

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-4-413-427

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ДРЕВЕСИНЫ С ПОМОЩЬЮ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА\*

© 2020 г.

Баландин В.В.<sup>1</sup>, Баландин Вл.Вл.<sup>1</sup>,  
Ломунов А.К.<sup>1</sup>, Пархачёв В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт механики  
Национального исследовательского Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

lomunov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 15.11.2020

Предложен новый метод для определения динамического коэффициента Пуассона как изотропных, так и анизотропных материалов. Нагружение образца импульсной сжимающей нагрузкой производилось на установке, реализующей методику Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Развитие во времени продольной деформации сжатия образца определялось по сигналам, зарегистрированным с помощью малобазных тензорезисторов, наклеенных на мерных стержнях. Для измерения развития радиальных компонент деформации образца во времени использовался радиоинтерферометр миллиметрового диапазона. Для оценки возможной несимметричности радиального расширения образца измерения проводились с использованием двух независимых каналов, облучающих диаметрально противоположные зоны боковой поверхности образца. Испытаниям подвергался образец сосны воздушной влажности в виде цилиндра диаметром 54 мм и высотой 30 мм. Нагружение импульсной сжимающей нагрузкой осуществлялось вдоль волокон. С помощью двух каналов радиоинтерферометра регистрировалось раздельное перемещение боковых поверхностей образца как вдоль, так и поперек годичных слоев. Определено, что перемещения областей боковой поверхности образца при расширении вдоль годичных слоев достаточно близки, тогда как при расширении поперек годичных слоев они сильно отличаются. Относительная поперечная деформация образца в обоих случаях определялась как сумма боковых перемещений, отнесенная к диаметру образца. В результате получены две компоненты динамического коэффициента Пуассона, которые составили  $\sim 0,2$  (в направлении вдоль годичных слоев) и  $\sim 0,24$  (в направлении поперек годичных слоев).

*Ключевые слова:* динамический коэффициент Пуассона, метод Кольского, радиоинтерферометр, ортотропная среда, древесина.

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-08-00808).

## Введение

В настоящее время методы автоматизированного проектирования (САЕ), такие как моделирование методом конечных элементов (FEM), используются для проектирования различных ответственных конструкций. Надежный FEM основан на достоверных данных о свойствах материала – упругих постоянных, включая коэффициент Пуассона. Для анизотропных материалов, таких как древесина, коэффициент Пуассона при растяжении и сжатии для каждого ортогонального направления представляет собой отношение поперечной деформации к продольной. Эти параметры в основном изучались в течение последних 4–5 десятилетий с помощью механических или электрических измерительных систем (тензодатчиков, систем механических экстензометров, индуктивных устройств измерения деформации) из-за высокой стоимости и отсутствия доступности оптических бесконтактных измерительных систем [1].

Коэффициент Пуассона может быть получен как с помощью статических, так и динамических методов испытаний. Статическое испытание является наиболее часто используемым для определения коэффициента Пуассона, однако при эксплуатации конструкций в условиях импульсных нагрузок для их достоверного проектирования и расчета в численные модели должна быть заложена либо величина динамического коэффициента Пуассона (для изотропных тел), либо набор коэффициентов Пуассона в характерных направлениях (для анизотропных тел). Динамический коэффициент Пуассона может быть определен с помощью различных ударных методов и анализа отклика материала на приложенные импульсные нагрузки малой амплитуды. Основное внимание в пилотном испытании бетона [2] уделено оценке некоторых динамических свойств бетона с использованием метода ударного резонанса [3], когда подвешенный образец подвергается импульсному нагружению небольшим ударным элементом, а реакция образца измеряется тремя акселерометрами на образце, что позволяет регистрировать ускорения частиц в виде трех основных продольных, крутильных и поперечных резонансных частот бетона соответственно. Основные частоты для трех различных режимов вибрации получаются правильным выбором точки удара и мест закрепления акселерометров.

Первые исследования коэффициента Пуассона для древесины ели приведены в [4–6]. Для анизотропных материалов, таких как дерево, коэффициент Пуассона для одного ортогонального направления представляет собой отношение поперечного сжатия (поперечной деформации) к осевому растяжению (осевой деформации). Carrington вывел коэффициент Пуассона из экспериментов по изгибу балки, измерив с помощью телескопа кривизну в поперечном направлении (поперечная деформация  $\epsilon_y$ ) и продольном направлении (осевая деформация  $\epsilon_x$ ). Högig [7] пересмотрел эти данные и принял идеи об ортотропном поведении древесных материалов [8–10]. Модель, которую предложил Högig [11], является основой для ортотропного описания древесины и используется по настоящее время. Дальнейшие существенные исследования древесины ели выполнили Wommelsdorff [12] и Neuhaus [13]. С помощью экспериментов на растяжение и изгиб они определили шесть ортотропных коэффициентов Пуассона, используя индуктивные устройства для измерения деформации, а также тензодатчики. Кроме того, Niemi и Caduff [14] исследовали коэффициент Пуассона для древесины ели. В [15] был предложен метод динамических испытаний по определению коэффициента Пуассона пиломатериалов, основанный на кривой деформационных изгибных колебаний первого порядка консоль-

ной плиты. Свободная вибрация консольного образца была возбуждена путем простукивания. С помощью розеток тензодатчиков были измерены коэффициенты Пуассона вдоль и поперек волокон на радиальных срезах и вдоль волокон на поперечных срезах у образцов ситкинской ели.

На примере бетона в статье [16] коэффициент Пуассона определялся на основе анализа резонансных частот продольных и крутильных колебаний балки, а также скорости импульса, возбуждаемого маломощным генератором поперечных колебаний. В [17] предложен метод определения динамического коэффициента Пуассона, основанный на измерении динамических осевой и сдвиговой деформаций двух образцов, изготовленных из одного и того же материала. Метод базируется на анализе вынужденных колебаний цилиндрического образца, нагруженного инерционной массой. Верхняя и нижняя поверхности вязкоупругого материала образца были присоединены соответственно к диску нагрузки и жесткой опорной плите. Жесткая опорная плита подвергалась вынужденным колебаниям от вибровозбудителя. Для отслеживания перемещений опорной плиты и нагружающего диска использовались два акселерометра. Отношение величин и разность фаз между колебаниями диска нагрузки и вибрацией опорной плиты представляют собой осевую динамическую деформацию образца. В статье [18] были предложены принципы и методы определения динамического коэффициента Пуассона древесины на основе анализа изгибных колебаний консольной плиты с помощью тензометрии. Для приклейки розетки тензодатчиков на поверхности плиты с помощью регрессионного анализа выбиралось место, в котором поперечное напряжение внутри древесной пластины было нулевым во время изгибной вибрации первого порядка. Отношение между линейными амплитудами поперечной и продольной деформации при частоте изгиба первого порядка было принято в качестве измеренного значения коэффициента Пуассона материала. В статье [19] был предложен метод динамических испытаний на коэффициент Пуассона пиломатериалов, основанный на кривой деформационных изгибных колебаний первого порядка консольной плиты. С использованием розеточных тензодатчиков измерялась продольная и поперечная деформация консольной плиты, в которой возбуждались колебания за счет ударного механизма с резиновым наконечником.

Достаточно распространенными методами косвенного измерения динамического коэффициента Пуассона являются методы на основе ультразвукового неразрушающего контроля. В методе тестирования UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) [20] используются два преобразователя для создания и приема ультразвукового импульса (электрического сигнала). При этом приемный преобразователь располагается точно на противоположной стороне испытываемого образца. Скорость ультразвуковых импульсов кубических образцов бетона определяется по времени прохождения продольных и поперечных волн через тело образца известной геометрии. Записанные значения используются для определения динамических значений коэффициента Пуассона и модуля упругости бетона. В статье [21] на примере бетона был применен энергетический подход для получения корреляции между модулем сдвига и частотой кручения свободной плиты на основе формы крутильных колебаний первого порядка. Также была получена зависимость между динамическим модулем упругости бетона и частотой изгиба первого порядка свободной плиты. Исходя из анализа напряжений и деформаций режима изгиба первого порядка бетонной консольной плиты и физической взаимосвязи между напряжением и деформацией в

состоянии плоского напряжения был предложен динамический метод определения коэффициента Пуассона для бетона.

Более сложные методы измерений (электронная интерферометрия, спекл-структуры и комбинация лазерной и видеоэкстензометрии) представлены в статье [22] в экспериментах на одноосное растяжение древесины ели, что позволило определить все шесть основных коэффициентов Пуассона. Кеунеске с соавторами [23] в качестве метода исследования использовали корреляцию цифровых изображений DIC для измерения распределения деформации. DIC (Digital Image Correlation) – это метод бесконтактного оптического измерения деформации поверхности образца при динамическом нагружении [24]. В [25] была применена процедура измерения двух независимых свойств вязкоупругого материала с использованием корреляции цифрового изображения во время испытания динамической вязкоупругости. Эффективность предложенного метода продемонстрирована при измерении свойств материала мягкой эпоксидной смолы. Пример измерения показывает, что с помощью предложенной процедуры можно получить эталонные кривые зависящего от времени динамического коэффициента Пуассона, а также других свойств материала для широкого диапазона времени. Методика DIC достаточно информативна, но технически очень сложно реализуема, требует скоростной камеры с высоким разрешением и лицензионного программного обеспечения для проведения математического корреляционного анализа последовательных изображений рабочей зоны образца, зарегистрированных цифровой камерой в течение его деформирования. Кроме того, для успешного применения этого метода образец должен быть особым образом подготовлен нанесением случайного точечного рисунка (спекл) на его поверхность.

В настоящей статье предлагается новый метод для определения динамического коэффициента Пуассона изотропных и анизотропных материалов. Основным измерительным инструментом является интерферометр миллиметрового диапазона.

### Метод исследования

Нагружение образца импульсной сжимающей нагрузкой производится на установке РСГ-60, реализующей методику Кольского [26] с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ). РСГ представляет собой два длинных мерных стержня, оснащенных тензорезисторами для измерения упругих импульсов деформации (падающего  $\varepsilon^I(t)$ , отраженного  $\varepsilon^R(t)$  и прошедшего  $\varepsilon^T(t)$ ), и короткий образец из исследуемого материала, размещенный между их торцами (рис. 1). Методика позволяет получать зависимости развития во времени осевых значений напряжения  $\sigma_x(t)$ , деформации  $\varepsilon_x(t)$  и скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_x(t)$  исследуемого образца и затем, после исключения параметра времени, строить диаграмму деформирования  $\sigma_x(\varepsilon_x)$  и зависимость  $\dot{\varepsilon}_x(\varepsilon_x)$  [27].

Для нагружения РСГ импульсной нагрузкой использована газовая пушка калибра 57 мм. Мерные стержни диаметром 60 мм и длиной по 1,5 м изготовлены из сплава Д16Т. Развитие во времени продольной деформации сжатия образца определяется по сигналам, зарегистрированным с помощью малобазных тензорезисторов, наклеенных на нагружающем мерном стержне:

$$\varepsilon_x(t) = -\frac{2C}{L_0} \int_0^t \varepsilon^R(t) dt, \quad (1)$$

где  $C$  – скорость упругих волн в мерном стержне,  $L_0$  – начальная длина образца,  $\epsilon^R(t)$  – отраженный от образца импульс упругой деформации в нагружающем стержне.

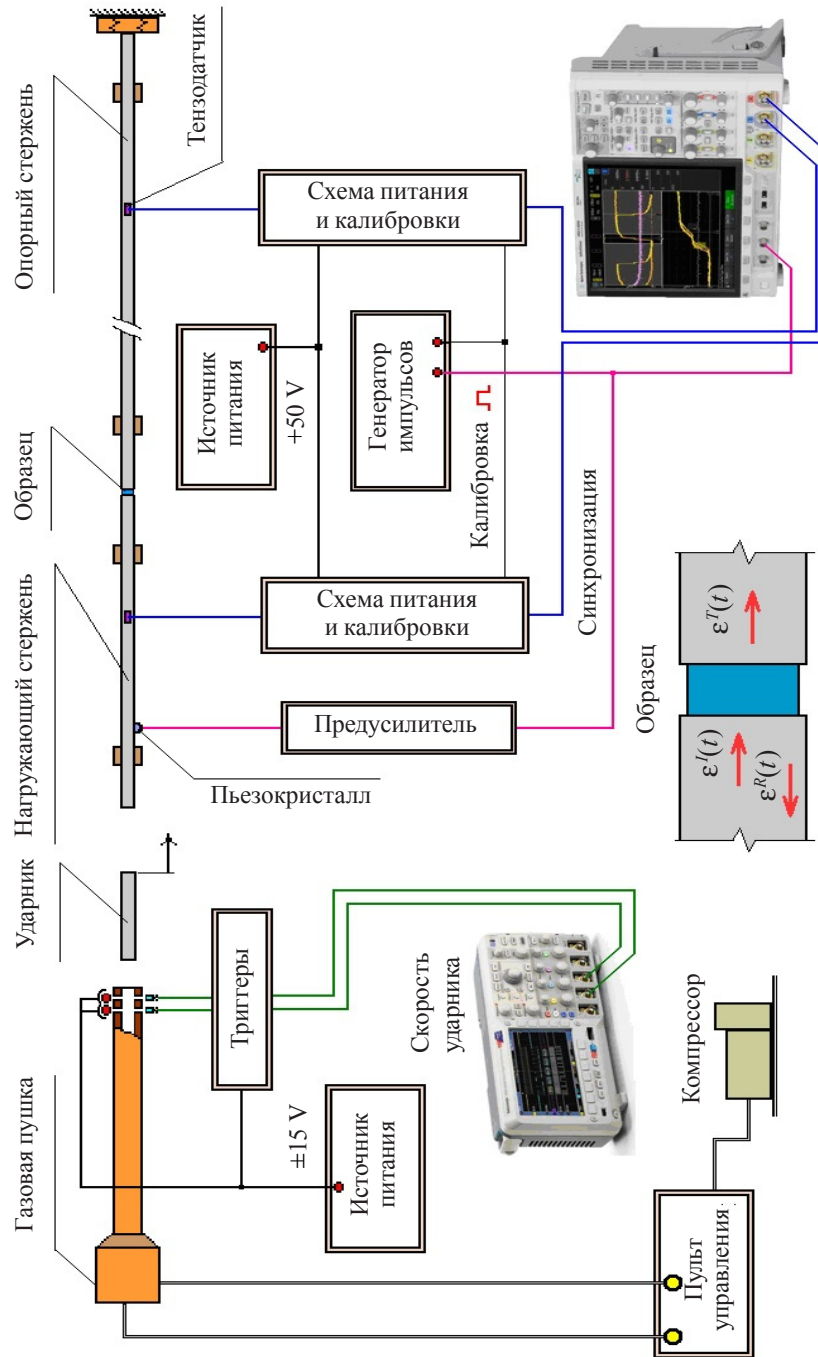


Рис. 1. Схема экспериментальной установки при испытаниях на сжатие

Для измерения развития во времени радиальной компоненты деформации образца  $\epsilon_r(t)$  использовался трехканальный интерферометр миллиметрового диапазона

на, разработанный в НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова. Интерферометр работает на длине волны 3,2 мм и используется в НИИ механики Нижегородского государственного университета для проведения плосковолновых экспериментов [28] и при изучении ударного взаимодействия твердых тел с преградами [29]. Несомненными достоинствами радиоинтерферометра при испытаниях структурно-неоднородных тел является достаточно большая область засветки, что позволяет нивелировать влияние структурной неоднородности поверхности и получать интегральное перемещение на выделенном участке боковой поверхности образца. К тому же радиоинтерферометр нетребователен к качеству обработки отражающей поверхности и может работать с поверхностью, на которой имеются неоднородности 0,1–0,2 мм.

Радиоинтерферометр миллиметрового диапазона – устройство, предназначенное для измерения перемещений физических объектов, способных отражать радиоволны. Такой интерферометр реализует схему Майкельсона в радиодиапазоне. Прибор включает в себя высокостабильный генератор электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона, передающие и приемные антенны, приемное устройство и блок регистрации данных (осциллограф). Высокочастотные элементы схемы соединены волноводным трактом. Одновременно можно регистрировать до трех независимых процессов

Измерения проводились с использованием двух независимых каналов, облучающих диаметрально противоположные зоны боковой поверхности образца, для исключения искажения регистрируемого радиального расширения образца за счет возможного смещения его как целого при нагружении либо при неосесимметричной раздаче образца вследствие анизотропии свойств исследуемого материала. Схема расположения антенн радиоинтерферометра для отдельной регистрации радиальных перемещений диаметрально противоположных зон деформации представлена на рис. 2.

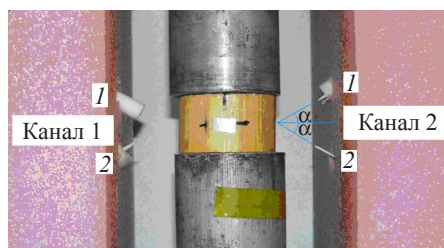


Рис. 2. Схема регистрации радиальной компоненты деформации радиоинтерферометром

В экспериментах использовались две группы приемных и передающих антенн, расположенных с противоположных сторон образца. Передающие 1 и приемные 2 антенны располагались в блоках из вспененного полиэтилена в виде прямоугольных параллелепипедов, размещенных на станине установки РСГ-60. Антенны размещались в горизонтальной плоскости, проходящей через ось ствола пушки, на одинаковом расстоянии от оси мерных стержней и образца. Антенная система радиоинтерферометра представляет собой «открытые концы» диэлектрических волноводов, по которым зондирующее излучение выводится из интерферометра и отраженный от образца сигнал возвращается обратно в интерферометр. Диэлектрические волноводы помещены в гибкую цилиндрическую оболочку из вспененного полиэтилена на всем протяжении от интерферометра. Передающая и приемная антенны

размещались в блоке из вспененного полиэтилена под фиксированным углом  $\alpha$  к нормали к боковой поверхности образца в точке облучения (см. рис. 2).

Создаваемые генератором непрерывные электромагнитные колебания постоянной мощности на фиксированной частоте через элементы волноводного тракта поступают на передающую антенну и излучаются в окружающую среду. Отраженный сигнал от движущегося объекта принимается приемной антенной и через волноводы поступает на вход приемного устройства. На другой вход приемного устройства с генератора подается опорное колебание с частотой, равной частоте излучаемой электромагнитной волны. Связь параметров интерферограммы с параметрами движения исследуемого объекта обусловлена эффектом Доплера. Текущая фаза и мгновенная частота интерферограммы несут информацию соответственно о перемещении и мгновенной скорости исследуемого объекта, от которого произошло отражение излучаемой интерферометром радиоволны.

Зондирующий сигнал имеет длину волны  $\lambda = 3,2$  мм в вакууме (частота 93,75 ГГц). Отраженный от поверхности радиосигнал имеет частоту, отличающуюся на величину доплеровского сдвига. В радиоинтерферометре принятый сигнал, содержащий доплеровский частотный сдвиг, с помощью гетеродина переносится на промежуточную частоту 2 ГГц, после чего регистрируется осциллографом Tektronix DPO 7254C с частотой дискретизации 20 ГГц. Одновременно регистрируется опорный сигнал (также перенесенный на промежуточную частоту) с генератора интерферометра на несмещенной частоте. Далее обработка полученных сигналов (опорного и отраженного, содержащего информацию о доплеровском сдвиге частоты) производится программно. Это позволяет избежать применения аппаратного детектирования сигналов и вносимых им дополнительных погрешностей.

Определение величины разности фаз между опорным и отраженным сигналами для каждой точки записи осуществлялось методом численной оптимизации. Обозначим разность фаз для  $n$ -й точки через  $\varphi_n$ . Изменение  $\varphi_n$  от точки к точке несет информацию о перемещении отражающей поверхности. Так как зондирование осуществляется под углом  $\alpha$  к направлению перемещения, то справедливо равенство, связывающее изменение  $\varphi_n$  от точки к точке и перемещение объекта  $\Delta x_n$ :

$$\varphi_n - \varphi_{n-1} = 2k\Delta x_n \cos \alpha,$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны излучения.

Для определения смещения боковой поверхности от начального положения производится суммирование полученных величин  $\Delta x_n$ :

$$X_n = \sum \Delta x_n.$$

### Результаты испытаний

Испытаниям подвергался образец сосны воздушной влажности в виде цилиндра диаметром 54 мм и высотой 30 мм. Для лучшего отражения зондирующего излучения от боковой поверхности образца на диаметрально противоположные зоны боковой поверхности образца в направлениях  $T$  и  $R$  наклеивались небольшие ( $5 \times 10$  мм) кусочки алюминиевой фольги (рис. 3).

Образцы нагружались вдоль волокон импульсами сжатия, создаваемыми за счет нагружения РСГ ударниками из сплава Д16Т диаметром 57 мм, разогнанными в стволе газовой пушки до скоростей 12–16 м/с. При такой скорости удара образец не испытывает необратимых деформаций и может быть испытан многократно. Им-

пульсы сжатия в мерных стержнях были зарегистрированы одновременно с сигналами интерферометра.

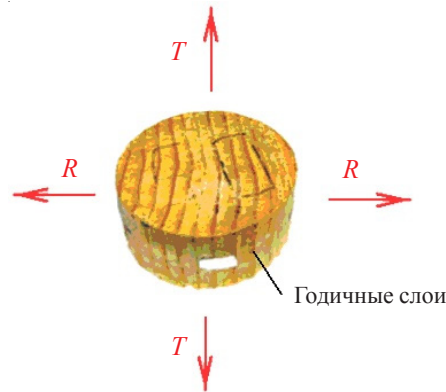


Рис. 3. Образец, подвергнутый испытаниям с регистрацией поперечной раздачи вдоль (направление  $T$ ) и поперек (направление  $R$ ) годичных слоев

В первом эксперименте регистрировалось раздельное перемещение боковых поверхностей образца вдоль годичных слоев. Полученные раздельно процессы развития поперечных перемещений приведены на рис. 4.

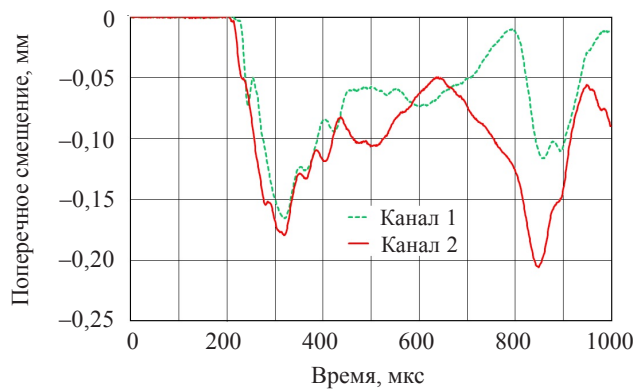


Рис. 4. Перемещения боковой поверхности образца в направлении  $T$

На рис. 4 хорошо видно, что перемещения областей боковой поверхности образца, расположенных на диаметрально противоположных его сторонах, достаточно близки, но имеют некоторые отличия, связанные с движением и поворотом образца как целого. Поперечная деформация образца при этом определялась как сумма боковых перемещений, отнесенная к диаметру образца. Процесс развития продольной деформации образца  $\epsilon_x(t)$  определялся по показаниям тензодатчиков на нагружающем мерном стержне по формуле (1). Полученные зависимости поперечной и продольной деформаций образца были синхронизованы между собой по времени (рис. 5). Затем строилась зависимость поперечной деформации от продольной (рис. 6). Кривая хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с тангенсом угла наклона  $\sim 0,2$ . Это и будет искомая компонента  $TX$  коэффициента Пуассона (в направлении вдоль годичных слоев).



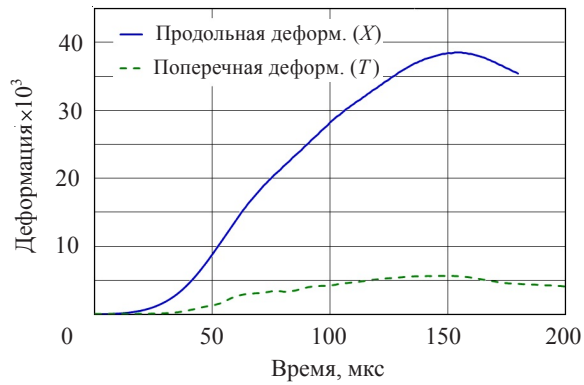


Рис. 5. Зависимости продольной и поперечной (направление  $T$ ) деформаций образца от времени

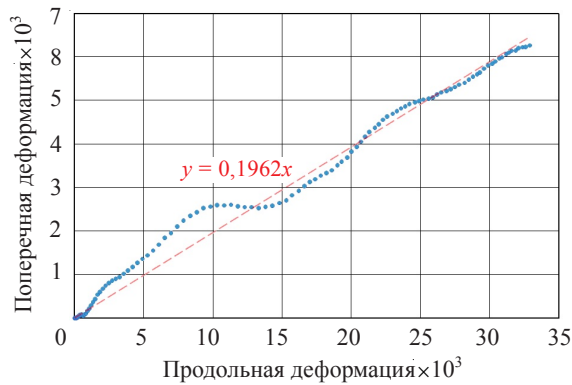


Рис. 6. Зависимость поперечной деформации (направление  $T$ ) от продольной

Поскольку образец в процессе испытаний не получил остаточных деформаций, следующий эксперимент был проведен с тем же образцом, но регистрация поперечной деформации проводилась поперек слоев дерева (направление  $R$  на рис. 3). Скорость ударника (и, соответственно, амплитуда продольной деформации образца) в этом эксперименте несколько отличалась от предыдущего эксперимента. На рис. 7 приведены зависимости боковых смещений от времени, полученные в результате обработки сигналов интерферометра.

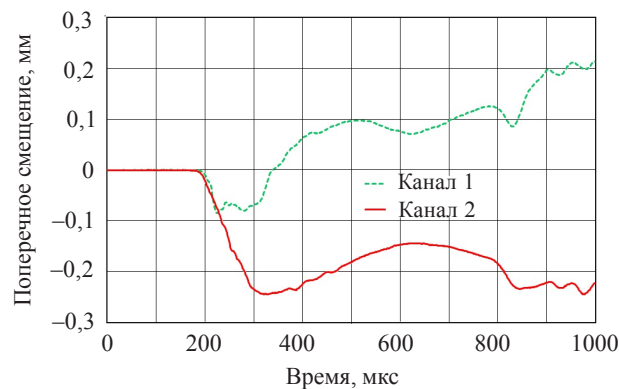


Рис. 7. Перемещения боковой поверхности образца в направлении  $R$

Хорошо видно, что вследствие существенной анизотропии свойств древесины перемещения с разных сторон образца совпадают только в начальные 50 мкс процесса. С ростом времени они становятся существенно различными, что подтверждает необходимость использования выбранной схемы измерения поперечной деформации анизотропного образца двумя группами антенн. Относительная поперечная деформация образца, как и в первом случае, определялась как сумма боковых перемещений, отнесенная к диаметру образца.

Процесс развития продольной деформации образца  $\epsilon_x(t)$ , как и раньше, определялся по показаниям тензодатчиков на нагружающем мерном стержне, согласно (1). Полученные зависимости поперечной и продольной деформаций образца были синхронизованы между собой по времени (рис. 8), и затем построена зависимость поперечной деформации от продольной (рис. 9). Полученное значение тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой, соответствующей компоненте  $RX$  коэффициента Пуассона, равно  $\sim 0,24$ .

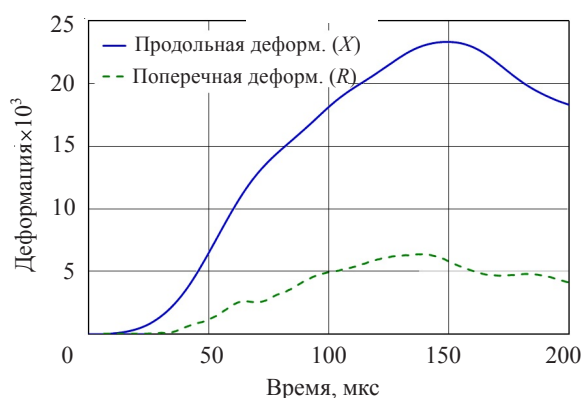


Рис. 8. Зависимости продольной и поперечной (направление  $R$ ) деформаций образца от времени

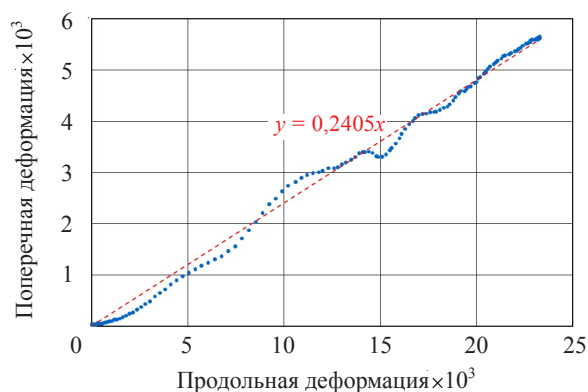


Рис. 9. Зависимость поперечной (направление  $R$ ) деформации образца от продольной

Таким образом, с использованием новой методики раздельного измерения двух компонент поперечной раздачи анизотропного материала удалось определить величины компонент динамического коэффициента Пуассона  $TX$  и  $RX$ , которые могут быть использованы при определении параметров математической модели древесины, необходимой для достоверных расчетов динамически нагруженных конструкций.

## Заклучение

Предложена методика измерения процесса развития двух ортогональных компонент поперечной деформации образца древесины при осесимметричном сжатии с помощью двухканального интерферометра Майкельсона миллиметрового диапазона. Измерения проводились с использованием двух независимых каналов, облучающих диаметрально противоположные зоны боковой поверхности образца. Получено, что вследствие сильной анизотропии свойств древесины при осесимметричном сжатии образца его поперечное расширение вдоль годичных слоев (направление  $T$ ) близко к симметричному, тогда как расширение поперек годичных слоев (направление  $R$ ) имеет существенное отличие от симметричного. Относительная поперечная деформация образца в обоих случаях определялась как сумма боковых перемещений, отнесенная к диаметру образца. В результате получены две компоненты динамического коэффициента Пуассона, которые составили  $\sim 0,2$  (в направлении вдоль годичных слоев) и  $\sim 0,24$  (в направлении поперек годичных слоев), которые могут быть использованы при определении параметров математической модели древесины, необходимой для достоверных расчетов динамически нагруженных конструкций.

### Список литературы

1. *Tensile Testing*. Ed. J.R. Davis. ASM International, 2004. 283 p.
2. Ahmed L. Dynamic measurements for determining Poisson's ratio of young concrete. *Nordic Concrete Research*. 2018. Vol. 58. Iss. 1. P. 95–106. DOI: 10.2478/ncr-2018-0006.
3. *ASTM C215-14. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens*. West Conshohocken, Pa, USA: ASTM International, 2014. 7 p. <https://www.astm.org/Standards/C215>.
4. Carrington H. The determination of values of Young's modulus and Poisson's ratio by the method of flexures. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1921. Vol. 41. Iss. 242. P. 206–210. <https://doi.org/10.1080/14786442108636212>.
5. Carrington H. The elastic constants of spruce as influenced by moisture. *Aeronautical Journal*. 1922. Vol. 26. Iss. 144. P. 462–471. <https://doi.org/10.1017/S2398187300139465>.
6. Carrington H. Young's modulus and Poisson's ratio for spruce. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1922. Vol. 43. Iss. 257. P. 871–878. <https://doi.org/10.1080/14786442208633943>.
7. Hörig H. Zur Elastizität des Fichtenholzes. I. Folgerungen aus Messungen von H. Carrington an Spruce (To the elasticity of spruce wood. I. Consequences of the measurements conducted by H. Carrington on Spruce). *Zeitschrift für technische Physik*. 1933. Vol. 12. Nr. 8. S. 369–379. <https://www.scienceopen.com/document?vid=b97d5031-646a-41c2-b76a-58f166ef1717>.
8. Voigt W. Allgemeine Formeln für die Bestimmung der Elastizitätskonstanten von Kristallen durch Beobachtung der Biegung und Drillung von Prismen (General formulas to determine the elastic constants of crystals by observing the bending and twisting of prisms). *Annalen der Physik*. 1882. Vol. 252. Nr. 6. S. 273–321. <https://doi.org/10.1002/andp.18822520607>.
9. Voigt W. Theoretische Studien über die Elastizitätsverhältnisse der Kristalle (Theoretical studies on the elasticity of crystals). *Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*. 1887. <https://www.worldcat.org/title/theoretische-studien-uber-die-elasticitatsverhaeltnisse-der-kristalle/oclc/634403068>.
10. Voigt W. *Lehrbuch der Kristallphysik (Textbook of Crystal Physics)*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 1966. 979 s. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-663-15884-4>.
11. Hörig H. Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen an Holz (Application of the elasticity theory of anisotropic bodies to wood measurements). *Archive of Applied Mechanics*. 1935. Vol. 6. S. 8–14. <https://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02086407>.

12. Wommelsdorff O. Dehnungs- und Querdehnungszahlen von Hölzern (Elongation and transverse strain constants of wood). *Dissertation*. Hannover: Leibniz Universität, 1966. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A046346732/Dehnungs-und-Querdehnungszahlen-von-H%C3%B6lzern>.
13. Neuhaus F.H. Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit (Elasticity constants of spruce wood in relation to the wood moisture content). *Dissertation*. Ruhr: Ruhr-Universität Bochum, 1981. 162 s. [https://books.google.ru/books/about/Elastizit%C3%A4tzzahlen\\_von\\_Fichtenholz\\_in\\_A.html?id=nRv0SgAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Elastizit%C3%A4tzzahlen_von_Fichtenholz_in_A.html?id=nRv0SgAACAAJ&redir_esc=y).
14. Niemz P., Caduff D. Untersuchungen zur Bestimmung der Poissonschen Konstanten an Fichtenholz (Investigations to determine the Poisson's ratio of spruce wood). *Holz als Roh- und Werkstoff*. 2008. Vol. 66. S. 1–4. <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0188-2>.
15. Wang G.-G., Zhang X., Gao Z.-Z., Wang Y.-L., Yu C., Wang Z. Dynamic testing and analysis of Poisson's ratio constants of timber. In: *2016 International Conference on Mechanics and Architectural Design*. Suzhou, Jiangsu, China, 14–15 May 2016. 2017. P. 9–18. [https://doi.org/10.1142/9789813149021\\_0002](https://doi.org/10.1142/9789813149021_0002).
16. Swamy R.N. Dynamic Poisson's ratio of Portland cement paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*. 1971. Vol. 1. Iss. 5. P. 559–583. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0008884671900603>.
17. Boiko A.V., Kulik V.M., Seoudi B., Chun H.H., Lee I. Measurement of dynamic Poisson's ratio and the form factor for a cylindrical sample. *Advances in Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM-2008): Proceedings International Conference*. 2008. P. 1411. [https://www.researchgate.net/publication/236589216\\_Measurement\\_of\\_dynamic\\_Poisson%27s\\_ratio\\_and\\_form\\_factor\\_for\\_a\\_cylindrical\\_sample](https://www.researchgate.net/publication/236589216_Measurement_of_dynamic_Poisson%27s_ratio_and_form_factor_for_a_cylindrical_sample).
18. Gao Z., Zhang X., Wang Y., Yang R., Wang G., Wang Z. Measurement of the Poisson's ratio of materials based on the bending mode of the cantilever plate. *BioResources*. 2016. Vol. 11. No 3. P. 5703–5721. DOI: 10.15376/BIORES.11.3.5703-5721.
19. Cao Y., Li M., Wang Z., Wang Y., Gao Z. Dynamic testing and analysis of Poisson's ratio of lumbars based on the cantilever-plate bending mode shape method. *Journal of Testing and Evaluation*. 2019. Vol. 47. Iss. 4. P. 2540–2550. <https://doi.org/10.1520/JTE20160521>.
20. Pal P. Dynamic Poisson's ratio and modulus of elasticity of pozzolana Portland cement concrete. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*. 2019. Vol. 9. No 2. P. 131–144. <https://core.ac.uk/download/pdf/228833802.pdf>.
21. Wang Z.H., Gao Z.Z., Wang Y.L., Cao Y., Wang G.G., Liu B., Wang Z. A new dynamic testing method for elastic, shear modulus and Poisson's ratio of concrete. *Construction & Building Materials*. 2015. Vol. 100. P. 129–135. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.060.
22. Kumpenza C., Matz P., Halbauer P., Grabner M., Steiner G., Feist F., Müller U. Measuring Poisson's ratio: mechanical characterization of spruce wood by means of non-contact optical gauging techniques. *Wood Science and Technology*. 2018. Vol. 52. Iss. 6. P. 1451–1471. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-018-1045-7>.
23. Keunecke D., Hering S., Niemz P. Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. *Wood Science and Technology*. 2008. Vol. 42. Iss. 8. P. 633–647. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0192-7>.
24. Valla A., Konnerth J., Keunecke D. et al. Comparison of two optical methods for contactless, full field and highly sensitive in-plane deformation measurements using the example of plywood. *Wood Science and Technology*. 2011. Vol. 45. Iss. 4. P. 755–765. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0394-7>.
25. Hoshino Y., Tamai K., Zhang Y., Yoneyama S. Direct measurement and master curve construction of viscoelastic Poisson's ratio with digital image correlation. *Strain*. 2018. Vol. 54. Iss. 6. P. 1–12. DOI: 10.1111/str.12294.
26. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0370-1301/62/11/302>.
27. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0734743X9593939G>.

28. Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Пархачёв В.В., Ламзин Д.А. Применение радиоинтерферометра для измерения скорости свободной поверхности в плосковолновом эксперименте. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №1. С. 118–126. <http://ppp.mech.unn.ru/index.php/ppp/article/view/436/417>.

29. Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Пархачёв В.В. Измерение перемещения и скорости ударника радиоинтерферометром. *Проблемы прочности и пластичности*. 2019. Т. 81. №1. С. 118–128. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-1-118-128.

#### References

1. *Tensile Testing*. Ed. J.R. Davis. ASM International. 2004. 283 p.
2. Ahmed L. Dynamic measurements for determining Poisson's ratio of young concrete. *Nordic Concrete Research*. 2018. Vol. 58. Iss. 1. P. 95–106. DOI: 10.2478/ncr-2018-0006.
3. *ASTM C215-14. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens*. West Conshohocken, Pa, USA. ASTM International. 2014. 7 p. <https://www.astm.org/Standards/C215>.
4. Carrington H. The determination of values of Young's modulus and Poisson's ratio by the method of flexures. *Lond. Edinb. Dublin. Philos. Mag. J. Sci.* 1921. Vol. 41. Iss. 242. P. 206–210. <https://doi.org/10.1080/14786442108636212>.
5. Carrington H. The elastic constants of spruce as influenced by moisture. *Aeronaut. J.* 1922. Vol. 26. Iss. 144. P. 462–471. <https://doi.org/10.1017/S2398187300139465>.
6. Carrington H. Young's modulus and Poisson's ratio for spruce. *Lond. Edinb. Dublin. Philos. Mag. J. Sci.* 1922. Vol. 43. Iss. 257. P. 871–878. <https://doi.org/10.1080/14786442208633943>.
7. Hörig H. Zur Elastizität des Fichtenholzes. I. Folgerungen aus Messungen von H. Carrington an Spruce (To the elasticity of spruce wood. I. Consequences of the measurements conducted by H. Carrington on Spruce). *Zeitschr. für techn. Phys.* 1933. Vol. 12. Nr. 8. S. 369–379. <https://www.scienceopen.com/document?vid=b97d5031-646a-41c2-b76a-58f166ef1717> (In German).
8. Voigt W. Allgemeine Formeln für die Bestimmung der Elastizitätskonstanten von Kristallen durch Beobachtung der Biegung und Drillung von Prismen (General formulas to determine the elastic constants of crystals by observing the bending and twisting of prisms). *Ann. Phys.* 1882. Vol. 252. Nr. 6. S. 273–321. <https://doi.org/10.1002/andp.18822520607> (In German).
9. Voigt W. Theoretische Studien über die Elastizitätsverhältnisse der Kristalle (Theoretical studies on the elasticity of crystals). *Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*. 1887. <https://www.worldcat.org/title/theoretische-studien-uber-die-elasticitatsverhaltnisse-der-kristalle/oclc/634403068> (In German).
10. Voigt W. *Lehrbuch der Kristallphysik (Textbook of Crystal Physics)*. Wiesbaden. Vieweg + Teubner Verlag. 1966. 979 s <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-663-15884-4> (In German).
11. Hörig H. Anwendung der Elastizitätstheorie anisotroper Körper auf Messungen an Holz (Application of the elasticity theory of anisotropic bodies to wood measurements). *Arch. Appl. Mech.* 1935. Vol. 6. S. 8–14. <https://link.springer.com/article/10.1007%2F2F02086407> (In German).
12. Wommelsdorff O. Dehnungs- und Querdehnungszahlen von Hölzern (Elongation and transverse strain constants of wood). *Dissertation*. Hannover. Leibniz Universität. 1966. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A046346732/Dehnungs-und-Querdehnungszahlen-von-H%C3%B6lzern> (In German).
13. Neuhaus F.H. Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit (Elasticity constants of spruce wood in relation to the wood moisture content). *Dissertation*. Ruhr: Ruhr-Universität Bochum, 1981. 162 s. [https://books.google.ru/books/about/Elastizit%C3%A4tzzahlen\\_von\\_Fichtenholz\\_in\\_A.html?id=nRv0SgAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Elastizit%C3%A4tzzahlen_von_Fichtenholz_in_A.html?id=nRv0SgAACAAJ&redir_esc=y) (In German).
14. Niemz P., Caduff D. Untersuchungen zur Bestimmung der Poissonschen Konstanten an Fichtenholz (Investigations to determine the Poisson's ratio of spruce wood). *Holz Roh. Werkstoff*. 2008. Vol. 66. S. 1–4. <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0188-2> (In German).
15. Wang G.-G., Zhang X., Gao Z.-Z., Wang Y.-L., Yu. C., Wang Z. Dynamic testing and analysis of Poisson's ratio constants of timber. In: *2016 International Conference on Mechanics and Architectural Design*. Suzhou, Jiangsu, China. 14–15 May 2016. 2017. P. 9–18. [https://doi.org/10.1142/9789813149021\\_0002](https://doi.org/10.1142/9789813149021_0002).

16. Swamy R.N. Dynamic Poisson's ratio of Portland cement paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*. 1971. Vol. 1. Iss. 5. P. 559–583. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0008884671900603>.
17. Boiko A.V., Kulik V.M., Seoudi B., Chun H.H., Lee I. Measurement of dynamic Poisson's ratio and the form factor for a cylindrical sample. *Advances in Heterogeneous Material Mechanics (ICHMM-2008): Proceedings International Conference*. 2008. P. 1411. [https://www.researchgate.net/publication/236589216\\_Measurement\\_of\\_dynamic\\_Poisson%27s\\_ratio\\_and\\_form\\_factor\\_for\\_a\\_cylindrical\\_sample](https://www.researchgate.net/publication/236589216_Measurement_of_dynamic_Poisson%27s_ratio_and_form_factor_for_a_cylindrical_sample).
18. Gao Z., Zhang X., Wang Y., Yang R., Wang G., Wang Z. Measurement of the Poisson's ratio of materials based on the bending mode of the cantilever plate. *BioResources*. 2016. Vol. 11. No 3. P. 5703–5721. DOI:10.15376/BIORES.11.3.5703-5721.
19. Cao Y., Li M., Wang Z., Wang Y., Gao Z. Dynamic testing and analysis of Poisson's ratio of lumbars based on the cantilever-plate bending mode shape method. *Journal of Testing and Evaluation*. 2019. Vol. 47. Iss. 4. P. 2540–2550. <https://doi.org/10.1520/JTE20160521>.
20. Pal P. Dynamic Poisson's ratio and modulus of elasticity of pozzolana Portland cement concrete. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*. 2019. Vol. 9. No 2. P. 131–144. <https://core.ac.uk/download/pdf/228833802.pdf>.
21. Wang Z.H., Gao Z.Z., Wang Y.L., Cao Y., Wang G.G., Liu B., Wang Z. A new dynamic testing method for elastic, shear modulus and Poisson's ratio of concrete. *Construction & Building Materials*. 2015. Vol. 100. P. 129–135. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.060.
22. Kumpenza C., Matz P., Halbauer P., Grabner M., Steiner G., Feist F., Müller U. Measuring Poisson's ratio: mechanical characterization of spruce wood by means of non-contact optical gauging techniques. *Wood Sci. Technol.* 2018. Vol. 52. Iss. 6. P. 1451–1471. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-018-1045-7>
23. Keunecke D., Hering S., Niemz P. Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. *Wood Sci. Technol.* 2008. Vol. 42. Iss. 8. P. 633–647. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0192-7>.
24. Valla A., Konnerth J., Keunecke D. et al. Comparison of two optical methods for contactless, full field and highly sensitive in-plane deformation measurements using the example of plywood. *Wood Sci. Technol.* 2011. Vol. 45. Iss. 4. P. 755–765. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0394-7>.
25. Hoshino Y., Tamai K., Zhang Y., Yoneyama S. Direct measurement and master curve construction of viscoelastic Poisson's ratio with digital image correlation. *Strain*. 2018. Vol. 54. Iss. 6. P. 1–12. DOI: 10.1111/str.12294.
26. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading. *Proc. Phys. Soc. Section B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0370-1301/62/11/302>.
27. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *Int. J. Impact Eng.* 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0734743X9593939G>.
28. Balandin V.V., Balandin V.I., Parkhachev V.V., Lamzin D.A. Primenenie radiointerferometra dlya izmereniya skorosti svobodnoy poverkhnosti v ploskovolnovom eksperimente [Using radio-interferometry for measuring free surface velocity in plane-wave experiments]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80. No 1. P. 118–126. <http://ppp.mech.unn.ru/index.php/ppp/article/view/436/417> (In Russian).
29. Balandin V.V., Balandin V.I., Parkhachev V.V. Izmerenie peremeshcheniya i skorosti udarnika radiointerferometrom [Measuring displacement and velocity of a striker using a radio-interferometer]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2019. Vol. 81. No 1. P. 118–128. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-1-118-128 (In Russian).

## MEASURING THE DYNAMIC POISSON'S RATIO OF WOOD WITH THE USE OF A RADIO INTERFEROMETER

**Balandin V.V.<sup>1</sup>, Balandin V.I.VI.<sup>1</sup>, Lomunov A.K.<sup>1</sup>, Parkhachev V.V.<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

A new method is proposed for determining the dynamic Poisson's ratio of both isotropic and anisotropic materials. The sample was loaded with a pulsed compressive load on a setup that implements the Kolsky technique using a split Hopkinson bar. The development in time of the longitudinal compressive deformation of the sample was determined by the signals recorded with the help of low-base strain gauges glued to the measuring bars. A millimeter-wave interferometer was used to measure the development of the radial components of the sample deformation in time. To assess the possible asymmetry of the radial expansion of the sample, measurements were carried out using two independent channels irradiating diametrically opposite zones of the lateral surface of the sample. The tests were carried out on a sample of pine with air humidity in the form of a cylinder 54 mm in diameter and 30 mm in height. A pulsed compressive load was loaded along the fibers. Using two channels of the radio interferometer, the separate displacement of the lateral surfaces of the sample was recorded both along and across the annual layers. It was determined that the displacements of the regions of the lateral surface of the sample during expansion along the annual layers are quite close, while during expansion across the annual layers they are very different. The relative transverse deformation of the sample in both cases was determined as the sum of lateral displacements divided by the sample diameter. As a result, two components of the dynamic Poisson's ratio were obtained, which amounted to  $\sim 0.2$  (in the direction along the annual layers) and  $\sim 0.24$  (in the direction across the annual layers).

*Keywords:* dynamic Poisson's ratio, Kolsky's method, radio interferometer, orthotropic medium, wood.