

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-2-165-176

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ, УЧИТЫВАЮЩАЯ СКОРОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ*

© 2019 г. **Гандурин В.П.¹, Герасимов С.И.^{1,2,3,4},
Ерофеев В.И.^{2,5}, Кузьмин В.А.^{1,2,3}, Одзерихо И.А.^{1,2,3}**

¹*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Российская Федерация*

²*Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижний Новгород, Российская Федерация*

³*Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Российская Федерация*

⁴*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация*

⁵*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

erof.vi@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.02.2019

Исследуется проблема обеспечения безопасности транспортирования взрывоопасных грузов с помощью защитных конструкций, в которых в качестве демпфера используется древесина.

Определены параметры Купера – Саймондса изотропной упругопластической модели для некоторых пород древесины с учетом скорости деформирования. Модель не учитывает анизотропию, которая характерна для древесины. Применение изотропной модели деформирования оправдано тем, что в реальных защитных конструкциях расположение волокон древесины выбирается таким образом, чтобы обеспечить приемлемые нагрузки на защищаемый груз. Использование изотропной модели в этом случае позволяет с достаточной точностью описать деформирование реальной защитной конструкции. При этом рассматриваемая модель является более простой с точки зрения подбора параметров по сравнению с моделью, учитывающей анизотропию.

Рассмотренная модель деформирования древесины сосны, березы и осины учитывает влияние скорости деформирования в диапазоне 600–3000 с⁻¹. Высокоскоростное деформирование учитывается с помощью подобранных параметров модели Купера – Саймондса. Параметры подбирались на основе

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты №18-08-00715, 18-38-00297, 18-29-10073).

экспериментальных данных по динамическому сжатию образцов с различной ориентацией волокон по отношению к направлению удара (0, 30, 45, 60, 90°). Проведено численное моделирование с использованием подобранных параметров для модели. Проведено сравнение диаграмм деформирования, полученных с применением принятой модели, с диаграммами деформирования, полученными экспериментально. Сравнение показало приемлемую точность модели.

Ключевые слова: древесина, деформирование, упругопластическая модель, скоростное упрочнение.

Введение

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 за счет конструктивных решений. В качестве демпфера в защитных конструкциях часто используется древесина.

Свойство древесины деформироваться при сжатии в широком диапазоне деформаций 30–40% при практически постоянном напряжении позволяет отнести ее к материалам, способным амортизировать ударные нагрузки. Древесина как конструкционный материал обладает рядом положительных свойств: она имеет относительно высокую прочность, небольшую плотность, малую теплопроводность, легко поддается механической обработке. Однако механические свойства древесины зависят от многих других факторов: с увеличением влажности прочность древесины снижается; древесина большей плотности имеет более высокую прочность; на прочность древесины влияет процент поздней древесины, наличие пороков, гнили, строения. Эти факторы приводят к достаточно большому диапазону разброса данных о механических свойствах древесины.

В настоящей статье представлена упругопластическая модель деформирования с изотропным упрочнением для сосны, березы и осины с параметрами модели Купера – Саймондса (Cowper – Symonds) при комнатной температуре (+20 °C), которая учитывает влияние скорости деформации образцов с разными углами ориентации волокон по отношению к направлению удара. Параметры подбирались на основе экспериментальных данных по динамическому сжатию образцов с различной ориентацией волокон по отношению к направлению удара, представленных в [1]. Эксперимент проводился на установке, реализующей методику Кольского и разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [2, 3]. Численные расчеты проводились с помощью отечественного пакета программ ЛЮГОС [4].

1. Постановка и результаты эксперимента

В разделе изложены данные о методике и результатах экспериментов, приведенных в [1].

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

Установка содержала ударник, нагружающий стержень и опорный стержень диаметром 20 мм, изготовленные из алюминиевого сплава Д16Т. Образец располагался между опорным и нагружающим стержнями. Нагружающий стержень имел длину 1,5 м, опорный стержень – 4,5 м, что позволяло регистрировать основной и два дополнительных цикла нагружения, необходимых для корректного проведения эксперимента [2, 3].

На рис. 1, 3, 5 приведены диаграммы деформирования $\sigma \sim \epsilon$, а на рис. 2, 4, 6 – диаграммы $\dot{\epsilon} \sim \epsilon$ для образцов березы, сосны и осины соответственно с различными углами вырезки при температуре +20 °С [1], причем каждая порода древесины представлена двумя диаграммами: одна характерна для «упругого» деформирования образцов при малых скоростях деформации (600–800 с⁻¹) и сохранения их целостности, другая характеризует поведение материалов в случае их разрушения (при скоростях деформации 1500–3000 с⁻¹). Для разных углов ориентации волокон диаграммы деформирования смещены по оси деформаций.

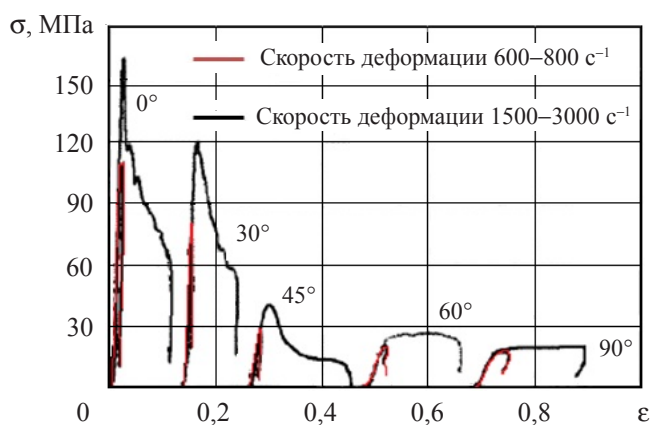


Рис. 1. Диаграммы «напряжение–деформация» для образцов березы

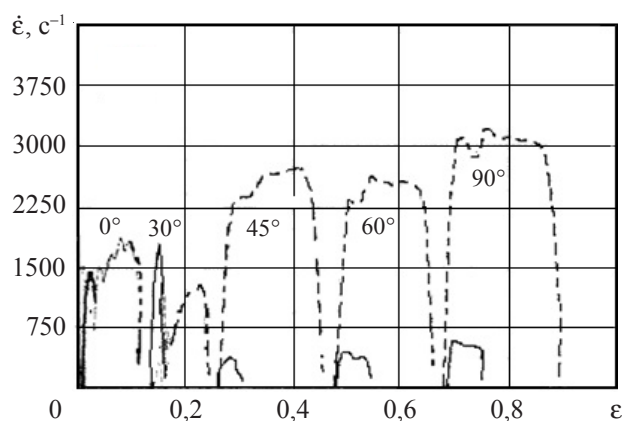


Рис. 2. Диаграммы «скорость деформации–деформация» для образцов березы

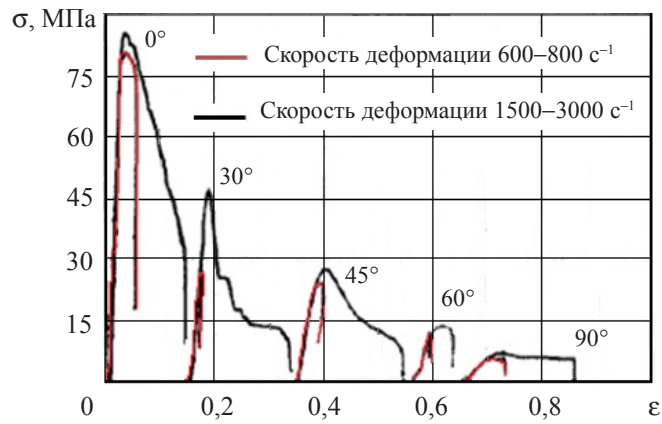


Рис. 3. Диаграммы «напряжение–деформация» для образцов сосны

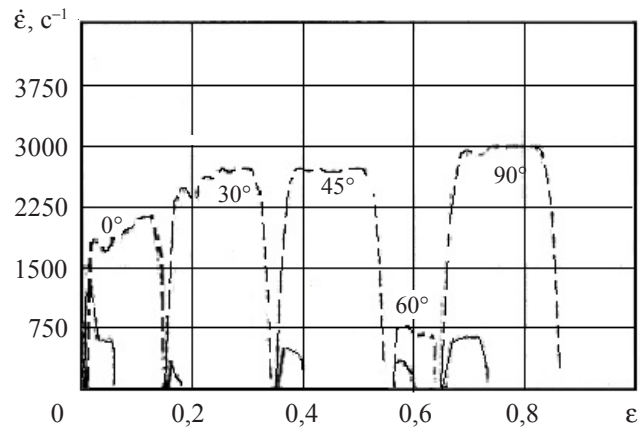


Рис. 4. Диаграммы «скорость деформации–деформация» для образцов сосны

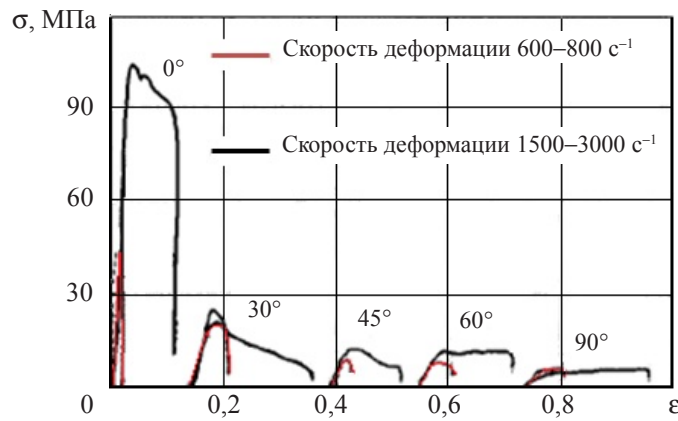


Рис. 5. Диаграммы «напряжение–деформация» для образцов осины

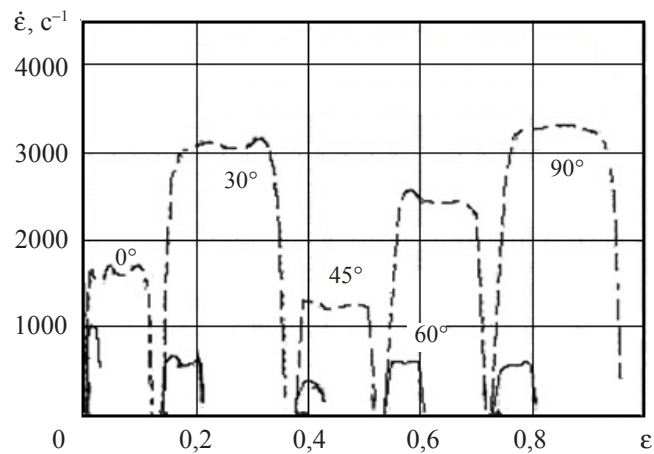


Рис. 6. Диаграммы «скорость деформации–деформация» для образцов осины

2. Численное моделирование

На рис. 7 приведена расчетная конечно-элементная модель задачи численного моделирования, реализующая нагружение образцов древесины на установке РСГ. На рисунке обозначено: 1 – ударник, 2 – нагружающий стержень, 3 – образец древесины, 4 – опорный стержень. Задача решалась в двумерной осесимметричной постановке. В конечно-элементной сетке использовались четырехузловые элементы. Модель содержит 243360 элементов и 256362 узла.

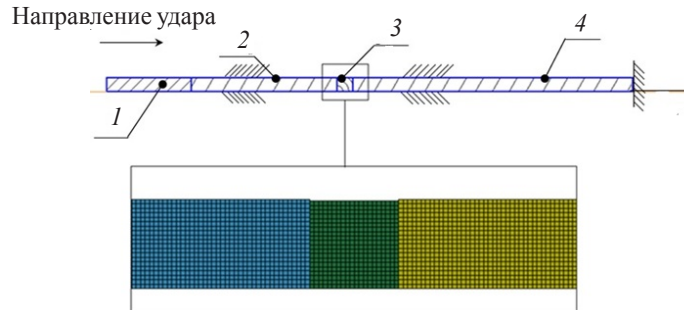


Рис. 7. Расчетная конечно-элементная модель задачи

Для образцов древесины задавалась упругопластическая модель с изотропным упрочнением. Упругое деформирование описывается законом Гука, пластическое – условием текучести Мизеса. Влияние скорости деформирования на напряжение текучести описывается моделью Купера – Саймондса. Для ударника, нагружающего и опорного стержней задавалась упругая модель деформирования.

Для описания контактного взаимодействия между расчетными областями был использован контактный алгоритм с использованием метода штрафа с коэффициентом трения $\mu = 0,01$. В методе штрафа к стандартному уравнению принципа возможных перемещений добавляется слагаемое, отвечающее за вклад контактных сил. Применение этого метода равносильно введению фиктивных пружин на границе контакта, которые предохраняют контактирующие тела от взаимного проникновения [5].

В качестве граничных условий задавалась жесткая заделка опорного стержня, а также запрещались перемещения узлов нагружающего и опорного стержней по двум степеням свободы, перпендикулярным оси y (см. рис. 7).

В области упругих деформаций поведение древесины описывается обобщенным законом Гука:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right], \quad (1)$$

$$s_{ij} = 2G \varepsilon_{ij}, \quad P = -K \frac{\Delta V}{V},$$

где $G = E/[2(1 + \nu)]$ – модуль сдвига; ε_{ij} – девиатор тензора деформаций; s_{ij} – девиатор тензора напряжений; E – модуль упругости (модуль Юнга); ν – коэффициент Пуассона; $K = E/[2(1 - 2\nu)]$ – модуль всестороннего сжатия; $\Delta V/V$ – объемная деформация, P – давление.

В пластической области деформирования поверхность текучести описывается поверхностью текучести Мизеса:

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

где σ_y – предел текучести материала.

Напряжение текучести древесины определяется по модели Купера – Саймондса [6], 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 модели. Расчеты проводились с подбором параметров модели Купера – Саймондса для каждой породы древесины.

3. Результаты численного моделирования

Необходимые для изотропной упругопластической модели деформирования модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , статический предел текучести σ_T и плотность ρ для древесины березы, сосны и осины, соответствующие различным углам α ориентации волокон к вектору удара, использованные при численном моделировании процесса деформирования, представлены в таблице 1.

Таблица 1

	α , град	0	30	45	60	90
I	2	3	4	5	6	7
Береза	E , МПа	4850	3650	810	450	400
	ν	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
	σ_T , МПа	81	35	23	17	11
	ρ , г/см ³	0,62				
Сосна	E , МПа	2833	1200	600	430	130
	ν	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
	σ_T , МПа	45	15	8	5	4
	ρ , г/см ³	0,59				

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
Осина	E , МПа	3180	670	475	400	300
	ν	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	σ_T , МПа	41	15	10	8	6
	ρ , г/см ³	0,50				

Следует отметить, что модуль упругости E определен по начальному линейному участку экспериментальных кривых деформирования (см. рис. 1–6 [1]). Остальные данные для ν , σ_T , ρ взяты из различных источников [7–26]. Для определения параметров модели Купера – Саймондса C , p использовалось выражение (3) для «упругого» деформирования при малой скорости деформации ($600\text{--}800\text{ с}^{-1}$) и при скоростях деформации $1500\text{--}3000\text{ с}^{-1}$.

В таблице 2 приведены значения параметров C , p модели Купера – Саймондса при температуре $+20\text{ }^\circ\text{C}$, использованные в численных расчетах.

Таблица 2

α , град	Береза		Сосна		Осина	
	C , с ⁻¹	p	C , с ⁻¹	p	C , с ⁻¹	p
0	1543	1,07	7260	4,24	1439	0,94
30	600	1,12	640	2,10	17460	7,60
45	3557	1,09	1141	1,04	1929	1,11
60	3301	0,77	82	4,71	26950	1,81
90	1889	5,32	5000	1,32	25200	2,0

На рис. 8–13 приведены построенные по результатам моделирования с использованием параметров модели Купера – Саймондса диаграммы $\sigma \sim \epsilon$ и $\dot{\epsilon} \sim \epsilon$ образцов березы, сосны и осины с различными углами ориентации волокон к направлению удара при температуре $+20\text{ }^\circ\text{C}$.

Сравнительный анализ экспериментальных и построенных численно диаграмм показал хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных. Относительная погрешность по величине предела текучести при ударе для образцов березы составляет не более 12%, сосны – не более 11%, осины – не более 15%. Погрешность возрастает с увеличением угла вырезки, что можно объяснить расщеплением, расслоением реальных образцов при сжатии, которые не учитываются в численной модели деформирования.

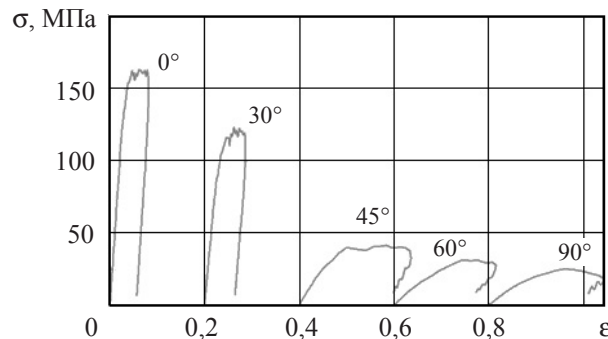


Рис. 8. Расчетные диаграммы «напряжение–деформация» для березы

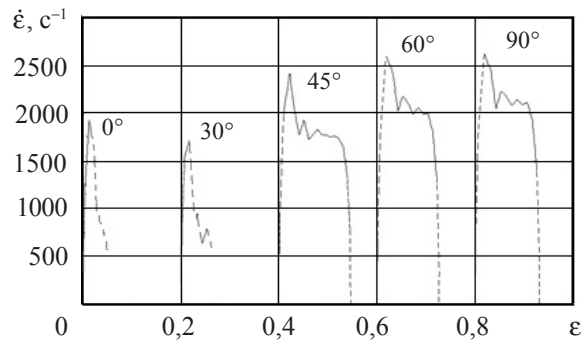


Рис. 9. Расчетные диаграммы «скорость деформации–деформация» для березы

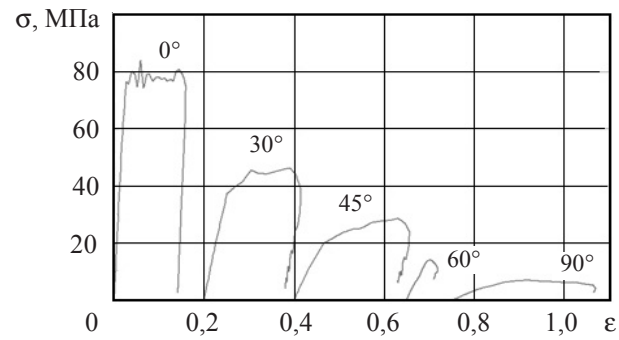


Рис. 10. Расчетные диаграммы «напряжение–деформация» для сосны

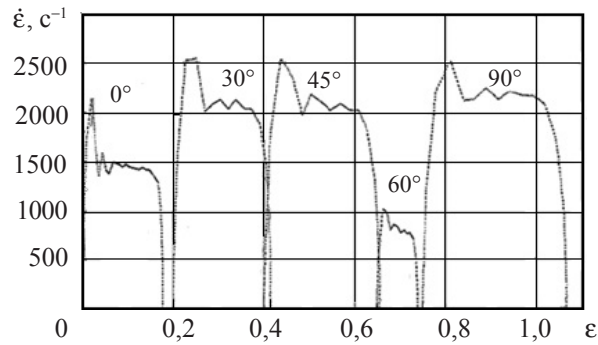


Рис. 11. Расчетные диаграммы «скорость деформации–деформация» для осины

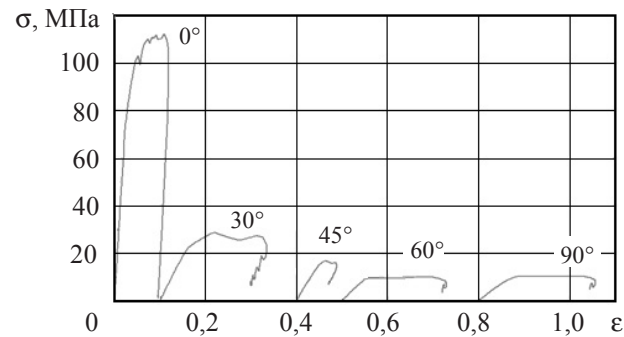


Рис. 12. Расчетные диаграммы «напряжение–деформация» для осины

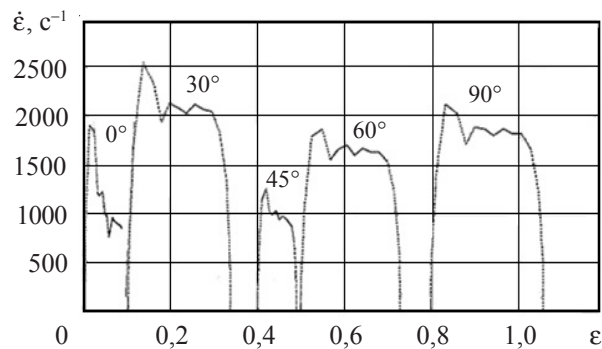


Рис. 13. Расчетные диаграммы «скорость деформации–деформация» для осины

Заключение

Определены параметры Купера – Саймондса изотропной упругопластической модели деформирования березы, сосны и осины, учитывающей влияние скорости деформации в диапазоне $600\text{--}3000\text{ c}^{-1}$ при комнатной температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности древесины 10% . Параметры модели подобраны для различных углов ориентации волокон по отношению к вектору скорости при ударе ($0, 30, 45, 60, 90^{\circ}$). Использование изотропной модели в этом случае позволяет с приемлемой точностью описать деформирование демпфирующих элементов реальной защитной конструкции. При этом приведенная модель позволяет учитывать упрочнение древесины при росте скорости деформирования, что повышает точность и достоверность результатов расчетов динамического деформирования элементов конструкций, содержащих древесину.

Список литературы

1. Брагов А.М., Ломунов А.К., Сергеичев И.В., Грей III Дж.Т. Влияние скорости деформации, температуры и угла вырезки на механические свойства некоторых пород древесины. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Труды Междунар. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». 12–16 мар. 2007. Саров.* Под ред. А.Л. Михайлова. Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2007. С. 349–353.
2. Брагов А.М., Ломунов А.К. Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация конструкций.* 1995. Вып. 51. С. 127–136.
3. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering.* 1995. Vol. 16. No 2. P. 321–330.
4. Дьянов Д.Ю., Казанцев А.В., Морозов С.В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сложенных частиц. Супервычисления и математическое моделирование: *Труды XV Междунар. конф. 13–17 окт. 2014. Саров.* Под ред. Р.М. Шагалиева. Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2015. С. 241–246.
5. Galanin M.P., Krupkin A.V., Kuznetsov V.I. et al. Mathematical modeling thermal elastoplastic contact interaction system of bodies. *Mathematica Montisnigri.* 2014. Vol. XXX. P. 99–114.
6. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams. *Brown University Applied Mathematics Report.* 1958. Vol. 28. P. 1–46.
7. Большаков А.П., Балакшина М.А., Гердюков Н.Н. и др. Демпфирующие свойства секвойи, березы, сосны и осины при ударном нагружении. *Прикладная механика и техническая физика.* 2001. Т. 42. № 2. С. 23–32.

8. Митинский А.Н. Упругие постоянные древесины как ортотропного материала. *Труды лесотехнической академии им. С.М. Кирова*. 1958. №63. С. 22–54.
9. Ашкенази Е.К. *Анизотропия древесины и древесных материалов*. М.: Лесная промышленность, 1978. 221 с.
10. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. *Анизотропия конструкционных материалов: Справочник*. М.: Машиностроение, 1980. 247 с.
11. Комар А.Г. *Строительные материалы и изделия*. М.: Высшая школа, 1988. 527 с.
12. Кузнецов А.И. *Внутренние напряжения в древесине*. М.: ГЛБИ, 1950. 59 с.
13. Леонтьев Н.Л. *Упругие деформации древесины*. М.–Л.: ГЛБИ, 1952. 117 с.
14. Глухих В.Н. *Анизотропия древесины как фактор для повышения качества сушки пиломатериалов*. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 161 с.
15. Iraola B., Cabrero J.M. An algorithm to model wood accounting for different tension and compression elastic and failure behaviors. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 117. P. 332–343.
16. Zhao S., Zhao J.X., Han G.Z. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 137. No 1. P. 1–9.
17. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1986. Vol. 4. P. 161–174.
18. Reid S.R., Peng C., Reddy T.Y. Dynamic uniaxial crushing and penetration of wood. In: *Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain*. Ed. J. Harding. *Institute of Physics Conference Series*. 1989. No 102. Bristol. P. 535–542.
19. Reid S.R., Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1997. Vol. 19. No 5–6. P. 531–570.
20. Buchar J., Krivanek I., Severa L. *High rate behaviour of wood. New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. Trends in Mechanics of Materials*. Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepaczko. Warsaw. 2001. P. 357–362.
21. Harrigan J.J., Reid S.R., Tan P.J., Reddy T.Y. High rate crushing of wood along the grain. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. No 4–5. P. 521–544.
22. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Coutellier D., Morvan H. Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities. Part A: Experimental investigations. *Composite Structures*. 2016. Vol. 149. P. 315–328.
23. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *Journal de Physique IV France 7 Colloque 3*. 1997. P. 487–492.
24. Allazadeh M.R., Wosu S.N. High strain rate compressive tests on wood. *Strain*. 2011. Vol. 48. No 2. P. 101–107.
25. Holmgren S.-E., Svensson B.A., Gradin P.A., Lundberg B. An encapsulated split Hopkinson pressure bar for testing of wood at elevated strain rate, temperature, and pressure. *Experimental Techniques*. 2008. Vol. 32. P. 44–50.
26. Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Iuzhina T.N., Gray III G.T. Investigation of wood anisotropy under dynamic loading. *Problems of Strength and Plasticity*. 2018. Vol. 80. No 4. P. 555–565.

References

1. Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Gray III G.T. Vliyaniye skorosti deformatsii, temperatury i ugla vrezki na mekhanicheskiye svoystva nekotorykh porod drevesiny [The effect of strain rate, temperature and cutting angle on the mechanical properties of certain wood species]. *Ekstremalnyye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnyye volny. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii. "IX Kharitonovskiy tematicheskiy nauchnyy chteniya" [Extreme States of Matter. Detonation. Shock Waves. Proceedings of the International Conference "IX Kharitonovskie Thematic Scientific Readings"]*. (12–16 March 2007. Sarov). RFNC – VNIIEF Publ. 2007. P. 349–353 (In Russian).
2. Bragov A.M., Lomunov A.K. Ispol'zovaniye metoda Kol'skogo dlya dinamicheskikh ispytaniy konstruktivnykh materialov [Using the Kolsky method for dynamic testing of structural materials]. *Prikladnyye problemy prochnosti i plastichnosti. Analiz i optimizatsiya konstruktivnykh materialov* [Applied Problems of Strength and Plasticity. Analysis and Optimization of Structural Materials].

of Strength and Plasticity. Analysis and Optimization of Structures]. 1995. Iss. 51. P. 127–136 (In Russian).

3. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Impact Eng.* 1995. Vol. 16. No 2. P. 321–330.

4. Dyanov D.Yu., Kazantsev A.V., Morozov S.V. et al. Paket programm LOGOS. Funktsionalnyye vozmozhnosti dlya resheniya svyazannykh zadach prochnosti i gidrodinamiki sglazhennykh chastits [LOGOS software package. Functional capabilities for solving related problems of strength and hydrodynamics of smoothed particles]. *Trudy XV mezhdunarodnoy konferentsii "Supervychisleniya i matematicheskoye modelirovaniye"* [Proceedings of the XV International Conference "Super-computation and Mathematical Modeling"] (13–17 Oct. 2014 . Sarov). RFNC – VNIIEF Publ. 2015. P. 241–246 (In Russian).

5. Galanin M.P., Krupkin A.V., Kuznetsov V.I. et al. Mathematical modeling thermal elastoplastic contact interaction system of bodies. *Mathematica Montisnigri*. 2014. Vol. XXX. P. 99–114.

6. Cowper G.R., Symonds P.S. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams. *Brown University Appl. Math. Reports*. 1958. Vol. 28. P. 1–46.

7. Bolshakov A.P., Balakshina M.A., Gerdyukov N.N. et al. Damping properties of sequoia, birch, pine, and aspen under shock loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. Vol. 42. No 2. P. 202–210.

8. Mitinskii A.N. Uprugiy postoyannye drevesiny kak ortotropnogo materiala [Elastic permanent wood as an orthotropic material]. *Trudy lesotekhnicheskoy akademii im. S.M. Kirova* [Proceedings of the Forestry Academy. n.a. S.M. Kirov]. 1958. No 63. P. 22–54 (In Russian).

9. Ashkenazi E.K. *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov* [Anisotropy of Wood and Wood Materials]. Moscow. Lesnaia promyshlennost Publ. 1978. 221 p. (In Russian).

10. Ashkenazi E.K., Ganov E.V. *Anizotropiya konstruktsionnykh materialov. Spravochnik* [Anisotropy of Construction Materials. Directory]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1980. 247 p. (In Russian).

11. Komar A.G. *Stroitelnyye materialy i izdeliya* [Building Materials and Products]. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 1988. 527 p. (In Russian).

12. Kuznetsov A.I. *Vnutrenniye napryazheniya v drevesine* [Internal Stresses in Wood]. Moscow. GLBI Publ. 1950. 59 p. (In Russian).

13. Leontiev N.L. *Uprugiy deformatsii drevesiny* [Elastic Deformation of Wood]. Moscow. Leningrad. GLBI Publ. 1952. 117 p. (In Russian).

14. Glukhikh B.N. *Anizotropiya drevesiny kak faktor dlya povysheniya kachestva sushki pilomaterialov* [Anisotropy of Wood as a Factor for Improving the Quality of Lumber Drying]. St. Petersburg. SPGU Publ. 2007. 161 p. (In Russian).

15. Iraola B., Cabrero J.M. An algorithm to model wood accounting for different tension and compression elastic and failure behaviors. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 117. P. 332–343.

16. Zhao S., Zhao J.X., Han G.Z. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 137. No 1. P. 1–9.

17. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *Int. J. Impact Eng.* 1986. Vol. 4. P. 161–174.

18. Reid S.R., Peng C., Reddy T.Y. Dynamic uniaxial crushing and penetration of wood. In: *Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain*. Ed. J. Harding. *Inst. Phys. Conf. Series*. 1989. No 102. Bristol. P. 535–542.

19. Reid S.R., Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *Int. J. Imp. Eng.* 1997. Vol. 19. No 5–6. P. 531–570.

20. Buchar J., Krivanek I., Severa L. *High rate behaviour of wood. New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. Trends in Mechanics of Materials*. Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepaczko. Warsaw. 2001. P. 357–362.

21. Harrigan J.J., Reid S.R., Tan P.J., Reddy T.Y. High rate crushing of wood along the grain. *Int. J. Mech. Sci.* 2005. Vol. 47. No 4–5. P. 521–544.

22. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Coutellier D., Morvan H. Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities. Part A: Experimental investigations. *Composite Structures*. 2016. Vol. 149. P. 315–328.

23. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *J. Phys. IV France 7 Colloque 3*. 1997. P. 487–492.
24. Allazadeh M.R., Wosu S.N. High strain rate compressive tests on wood. *Strain*. 2011. Vol. 48. No 2. P. 101–107.
25. Holmgren S.-E., Svensson B.A., Gradin P.A., Lundberg B. An encapsulated split Hopkinson pressure bar for testing of wood at elevated strain rate, temperature, and pressure. *Experimental Techniques*. 2008. Vol. 32. P. 44–50.
26. Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Iuzhina T.N., Gray III G.T. Investigation of wood anisotropy under dynamic loading. *Problems of Strength and Plasticity*. 2018. Vol. 80. No 4. P. 555–565.

ELASTOPLASTIC MODEL OF DEFORMATION OF SOME OF WOOD SPECIES, ACCOUNTING FOR HIGH-RATE HARDENING

**Gandurin V.P.¹, Gerasimov S.I.^{1,2,3,4}, Erofeev V.I.^{2,5},
Kuzmin V.A.^{1,2,3}, Odzerikho I.A.^{1,2,3}**

¹*Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation*

²*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences–Branch
of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

³*Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI,
Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation*

⁴*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

⁵*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The problem of ensuring the safe transportation of explosive goods by means of protective structures that use wood as a damper is being investigated. One of the solutions to this problem is damping the impact energy using structural designs. Wood is often used as damping material in such protective structures. In the present report, Cowper–Symonds' parameters of the elastoplastic model of some of wood species are determined, accounting for strain rate. The proposed model does not account for anisotropy, which is characteristic of wood. Use of an isotropic model is justified by the fact that, in realistic protective structures, the direction of fibers is chosen so as to provide admissible loading of the protected cargo. Using an isotropic model in this case makes it possible to describe accurately enough deformation of a realistic protective structure. Such a model is simpler from the viewpoint of choosing its parameters, as compared with a model accounting for anisotropy. The model of deformation of pine, birch and aspen, considered in the report, accounts for the strain-rate effect in the range of 600–3000 s⁻¹. High-rate damping is accounted for by choosing parameters of the Cowper–Symonds model. The parameters were chosen, based on the experimental data on dynamic compression of specimens with various kinds of fiber orientation relative to the impact direction (0, 30, 45, 60, 90°). The numerical modeling was done using the chosen parameters of the model. The deformation diagrams obtained using the above model are compared with the experimentally obtained ones. The comparison showed acceptable model accuracy.

Keywords: wood, damping, elastoplastic model, high-rate hardening.