

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 89–101.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (6): 89–101.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 539.32

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-89-101

EDN: YJYZWM

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА ПРИ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Павел Алексеевич Хазов¹, Ирина Васильевна Шкода²,
Лидия Юрьевна Тягунова¹

¹Нижегородский государственный

архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

²Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской академии наук,

г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Актуальность. Изучение динамических свойств материалов является ключевым аспектом для проведения сложных инженерных расчетов. Наиболее часто используемые на данный момент методы определения динамических характеристик являются дорогостоящими и трудновоспроизводимыми в условиях отсутствия специального оборудования. Следовательно, существует необходимость разработки упрощенных методик, позволяющих инженеру определять конкретные характеристики материала, избегая проведения сложных лабораторных испытаний, что подтверждает актуальность данной темы исследования.

Цель исследования – разработка и обоснование упрощенной методики определения динамических свойств различных материалов на примере древесины сосны.

В исследовании применяются *методы экспериментального моделирования* при помощи современных измерительных устройств и последующая *аналитическая обработка* полученных результатов.

Научная новизна заключается в предложении упрощенной методики определения динамических параметров материала с помощью анализа зарегистрированных блоком акселерометра колебаний шарнирно закрепленной двухопорной балки.

В результате исследования определен динамический модуль упругости древесины сосны, с высокой точностью совпадающий со справочными значениями, а также получен коэффициент затухания колебаний, необходимый при расчете динамических систем в окolorезонансных зонах.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предлагаемой методики для определения динамических свойств новых материалов с целью дальнейшего внесения этих характеристик в базы данных программно-вычислительных комплексов.

Ключевые слова: собственные колебания, декремент затухания, динамический модуль упругости, коэффициент затухания, акселерометр

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Нижегородской области (грант Нижегородской

области в сфере науки, технологий и техники от 04.07.2023 года № 316-06-16-118a/23).

Для цитирования: Хазов П.А., Шкода И.В., Тягунова Л.Ю. Методика определения динамических параметров материала при свободных колебаниях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 89–101. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-89-101. EDN: YJYZWM

ORIGINAL ARTICLE

DETERMINATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF FREE VIBRATING MATERIALS

Pavel A. Khazov¹, Irina V. Shkoda², Lidia Yu. Tiagunova¹

¹*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The most commonly used methods for determination of dynamic properties are expensive and difficult to reproduce without specialised equipment. There is a need to develop simplified techniques that allow to determine specific material properties, avoiding the use of complex laboratory tests.

Purpose: The aim of this work is to develop and test a simplified methodology for determining dynamic properties of various materials using pine wood as an example.

Methodology: Experimental modelling using up-to-date measuring devices and analytical processing of the obtained results.

Research findings: The dynamic modulus of elasticity of pine wood is determined with high accuracy and coincides with reference values. The coefficient of vibration damping is obtained for the calculation of dynamic systems in near-resonance zones.

Practical implications: The proposed methodology can be used to determine the dynamic properties of new materials in order to enter these characteristics in software databases and computer complexes.

Originality: The proposed method of determining the dynamic parameters of the material is based on the analysis of two-support beam vibrations registered by an accelerometer.

Keywords: natural vibrations, damping decrement, dynamic modulus of elasticity, damping factor, accelerometer

Funding: This work was financially supported by Grant N 316-06-16-118a/23 from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Khazov P.A., Shkoda I.V., Tiagunova L.Yu. Determination of dynamic parameters of free vibrating materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 89–101. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-89-101. EDN: YJYZWM

Введение

Для сложных расчетов напряженно-деформированного состояния и прочности различных конструкций, испытывающих интенсивные динамические воздействия, наиболее часто применяют различные программно-вычислительные комплексы (ПВК) (ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA и др). Достоверность и точность вычислений таких ПВК определяется критериями разрушения мате-

риалов и конструкций, а также материальными функциями, которые описывают реальную картину работы исследуемых объектов с учетом различных факторов (влияния скоростей деформаций, деформационного упрочнения и т. д.). В настоящее время, с появлением новых материалов и сплавов, чьи свойства не до конца изучены, требуется расширение базы данных ПВК для получения корректных результатов. Оснащение базы данных ПВК информацией о свойствах материалов и работе конструкций происходит посредством реальных натуральных экспериментов с последующим внесением их результатов в базу [1]. Все это указывает на необходимость разработки новых экспериментальных методов для оснащения таких моделей необходимыми параметрами, а также на актуальность исследования, представленного в настоящей статье.

Как отмечает в своей диссертации А.Ю. Константинов [2], систематическое изучение динамических свойств материалов было начато в конце XIX – начале XX в. трудами отца и сына Дж. и Б. Гопкинсонов. В России изучение свойств материалов при высоких скоростях деформации началось в 30-х гг. прошлого века Н.Н. Давиденковым и было продолжено Ф.Ф. Витманом, Н.А. Златиным, В.А. Степановым, Ю.Я. Волошенко-Климовицким, А.А. Ильюшиным, В.С. Ленским, Р.А. Васиным и др. За рубежом исследованию этого вопроса посвящены работы Р. Дэвиса, А. Надаи, Дж. Даффи, Дж. Тейлора, Г. Кольского, Дж. Кэмпбелла, У. Линдхольма, Дж. Белла, А. Кобаяси. К настоящему времени результаты систематических исследований процессов высокоскоростной деформации различных материалов представлены в работах С.А. Новикова, Г.В. Степанова, А.П. Большакова, К. Альбертини, Дж. Филда, Дж. Грея, У. Прауда, Я. Клепачко, Дж. Хардинга, Ф. Хаузера, Г. Гари, З. Розенберга, С. Немат-Нассера и др. [2, 3, 4, 5].

Среди множества современных публикаций авторами выделяются работы, реализуемые в Научно-исследовательском институте механики при ННГУ им. Н.И. Лобачевского под руководством А.М. Брагова, А.К. Ломунова и др. [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

За весь период изучения динамических свойств материалов так и не было представлено стандартизированных методов или серийно выпускаемого оборудования для проведения экспериментов. Разработки новых методов получения достоверных измерений напряжений и деформаций, не искажающих механические свойства материалов, продолжаются до сих пор [13, 14]. Несмотря на то, что за это время было создано большое количество средств для измерения усилий и деформаций от различных нагружающих устройств, исследования в этой области продолжаются.

Одним из фокусов, на который было направлено внимание исследователей, являются методы построения диаграмм деформирования материалов. В настоящее время наиболее распространенными являются следующие методы: метод копровых испытаний на растяжение или сжатие, кулачковый пластометр, методы Кольского и Тейлора. Также существуют и другие методики, однако их используют значительно реже, например: методика исследования раздачи кольцевых образцов, методика А.А. Ильюшина и В.С. Ленского, основанная на теории распространения одномерных упругопластических волн и распределения остаточных деформаций по длине образца, и т. д.

Однако даже в наиболее часто используемых методиках есть недостатки.

В методе копровых испытаний основными недостатками являются: небольшая скорость деформации образца, невозможность контролировать требуемый закон нагружения в процессе проведения испытаний, сложная картина распространения волн, которая не учитывается при построении диаграмм.

В методике расширяющегося кольца используются высокоскоростная киносъемка и теневая оптическая система с лазерным источником света и фотоумножителем [15] и тензорезисторы [16]. Однако такая методика позволяет зафиксировать только радиальную раздачу образца. Кроме того, в процессе обработки полученных результатов требуется дважды произвести дифференцирование полученной экспериментальной кривой, что часто приводит к существенным искажениям полученных результатов.

Наиболее простым и удобным методом определения прочностных и деформационных свойств материалов считается метод Тейлора [17, 18, 19, 20].

Среди таких методов на сегодняшний день выделяется метод Кольского [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31] по причине простоты реализации и хорошей теоретической обоснованности. Этот метод позволяет получить не только диаграмму деформирования, но и кривую изменения скорости деформации в течение всего хода испытания.

Все вышеперечисленные методы используются для получения большого количества различных динамических свойств материалов, которые необходимы для проведения сложных расчетов. Однако в некоторых случаях инженеру нужно определить значение конкретной характеристики материала, например его динамического модуля упругости, не прибегая к дорогим испытаниям в специальных лабораториях.

В настоящей статье на примере двухопорной шарнирной балки рассмотрен упрощенный метод определения динамического модуля упругости, а также коэффициента затухания колебаний, значения которых могут быть использованы при расчетах на динамические воздействия.

Материалы и методы

Объектом исследования является деревянная балка, шарнирно закрепленная с двух сторон в вертикальном положении. На середину балки установлен акселерометр, фиксирующий ее ускорения после приложения начального импульса (рис. 1). В исследовании использовался трехосный акселерометр ТБА, масса которого составляет 50 г, что не оказывает влияния на чистоту эксперимента. Пролет балки – 2560 мм, сечение – 197×40 мм (рис. 2).

Для двухопорной балки с сосредоточенной массой круговая частота вычисляется по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{M}} = \sqrt{\frac{1}{\delta \cdot M}}, \quad (1)$$

где c – жесткость системы, численно равна величине, вызывающей единичное перемещение точки сосредоточения масс; M – сосредоточенная масса, т; δ – удельное перемещение точки, м/кН.

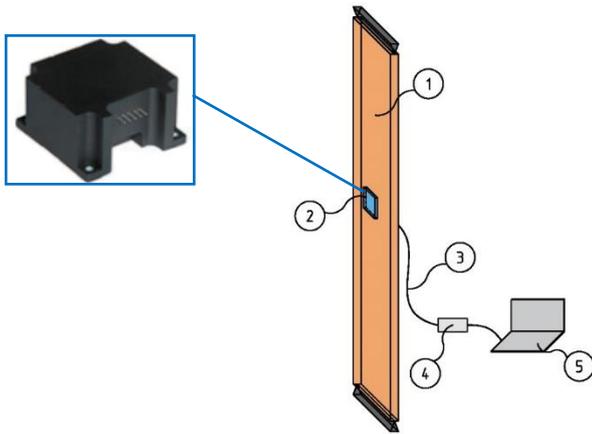


Рис. 1. Экспериментальная модель:

1 – испытуемый образец; 2 – трехосный акселерометр; 3 – контактный передатчик сигнала акселерометра; 4 – модуль обработки сигнала акселерометра; 5 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации

Fig. 1. Experimental model:

1 – test sample; 2 – triaxial accelerometer; 3 – contact accelerometer signal transmitter; 4 – accelerometer signal processing module; 5 – laptop for recording oscillation patterns and vibration measurement results

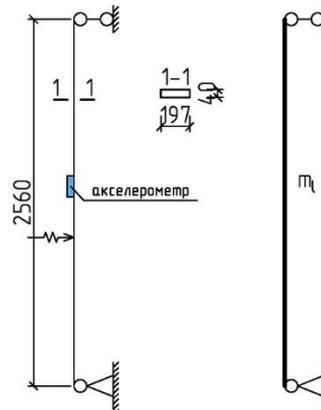


Рис. 2. Расчетная схема

Fig. 2. Design model

В случае, когда масса распределена по длине балки (рис. 2), формула (1) усложняется и принимает следующий вид:

$$\omega = \sqrt{\frac{EJ \cdot \pi^4}{\rho \cdot F \cdot l^4}} = \sqrt{\frac{EJ \cdot \pi^4}{m_l \cdot l^4}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, kH/m^2 ; J – момент инерции, м^4 ; ρ – плотность древесины балки, т/м^3 ; F – площадь сечения деревянной балки, м^2 ; m_l – погонная масса, т/м ; l – пролет балки, м .

У большинства вязкоупругих материалов модуль упругости, определенный в статических условиях, не совпадает с динамическим модулем упругости, поскольку при быстрых нагружениях не успевают проявиться эффекты, связанные с ползучестью или релаксацией материала. Именно такой эффект наблюдается в древесине при колебаниях конструкции, таким образом, в формуле (2) не может быть использован статический модуль упругости.

Проведение динамических исследований материалов является актуальной задачей, требующей больших финансовых и экономических затрат. Тем не менее, используя описанный экспериментальный стенд, можно оценить значение динамического модуля упругости материала (в данном случае древесины) без привлечения специализированных лабораторий. По найденным значениям вычисляется коэффициент неупругой работы, являющийся кон-

стантой материала и необходимый при расчете систем на собственные и вынужденные колебания.

В случае инструментальной записи процесса собственных колебаний системы круговая частота ω может быть найдена непосредственно из эксперимента. В этом случае динамический модуль упругости становится единственным неизвестным в уравнении (2) и может быть определен:

$$E_{\sigma} = \frac{\omega^2 \cdot m_l \cdot l^4}{\pi^4 \cdot J}. \quad (3)$$

В результате приложения однократного импульса к неподвижной массе система будет совершать свободные колебания. Используя закон движения для свободных затухающих колебаний, можно записать уравнение движения акселерометра после воздействия мгновенного импульса:

$$y(t) = A \cdot e^{-\varepsilon t} \cos(\omega t), \quad (4)$$

где A – начальная амплитуда колебаний, м; ε – коэффициент затухания, c^{-1} ; ω – круговая частота, рад/с; t – время, с.

Закон изменения ускорений может быть записан при помощи дифференциальной зависимости $\ddot{y}(t) = \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = -\omega^2 \cdot A \cdot e^{-\varepsilon t} \cos(\omega t)$ или, учитывая выражение (4), $\ddot{y}(t) = -\omega^2 \cdot y(t)$, откуда

$$y(t) = -\frac{\ddot{y}(t)}{\omega^2}. \quad (5)$$

Результаты и обсуждение

Результатом измерения акселерометра является набор ускорений a_i , представляющий собой численную запись зависимости $\ddot{y}(t)$. Согласно уравнению (5), графики перемещений будут пропорциональны графикам ускорений с коэффициентом $-\frac{1}{\omega^2}$. Ускорения, фиксируемые акселерометром, переведенные в перемещения, представлены на рис. 3.

По графику определено количество колебаний от момента удара до затухания процесса (129 колебаний за 8,776 с). В таблице приведены некоторые динамические характеристики балки.

Частота и период колебаний балки

Beam vibration frequency and cycle

Динамическая характеристика	Формула	Полученное значение
Период колебаний T , с	n/t	0,068
Частота ν , Гц	$1/T$	14,699
Круговая частота ω , рад/с	$2\pi\nu$	92,358

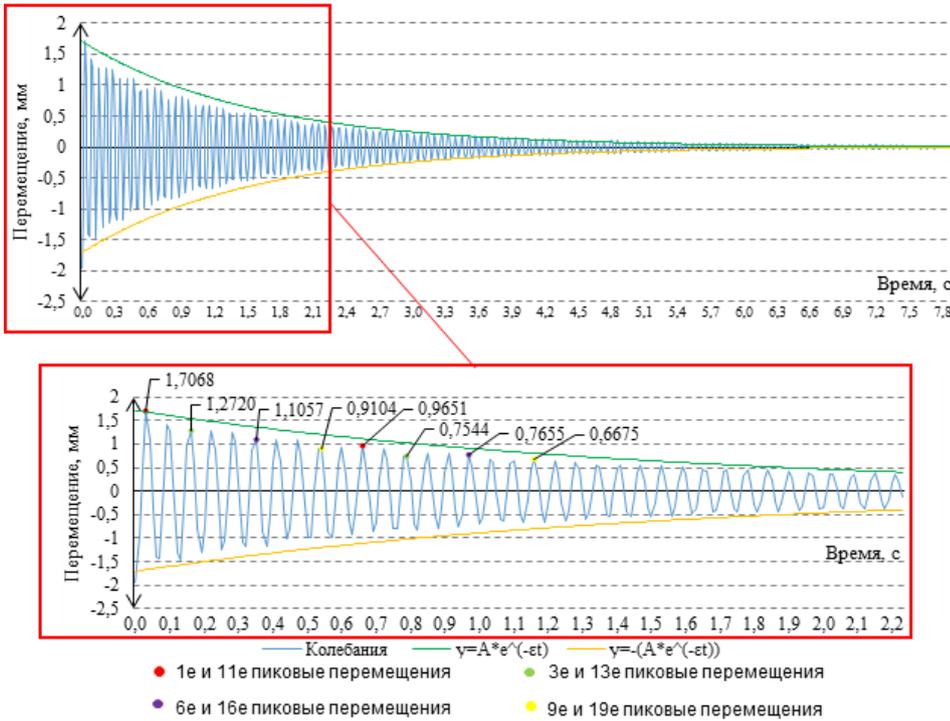


Рис. 3. Сравнение результатов измерений и аналитических вычислений
 Fig. 3. Results of measurements and analytical calculations

Согласно (3), значение динамического модуля упругости составляет $E_d = 19,745 \cdot 10^6$ кН/м². Согласно исследованиям других авторов, например [32], модуль упругости сосны при описании колебаний следует принимать равным $\approx 180\text{--}200$ ГПа, что отличается от определенного экспериментально в пределах 1%. Полученные результаты подтверждают возможность использования предложенного упрощенного метода определения динамических характеристик, основанного на измерении колебаний двухопорной балки. Метод может быть полезен, если данные о динамическом модуле упругости для изучаемого материала не представлены в справочной литературе, а его значение необходимо для выполнения каких-либо расчетов.

Для определения логарифмического декремента затухания необходимо вычислить натуральный логарифм отношения амплитуд двух соседних колебаний. Для снижения влияния погрешностей измерения акселерометра предлагается определение среднего из нескольких декрементов. Локальные погрешности измерений могут быть нивелированы, если вместо двух соседних колебаний использовать отношение колебаний через несколько фаз. Таким образом, формула коэффициента затухания будет выглядеть следующим образом:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{0,1}{T} \ln \frac{x_j}{x_{j+10}} \right)_i, \quad (6)$$

где x_j – текущее пиковое значение перемещения, м; x_{j+10} – десятое по счету пиковое значение перемещения, отсчитываемое от x_j , м; n – количество пиковых значений перемещений, взятых для определения коэффициента затухания; T – период, с.

В конкретном случае амплитуды сравнивались через десять периодов, что объясняет наличие в формуле коэффициента 0,1. Введением такого коэффициента была исключена погрешность, которая могла произойти, если измерения, фиксируемые акселерометром, не попали в действительный пик синусоиды.

При начальной амплитуде $A = 1,71 \cdot 10^3$ м и коэффициенте затухания $\varepsilon = 0,65 \text{ с}^{-1}$ были получены прямая и обратная экспоненты затухания, показанные на рис. 3.

При вынужденных колебаниях от действия гармонических нагрузок необходимо знать динамический коэффициент μ , который, в свою очередь, определяется по формуле

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}}, \quad (7)$$

где $\lambda = \frac{\theta}{\omega}$ – отношение круговой частоты нагрузки и собственной круговой частоты; γ – коэффициент неупругой работы материала, учитывающий силы сопротивления.

Коэффициент неупругой работы является константой материала и оказывает значительное влияние на поведение системы в околорезонансных зонах (рис. 4). Коэффициент неупругой работы также может быть определен по результатам эксперимента, поскольку зависит от коэффициента затухания колебаний:

$$\gamma = \frac{2\varepsilon}{\omega} = \frac{\varepsilon T}{\pi}. \quad (8)$$

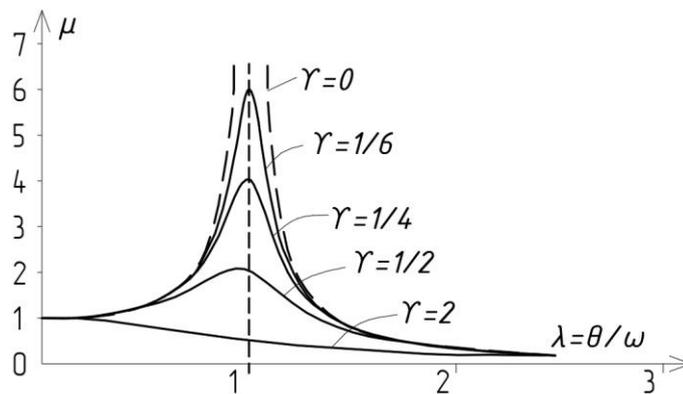


Рис. 4. График зависимости коэффициента неупругой работы материала
Fig. 4. Dependence of the coefficient of inelastic work of the material

Заключение

1. Определенный динамический модуль упругости на примере древесины сосны с высокой точностью совпадает со справочными значениями. Это означает, что предложенная методика может быть использована для оценки модулей упругости менее изученных материалов, а также композитных конструкций, например сталебетонных стержней.

2. Предложенная методика позволяет определить коэффициент затухания колебаний, который может быть применен при аналитическом моделировании колебаний и включен в уравнения движения.

3. Методика позволяет определить коэффициент неупругой работы материала, необходимый при расчете систем на вынужденные колебания. Основная особенность состоит в том, что данный параметр является физической константой материала и может быть использован при расчете гораздо более сложных механических систем.

Исследованием обоснована возможность применения упрощенной методики для определения динамических характеристик материалов. Безусловно, данный метод не может полноценно конкурировать с лабораторными испытаниями, проводимыми с помощью специальных установок. Однако предложенная методика является более простой и доступной для инженера, т. к. не требует изготовления большого количества образцов, специализированного программного обеспечения, а также проведения исследований в специальных лабораториях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аманов А.Н., Ильина Д.А., Шлычков С.В. Идентификация физико-механических свойств материалов // Научному прогрессу – творчество молодых : материалы XIV Международной молодежной научной конференции, 19–20 апреля 2019 г. В 4 частях. Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2019. Ч. 1. С. 129–131.
2. Константинов А.Ю. Экспериментально-теоретический подход к исследованию высокоскоростного деформирования и разрушения материалов с использованием мерных стержней : специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Нижний Новгород, 2018. 304 с.
3. 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.
4. Брагов А.М., Ломунов А.К. Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2017. 148 с.
5. Смирнов В.А. Сравнительные динамические характеристики конструкционных материалов // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 3. С. 117–131.
6. Южина Т.Н. Исследование динамических свойств древесины при одноосном сжатии // Проблемы прочности и пластичности. 2022. № 3. С. 420–431.
7. Южина Т.Н. Высокоскоростное деформирование и разрушение некоторых пород древесины // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений : специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2022. 163 с.
8. Брагов А.М., Карихалу Б.Л., Петров Ю.В., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Ламзин Д.А., Смирнов И.В. Экспериментально-теоретическое исследование динамического

- деформирования и разрушения фибробетона // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 4. С. 57–63.
9. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К., Ламзин Д.А. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении // Приволжский научный журнал. 2014. № 4 (32). С. 11–21.
 10. Dell'Isola F., Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Y., Abali V.E. Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates // *Advanced Structured Materials*. 2019. V. 108. P. 71–80.
 11. Ламзин Д.А., Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Новиков В.В., Гонов М.Е. Методические аспекты динамических испытаний хрупких материалов на сжатие // Приволжский научный журнал. 2019. № 4. С. 65–78.
 12. Ламзин Д.А., Брагов А.М., Ломунов А.К., Константинов А.Ю., Новиков В.В., Чекарев Д.Т. Удельная энергоёмкость кирпича при динамическом нагружении // Приволжский научный журнал. 2019. № 4. С. 79–88.
 13. Захезин А.М., Колосова О.П., Воителев П.Ю., Пакулев М.В. Оценка динамических характеристик материалов и механических систем экспериментальными методами // *Международный журнал экспериментального образования*. 2015. № 5. Ч. 1. С. 91–95.
 14. Турков А.В., Коробко В.И., Макаров А.А. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане при изменении динамических и статических нагрузок // *Лесной журнал*. 2016. № 5. С. 275–280.
 15. Perrone N. On the use ring test determination of rate sensitive material constants // *Experimental Mechanics*. 1968. V. 5. P. 232–236.
 16. Кокошвили С.М. Методы динамических испытаний жестких полимерных материалов. Рига : Зинатне, 1978. 182 с.
 17. Рыжанский В.А., Минеев В.Н., Цыпкин В.И., Иванов А.Г. Экспериментальное исследование взрывного расширения тонких колец из отожженного алюминиевого сплава // *Физика горения и взрыва*. 1976. Т. 12. № 1. С. 120–124.
 18. Whiffin A.C. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. II: Tests on various metallic materials // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1948. V. 14. P. 289–299.
 19. Li H., Yu Z., Rong P., Wu Yu, Hui H., Zhang F. High strain rate response of in-situ TiB₂/7055 composite by Taylor impact // *Materials*. 2021. V. 14. 258. P. 1–13.
 20. Taylor G.I. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. I: Theoretical considerations // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1948. Series A. V. 194. P. 289–299.
 21. Li J.-C., Chen G., Huang F.-L., Lu Y.-G. Load characteristics in Taylor impact test on projectiles with various nose shapes // *Metals*. 2021. V. 11. 713. P. 21.
 22. Woodward R.L., Burman N.M., Baxter B.J. An experimental and analytical study of the Taylor impact test // *Pergamon*. 1994. V. 15. № 4. P. 407–416.
 23. Juncheng L., Gang C., Yonggang L., Fenglei H. Investigation on the application of Taylor impact test to high-g loading // *Frontiers in materials*. 2021. V. 8. P. 21.
 24. Chen W., Song B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing, and applications. New York : Springer Science & Business Media, 2011. P. 388.
 25. Jankowiak T., Rusinek A., Lodygowski T. Validation of the Klepaczko–Malinowski model for friction correction and recommendations on split Hopkinson pressure bar // *Finite elements in analysis and design*. 2011. V. 47. № 10. P. 1191–1208.
 26. Klepaczko J., Malinowski Z. Dynamic frictional effects as measured from the split Hopkinson pressure bar // *International Union of Theoretical and Applied Mechanics / K. Kawata ed., Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1977. P. 403–416.*
 27. Gray III G.T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing // *Mechanical testing and evaluation / H. Kuhn, D. Medlin ed. 2000. V. 8. P. 462–476.*
 28. Gray G.T., Blumenthal W.R. Split Hopkinson pressure bar testing of soft materials // *Mechanical Testing and Evaluation / H. Kuhn, D. Medlin ed. ASM International, 2000. P. 488–496.*
 29. Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. Pulse shaping techniques for testing high-strength steel with a split Hopkinson pressure bar // *Experimental Mechanics*. 2005. V. 45. P. 186–195.
 30. Forrestal M.J., Wright T.W., Chen W. The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test // *International Journal of Impact Engineering*. 2007. V. 34 (3). P. 405–411.

31. Feng J., Jiang M., Xu H., Li Z., Wu Z. Influence of the end cap deformation of a hollow transmission bar on the hollow split Hopkinson pressure bar test results // *International Journal of Impact Engineering*. 2017. V. 112. P. 116–124.
32. Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М., Шлычков С.В. Идентификация упругих свойств древесины // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10. Ч. 12. С. 2625–2629.

REFERENCES

1. Amanov A.N., Ilyina D.A., Shlychikov D.A. Identification of physical and mechanical properties of materials. In: *Proc. 14th Sci. Conf. 'Scientific Progress – Creativity of the Young'*, Pt. 1. Yoshkar-Ola, 2019. Pp. 129–131. (In Russian)
2. Konstantinov A.Yu. Experimental and theoretical approach to high-speed deformation and destruction of materials using dimensional rods. DSc Thesis. Nizhny Novgorod, 2018. 304 p. (In Russian)
3. Bragov A.M., Lomunov A.K., Yuzhina T.N. Stress-strain state effect on birch dynamic compressibility. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2020; 82 (3): 269–282. (In Russian)
4. Bragov A.M., Lomunov A.K. The Kola method in studying processes of high-speed deformation of materials of various physical nature. Nizhny Novgorod, 2017. 148 p. (In Russian)
5. Smirnov V.A. Comparative dynamic characteristics of structural materials. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2022; 3: 117–131. (In Russian)
6. Yuzhina T.N. Dynamic properties of wood under uniaxial compression. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2022; 3: 420–431. (In Russian)
7. Yuzhina T.N. High-speed deformation and destruction of some types of wood. PhD Thesis. Moscow, 2022. 163 p. (In Russian)
8. Bragov A.M., Karikhalu B.L., Petrov Yu.V., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Lamzin D.A., Smirnov I.V. Experimental and theoretical study of dynamic deformation and destruction of fiber concrete. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2014; 80 (4): 57–63. (In Russian)
9. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K., Lamzin D.A. Mechanical properties of fine-grained concrete under dynamic loading. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2014; 4 (32): 11–21. (In Russian)
10. Dell'Isola F., Bragov A.M., Igumnov L.A., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Y., Abali B.E. Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates. *Advanced Structured Materials*. 2019; 108: 71–80.
11. Lamzin D.A., Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Novikov V.V., Gonov M.E. Methodological aspects of dynamic tests of brittle materials for compression. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2019; 4: 65–78. (In Russian)
12. Lamzin D.A., Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A.Yu., Novikov V.V., Chekmarev D.T. Specific energy consumption of bricks under dynamic loading. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2019; 4: 79–88.
13. Zakhezin A.M., Kolosova O.P., Voitelev P.Yu., Pakulev M.V. Experimental evaluation of dynamic characteristics of materials and mechanical systems. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniia*. 2015; 5 (1): 91–95. (In Russian)
14. Turkov A.V., Korobko V.I., Makarov A.A. Experimental studies of systems of cross beams made of wooden elements on a square plan when dynamic and static loads change. *Lesnoi zhurnal*. 2016; 5: 275–280. (In Russian)
15. Perrone N. On the use ring test determination of rate sensitive material constants. *Experimental Mechanics*. 1968; 5: 232–236.
16. Kokoshvili S.M. Methods of dynamic testing of rigid polymer materials. Riga: Zinatne, 1978. 182 p. (In Russian)
17. Ryzhansky V.A., Mineev V.N., et al. Experimental investigation of explosive expansion of thin annealed aluminum alloy rings. *Fizika gorenii i vzryva*. 1976; 12(1): 120–124. (In Russian)
18. Whiffin A.C. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. I: Tests on various metallic materials. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1948; 14: 289–299.
19. Li H., Yu Z., Rong P., Wu Yu, Hui H., Zhang F. High strain rate response of in-situ TiB₂/7055 composite by Taylor impact. *Materials*. 2021; 14 (258): 1–13.

20. Taylor G.I. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. I: Theoretical considerations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1948;194: 289–299.
21. Li J.-C., Chen G., Huang F.-L., Lu Y.- G. Load characteristics in Taylor impact test on projectiles with various nose shapes. *Metals*. 2021; 11 (713): 21.
22. Woodward R.L., Burman N.M., Baxter B.J. An experimental and analytical study of the Taylor impact test. *Pergamon*. 1994; 15. (4): 407–416.
23. Juncheng L., Gang C., Yonggang, L., Fenglei H. Investigation on the application of Taylor impact test to high-g loading. *Frontiers in materials*. 2021; 8: 21.
24. Chen W., Song B. Split Hopkinson (Kolsky) bar: Design, testing, and applications. New York: Springer Science & Business Media, 2011. 388 p.
25. Jankowiak T., Rusinek A., Lodygowski T. Validation of the Klepaczko–Malinowski model for friction correction and recommendations on Split Hopkinson Pressure Bar. *Finite elements in analysis and design*. 2011; 47 (10): 1191–1208.
26. Klepaczko J., Malinowski Z. Dynamic frictional effects as measured from the split Hopkinson pressure bar. *International Union of Theoretical and Applied Mechanics*, K. Kawata Ed., Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1977. Pp. 403–416.
27. Gray III G.T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing. *Mechanical Testing and Evaluation*. 2000; 8: 462–476.
28. Gray G.T., Blumenthal W.R. Split Hopkinson pressure bar testing of soft materials. *Mechanical Testing and Evaluation*, H. Kuhn, D. Medlin Eds., ASM International, 2000. Pp. 488–496.
29. Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. Pulse shaping techniques for testing high-strength steel with a split Hopkinson pressure bar. *Experimental Mechanics*. 2005; 45: 186–195.
30. Forrestal M.J., Wright T.W., Chen W. The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test. *International Journal of Impact Engineering*. 2007; 34 (3): 405–411.
31. Feng J., Jiang M., Xu H., Li Z., Wu Z. Influence of the end cap deformation of a hollow transmission bar on the hollow split Hopkinson pressure bar test results. *International Journal of Impact Engineering*. 2017; 112: 116–124.
32. Saldaeva E.Yu., Tsvetkova E.M., Shlychkov S.V. Identification of elastic properties of wood. *Fundamentalnye issledovaniia*. 2013; 10 (12): 2625–2629. (In Russian)

Сведения об авторах

Хазов Павел Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, зав. лабораторией, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, khazov.nngasu@mail.ru

Шкода Ирина Васильевна, аспирант, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85; ассистент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, ShkodaIrinaVasil@yandex.ru

Тягунова Лидия Юрьевна, ст. преподаватель, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, tyagunovaly@yandex.ru

Authors Details

Pavel A. Khazov, PhD, A/Professor, Nizhnii Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskya Str., 603000, Nizhnii Novgorod, Russia, khazov.nngasu@mail.ru

Irina V. Shkoda, Research Assistant, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 85, Belinsky Str., 603024, Nizhny Novgorod, Russia; Nizhnii Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskya Str., 603000, Nizhnii Novgorod, Russia, ShkodaIrinaVasil@yandex.ru

Lidiia Yu. Tjagunova, Senior Lecturer, Nizhnii Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskya Str., 603000, Nizhnii Novgorod, Russia, tyagunovaly@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.06.2023
Одобрена после рецензирования 18.07.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 30.06.2023
Approved after review 18.07.2023
Accepted for publication 09.11.2023