

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-82-103

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДРЕВЕСИНЫ ДЕФОРМАЦИОННЫМИ И ПРОЧНОСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ*

© 2022 г.

**Кибец А.И.¹, Калинина Ю.А.^{1,2},
Вуцин Л.И.², Крушка Л.³**

*¹Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

*²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

³Военный университет технологий, Варшава, Польша

kibec@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 21.12.2021

Древесина благодаря ряду специфических свойств (относительно низкая плотность, относительно высокая прочность, низкая теплопроводность, технологичность) получила широкое распространение не только в строительстве, но и в некоторых областях техники. Ежегодно в мире транспортируется огромное количество контейнеров с радиоактивными веществами, отработавшим ядерным топливом, компонентами боеприпасов и т.д. Обеспечение безопасности транспортирования подобных веществ и изделий авиационным, автомобильным, морским и железнодорожным транспортом имеет большое значение в связи с наличием потенциального риска нанесения в процессе перевозки ущерба людям, окружающей среде и имуществу. Конструкция контейнера должна выдерживать без разгерметизации и повреждения содержимого значительные динамические нагрузки, которые могут возникать при аварийном падении контейнера с транспортного средства или в процессе выполнения погрузо-разгрузочных операций. В качестве одного из демпфирующих материалов, которые могут смягчить последствия подобных интенсивных динамических воздействий на контейнеры и их содержимое, используется древесина, поскольку свойство деформироваться при сжатии поперек волокон до 30–40%, а для некоторых пород и до 70%, при практически постоянном напряжении ограничивает передаваемую через нее нагрузку величиной предела прочности. Для достоверного расчета поведения контейнеров в этом случае необходимы данные по свойствам используемой древесины при ударных воздействиях, в частности динамические диаграммы деформирования. В статье проводится анализ публикаций, содержащих результаты экспериментального исследования деформирования древесины для определения значений параметров и после-

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта (грант №20-08-00455_а).

дующей верификации ее математической модели как однонаправленно армированного упругопластического материала, реализованной в вычислительном комплексе «Динамика-3».

Ключевые слова: древесина, пластические деформации, разрушение, экспериментальные данные.

Введение

Для обеспечения безопасности окружающей среды контейнер для транспортировки радиоактивных материалов должен выдерживать значительные динамические нагрузки, которые могут возникать при его падении в результате аварии или теракта. В качестве одного из демпфирующих материалов, которые могут смягчить последствия подобных интенсивных динамических воздействий на контейнеры и их содержимое, используется древесина разных пород деревьев (W. Johnson [1], A.M. Bragov, A.K. Lomunov [2], M. Neumann [3]).

Древесина является анизотропным ячеистым материалом (L.J. Gibson, M.F. Ashby [4], F. Kollmann [5], P. Niemz [6], J.M. Dinwoodie [7], J. Eberhardsteiner [8]). Для достоверного расчета поведения контейнеров с подобными демпфирующими материалами необходимы данные по их свойствам при ударных воздействиях, в частности динамические диаграммы деформирования. Цель настоящей статьи – анализ публикаций, содержащих результаты экспериментального исследования деформирования древесины, для определения значений параметров и последующей верификации ее математической модели [9] как упругопластического однонаправленно армированного упругопластического материала, реализованной в вычислительной системе «Динамика-3» [10].

1. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных характеристик древесины при статическом и квазистатическом нагружении

В публикациях [11–17] приведены результаты экспериментального исследования деформирования образцов древесины с использованием маятника Шарпи.

В статье I. Loulidi et al. [11] исследуется ударопрочность или ударная вязкость – способность древесины поглощать работу при ударном изгибе, которая выражается энергией, затраченной на разрушение образцов древесины четко определенных размеров. В исследовании проверялась прочность древесины при разрушении на образце с надрезом и без него. Образцы, размеры которых составляли 20×20×340 мм, изготавливались из древесины эвкалипта (*Eucalyptus gomphosephala*). Надрез выполнялся в виде V-образного паза в центральном поперечном сечении глубиной 2 мм с углом 45° и радиусом основания паза 0,25 мм. Нагружение выполнялось перпендикулярно волокнам. Исследовалось деформирование образцов при нагружении в радиальном направлении (RL) и тангенциальном направлении (TL) при уровнях влажности 0, 16, 20, 25 и 30%. Установлено, что древесина эвкалипта наиболее устойчива к разрушению при нагружении в тангенциальном направлении, касательном к кольцам, когда влажность образцов составляет от 10 до 20%. Отмечено, что чрезмерная скорость испарения во время искусственной сушки в духовке может привести к изменению размеров образца древесины и отразиться на результатах эксперимента.

Чтобы лучше понять защитный эффект лесов от камнепадов, в статье D. Bertrand et al. [12] исследуется деформирование образцов небольшого диаметра при ударном нагружении. Высокоскоростной камерой измерено поле перемещения. Выявлено три основных режима соударения: квазистатический, промежуточный и импульсный, которые зависят от механических и геометрических характеристик ударного элемента и исследуемого образца (относительной массы и жесткости). Результаты лабораторных испытаний использованы для верификации конечно-элементной (КЭ) модели ствола бука европейского диаметром до 81 мм, подвергающегося локальной динамической нагрузке. Разработанная КЭ-модель учитывает большие перемещения, многоволоконность и нелинейность древесины, а также несимметричность механической реакции в режимах растяжения и сжатия. Показано хорошее согласие расчета с экспериментальными измерениями. Динамика ствола сильно зависит от характеристик силы удара, таких как максимальное значение и продолжительность. Чтобы воспроизвести общую кинематику ствола, необходимо тщательно учитывать форму изменения приложенной силы во времени. Кроме того, крепление ствола к опоре также оказывает огромное влияние на результаты лабораторного эксперимента – дробление цемента в основании образца изменяет его вращательную жесткость, эволюцию поля смещения и передачу энергии.

Исследование R. Veltrame et al. [13] направлено на оценку ударной вязкости древесины платана, испытанной в условиях равновесия при влажности 12% и ударов в состоянии насыщенной древесины (PSF). Образцы платана 2×2×30 см подвергались ударам с помощью маятника Шарпи и оценивались на сопротивление в тангенциальной и радиальной плоскостях. Были определены удельный вес при влажности 12% и насыщении, содержание влаги, поглощенная работа, коэффициент упругости и динамический эффект. Показано, что древесина платана более устойчива к ударам в состоянии насыщенной древесины (PSF) по сравнению с состоянием при влажности 12%. Согласно результатам исследования [13], древесина платана не рекомендуется для использования в случаях, когда требуется ее способность поглощать и рассеивать энергию.

В статьях I. Olmedo et al. [14–16] был проанализирован в лабораторных экспериментах с использованием маятника Шарпи динамический изгиб свежих стволов при ударном нагружении. Представлены два экспериментальных испытания: динамический изгиб тонкого ствола длиной 1,7 м, расположенного на двух опорах, и ударное сжатие образца длиной 30 см. Образцы изготавливались из европейского бука. Результаты экспериментов позволили определить различные виды воздействия, связанные с возникновением нелинейных процессов при частичном разрыве древесных волокон. Было показано, что на ранних стадиях удара контактная сила и смещение образца в основном связаны с инерционными эффектами. При больших смещениях образца его деформирование становится квазистатическим. На основе результатов был предложен и оценен практический подход к оценке способности деревянных конструкций противостоять ударам горных пород в зависимости от массы падающих камней, от их расчетной скорости, а также от диаметра дерева и механических свойств (модуль упругости и предел прочности). Применимость предложенного простого подхода в полевых условиях основана на том факте, что относительная доля между инерционными эффектами и квазистатической нагрузкой во время удара в полевых условиях остается такой же, как и в лабораторных экспериментах.

Авторами статьи J. Fortin-Smith et al. [17] для оценки прочности деревянных бейсбольных бит методом конечных элементов выполнено испытание образцов древесины на удар по Шарпи при скоростях деформации, сопоставимых с теми, которые испытывает деревянная бита во время ее столкновения с мячом. Цель исследования – определение энергии разрушения и деформации до разрушения как функции плотности и угла наклона волокон (SoG). Испытываемые образцы имели SoG в диапазоне $\pm 3^\circ$, разрешенном для производства бейсбольных бит, используемых игроками высшей лиги (SoG = 0 соответствует направлению волокон древесины, совмещенному с осью биты). Образцы были изготовлены из ясеня и клена, плотность которых находилась в диапазоне 608,9–747,4 кг/м³, и имели размеры 1,27×1,27×12,7 см. Для этого испытания образцы не имели надрезов с целью определения деформации, необходимой для инициирования разрушения цельной древесины, так как бейсбольная бита не используется, если она треснула или надрезана. Для каждого образца были измерены радиальные и тангенциальные SoG. Для определения перемещений образца и предельной деформации до разрушения применялись высокоскоростная видеосъемка и соответствующие методы анализа изображений. Получены зависимости предельной деформации от плотности древесины, необходимые для расчета входных данных в пакете программ LS-DYNA для последующего моделирования методом конечных элементов. Данные проведенных испытаний показывают, что для клена предельная деформация увеличивается с увеличением плотности, но остается практически постоянной во всем диапазоне плотностей, рассматриваемом в этом исследовании для ясеня. Энергия разрушения увеличивается с увеличением плотности древесины кленовых пород, но немного уменьшается для образцов из ясеня. Отмечается, что плотность оказывает большее влияние на свойства древесины при ударном разрушении, чем SoG. Однако как только древесина начинает разрушаться, SoG играет большую роль в направлении распространения трещин в древесине, тем самым определяется, являются ли части, отколовшиеся от биты, достаточно тупыми или копьевидными. Образцы из клена продемонстрировали более низкую энергию разрушения, меньший максимальный прогиб и меньшую деформацию до разрушения по сравнению с образцами из ясеня.

Стандартный тест Шарпи регистрирует высоту, достигаемую ударником после разрушения испытательного образца, необходимую для определения энергии разрушения испытательного образца. Эта энергия – единственный прямой результат теста Шарпи. Для определения скорости деформации применялась высокоскоростная камера Redlake HG100k в сочетании с программным обеспечением камеры Motion Studio, с помощью которой фиксировалось перемещение образца. Кроме того, диапазон скоростей деформации, возникающих во время столкновения, оценивался на основе результатов предварительного анализа методом конечных элементов с использованием пакета программ LS-DYNA. Результаты моделирования методом конечных элементов лабораторных испытаний по Шарпи и соударения биты с мячом хорошо коррелируют с экспериментальными данными.

В статье F. Pierre et al. [18] описывается экспериментальное устройство, предназначенное для определения механического поведения древесины при динамическом нагружении. Эта ударная система состоит из движущейся тележки, оснащенной акселерометром, которая соударяется с неподвижной тележкой, на которой закреплен образец. С помощью высокоскоростной камеры записываются ускорения обеих тележек во время удара для получения кривых напряжения–деформации. Чтобы

проиллюстрировать потенциал предлагаемого устройства, описан ряд тестов на образцах тополя и ели размером $10 \times 10 \times 10$ мм. Получены зависимости напряжений от деформаций при трех различных уровнях влажности (высушенные на воздухе, точка насыщения волокна (FSP) и полностью насыщенные). Выполнен анализ влияния степени сжатия и содержания влаги на деформационные параметры древесины для скорости соударения 1,7 м/с. Для сравнения приводятся экспериментальные данные, полученные при скорости нагружения 1 мм/мин.

В статье A. Reiterer, S.E. Stanzl-Tschegg [19] изучено одноосное сжатие образца ели при одноосной нагрузке при различных ориентациях в продольном и радиальном направлениях. Определены зависимости модуля Юнга, коэффициента Пуассона и прочности на раздавливание от угла нагружения по отношению к продольному направлению. Показано влияние ориентации нагрузки на деформирование и разрушение образца. Обнаружены следующие виды разрушения: а) потеря устойчивости удлиненных ячеек при нагружении в продольном направлении с последующим окончательным разрушением из-за продольных трещин; б) деформации сдвига и разрушение на границах годичного кольца при углах нагрузки 20 и 45° ; в) пластическая деформация с последующим уплотнением для нагружения в радиальном направлении.

В статье M. Oudjene, M. Khelifa [20] приведены результаты экспериментальных исследований квазистатического одноосного сжатия образцов размером $20 \times 10 \times 10$ мм из ели. Образцы были подготовлены с двумя ориентациями относительно волокон: продольной (вырезались вдоль волокон) и радиальной (вырезались поперек волокон). Нагружение выполнялось до фазы уплотнения древесины для радиальной ориентации образца (90°) и до окончательного разрушения при сжатии в продольном направлении (0°). На основе полученных экспериментальных данных были определены: а) упругие характеристики ортотропной модели древесины без различия между радиальной и касательной плоскостями; б) параметры математической модели [20] как для пластичности, так и для уплотнения древесины. В [20] представлены также результаты экспериментального исследования трехточечного поперечного изгиба балки, выполненной из ели. Основная цель этого исследования – проверка выполнения критерия хрупкого разрушения. Показано, что влиянием уплотнения в этой задаче можно пренебречь, поскольку пластическое деформирование древесины в данном случае не является значительным или не происходит.

M. Neumann et al. [21] изложили результаты экспериментального исследования деформирования образцов ели с использованием боковых ограничителей перемещений. Показаны различные механизмы разрушения древесины с осевой нагрузкой в зависимости от их бокового ограничения. Проведены испытания образцов ели при скоростях деформации от статической до 30 с^{-1} для определения: а) прочности на сжатие; б) напряжения и поглощения энергии при общем уровне деформации 50%. Результаты были следующими: увеличение скорости деформации привело к значительному росту прочности на сжатие, напряжения и энергопоглощения при деформации 50%. Ограничение боковой деформации не повлияло на прочность при сжатии, но оказало значительное влияние на напряжение и энергию деформации при уровне деформации 50%. С ограничением поперечной деформации напряжение при уровне деформации 50% увеличилось в 2,2 раза, а поглощенная энергия на 30%. По сравнению со статическими испытаниями повышение скорости деформации до 30 с^{-1} привело к увеличению прочности на сжатие примерно на 30%. Влияние изме-

нения скорости деформации от статической до 30 с^{-1} на удельное поглощение энергии и напряжение при уровне деформации 50% было значительным: напряжения при уровне деформации 50% увеличились на 36%; а поглощенная энергия – на 23%.

В статье J. Garab et al. [22] приведены результаты экспериментов по трехосному сжатию с помощью сервогидравлической испытательной машины с различным боковым давлением на цилиндрических образцах ели и различными углами наклона волокон. Была определена прочность на трехосное сжатие. Полученные результаты показывают, что влияние угла волокон на механическое поведение древесины ели такое же, как и в одноосном случае. Прочность на трехосное сжатие и параметры жесткости уменьшаются с увеличением угла наклона волокон от продольного направления до 45° . Боковое давление в основном влияет на жесткость, особенно для образцов, ориентированных в продольном направлении.

Статья G. Eisenacher et al. [23] посвящена проведенной обширной серии испытаний на раздавливание при большой деформации образцов древесины ели, в которых варьировались ориентация материала, боковые ограничения и скорость нагружения. Образцы древесины имели кубическую форму и длину кромки 100 мм. Целевая деформация образцов составляла 70% (остаточная высота образца 30 мм). Для испытаний на дробление использовалась сервогидравлическая ударная установка, обеспечивающая скорости нагружения до 3000 мм/с и максимальное испытательное усилие 1000 кН. Что касается ориентации материала, уменьшение эффекта размягчения и общего уровня силы наблюдалось при более высоком угле нагрузки волокна. Боковое ограничение смещения вызвало многоосное напряженное состояние в образцах. В результате был получен более высокий уровень силы по сравнению с образцами без бокового ограничения и значительный эффект упрочнения при больших деформациях. Увеличение скорости нагружения привело к более высоким уровням силы при любом значении смещения и ориентации материала.

В статье E. Günaу et al. [24] приведены результаты экспериментальных исследований предела текучести для образцов древесины сосны. Сосна рассматривается как композитный материал с поперечно-изотропными волокнами. Годовые кольца (текстура древесины) образцов древесины принимаются в качестве основных направлений волокон, с которыми совмещены направления тензодатчиков. Проведены три типа тестов: испытания на растяжение, сжатие и кручение. Исследования растяжения и сжатия образцов проводятся на гидравлической универсальной испытательной машине. Максимально допустимая нагрузка принята равной 600 кН. Для приложения крутящих моментов используется машина для испытаний на кручение, максимальный крутящий момент принят равным 199,9 Н·м. Образцы древесины сосны обыкновенной испытывают на ее способность противостоять растяжению, сжатию, скручиванию и сдвигу без разрушения, принимая во внимание направление волокон и годовые кольца. Все тесты разделены на категории в зависимости от ориентации волокон и соответствующих условий нагружения. Тензодатчики устанавливаются на поверхности образцов таким образом, чтобы измерения нагрузки выполнялись в направлениях, параллельных или перпендикулярных направлениям волокон. Для каждого испытания построены графики зависимости нормального напряжения от нормальной деформации или напряжения сдвига от деформации сдвига. На каждом графике предел текучести определяется путем выбора точки на диаграмме, тангенс которой имеет наклон на 5% меньше, чем наклон упругой части диаграммы. Геометрическое место выбранных точек составляет единую кривую предела текучести.

части на главной плоскости σ_1 – σ_2 , которая имеет форму, близкую к эллипсу. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, которые легкодоступны в литературе.

В статье W. Zhong et al. [25] описаны проведенные испытания сжатия образцов еловой древесины в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях с использованием гидравлической машины INSTRON. Получены упругие и пластические характеристики ели. Экспериментальные результаты позволяют продемонстрировать различные режимы разрушения образцов ели. Выпучивание и схлопывание, происходящие во время процесса увеличения пластической деформации, были доминирующим видом разрушения для случая осевого нагружения, что объясняет уменьшение сжимающих напряжений на стадии податливости. С другой стороны, режим разрушения образцов при радиальных и тангенциальных сжимающих нагрузках в основном характеризовался проскальзыванием и расслоением волокон. Анализируется эффективность поглощения энергии образца ели в трех направлениях нагрузки. Модель типичного объемного элемента (RVE) принимается с учетом поперечного изотропного поведения для моделирования микроструктуры древесины во всех направлениях. Было показано, что микрорядежная компоновка приводит к пространственной анизотропии древесного макромеханического свойства. Эффекты пористости и формы отверстий на результатах моделирования оцениваются с помощью моделей RVE с шестиугольными, круглыми, пятиугольными и квадратными отверстиями.

В статье С.В. Деордиева и др. [26] приводятся результаты экспериментальных исследований образцов из древесины сосны на одноосное сжатие в диапазоне скоростей нагрузки от 4 до 1000 мм/мин. Установлены закономерности изменения начального модуля упругости и прочности древесины вдоль волокон, в радиальном и тангенциальном направлениях. Выявлены зависимости модуля упругости и предела прочности древесины от скорости нагрузки. Эксперименты показали, что диаграммы зависимости значений модуля упругости с увеличением скорости нагрузки имеют нелинейный характер с наибольшим градиентом на начальном этапе деформирования. Получены характерные формы разрушения экспериментальных образцов при сжатии вдоль волокон, в радиальном и тангенциальном направлениях. Установлено, что наиболее чувствительными к увеличению скорости нагрузки являются образцы, подверженные сжатию в тангенциальном направлении.

S. T. Akter, T. K. Bader [27] экспериментально исследовали механическое поведение древесины ели путем проверки диапазонов разрушения для комбинаций напряжений в плоскости поперечного сечения. С этой целью была разработана испытательная установка, которая задает нагрузку на образец древесины по указанным траекториям смещения. Поведение материала количественно определялось с точки зрения прочности, упругости и пластичности на образцах, нагруженных по двенадцати различным путям смещения. Показано, что для описания поведения материала и учета положительного влияния сжимающих напряжений на прочность при сдвиге требуется комбинация критериев разрушения. Выявлены различия в поведении материалов в радиальном и тангенциальном направлениях. Модуль упругости в радиальном направлении оказался выше, чем в тангенциальном. Незначительные различия наблюдались даже для двух ориентаций при испытании на сдвиг. Свойства и прочность одноосного материала при растяжении, сжатии и сдвиге хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований. Испытания по двенадцати

путям нагружения с различным соотношением смещений хорошо описывают взаимное влияние растяжения/сжатия и сдвига в пространстве напряжений в поперечной плоскости древесины. Выявлена небольшая переходная зона от хрупкого разрушения при растяжении и сдвиге до пластического разрушения в комбинациях сдвига и сжатия. Отмечается, что результаты испытаний продемонстрировали сложность определения свойств материала, которые зачастую являются скорее свойствами испытательной системы, чем характеристиками материала. Поэтому для разработки математической модели древесины, надлежащим образом представляющей упруго-пластическое макроскопическое поведение материала, целесообразно сочетание экспериментальных исследований с численным моделированием, что дало бы дополнительное понимание пригодности испытательной установки.

В статье Q. Xie et al. [28] исследуется динамическое сжатие вдоль волокон хвойной древесины, которая обычно используется в деревянных конструкциях, при сейсмических воздействиях. Исследовано 108 образцов из ели, даурской лиственницы и сосны, подвергнутых четырем уровням скоростей деформации (10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} и $0,1 \text{ с}^{-1}$) при монотонном и многократном сжатии. В соответствии с методикой испытаний на прочность при сжатии параллельно волокнам древесины (GB 1935 2009) из бревна вырезали образцы древесины размером $20 \times 20 \times 30$ мм с шагом 30 мм в продольном направлении. Испытания на скорость сейсмической деформации проводились на сервогидравлической испытательной машине (MTS322). Кривые нагрузка–смещение записывались системой автоматического сбора данных испытательной машины. Влияние скорости сейсмической деформации на мягкую древесину было исследовано путем наблюдения за механизмами разрушения, инженерными кривыми напряжения–деформации, начальной прочностью на раздавливание, модулем упругости и пиковой деформацией. Сформулированы основные выводы исследования:

- а) при трех различных скоростях деформации соответствующие кривые напряжения–деформации хорошо согласуются с формой квазистатических кривых;
- б) как монотонное, так и повторное испытание на сжатие при различных скоростях сейсмической деформации показывают хорошую повторяемость;
- в) при повторных испытаниях на сжатие модуль разгрузки мягкой древесины обычно не соответствует величине модуля упругости при повторной нагрузке, причем модуль разгрузки был больше, чем при повторной нагрузке, и, как правило, изменялся в зависимости от деформации точки разгрузки.

На основе полученных результатов в [28] предложена математическая модель мягкой древесины, учитывающая монотонную и повторяющуюся сжимающую нагрузку в направлении, параллельном волокнам, при скоростях сейсмической деформации.

Авторы W.L. Fu, H.Y. Guan, S. Kei [29] выполнили экспериментальное и численное исследование влияния широкого диапазона содержания влаги и направления волокон на предел текучести при сжатии, модуль упругости и модуль сдвига древесины бука. Испытания проводились с использованием универсальной механической испытательной машины типа AG-X. Согласно полученным результатам, константы упругости древесины бука по-разному реагировали на содержание влаги при нагружении в продольном и поперечном направлениях. Направление волокон оказало большее влияние на упругие свойства, чем содержание влаги.

В статье K. Radmanović et al. [30] выполнен анализ механических свойств образцов древесины бука, подвергнутых действию сжимающей силы в продольном

направлении в диапазоне скоростей нагружения от 10 до 500 мм/мин. С использованием экспериментальных данных построены диаграммы напряжения–деформации. Определены характеристики древесины бука: напряжение и деформация на пределе упругости, максимальное напряжение, модуль упругости; касательный модуль, удельная энергия упругой деформации и удельная энергия пластической деформации. Результаты показали, что при увеличении скорости нагружения упругие характеристики древесины бука повышаются. Для пластических свойств бука не выявлена четкая тенденции изменения с увеличением скорости нагружения.

Статья А.П. Большакова и др. [31] посвящена экспериментальному исследованию деформационно-прочностных свойств древесины секвойи, осины, сосны и березы при различных углах ориентации волокон относительно нагрузки. Цилиндрические образцы, вырезанные под углами, величина которых варьировалась от 0 до 90° относительно направления волокон, испытывались на одноосное сжатие при температурах от –30 до 65 °С. Динамические испытания проводились на ударном стенде копрового типа и по методу Кольского на установке с составным стержнем Гопкинсона. Скорость нагружения образцов в этом случае равнялась примерно 10 м/с. Для сравнения проводились испытания образцов при нагружении со скоростью 10⁻⁴ м/с. Получены диаграммы напряжение–деформация, на основе которых показано: а) значения практически постоянных напряжений деформирования при поперечном сжатии для испытанных образцов древесины на порядок меньше разрушающих напряжений при продольном сжатии; б) анизотропия структуры древесины приводит к анизотропии прочностных свойств при квазистатическом и динамическом сжатии; в) при сжатии в радиальном и тангенциальном направлениях наблюдается типичная картина упругопластического деформирования с последующей жесткой разгрузкой. Сделана оценка влияния влажности, скорости нагружения и температуры на прочность исследуемых образцов древесины.

2. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных характеристик древесины при высокоскоростном нагружении

М. Renaud et al. [32, 33] исследовали с использованием отдельной системы стержней под давлением Гопкинсона деформирование трех видов древесины (береза, дуб, осина), пропитанных различными набухающими жидкостями, сжатых с высокой степенью деформации. Изучены вариации модулей упругости, предела пропорциональности и максимального напряжения в зависимости от степени влажности [32]. Обнаружено, что насыщенные образцы могут быть такими же жесткими, как и сухие. Этот результат был объяснен поведением жидкости, присутствующей в полостях древесины, то есть просветах ячеек, которое должно отличаться от наблюдаемого при низких скоростях деформации. При больших скоростях деформации эта жидкость не может вытекать из пор и должна вести себя как твердое тело, поэтому структура материала усиливается и, как следствие, смягчающий эффект пропитывающей жидкости может не проявляться. Чтобы определить влияние скорости деформации, образцы из одного и того же вида древесины были подвергнуты испытаниям на сжатие при низких скоростях деформации [33]. Замечено, что при низких скоростях деформации насыщенные образцы всегда были менее жесткими, чем сухие, что согласуется с литературными данными, но отличается от поведения при высоких скоростях деформации. Показано, что образцы могут выдерживать более высокие

напряжения при высоких скоростях деформации. После испытаний образцы не всегда были заметно повреждены, но некоторые типичные отказы были обнаружены с помощью микроскопии. Поврежденные зоны выглядели одинаково независимо от степени деформации.

В статье S.R. Reid, C. Peng [34] представлены экспериментальные результаты из серии испытаний на одноосное динамическое раздавливание цилиндрических образцов из пяти пород древесины (бальза, сосна, красное дерево, дуб, *ekki*), испытанных до скоростей удара приблизительно 300 м/с. Проведен анализ макродеформации и микродеформации, возникающих в результате квазистатического и динамического одноосного сжатия. Измерения импульсов силы показывают, что в условиях динамического нагружения происходит значительное повышение начальной прочности образцов на раздавливание. Механизмы деформации древесины локализуются при квазистатическом сжатии, а в условиях динамического нагружения они становятся еще более локализованными и распространяются по материалу в виде фронтов волн дробления, которые имеют некоторые характеристики ударных волн. Предлагается простая модель удара, основанная на не зависящей от скорости, жесткой, идеально пластической формулировке зависимости напряжения–деформации для древесины. Эта модель особенно успешна в прогнозировании динамического повышения прочности на раздавливание образцов, нагруженных поперек волокон, что подтверждается сравнением экспериментальных данных и теоретических результатов. Менее удачными получились результаты эксперимента на сжатие вдоль волокон. В [34] обсуждается источник этого несоответствия.

В статьях M. Vural, G. Ravichandran [35, 36] представлены результаты экспериментального исследования характеристик сжатия древесины бальзы при статическом и динамическом нагружении. Образцы с различной плотностью от 55 до 380 кг/м³ нагружают в направлении волокон с помощью винтовой системы испытания материалов при скорости деформации 10^{-3} с⁻¹ и сжатием вдоль направления волокон при номинальной скорости деформации $3 \cdot 10^3$ с⁻¹ с использованием модифицированного стержня Кольского (разрезного стержня Гопкинсона). Результаты показывают, что прочность на сжатие бальзового дерева увеличивается с увеличением плотности. Для определения видов разрушения используется послетестовая сканирующая электронная микроскопия. Разрушение образцов с низкой плотностью определяется упругим и/или пластическим изгибом, в то время как образование полос изгиба и схлопывание торцевых крышек преобладают в образцах из бальзы с более высокой плотностью. Результаты показывают, что хотя начальное напряжение разрушения очень чувствительно к скорости нагружения, напряжение плато (раздавливания) не зависит от скорости деформации. Как и в случае квазистатического нагружения, потеря устойчивости и образование полосы перегиба были определены как два основных вида отказа при динамическом нагружении. Однако наблюдалось, что степень повышения динамической прочности различается для этих двух различных режимов.

В статье J.J. Harrigan et al. [37] приведены результаты экспериментального измерения нагрузок на проксимальном (ближайший к месту прикрепления) и дистальном (удаленный от точки прикрепления) концах при динамическом дроблении дуба вдоль волокон в диапазоне скоростей 20–260 м/с. Увеличение напряжения примерно в 2 раза наблюдается в нагрузках на дистальном конце для скоростей удара от 34 до 225 м/с. Дальнейшее увеличение напряжения, измеряемого на прокси-

мальном конце, является результатом эффектов инерции, связанных с динамической локализацией раздавливания.

E. Palamidi, J.J. Harrigan [38] представили экспериментальное исследование механических свойств древесины бальзы. Цилиндрические образцы древесины бальзы были сжаты квазистатически и динамически по трем основным осям. Для определения влияния скорости деформации материала были проведены испытания методом Гопкинсона (SHPB). Бальзовая древесина – это материал с относительно низкой прочностью (около 1,5 МПа в самом слабом направлении) в зависимости от плотности. Испытания при высоких скоростях деформации привели к увеличению как начальных напряжений раздавливания, так и напряжений плато.

В статье V.L. Tagarielli et al. [39] рассмотрено одноосное сжатие образцов древесины бальзы в широком диапазоне скоростей деформации от 10^{-4} до 4000 с^{-1} . Испытания при номинальной скорости деформации 10^{-4} с^{-1} были выполнены на испытательной машине с винтовым приводом. В этих испытаниях использовались прямоугольные образцы сечением 30×30 мм и толщиной 5–16 мм. Для достижения скорости деформации $0,01$ – 250 с^{-1} были проведены испытания на одноосное сжатие на сервогидравлической испытательной машине при скоростях сжатия до 1,5 м/с. Чтобы предотвратить повреждение машины при ударе о загрузочные плиты, испытания были остановлены при номинальной деформации сжатия около 70%. Этот уровень деформации был достаточен для фиксации начальной упругой фазы и режима плато. Испытания на сжатие с высокой скоростью деформации проводились методом Гопкинсона (SHPB). Показано, что экспериментальные данные для прочности при одноосном сжатии образцов древесины бальзы как функции скорости деформации хорошо аппроксимируются степенной зависимостью. Предел текучести при одноосном сжатии бальзы удваивается, когда скорость деформации увеличивается с 10^{-4} до 1000 с^{-1} .

W. Zhong, S. Song, X.Huang et al. [40] выполнили эксперименты по квазистатическому и динамическому сжатию древесины ели в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях нагружения с помощью оборудования INSTRON и Hopkinson. Динамические испытания проводились для трех скоростей деформации. Результаты экспериментов показывают, что режимами разрушения образцов ели при осевом сжатии являются коробление волокон и сморщивание. Когда направление нагружения радиальное или тангенциальное поперек волокон, режимом разрушения является проскальзывание и расслоение древесного волокна. Модуль упругости при осевом сжатии примерно в 21 раз больше, чем модуль упругости в радиальном направлении, и примерно в 32 раза выше модуля упругости в тангенциальном направлении. Предел текучести при осевом квазистатическом сжатии примерно в девять раз превышает предел текучести при радиальном и тангенциальном сжатии. Пределы текучести при радиальном и тангенциальном квазистатическом сжатии практически равны. Предел текучести древесины ели при динамическом сжатии чувствителен к скорости деформации. Пределы текучести при осевом, радиальном и тангенциальном динамическом сжатии значительно увеличиваются при скорости деформации от 500 до 1000 с^{-1} .

В статьях J. Wouts et al. [41–43] были исследованы механизмы разрушения, реакции напряжения и деформации и способность поглощения энергии двух пород древесины (ели и бука) в трех направлениях (продольном, радиальном и тангенциальном) в широком диапазоне скоростей деформации от 0,001 до 600 с^{-1} . Для проведения

испытаний использовались несколько аппаратов: машина с винтовым приводом (Sintec20D) для низких скоростей деформации ($0,001 \text{ с}^{-1}$), испытательная машина Instron VHS65/20 для промежуточных скоростей деформации ($0,39, 2,45, 15,3 \text{ с}^{-1}$) и устройство Split Hopkinson Pressure Bars (SHPB) для высокой скорости деформации (600 с^{-1}). Кроме того, аналитические описания влияния скорости деформации на начальную прочность на раздавливание и значение напряжения плато были протестированы для нагрузки в продольном направлении, они хорошо согласуются с экспериментальными результатами. По экспериментальным наблюдениям и анализу сделаны следующие выводы:

- напряжение раздавливания и напряжение плато в целом имеют тенденцию к увеличению с увеличением скорости деформации в продольном направлении для обеих изученных пород древесины;

- увеличение как напряжения раздавливания, так и напряжения плато более значительно для скорости деформации свыше 15 с^{-1} в продольном направлении для обеих пород древесины;

- для ели напряжение раздавливания и напряжение плато в поперечном направлении возрастают с увеличением скорости деформации. Для бука только напряжение раздавливания следует той же тенденции к увеличению, в то время как для напряжения плато четкой зависимости нет;

- скорость деформации оказывает большое влияние на механизмы разрушения в продольном направлении для обоих видов, в то время как механизмы разрушения в поперечных направлениях не затрагиваются;

- при высокой скорости деформации 600 с^{-1} образцы разрушаются более резко в продольном направлении;

- за пределами уровня скорости деформации 600 с^{-1} напряжение плато в продольном направлении трудно исследовать из-за преждевременного хрупкого разрушения образцов, поэтому удельную поглощенную энергию сложно выразить количественно;

- при ударной нагрузке ель обладает большей способностью рассеивать энергию на единицу массы, чем бук.

В [42] изучается влияние бокового жесткого удержания на деформирование образцов древесины. Эксперименты проводились в квазистатическом, промежуточном и динамическом режимах с жесткими ограничивающими устройствами для оценки влияния скорости деформации в сочетании с боковым ограничением на сжимающие свойства древесины в трех направлениях материала. Скорости деформации варьировались от $0,001$ до 600 с^{-1} . Для сравнения рассматривалось одноосное сжатие образцов древесины без бокового ограничения. Кроме того, сравниваются и обсуждаются основные параметры, влияющие на зависимость напряжения от деформации при сжатии, а также режимы разрушения. В статье [43] представлена расчетно-экспериментальная методика, сочетающая анализ методом конечных элементов и оригинальную экспериментальную проверку влияния скорости деформации и боковых ограничений на свойства древесины. С учетом результатов конечно-элементных расчетов особое внимание уделено массе, материалу и геометрии для минимизирования влияния ограничивающего устройства на распространение упругих волн и, следовательно, на реакцию материала испытываемых образцов. Численно предсказанные решения подтверждаются экспериментально.

В статье S. Pang et al. [44] были проведены испытания образцов древесины бука на динамическое сжатие в диапазоне скоростей деформации $800\text{--}2000 \text{ с}^{-1}$, а также

квазистатические испытания на сжатие для получения статических механических свойств древесины. Влияние направления волокон на механические свойства было проанализировано с учетом двух направлений нагрузки: одно перпендикулярно направлению волокон бука (RD), а другое – параллельно направлению волокон (LD). Экспериментальные результаты показывают не только то, что скорость деформации оказывает существенное влияние на механическое поведение древесины бука в обоих направлениях LD и RD, но также и то, что механические свойства образцов вдоль LD значительно отличаются от таковых вдоль RD. Модуль упругости, предел текучести и предельное напряжение образцов в направлении LD выше, чем в направлении RD. Это можно объяснить их разными режимами разрушения, основанными на макроскопических и микроскопических структурах деформации. Показано, что древесина бука, как природный защитный материал, обладает особыми динамическими механическими свойствами с точки зрения поперечной изотропии и способна поглощать энергию при высоких скоростях деформации.

S.C. Zhou, C. Demartino, Y. Xiao исследовали сжатие и поглощение энергии пихты Дугласа и глумама при ударных и взрывных нагрузках [45]. Были выполнены квазистатические испытания с использованием универсальной испытательной машины и динамические испытания с использованием SHPB. Всего было испытано 90 образцов пихты Дугласа и двух типов глумама для оценки квазистатических и динамических характеристик сжатия, охватывающих широкий диапазон скоростей деформации. Были исследованы два направления нагружения: вдоль волокна (продольное) и поперек волокна (поперечное). Кривые деформации сжатия были аналитически описаны с помощью двух одноосных феноменологических моделей, взятых из литературы. С использованием подобранных параметров феноменологических моделей дано оригинальное определение динамического фактора роста (DIF). Исследованы характеристики поглощения энергии. Результаты этого исследования показывают, что пихта Дугласа и глумама чувствительны к скорости деформации, и эта чувствительность сильно зависит от направления нагрузки.

F. Šebek et al. [46] провели с использованием SHPB испытание древесины бука европейского по основным направлениям нагружения. Испытания были повторены в расчетах, чтобы получить материальные константы математической модели материала, которые охватывают анизотропию упругости, пластичности, а также поведение разрушения. Более того, разрушение считалось несимметричным по отношению к растяжению и сжатию. Инициирование и распространение трещины было реализовано с помощью техники удаления элементов в коде LS-DYNA. Получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

E. Zulkifli, P. Kusumaningrum, D.P. Rahmi [47] исследовали сжатие древесины ели и тика с высокой скоростью деформации в диапазоне от 590 до 3300 с⁻¹. Испытания были проведены с использованием SHPB по трем основным осям относительно направления волокон и годовичных колец. Проведено численное моделирование исследуемых процессов с применением метода конечных элементов. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 10%. Показано влияние скорости деформации на прочность древесины ели и тика, которое в этом случае описывается степенной функцией. Это означает, что чем выше скорость деформации, тем прочнее материал.

В статьях А.М. Брагова и др. [48–53], А.Ю. Константинова и др. [54], А.К. Ломунова и др. [55] опубликованы результаты исследований свойств древесины с

применением установки с разрезным стержнем Гопкинсона по методу Кольского, выполненных в последние 4 года. В них можно найти ссылки на более ранние работы этих авторов.

В [48] приведены результаты испытаний на динамическое сжатие образцов березы поперек волокон при скоростях деформации $\sim 2000 \text{ с}^{-1}$ при нормальной температуре. Получены динамические диаграммы деформирования для одноосного напряженного и одноосно-деформированного состояний, а также для некоторого промежуточного состояния (деформации в массиве березовых плит). Сравнение диаграмм деформирования для разных типов напряженно-деформированного состояния показывает существенное влияние типа напряженно-деформированного состояния на поведение исследуемого материала.

В статьях [49, 50] изложены результаты испытаний осины на динамическое сжатие при повышенной температуре до $+60 \text{ }^\circ\text{C}$. Для исследования анизотропии свойств были изготовлены и испытаны образцы осины путем разрезания вдоль и поперек направления волокон. Были получены динамические кривые деформации и напряжения, а также средние значения модулей активных участков нагружения. Наибольшая крутизна ветвей нагружения и наибольшие разрушающие напряжения наблюдались для образцов, нагруженных вдоль направления волокна, а наименьшие значения – при нагрузке поперек направления волокна. Выполнена оценка влияния повышенных температур на прочностные и деформационные свойства осины.

В [51] представлены результаты динамических испытаний на сжатие поперек волокон при комнатной температуре образцов березы воздушной влажности. Для оценки влияния вида напряженно-деформированного состояния на поведение материала сравниваются результаты исследования образцов в форме таблеток (одноосное напряженное состояние), образцов в жесткой обойме (одноосная деформация) и испытания прямоугольных фрагментов доски. Для этих трех типов напряженно-деформированного состояния получены динамические диаграммы деформирования с регистрацией дополнительных циклов нагружения. Сравнение диаграмм деформирования показывает существенное влияние вида напряженно-деформированного состояния на поведение исследуемого материала.

В [52] представлены результаты динамических испытаний древесины липы и сосны методом Кольского при испытаниях на сжатие, который был модифицирован для испытания образца в жестком ограничивающем держателе. По результатам экспериментов были построены динамические диаграммы деформирования для одноосного напряженного и для одноосного деформированного состояний. Определены предельные прочностные и деформационные характеристики. Получена энергия разрушения в зависимости от типа испытания. Определены скорости деформации и скорости роста напряжений. Отмечено влияние угла резки образцов относительно волокон.

В статье [53] приведены результаты испытаний на березе и осине при температурах -40 , $+20$ и $+60 \text{ }^\circ\text{C}$. Углы между направлением приложения нагрузки и направлением расположения волокон образцов варьировались от 0 до 90° . Получены динамические диаграммы растяжения. Наибольшая крутизна ветвей нагрузки и наибольшие разрушающие напряжения наблюдались для образцов с углом резания, равным нулю, а наименьшие значения этих параметров – при угле резания 90° . Снижение температуры испытания приводит к увеличению предельных напряжений. При температуре $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается тенденция к снижению диаграмм деформи-

рования по сравнению с диаграммами, полученными при комнатной температуре.

В [54] изучено поведение древесины сосны, березы и секвойи в условиях одноосного напряженного состояния в режиме многоциклового нагружения образца. Получены кривые растяжения сосны и березы при нагрузке образцов вдоль и поперек волокон. Определены прочностные и деформационные характеристики исследуемых пород древесины. Показано, что береза демонстрирует большее поглощение энергии, чем сосна, как вдоль, так и поперек волокон. Проведен анализ влияния напряженного состояния на прочностные и деформационные свойства для секвойи. Выполнена оценка неравномерности радиального расширения образцов с разными направлениями относительно ориентации волокон древесины. Обнаружено, что ограничение перемещений сильно влияет на деформационное поведение секвойи, подавляя растрескивание вдоль волокон.

В [55] представлены результаты динамических испытаний при сжатии древесины липы и сосны при многоциклового нагружении образца в процессе одного испытания вдоль и поперек волокон. Получены динамические диаграммы деформирования, определены предельные прочностные и деформационные характеристики, зависимость энергии разрушения липы и сосны от угла вырезки образцов и скорости деформации. Отмечается сильная анизотропия свойств испытанных материалов. При сохранении целостности образца модуль нагрузочной ветви нелинеен и, как правило, меньше модуля разгрузочной ветви. Характер деформирования и разрушения образцов сильно зависит от угла вырезки. При углах вырезки 90° по отношению к направлению волокон диаграмма деформирования после достижения некоторого порогового значения близка к идеально-пластической диаграмме. При нагружении вдоль волокон на начальном участке диаграммы деформирования близко к линейно-упругому, а при разрушении образцов после достижения предельного значения становится нелинейным. Энергопоглощение образцов, вырезанных вдоль волокон, значительно превышает энергопоглощение образцов, вырезанных поперек волокон.

Заключение

В рассмотренных публикациях приведены результаты экспериментальных исследований деформирования и разрушения образцов различных пород древесины при квазистатических и динамических нагружениях. Выполнен анализ влияния ориентации вырезки образцов относительно волокон древесины, скорости нагружения, влажности, температуры и других факторов на процесс ее деформирования, энергопоглощение и демпфирующие свойства. Результаты проведенного анализа могут быть использованы для оснащения необходимыми деформационными и прочностными параметрами вычислительной модели древесины [9] как однонаправленно армированного упругопластического материала, верификации этой вычислительной модели и численного решения исследовательских и прикладных задач.

Список литературы

1. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1986. Vol. 4. No 3. P. 161–174.
2. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *Journal de Physique IV*. 1997. Vol. 7. P. 487–492.
3. Neumann M. Investigation of the behavior of shock-absorbing structural parts of transport casks holding radioactive substances in terms of design testing and risk analysis. *PhD thesis*. Germany, Wuppertal: Bergische Universität, 2009. 208 p.

4. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 510 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>.
5. Kollmann F. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin: Springer, 1982. 1200 s.
6. Niemz P. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Stuttgart: DRW Verlag, 1993. 243 s.
7. Dinwoodie J.M. *Timber: its Nature and Behaviour*. London: CRC Press, 2000. 272 p. <https://doi.org/10.4324/9780203477878>.
8. Eberhardsteiner J. *Mechanisches Verhalten von Fichtenholz, Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften*. Wien: Springer, 2002. 176 s.
9. Беженцева М.В., Вуцин Л.И., Кибец А.И., Крушка Л. Конечно-элементная методика численного моделирования упругопластического деформирования древесины при ударном нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №4. С. 428–441. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-4-428-441.
10. Вычислительный комплекс «Динамика-3». Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 325 от 18.04.2013.
11. Loulidi I., Chergui M.H., Elghorba M., Famiri A. Impact energy on notched and unnotched specimens of wooden eucalyptus gomphocephala under variations of moisture. *Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur*. 2012. No 36. P. 9–14.
12. Bertrand D., Bourrier F., Olmedo I., Brun M., Berger F., Limam A. Experimental and numerical dynamic analysis of a live tree stem impacted by a Charpy pendulum. *International Journal of Solids and Structures*. 2013. Vol. 50. Iss. 10. P. 1689–1698. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.01.037.
13. Beltrame R., Mattos B.D., Gatto D.A., Lazarotto M., Haselein C.R. Impact resistance of *Platanus x acerifolia* wood. *Revista Árvore*. 2013. Vol. 37. No 4. P. 771–778. DOI: 10.1590/S0100-67622013000400020.
14. Olmedo I., Bourrier F., Bertrand D., Berger F., Limam A. Felled trees as a rockfall protection system, experimental study for numerical models calibration. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 566. P. 449–454. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.566.449.
15. Olmedo I., Bourrier F., Bertrand D., Toe D., Berger F., Limam A. Experimental analysis of the response of fresh wood stems subjected to localized impact loading. *Wood Science and Technology*. 2015. Vol. 49. Iss. 3. P. 623–646. DOI: 10.1007/s00226-015-0713-0.
16. Olmedo I., Bourrier F., Bertrand D., Berger F., Limam A. Felled trees as a rockfall protection system: experimental and numerical studies. *Engineering Geology for Society and Territory*. 2015. Vol. 2. P. 1889–1893. DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3_335.
17. Fortin-Smith J., Sherwood J., Drane P., Kretschmann D. Characterization of maple and ash material properties for the finite element modeling of wood baseball bats. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8. Iss. 11. P. 2256-1–2256-16. DOI: 10.3390/APP8112256.
18. Pierre F., Almeida G., Huber F., Jacquin P., Perre P. An original impact device for biomass characterisation: results obtained for spruce and poplar at different moisture contents. *Wood Science and Technology*. 2012. Vol. 47. Iss. 3. P. 537–555. DOI: 10.1007/s00226-012-0512-9.
19. Reiterer A., Stanzl-Tschegg S.E. Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain. *Mechanics of Materials*. 2001. Vol. 33. Iss. 12. P. 705–715. DOI: 10.1016/S0167-6636(01)00086-2.
20. Oudjene M., Khelifa M. Finite element modelling of wooden structures at large deformations and brittle failure prediction. *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. Iss. 10. P. 4081–4087. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.05.024.
21. Neumann M., Herter J., Droste B.O., Hartwig S. Compressive behaviour of axially loaded spruce wood under large deformations at different strain rates. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2011. Vol. 69. Iss. 3. P. 345–357. DOI: 10.1007/s00107-010-0442-x.
22. Garab J., Reihnsner R., Eberhardsteiner J. Mechanical behaviour of spruce under triaxial compression. *Wood Research*. 2012. Vol. 57. No 1. P. 57–68.
23. Eisenacher G., Scheidemann R., Neumann M., Droste B., Völzke H. Dynamic crushing characteristics of spruce wood under large deformations. *Wood Science and Technology*. 2013. Vol. 47. Iss. 2. P. 369–380. DOI: 10.1007/s00226-012-0508-5.
24. Günay E., Aygun C., Kaya S. T. Experimental determination of the yield stress curve of the

- scotch pine wood materials. *AIP Conference Proceedings*. 24–28 April 2013. Antalya, Turkey. 2013. Vol. 1569. Iss. 1. P. 65–72. DOI: 10.1063/1.4849230.
25. Zhong W., Rusinek A., Jankowiak T., Huang X., Abed F. Experimental and numerical investigation on compression orthotropic properties of spruce wood in axial and transverse loading directions. *Engineering Transactions*. 2015. Vol. 62. No 4. P. 381–401.
26. Деордиев С.В., Копаница Д.Г., Тутатчиков Р.С., Краснев М.А. Влияние скорости одноосного сжатия на сопротивление «чистых» образцов древесины сосны. *Строительство и реконструкция*. 2017. №1(69). С. 11–18.
27. Akter S.T., Bader T.K. Experimental assessment of failure criteria for the interaction of normal stress perpendicular to the grain with rolling shear stress in Norway spruce clear wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2020. Vol. 78. Iss. 6. P. 1105–1123. DOI: 10.1007/s00107-020-01587-w.
28. Xie Q., Zhang L., Zhang B., Yang G., Yao J. Dynamic parallel-to-grain compressive properties of three softwoods under seismic strain rates: tests and constitutive modeling. *Holzforschung*. 2020. Vol. 74. Iss. 10. P. 927–937. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0229>.
29. Fu W.L., Guan H.Y., Kei S. Effects of moisture content and grain direction on the elastic properties of beech wood based on experiment and finite element method. *Forests*. 2021. Vol. 12. Iss. 5. P. 610-1–610-17. DOI: 10.3390/F12050610.
30. Radmanović K., Roginić R., Lučić R. B., Jovanović J., Jug M., Sedlar T., Šafran B. Effect of a high loading rate on the compressive properties of beech wood in the longitudinal direction. *BioResources*. 2021. Vol. 16. No 2. P. 4093–4105. DOI: 10.15376/biores.16.2.4093-4105.
31. 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.
32. Renaud M., Rueff M., Rocaboy A.C. Mechanical behaviour of saturated wood under compression. Part 1. Behaviour of wood at high rates of strain. *Wood Science and Technology*. 1996. Vol. 30. Iss. 3. P. 153–164.
33. Renaud M., Rueff M., Rocaboy A.C. Mechanical behaviour of saturated wood under compression. Part 2. Behaviour of wood at low rates of strain some effects of compression on wood structure. *Wood Science and Technology*. 1996. Vol. 30. Iss. 4. P. 237–243.
34. Reid S.R., Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *International Journal of Impact Engineering*. 1997. Vol. 19. Iss. 5-6. P. 531–570. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00016-X.
35. Vural M., Ravichandran G. Microstructural aspects and modeling of failure in naturally occurring porous composites. *Mechanics of Materials*. 2003. Vol. 35. Iss. 3-6. P. 523–536. DOI: 10.1016/S0167-6636(02)00268-5.
36. Vural M., Ravichandran G. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2003. Vol. 40. Iss. 9. P. 2147–2170. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00057-X.
37. 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. Iss. 4-5. P. 521–544. DOI: 10.1016/J.IJMECSCI.2004.12.013.
38. Palamidi E., Harrigan J.J. An investigation of balsa wood over a range of strain-rates and impact velocities. *Journal de Physique IV France (proceedings)*. 2006. Vol. 134. P. 225–230. DOI: 10.1051/jp4:2006134034.
39. Tagarielli V.L., Deshpande V.S., Fleck N.A. The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood. *Composites Part B: Engineering*. 2008. Vol. 39. Iss. 1. P. 83–91. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.02.005.
40. Zhong W., Song S., Huang X., Hao Z., Chen G. Research on static and dynamic mechanical properties of spruce wood by three loading directions. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2011. Vol. 43. No 6. P. 1141–1150. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-6-lxxb2010-450.
41. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.058>.
42. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Morvan H., Coutellier D. Strain rate effects on the

compressive response of wood and energy absorption capabilities-Part B: Experimental investigation under rigid lateral confinement. *Composite Structures*. 2018. Vol. 204. P. 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.001>.

43. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Naceur H., Coutellier D. Confinement device to assess dynamic crushability of wood material. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018. Vol. 232. Iss. 8. P. 1418–1432. DOI: 10.1177/0954406217719306.

44. Pang S., Liang Y., Tao W., Liu Y., Huan S., Qin H. Effect of the strain rate and fiber direction on the dynamic mechanical properties of beech wood. *Forests*. 2019. Vol. 10. Iss. 10. P. 881–1–881-14. DOI: 10.3390/f10100881.

45. Zhou S.C., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of Douglas fir and glubam. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 258. P. 119466–1–119466-16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119466.

46. Sebek F., Kubik P., Brabec M., Tippner J. Modelling of impact behaviour of European beech subjected to split Hopkinson pressure bar test. *Composite Structures*. 2020. Vol. 245. Iss. 3–4. Article No 112330. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112330.

47. Zulkifli E., Kusumaningrum P., Rahmi D.P. Experimental study and numerical model of spruce and teak wood strength properties under compressive high strain rate loading. *Journal of Engineering & Technological Sciences*. 2021. Vol. 53. Iss. 1. P. 44–57. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.1.3>.

48. Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Dynamic compressibility of birch under various types of stress-strain state. In: *Multiscale Solid Mechanics*. Springer Cham, 2021. P. 69–80. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_7.

49. Bragov A.M., Iuzhina T.N., Lomunov A.K., Igumnov L.A., Belov A.A., Eremeyev V.A. Investigation of wood properties at elevated temperature. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2021. Vol. 8. No 1. P. 298–305. DOI: 10.22055/JACM.2021.38486.3239.

50. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Южина Т.Н. Влияние повышенной температуры на динамические свойства осины. *Проблемы прочности и пластичности*. 2021. Т. 83. №1. С. 5–21. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-1-5-21.

51. Брагов А.М., Ломунов А.К., Южина Т.Н. Влияние вида напряженно-деформированного состояния на динамическую сжимаемость березы. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №3. С. 269–282. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-3-269-282.

52. Bragov A., Igumnov L., Dell'isola F., Konstantinov A., Lomunov A., Iuzhina T. Dynamic testing of lime-tree (*Tilia europaea*) and pine (*Pinaceae*) for wood model identification. *Materials*. 2020. Vol. 13. No 22. P. 5261–1–5261-12. DOI: 10.3390/ma13225261.

53. Bragov A., Gonov M., Konstantinov A., Lomunov A., Yuzhina T. Deformation and destruction at deformation rate of order 10^3 s^{-1} in wood of hardwood trees. In: *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics*. Springer Cham, 2020. P. 443–451. DOI: 10.1007/978-3-030-50460-1_26.

54. Konstantinov A.Y., 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. 555–566. DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-555-565.

55. Ломунов А.К., Южина Т.Н., Крушка Л., Чен В.В. Деформирование и разрушение липы и сосны при интенсивных динамических воздействиях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №1. P. 43–51. DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-1-43-51.

References

1. Johnson W. Historical and present-day references concerning impact on wood. *Int. J. Impact Eng.* 1986. Vol. 4. No 3. P. 161–174.

2. Bragov A.M., Lomunov A.K. Dynamic properties of some wood species. *J. Phys. IV France*. 1997. Vol. 7. P. 487–492.

3. Neumann M. Investigation of the behavior of shock-absorbing structural parts of transport casks holding radioactive substances in terms of design testing and risk analysis. *PhD thesis*. Germany. Wuppertal. Bergische Universität. 2009. 208 p.

4. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular Solids*. Cambridge. Cambridge University Press. 1997. 510 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>.
5. Kollmann F. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin. Springer. 1982. 1200 s.
6. Niemz P. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Stuttgart. DRW Verlag. 1993. 243 s.
7. Dinwoodie J.M. *Timber: its Nature and Behaviour*. London. CRC Press. 2000. 272 p. <https://doi.org/10.4324/9780203477878>.
8. Eberhardsteiner J. *Mechanisches Verhalten von Fichtenholz, Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften*. Wien. Springer. 2002. 176 s.
9. Bezhentseva M.V., Vutsin L.I., Kibets A.I., Kruszka L. Konechno-elementnaya metodika chislenogo modelirovaniya uprugoplasticheskogo deformirovaniya drevesiny pri udarnom nagruzenii [Finite element method for numerical modeling of elastic-plastic deformation of wood under shock loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 4. P. 428–441 (In Russian).
10. *Vychislitelnyy kompleks "Dinamika-3" [Computing Complex "Dynamics-3"]*. Nauchno-tehnicheskiiy tseñtr po yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti. Attestatsionnyy pasport programmnoy sredstva. Registratsionnyy pasport attestatsii PS No 325 ot 18.04.2013 [Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety. Certification passport software. Registrationpassport of certification PS No 325 dated 04.18.2013] (In Russian).
11. Loulidi I., Chergui M.H., Elghorba M., Famiri A. Impact energy on notched and unnotched specimens of wooden eucalyptus gomphocephala under variations of moisture. *Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur*. 2012. No 36. P. 9–14.
12. Bertrand D., Bourrier F., Olmedo I., Brun M., Berger F., Limam A. Experimental and numerical dynamic analysis of a live tree stem impacted by a Charpy pendulum. *Int. J. Solids Structs*. 2013. Vol. 50. Iss. 10. P. 1689–1698. DOI: 10.1016/j.ijstr.2013.01.037.
13. Beltrame R., Mattos B.D., Gatto D.A., Lazarotto M., Haselein C.R. Impact resistance of *Platanus x acerifolia* wood. *Revista Árvore*. 2013. Vol. 37. No 4. P. 771–778. DOI: 10.1590/S0100-67622013000400020.
14. Olmedo I., Bourrier F., Bertrand D., Berger F., Limam A. Felled trees as a rockfall protection system, experimental study for numerical models calibration. *App. Mech. Mater.* 2014. Vol. 566. P. 449–455.
15. Olmedo I., Bourrier F., Bertrand D., Toe D., Berger F., Limam A. Experimental analysis of the response of fresh wood stems subjected to localized impact loading. *Wood Sci. Technol.* 2015. Vol. 49. Iss. 3. P. 623–646. DOI: 10.1007/s00226-015-0713-0.
16. Olmedo I., Bourrier F., Bertrand D., Berger F., Limam A. Felled trees as a rockfall protection system: experimental and numerical studies. *Engineering Geology for Society and Territory*. 2015. Vol. 2. P. 1889–1893. DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3_335.
17. Fortin-Smith J., Sherwood J., Drane P., Kretschmann D. Characterization of maple and ash material properties for the finite element modeling of wood baseball bats. *Appl. Sci.* 2018. Vol. 8. Iss. 11. P. 2256-1–2256-16. DOI: 10.3390/AP8112256.
18. Pierre F., Almeida G., Huber F., Jacquin P., Perre P. An original impact device for biomass characterisation: results obtained for spruce and poplar at different moisture contents. *Wood Sci. Technol.* 2012. Vol. 47. Iss. 3. P. 537–555. DOI: 10.1007/s00226-012-0512-9.
19. Reiterer A., Stanzl-Tschegg S.E. Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain. *Mech. Mater.* 2001. Vol. 33. Iss. 12. P. 705–715. DOI: 10.1016/S0167-6636(01)00086-2.
20. Oudjene M., Khelifa M. Finite element modelling of wooden structures at large deformations and brittle failure prediction. *Mater. Des.* 2009. Vol. 30. Iss. 10. P. 4081–4087. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.05.024.
21. Neumann M., Herter J., Droste B.O., Hartwig S. Compressive behaviour of axially loaded spruce wood under large deformations at different strain rates. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2011. Vol. 69. Iss. 3. P. 345–357. DOI: 10.1007/s00107-010-0442-x.
22. Garab J., Reihnsner R., Eberhardsteiner J. Mechanical behaviour of spruce under triaxial compression. *Wood Res-Slovakia*. 2012. Vol. 57. No 1. P. 57–68.
23. Eisenacher G., Scheidemann R., Neumann M., Droste B., Völzke H. Dynamic crushing

characteristics of spruce wood under large deformations. *Wood Sci. Technol.* 2013. Vol. 47. Iss. 2. P. 369–380. DOI: 10.1007/s00226-012-0508-5.

24. Günay E., Aygun C., Kaya S. T. Experimental determination of the yield stress curve of the scotch pine wood materials. *AIP Conference Proceedings*. 24–28 April 2013. Antalya, Turkey. 2013. Vol. 1569. Iss. 1. P. 65–72. DOI: 10.1063/1.4849230.

25. Zhong W., Rusinek A., Jankowiak T., Huang X., Abed F. Experimental and numerical investigation on compression orthotropic properties of spruce wood in axial and transverse loading directions. *Engineering Transactions*. 2015. Vol. 62. No 4. P. 381–401.

26. Deordiev S., Kopanitsa D., Tutatchikov R., Krasiev M. Vliyanie skorosti odnoosnogo szhatiya na soprotivlenie “chistykh” obraztsov drevesiny sosny [Axial compression speed influence to resistance of pine wood samples]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*. 2017. No 1(69). P. 11–18 (In Russian).

27. Akter S.T., Bader T.K. Experimental assessment of failure criteria for the interaction of normal stress perpendicular to the grain with rolling shear stress in Norway spruce clear wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2020. Vol. 78. Iss. 6. P. 1105–1123. DOI:10.1007/s00107-020-01587-w

28. Xie Q., Zhang L., Zhang B., Yang G., Yao J. Dynamic parallel-to-grain compressive properties of three softwoods under seismic strain rates: tests and constitutive modeling. *Holzforschung*. 2020. Vol. 74. Iss. 10. P. 927–937. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0229>.

29. Fu W.L., Guan H.Y., Kei S. Effects of moisture content and grain direction on the elastic properties of beech wood based on experiment and finite element method. *Forests*. 2021. Vol. 12. Iss. 5. P. 610-1–610-17. DOI: 10.3390/F12050610.

30. Radmanović K., Roginić R., Lučić R. B., Jovanović J., Jug M., Sedlar T., Šafran B. Effect of a high loading rate on the compressive properties of beech wood in the longitudinal direction. *BioResources*. 2021. Vol. 16. No 2. P. 4093–4105. DOI: 10.15376/biores.16.2.4093-4105.

31. Bol'shakov A.P., Balakshina M.A., Gerdyukov N.N. et al. Dempfiruyushchie svoystva sekvoyi, berezy, sosny i osiny pri udarnom nagruzhении [Damping properties of sequoia, birch, pine, and aspen under shock loading]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2001. Vol. 42. No 2. P. 202–210 (In Russian).

32. Renaud M., Rueff M., Rocaboy A.C. Mechanical behaviour of saturated wood under compression. Part 1. Behaviour of wood at high rates of strain. *Wood Sci. Technol.* 1996. Vol. 30. Iss. 3. P. 153–164

33. Renaud M., Rueff M., Rocaboy A.C. Mechanical behaviour of saturated wood under compression. Part 2. Behaviour of wood at low rates of strain some effects of compression on wood structure. *Wood Sci. Technol.* 1996. Vol. 30. Iss. 4. P. 237–243.

34. Reid S.R., Peng C. Dynamic uniaxial crushing of wood. *Int. J. Eng.* 1997. Vol. 19. Iss. 5-6. P. 531–570. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00016-X.

35. Vural M., Ravichandran G. Microstructural aspects and modeling of failure in naturally occurring porous composites. *Mech. Mater.* 2003. Vol. 35. Iss. 3-6. P. 523–536. DOI: 10.1016/S0167-6636(02)00268-5.

36. Vural M., Ravichandran G. Dynamic response and energy dissipation characteristics of balsa wood: experiment and analysis. *Int. J. Solids Struct.* 2003. Vol. 40. Iss. 9. P. 2147–2170. DOI: 10.1016/S0020-7683(03)00057-X.

37. 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. Iss. 4-5. P. 521–544. DOI: 10.1016/J.IJMECSCI.2004.12.013.

38. Palamidi E., Harrigan J.J. An investigation of balsa wood over a range of strain-rates and impact velocities. *J. Phys. IV France (proceedings)*. 2006. Vol. 134. P. 225–230. DOI: 10.1051/jp4:2006134034.

39. Tagarielli V.L., Deshpande V.S., Fleck N.A. The high strain rate response of PVC foams and end-grain balsa wood. *Compos. Part B-Eng.* 2008. Vol. 39. Iss. 1. P. 83–91. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.02.005.

40. Zhong W., Song S., Huang X., Hao Z., Chen G. Research on static and dynamic mechanical properties of spruce wood by three loading directions. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2011. Vol. 43. No 6. P. 1141–1150. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-6-lxxb2010-450.

41. 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. *Compos. Struct.* 2016. Vol. 149. P. 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.058>.

42. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Morvan H., Coutellier D. Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities-Part B: Experimental investigation under rigid lateral confinement. *Compos. Struct.* 2018. Vol. 204. P. 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.001>.

43. Wouts J., Haugou G., Oudjene M., Naceur H., Coutellier D. Confinement device to assess dynamic crushability of wood material. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.* 2018. Vol. 232. Iss. 8. P. 1418–1432. DOI: 10.1177/0954406217719306.

44. Pang S., Liang Y., Tao W., Liu Y., Huan S., Qin H. Effect of the strain rate and fiber direction on the dynamic mechanical properties of beech wood. *Forests.* 2019. Vol. 10. Iss. 10. P. 881-1–881-14. DOI: 10.3390/f10100881.

45. Zhou S.C., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of Douglas fir and glulam. *Const. Build. Mater.* 2020. Vol. 258. P. 119466-1–119466-16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119466.

46. Šebek F., Kubik P., Brabec M., Tippner J. Modelling of impact behaviour of European beech subjected to split Hopkinson pressure bar test. *Compos. Struct.* 2020. Vol. 245. Iss. 3–4. Article No 112330. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112330.

47. Zulkifli E., Kusumaningrum P., Rahmi D.P. Experimental study and numerical model of spruce and teak wood strength properties under compressive high strain rate loading. *Journal of Engineering & Technological Sciences.* 2021. Vol. 53. Iss. 1. P. 44–57. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.1.3>.

48. Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Dynamic compressibility of birch under various types of stress-strain state. In: *Multiscale Solid Mechanics.* Springer Cham. 2021. P. 69–80. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_7.

49. Bragov A.M., Iuzhina T.N., Lomunov A.K., Igumnov L.A., Belov A.A., Eremeyev V.A. Investigation of wood properties at elevated temperature. *J. Appl. Comput. Mech.* 2021. Vol. 8. No 1. P. 298–305. DOI: 10.22055/JACM.2021.38486.3239

50. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Vliyaniye povyshennoy temperatury na dinamicheskie svoystva osiny [Influence of increased temperature on the dynamic properties of aspen]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2021. Vol. 83. No 1. P. 5–21 (In Russian).

51. Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Vliyaniye vida napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na dinamicheskuyu szhimaemost berezy [Dynamic compressibility of birch at different types of stress-strained state]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 3. P. 269–282 (In Russian).

52. Bragov A., Igumnov L., Dell'isola F., Konstantinov A., Lomunov A., Iuzhina T. Dynamic testing of lime-tree (*Tilia europaea*) and pine (*Pinaceae*) for wood model identification. *Materials.* 2020. Vol. 13. No 22. P. 5261-1–5261-12. DOI: 10.3390/ma13225261.

53. Bragov A., Gonov M., Konstantinov A., Lomunov A., Yuzhina T. Deformation and destruction at deformation rate of order 10^3 s⁻¹ in wood of hardwood trees. In: *Developments and Novel Approaches in Nonlinear Solid Body Mechanics.* Springer Cham. 2020. P. 443–451. DOI: 10.1007/978-3-030-50460-1_26.

54. Konstantinov A.Y., 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. 555–566. DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-555-565.

55. Lomunov A.K., Yuzhina T.N., Kruszka L., Chen W.W. Deformirovaniye i razrusheniye lipy i sosny pri intensivnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh [Deforming and fracture of linden and pine under intensive dynamic impacts]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 1. P. 43–51 (In Russian).

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA TO EQUIP A MATHEMATICAL MODEL OF WOOD WITH DEFORMATION AND STRENGTH PARAMETERS

Kibets A.I.¹, Kalinina Yu.A.^{1,2}, Vutcin L.I.², Kruszka L.³

¹*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russian Federation*

³*Military University of Technology, Warsaw, Poland*

Wood due to a number of specific properties (relatively low density, relatively high strength, low thermal conductivity, manufacturability) has become widespread not only in construction, but also in some areas of technology. Every year, a huge number of containers with radioactive substances, spent nuclear fuel, ammunition components, etc. are transported in the world. Ensuring the safety of transporting such substances and products by air, road, sea and rail transport is of great importance due to the potential risk of damage during transportation damage to people, the environment and property. The design of the container must withstand, without depressurization and damage to the contents, significant dynamic loads that may occur during an emergency fall of the container from the vehicle or during unloading and loading operations. As one of the damping materials that can mitigate the consequences of such intense dynamic effects on containers and their contents, wood is used, since the property is deformed under compression across the fibers up to 30–40%, and for some species up to 70%, at almost constant stress, limits the load transmitted through it by the value of the tensile strength. In order to reliably calculate the behavior of containers in this case, data are needed on the properties of the wood used under impact, in particular, dynamic deformation diagrams. The purpose of this work is to analyze publications containing the results of an experimental study of wood deformation to identify parameters and subsequent verification of its mathematical model as a unidirectionally reinforced elastoplastic material implemented in the Dynamics-3 computer complex.

Keywords: wood, plastic strain, destruction, experimental data.