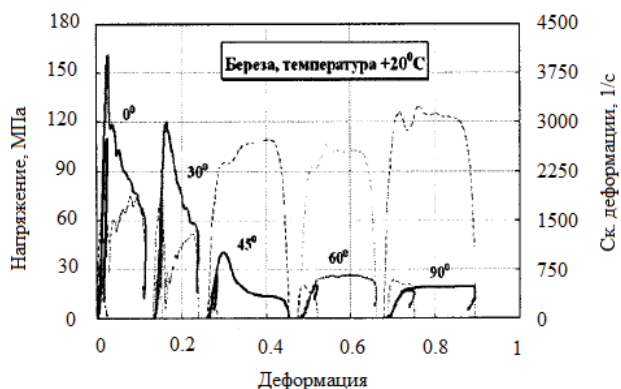


Рис. 1. Диаграммы деформирования образцов березы

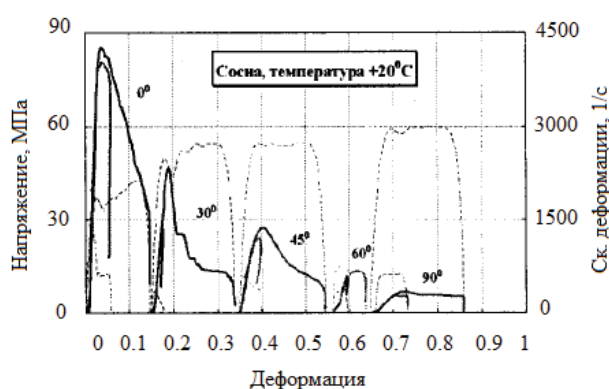


Рис. 2. Диаграммы деформирования образцов сосны

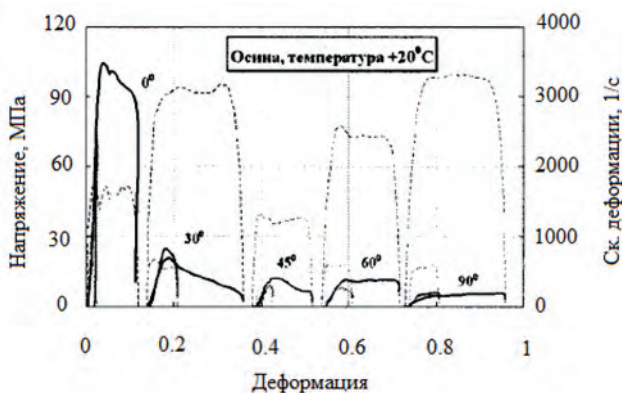


Рис. 3. Диаграммы деформирования образцов осины

Таблица 1

Статические свойства испытываемых пород древесины

Порода древесины	Начальная плотность, г/см ³	Влажность, %	Модуль упругости при сжатии, МПа		Предел прочности вдоль волокон при сжатии, МПа
			вдоль волокон	поперек волокон	
Береза	0,62	15	16 660	1124	45
Сосна	0,59		16 600	1126	44
Осина	0,50		–	–	37

Численное моделирование

На рис. 4 приведена расчетная конечно-элементная модель задач численного моделирования, реализующая нагружение образцов древесины на установке РСГ. Задачи решались в двумерной осесимметричной постановке. В конечно-элементной сетке использовались четырехузловые элементы. Модель содержит 243360 элементов и 256362 узла. Для конечно-элементной модели была проведена верификация, которая показала, что для получения достоверных значений уровней деформаций оптимальным размером элемента является $0,5 \times 0,5$ мм.

Для образцов древесины задавалась упруго-пластическая модель с изотропным упрочнением, а для ударника, нагружающего и опорного стержней – упругая модель.

Для описания контактного взаимодействия между расчетными областями был использован контактный алгоритм с использованием метода штрафа и с коэффициентом трения $\mu = 0,01$.

В качестве граничных условий задавалась жесткая заделка опорного стержня, а также запрещались перемещения узлов нагружающего и опорного стержня по двум степеням свободы.

В области упругих деформаций поведение древесины описывается законом Гука:

$$\begin{cases} s_{ij} = 2G\varepsilon_{ij}; \\ P = -K \frac{\Delta V}{V}, \end{cases} \quad (1)$$

где s_{ij} – девиатор тензора напряжений; P – давление;

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига; ε_{ij} – девиатор тензора деформаций; E – модуль упругости (модуль Юнга); ν – коэффициент Пуассона; $K = \frac{E}{2(1-2\nu)}$ – модуль объемного сжатия; $\frac{\Delta V}{V}$ – объемная деформация.

В пластической области деформирования девиатор тензора напряжений подчиняется условию текучести Мизеса:

$$\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij} - \sigma_y^2 \leq 0, \quad (2)$$

где σ_y – предел текучести материала.

Пластические свойства древесины описывались моделью Купера–Саймондса (Cowper–Symonds), учитывающей влияние скорости деформации:

$$\sigma_y = \sigma_T \left(1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right) \quad (3)$$

где σ_T – статический предел текучести материала; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации образца; C, p – параметры скорости деформации.

Для ударника и мерных стержней использовалась система уравнений (1).

В дальнейшем, проводились расчеты, в которых подбирались параметры скорости деформации C, p для каждой породы древесины в зависимости от угла вырезки.

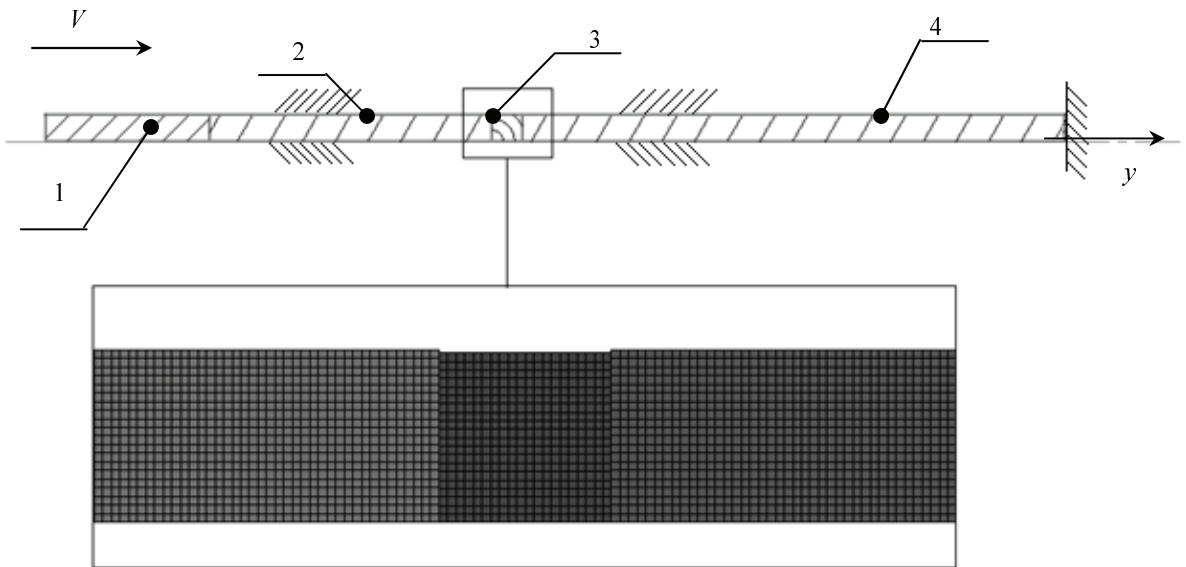


Рис. 4. Расчетная конечно-элементная модель задач: 1 – ударник; 2 – нагружающий стержень; 3 – образец древесины; 4 – опорный стержень, V – скорость ударника

Результаты численного моделирования

Для изотропной упруго-пластической модели деформирования с изотропным упрочнением, которая учитывает влияние скорости деформации необходимо задать: модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , статический предел текучести σ_T и параметры скорости деформации C, p .

В табл. 2 представлены механические свойства, которые принимались при численном моделировании. Следует отметить, что модуль упругости E определен по начальному линейному участку эксперимен-

тальных кривых деформирования (рис. 1–3). Остальные данные брались из различных источников [4–9]. Для определения параметров скорости деформации C, p , решалась система уравнений (3) для статического и динамического нагружения образца древесины.

Значения приведены в табл. 3–5.

На рис. 5–7 приведены диаграммы деформирования $\sigma \sim \varepsilon$ и $\dot{\varepsilon} \sim \varepsilon$ образцов березы, сосны и осины с различными углами вырезки при температуре $+20^\circ\text{C}$ с учетом параметров, учитывающих скорость деформирования C, p . В табл. 3–5 приведены результат численного моделирования со значением параметров C, p .

Таблица 2

Механические свойства изотропной упруго-пластической модели

α , град		0	30	45	60	90
Береза	E , МПа	4850	3650	810	450	400
	μ	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
	σ_T , МПа	81	35	23	17	11
Сосна	E , МПа	2833	1200	600	430	130
	μ	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
	σ_T , МПа	45	15	8	5	4
Осина	E , МПа	3180	670	475	400	300
	μ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	σ_T , МПа	41	15	10	8	6

Таблица 3

Результаты численного моделирования и параметры скорости деформации C, p при температуре $+20^\circ\text{C}$. Береза

α , град	Эксперимент			Численное моделирование			Параметры скорости деформирования	
	σ , МПа	ε	$\dot{\varepsilon}$, 1/с	σ , МПа	ε	$\dot{\varepsilon}$, 1/с	C , 1/с	p
0	160	0,10	1950	163,2	0,08	1941	1543	1,07
30	120	0,10	2050	123,6	0,09	1724	600	1,12
45	40	0,20	2700	41,4	0,23	2440	3557	1,09
60	27	0,18	2650	30,2	0,21	2610	3301	0,77
90	23	0,22	3100	25,7	0,24	2628	1889	5,32

Таблица 4

Результаты численного моделирования и параметры скорости деформации C, p при температуре $+20^\circ\text{C}$. Сосна

α , град	Эксперимент			Численное моделирование			Параметры скорости деформирования	
	σ , МПа	ε	$\dot{\varepsilon}$, 1/с	σ , МПа	ε	$\dot{\varepsilon}$, 1/с	C , 1/с	p
0	85	0,15	2120	84,1	0,18	2167	7260	4,24
30	45	0,2	2750	46,3	0,22	2566	640	2,10
45	27	0,2	2750	28,7	0,26	2569	1141	1,04
60	13	0,09	750	14,2	0,07	568	82	4,71
90	8	0,22	3000	7,1	0,32	2545	5000	1,32

Результаты численного моделирования и параметры скорости деформации C, p при температуре +20 °С. Осина

α , град	Эксперимент			Численное моделирование			Параметры скорости деформирования	
	σ , МПа	ε	$\dot{\varepsilon}$, 1/с	σ , МПа	ε	$\dot{\varepsilon}$, 1/с	C , 1/с	p
0	105	0,11	1800	112,2	1895	1439	1439	0,94
30	27	0,22	3200	28,8	2540	17460	17460	7,60
45	17	0,07	1300	16,9	0,09	1255	1929	1,11
60	12	0,18	2500	10,2	0,23	1867	26950	1,81
90	9	0,24	3200	10,2	0,26	2122	25200	2,0

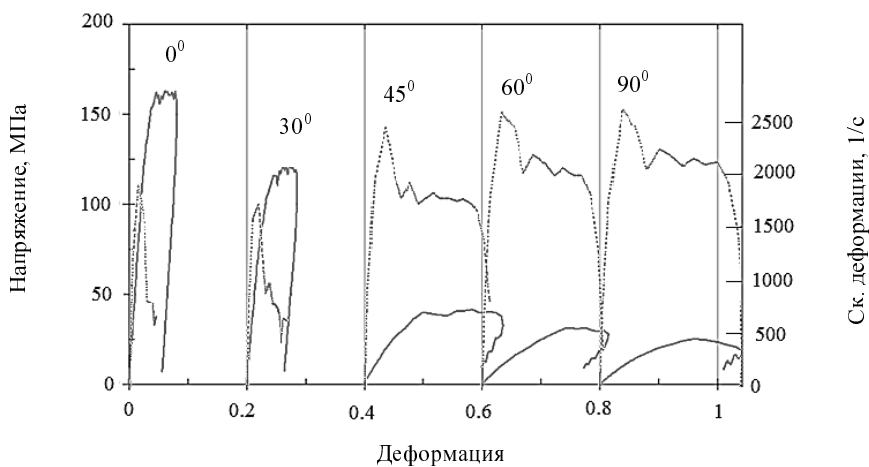


Рис. 5. Расчетные диаграммы деформирования образцов березы

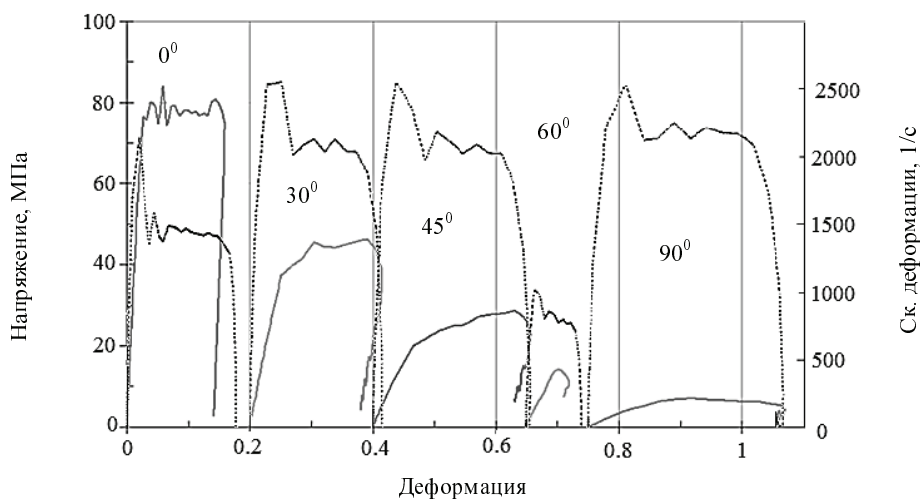


Рис. 6. Расчетные диаграммы деформирования образцов сосны

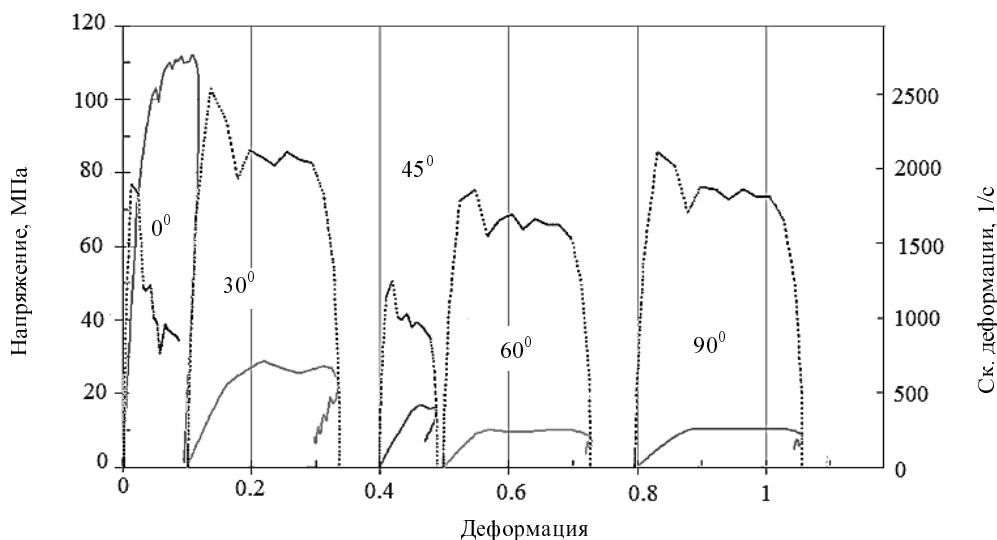


Рис. 7. Расчетные диаграммы деформирования образцов осины

Заключение

В работе приведена изотропная упруго-пластическая модель деформирования березы, сосны и осины, учитывающая скоростное деформирование в диапазоне скоростей деформаций $600 \dots 3000 \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре $+20 \text{ }^\circ\text{C}$. Параметры модели подобраны для различных углов ориентации волокон по отношению к вектору удара (угла вырезки). Приведенная модель позволит более корректно учитывать поведение древесины при сжатии, что повысит точность и достоверность результатов расчетов и численного моделирования динамического деформирования элементов конструкций, содержащих древесину. Численные результаты хорошо согласуются с результатами эксперимента [1]. Относительная погрешность по пределу текучести в зависимости от угла вырезки для образцов березы составляет не более 12 %, сосны – не более 11 %, осины не более 15 %. Причем погрешность возрастает с увеличением угла вырезки, которую можно объяснить расщеплением, расслоением реальных образцов при сжатии, что не учитывается в численной модели деформирования.

Литература

1. Брагов А. М., Ломунов А. К. и др. Влияние скорости деформации, температуры и угла вырезки на механические свойства некоторых пород древесины // IX Харитоновские чтения. 2007. С. 329–333.
2. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Морозов С. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные воз-

можности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц // XV Супервычисления и математическое моделирование. 2014. С. 241–246.

3. Брагов А. М., Ломунов А. К. Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация конструкций. 1995. С. 127–136.

4. Новиков С. А. Демпфирующие свойства секвойи, березы, сосны и осины при ударном нагружении // Прочность материалов при динамическом нагружении. № 7. 2003. С. 85–97.

5. Митинский А. Н. Упругие постоянные древесины // Труды лесотехнической академии им. С. М. Кирова. № 63, 1970.

6. Брагов А. М. и др. Научно-технический отчет по теме: Разработка программного обеспечения и математическое моделирование деформирования и разрушения спецконструкций при квазистатических и динамических нагрузках – Экспериментальное изучение динамических свойств сосны, березы и осины с различным направлением вырезки образцов при пониженной температуре // НИИ механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород, 1998.

7. Ашкенази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов. Ленинград: «Машиностроение» ленинградское отделение, 1980.

8. Комар А. Г. Строительные материалы и изделия. М: Высшая школа, 1983.

9. Iraola B., Cabrero J.M. An algorithm to model wood accounting for different tension and compression elastic and failure behaviors, Eng. Struct. 2016. № 117. P. 332–343.