

С.Н. ОВСЯННИКОВ^{1,2}, О.В. ЛЕЛЮГА^{1,2}, А.С. САМОХВАЛОВ^{1,2},
Е.А. ЛЫМАРЕВА^{1,2}, Т.С. БОЛЬШАНИНА^{1,2}

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГО-ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Аналитическое решение задачи прохождения звука и вибрации по конструкциям и через стыки требует определения упруго-диссипативных свойств конструкционных и герметизирующих материалов светопрозрачных конструкций: динамического модуля упругости и коэффициента потерь. В данной работе исследованы и экспериментально установлены параметры динамического модуля упругости и коэффициента потерь некоторых строительных материалов в сравнении с ранее полученными данными других авторов. Для автоматизации и повышения точности измерения модуля упругости и коэффициента потерь конструкционных материалов была использована методика измерения с применением программного обеспечения и измерительной аппаратуры Zetlab. При проведении измерений динамического модуля упругости герметизирующих материалов применялось измерительное оборудование компании LDS. Получены уточненные значения динамического модуля упругости и коэффициента потерь материалов.

Ключевые слова: звукоизоляция, динамический модуль упругости, коэффициент внутренних потерь, резонансная частота, светопрозрачные конструкции.

S.N. OVSYANNIKOV^{1,2}, O.V. LELYUGA^{1,2}, A.S. SAMOKHVALOV^{1,2},
E.A. LYMAREVA^{1,2}, T.S. BOLSHANINA^{1,2}

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

²Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL STUDIES OF ELASTIC-DISSIPATIVE PROPERTIES OF STRUCTURAL AND SEALING MATERIALS OF TRANSLUCENT STRUCTURES

Abstract. The analytical solution of the problem of sound and vibration passage through structures and joints requires determining the elastic-dissipative properties of structural and sealing materials of translucent structures: the dynamic modulus of elasticity and loss factor. In this paper, the parameters of the dynamic modulus of elasticity and loss coefficient of some well-known building materials are investigated and experimentally established in comparison with previously obtained data from other authors. To automate and accurately measure the coefficient of dynamic characteristics of materials, a measurement technique was used, using Zetlab software and measuring equipment. When measuring the dynamic modulus of elasticity of sealing materials, LDS measuring equipment was used. The refined values obtained for the dynamic modulus of elasticity and the loss factor of materials allow them to be used in vibroacoustic calculations of translucent structures.

Keywords: sound insulation, dynamic modulus of elasticity, internal loss coefficient, resonance frequency, translucent structures.

Введение

Развитие теории расчета звукоизоляции многослойных светопро-зрачных конструкций с воздухообменными элементами позволяет в перспективе разработать методические основы проектирования шумозащитных окон, обеспечивающих требуемый акустический режим в помещениях гражданских зданий при высоких шумовых характеристиках внешних источников шума. Исследования многих авторов показывают актуальность развития теории расчета звукоизоляции многослойных ограждающих конструкций [1-4].

Решение задач расчета и проектирования звукоизоляции светопрозрачных конструкций зданий в шумозащитном исполнении требует разработки математических моделей, основанных на достоверных значениях упруго-диссипативных свойств конструкционных и герметизирующих материалов, входящих в их состав [5-7].

Расчетными характеристиками материалов при расчёте звукоизоляции являются модуль упругости и коэффициент внутренних потерь. В настоящее время рынок строительных материалов, используемых для звукоизоляции, достаточно разнообразен. Однако фирмы-производители не всегда приводят характеристики, необходимые при разработке и проектировании конструкций с заданными звукоизоляционными параметрами. В связи с этим актуальным является развитие методов измерения и проведение экспериментальных исследований для определения модуля упругости и коэффициента внутренних потерь различных конструкционных и герметизирующих материалов.

Для повышения точности и автоматизации процесса измерений упруго-диссипативных характеристик материалов могут быть использованы современные технологии и многофункциональные измерительные комплексы с возможностью обработки результатов персональным компьютером.

Работа выполнена при поддержке ФНИ РААСН, проект 3.1.4.6. и госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0003.

Методики измерений

Методики измерения динамических характеристик конструкционных материалов и результаты измерений для целого ряда традиционных конструкционных материалов описаны в книге Л. Кремера [8]. В работе [9] выполнен обзор данных измерения динамических характеристик материалов [8, 10-13], который показал значительный разброс данных. Для конструкционных материалов модуль упругости материала практически не зависит от частоты и находится в пределах от 2 до 30 ГПа для бетонов и кладки; до 210 ГПа для металлов, до 10 ГПа для материалов на основе древесины и около 60 ГПа для стекла. Измерение и уточнение динамических характеристик современных конструкционных и изоляционных материалов с использованием современной цифровой виброакустической аппаратуры является актуальной задачей для развития методов виброакустических расчетов зданий.

Как показано в работе [8] существующие методы измерения модуля упругости и коэффициента внутренних потерь конструкционных и изоляционных материалов отличаются друг от друга типом колебаний исследуемых образцов (изгибные или продольные), характером возбуждения колебаний (вынужденные или свободные), режимом работы (резонансные или нерезонансные). Самым простым и надежным методом для измерений динамического модуля упругости и коэффициента внутренних потерь изоляционных материалов является метод вынужденных резонансных колебаний по ГОСТ 16297-80, который можно реализовать как для малых, так и для больших статических нагрузок [9]. Для измерения модуля упругости конструкционных материалов целесообразно использовать метод стоячих изгибных волн. Метод стоячих изгибных волн применяют при испытании материалов, из которых можно изготовить протяженные по длине образцы.

Экспериментальные исследования упруго-диссипативных свойств конструкционных материалов резонансными методами:

1. Измерение модуля упругости по длине стоячей изгибной волны

Для конструкционных материалов наиболее простым и достоверным является метод определения модуля упругости по длине изгибной волны. Этот метод, основан на возбуждении стоячих изгибных волн в полубесконечном стержне. В полубесконечном стержне из исследуемого материала чистым тоном возбуждается стоячая изгибная волна, измеряется длина изгибной полуволны и вычисляется модуль упругости [14-16].

Для светопрозрачных конструкций интерес представляют само стекло и широко применяемый в настоящее время стеклопластик. Из этих материалов изготавливались стержни прямоугольного сечения разной толщины, шириной $b = 0,1$ м, длиной $l = 3,00$ м. Стержни наполовину длины помещались в демпфирующую смесь из песка и опилок в коробе с размерами $0,5 \times 0,5 \times 1,5$ м. На входе стержня в коробку засыпались опилки, средняя часть заполнялась опилками с песком, а оставшаяся часть песком.

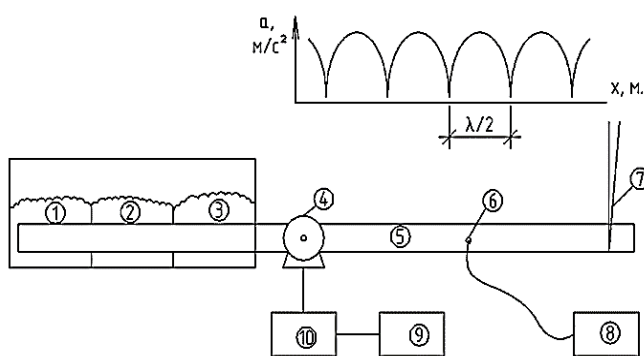


Рисунок 1 - Схема установки для измерения длины изгибной волны в полубесконечном стержне:

1 – песок, 2 – песок с опилками; 3 – опилки; 4 – электродинамический возбудитель колебаний;
5 – стержень; 6 – акселерометр; 7 – подвес на тонкой нити; 8 – анализатор спектра ZET 017-U8;
9 – усилитель; 10 – генератор

Свободный конец стержня подвешивался к потолку тонкой нитью. В месте входа стержня в короб с демпфирующей смесью стержни возбуждались электродинамическим возбудителем колебаний гармоническим сигналом на разных частотах. В результате в стержнях возбуждалась изгибная волна на исследуемой частоте, а в открытой части стержня формировалась стоячая изгибная волна за счет падающей на открытый конец и отраженной от него изгибной волны, что позволяло выявить расстояние между узлами стоячей волны и величину половины длины изгибной волны на заданной частоте (см. рисунок 1).

Возбуждающий тракт был составлен из электродинамического возбудителя колебаний, звукового генератора и усилителя. Приемный тракт состоял из анализатора спектра и акселерометра. Для измерения модуля упругости в стержне, возбуждаемом электродинамическим возбудителем колебаний, были измерены длины волн как удвоенное расстояние между соседними узлами стоячими изгибной волны.

Из элементарной теории изгибных волн в стержнях известна формула для определения фазовой скорости изгибной волны:

$$c_b = \sqrt{2\pi f \sqrt{\frac{B}{m}}}, \quad \text{м/с}, \quad (1)$$

где f – частота, Гц;

$$B = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{12} \quad \text{– изгибная жесткость стержня, Н м}^2;$$

h – толщина стержня, м;

$m = \rho \cdot b \cdot h$ – масса стержня длиной 1 м, кг/м;

ρ – плотность материала стержня, кг/м³.

Из формулы (1) можем получить уравнение для определения модуля упругости материала стержня по измеренному значению полудлины изгибной волны (2):

$$E = \left(\frac{\lambda}{2} \right)^4 \frac{48 \rho f^2}{\pi^2 h^2}, \text{ Па}, \quad (2)$$

где λ – длина волны, м;

f, ρ, h – те же что в формуле (1).

Стержни из стекла имели толщину 6 мм, из стеклопластика – 10 мм. Выбор известных материалов также был обусловлен планами проведения виброакустических экспериментов на моделях светопрозрачных конструкций. Выбор известных материалов также был обусловлен планами проведения виброакустических экспериментов на моделях светопрозрачных конструкций. Результаты измерений для материалов сведены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты измерения модуля упругости стеклопластика

Частота f , Гц	Полудлина изгибной волны $\lambda/2$, м	Длина изгибной волны λ , м	Фазовая скорость изгибной волны $c_b = f \cdot \lambda$, м/с	Модуль упругости E , Па
100	0,42	0,84	84	$2,51 \cdot 10^{10}$
125	0,39	0,78	97,5	$2,92 \cdot 10^{10}$
160	0,344	0,688	110,08	$2,89 \cdot 10^{10}$
200	0,305	0,61	122	$2,79 \cdot 10^{10}$
250	0,272	0,544	136	$2,76 \cdot 10^{10}$
315	0,252	0,504	158,76	$3,23 \cdot 10^{10}$
400	0,23	0,46	184	$3,61 \cdot 10^{10}$
500	0,2	0,4	200	$3,23 \cdot 10^{10}$
600	0,18	0,36	216	$3,05 \cdot 10^{10}$
800	0,155	0,31	248	$2,98 \cdot 10^{10}$
1000	0,138	0,276	276	$2,93 \cdot 10^{10}$
Среднее значение				$2,99 \cdot 10^{10}$

Таблица 2 – Результаты измерения модуля упругости стекла

Частота f , Гц	Полудлина изгибной волны $\lambda/2$, м	Длина изгибной волны λ , м	Фазовая скорость изгибной волны $c_u = f \cdot \lambda$, м/с	Модуль упругости E , Па
100	0,345	0,69	69	$4,63 \cdot 10^{10}$
125	0,308	0,616	77	$4,60 \cdot 10^{10}$
160	0,273	0,546	87,36	$4,65 \cdot 10^{10}$
200	0,26	0,52	104	$5,98 \cdot 10^{10}$
250	0,24	0,48	120	$6,79 \cdot 10^{10}$
315	0,22	0,44	138,6	$7,61 \cdot 10^{10}$
400	0,19	0,38	152	$6,82 \cdot 10^{10}$
500	0,184	0,368	184	$9,38 \cdot 10^{10}$
600	0,155	0,31	186	$6,80 \cdot 10^{10}$
800	0,133	0,266	212,8	$6,55 \cdot 10^{10}$
1000	0,12	0,24	240	$6,79 \cdot 10^{10}$
Среднее значение				$6,42 \cdot 10^{10}$

Таким образом, были экспериментально установлены средние значения модуля упругости для стеклопластика – $2,99 \cdot 10^{10}$ Па и стекла – $6,42 \cdot 10^{10}$ Па. Сравнение измеренных значений модуля упругости исследованных конструкционных материалов с данными, приведенными в литературе [8-10] показывает, что они хорошо согласуются, с учетом погрешности на условия измерения, например, модуль упругости для стекла по литературным данным [8, 9, 17] составляет $6 \cdot 10^{10}$ Па, а измеренный $6,42 \cdot 10^{10}$ Па, а значения модуля упругости стеклопластика на сайтах производителей варьируется от $1,92$ до $2,2 \cdot 10^{10}$ Па. Это позволяет сделать вывод о том, что представленная в работе методика и измерительный стенд могут быть широко использованы при измерении модуля упругости конструкционных материалов. Целесообразно также произвести измерения модулей упругости других известных материалов, применяемых в ограждающих и светопрозрачных конструкциях.

2. Измерения коэффициента внутренних потерь с помощью измерительного оборудования и программного обеспечения Zetlab

Для измерения коэффициента потерь использован метод, основанный на анализе резонансной кривой и определении ее ширины, Δf :

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_{\text{рез}}} \quad (3)$$

Ширина резонансной кривой отсчитывается на уровне 0,707 от резонансной амплитуды. Если частотная зависимость колебаний конструкции выражена на логарифмическом масштабе, то на каждой резонансной частоте ширину данной резонансной кривой можно определить на уровне 3 дБ от ее вершины (см. рисунок 2).

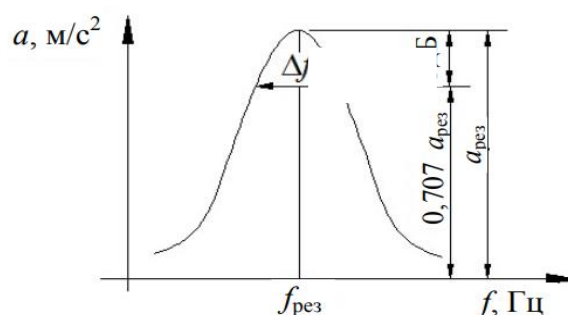


Рисунок 2 – К определению характеристик затухания колебательной системы с трением по ширине резонансной кривой

Для автоматизации и повышения точности измерения коэффициента внутренних потерь была использована цифровая аппаратура Zetlab [18, 19]. Стенд для измерения коэффициента внутренних потерь состоял из стержня исследуемого материала, подвешенного на тонких длинных нитях (см. рисунок 3). К подвешенному образцу на половине длины стержня 0,5 м закреплен датчик (акселерометр). К краю листа подведен электродинамический возбудитель колебаний. С помощью виброметра и программы Zetlab, был получен график зависимости виброускорения от частоты на промежутке от 0 до 1000 Гц определены частоты, на которых в конструкции возникают низшие формы изгибных колебаний. Определив частоту резонанса и ширину резонансной кривой, можем рассчитать коэффициент внутренних потерь η по формуле (3). Для данного эксперимента использованы специально подготовленные стержни шириной $b = 0,1$ м, длиной $l = 1$ м. Образцы из стекла, толщиной 6 мм и из стеклопластика, толщиной 10 мм.

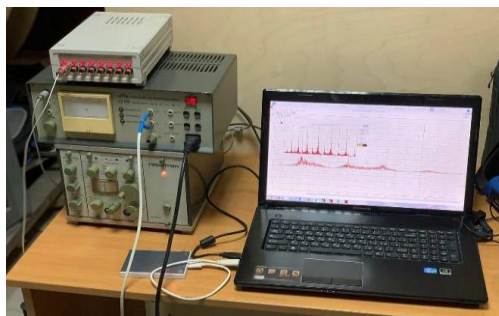
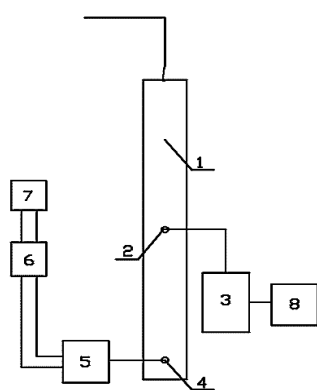


Рисунок 3 – Стенд для измерения коэффициента внутренних потерь:
 1 – исследуемый образец; 2 – акселерометр; 3 – анализатор спектра ZET 017-U8;
 4 – точка приложения рабочего органа ЭДВ; 5 – электродинамический возбудитель колебаний;
 6 – усилитель; 7 – генератор; 8 – персональный компьютер

По построенным на ПК графикам зависимости виброускорения от частоты определены (см. рисунок 4) точные значения коэффициентов внутренних потерь материалов. Результаты измерений коэффициента потерь сведены в таблицы 3 и 4.

Таблица 3 – Результаты измерения коэффициента потерь стеклопластика

№ измерения	Частота f , Гц	Длина волны λ , м	Скорость волны c , м/с	Коэффициент потерь, η
1	22,50	1,849201	41,6070	0,1156
2	53,75	1,196427	64,3079	0,0722
3	90,00	0,924600	83,2140	0,0319
4	135,00	0,754933	101,9160	0,0147
5	191,25	0,634271	121,3042	0,0115
6	256,25	0,547953	140,4130	0,0075
7	330,00	0,482857	159,3427	0,0061
8	411,25	0,432536	177,8805	0,0047
9	505,00	0,390328	197,1156	0,0068
10	606,25	0,356246	215,9738	0,0053
Среднее значение на частотах свыше 100 Гц				0,0081

Таблица 4 – Результаты измерения коэффициента потерь стекла

№ измерения	Частота f , Гц	Длина волны λ , м	Скорость волны c , м/с	Коэффициент потерь, η
1	26,333	1,45846169	38,40567	0,006
2	87,5	0,80009429	70,00825	0,003
3	171,167	0,57205156	97,91635	0,0018
4	287,669	0,44126417	126,93802	0,0016
5	404,833	0,37196942	150,58550	0,0005
6	652	0,29310377	191,10365	0,0004
7	1061,5	0,22971280	243,84014	0,00047
Среднее значение на частотах свыше 100 Гц				0,00095

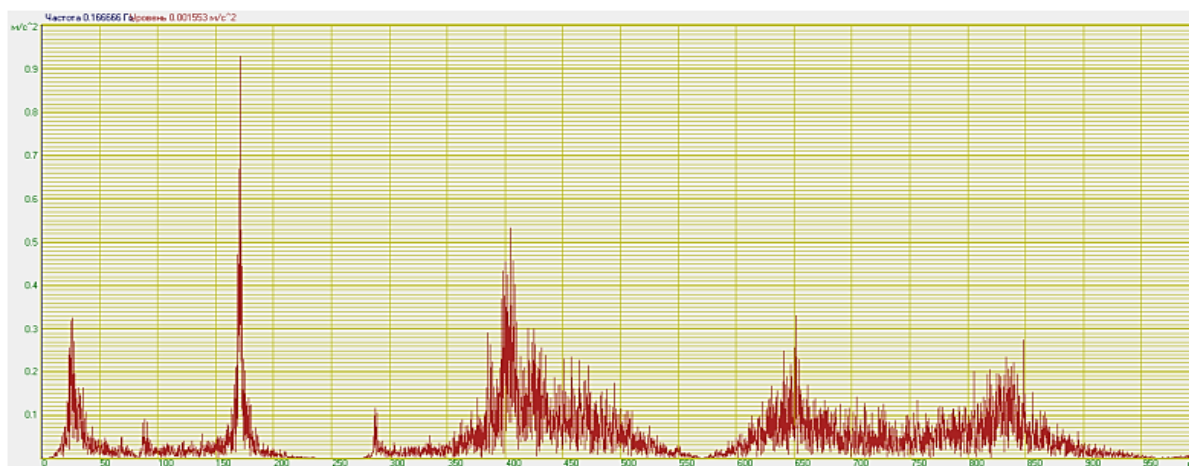


Рисунок 4 – График зависимости виброускорения от частоты. Исследуемый образец стекло

Как видим, из таблиц, коэффициент потерь имеет существенно большие значения в области низких частот, но на частотах свыше 100 Гц, на которых и производятся виброакустические расчеты для зданий, зависимость коэффициента потерь от частоты существенно меньше и расчеты можно вести по средним значениям на разных модах колебаний.

Сравнение результатов измерений коэффициента внутренних потерь с литературными данными показывает, что измеренные с использованием современной цифровой аппаратуры коэффициенты потерь оказались на порядок ниже значений, приведенных в литературе, например, коэффициент потерь для стекла [8, 9, 17] по литературным данным составляет от 0,6 до $2 \cdot 10^{-3}$, а измеренный $\eta = 0,00095$. Для стеклопластика значения коэффициента внутренних потерь в литературных данных отсутствуют, это подтверждает потребность в измерении и уточнении значений коэффициента внутренних потерь конструкционных материалов. Интерес представляют также измерения динамических характеристик конструкционных материалов в вакууме в целях исключить влияние потерь на излучение при определении коэффициента внутренних потерь в материале.

Экспериментальные исследования упруго-диссипативных свойств герметизирующих материалов

Динамический модуль упругости E_d определяется при продольных колебаниях нагруженного образца по величине собственной частоты колебаний, при которой амплитуда ускорения (или скорости, или смещения) становится наибольшей (резонанс). Определение динамического модуля упругости звукоизоляционных материалов производится в соответствии с методикой ГОСТ 16297-80 «Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний». Принцип данных измерений основан на формировании колебательной системы с одной степенью свободы, в которой по частоте собственных колебаний определяется продольная динамическая жесткость образца [20, 21]. Конструктивная и расчетная схемы для определения динамического модуля упругости и коэффициента потерь приведены на рисунке 5.

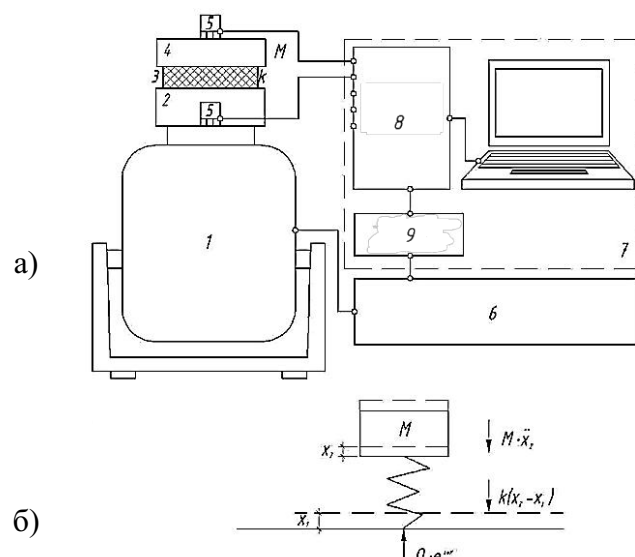


Рисунок 5 – Схемы стенда для определения динамического модуля упругости и коэффициента потерь при малых статических нагрузках: а) конструктивная схема:

1 – вибростенд, 2 – столик, 3 – образец, 4 – груз, 5 – акселерометр, 6 – усилитель мощности, 7 – система сбора и анализа данных; 8 – анализатор сигнала; 9 – генератор сигнала;

б) расчетная схема

При проведении измерений применялось измерительное оборудование компании LDS, включающее в себя электродинамический возбудитель LDS V406 M4-CE, усилитель мощности LDS PA100E CE, система контроля вибрации LDS Laser USB LAS 200 и программное обеспечение Shaker Control, установленное на персональный компьютер. Фотографии измерительного оборудования приведены на рисунке 6.

а)



б)



Рисунок 6 – Фотографии измерительного оборудования:

а) электродинамический возбудитель LDS V406 M4-CE;

б) усилитель мощности LDS PA100E CE, система контроля вибрации LDS Laser USB LAS 200

Особенностью стенда является обеспечение постоянного значения виброускорения на столике возбудителя колебаний $a_1 = \text{const}$, независимо от частоты. Динамический модуль упругости E_d , Н/м² (10^{-1} кгс/м²), для материалов и изделий вычисляется по формуле (4) [22-24]:

$$E_d = \frac{4\pi^2 f^2 M h}{F}, \quad \text{Па}, \quad (4)$$

где f – частота резонанса, Гц;

M – масса груза, кг;

h – высота образца под нагрузкой, м;

F – общая площадь одновременно испытываемых образцов, м².

При каждом испытании может быть вычислен коэффициент потерь по формуле (5):

$$\eta = \frac{1}{\left[\left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 - 1 \right]^{0,5}}, \quad (5)$$

где a_1 – амплитуда ускорения, м/с² столика вибратора;

a_2 – амплитуда ускорения, м/с², груза при частоте резонанса f .

Для проведения измерений были подготовлены образцы герметизирующего материала стеклопакетов (тиокол) диаметром 0,01 м и толщиной 0,004 м. Одновременно на виброплатформу устанавливалось по 3 образца, которые пригружались грузами различной массы.

При проведении измерений были применены грузы массой 0,742 кг, 1,623 кг и 3,189 кг, что соответствует давлению 0,031 мПа, 0,068 мПа и 0,133 мПа на измеряемые образцы, соответственно. Результаты измерений динамического модуля упругости и коэффициента потерь приведены в таблице 5 и на графике (см. рисунок 7).

Таблица 5 – Результаты измерений динамического модуля упругости и коэффициента потерь герметизирующего материала (тиокол)

№ п/п	Наименование материала	Динамический модуль упругости E_d , мПа, и коэффициент потерь материала η звукоизоляционного слоя при нагрузке на звукоизоляционный слой, мПа					
		0,031		0,068		0,133	
		E_d	η	E_d	η	E_d	η
1.	Образец 1	3,61	0,739	16,46	0,599	22,36	0,483
2.	Образец 2	4,41	0,73	25,36	0,618	27,38	0,394
3.	Образец 3	4,91	0,348	18,01	0,378	29,96	0,921
	Среднее значение	4,30		19,94		26,56	

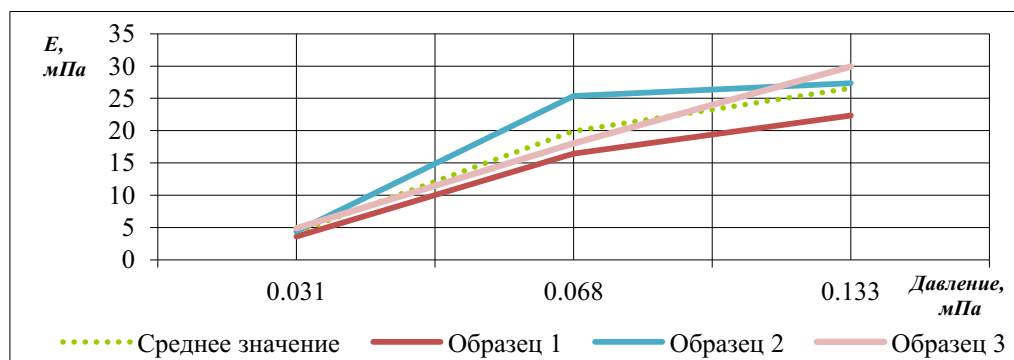


Рисунок 7 – Результаты измерений динамического модуля упругости

Аналогичные измерения были проведены для образцов бутилсодержащей мастики, используемой для приклеивания стекол к дистанционным рамкам при изготовлении стеклопакетов. Подготовлены образцы герметизирующего материала диаметром 0,029 м и толщиной 0,006 м. На виброплатформу устанавливался 1 образец, который пригружался грузами различной массы: 0,742 кг, 1,623 кг и 3,189 кг. Результаты измерений динамического модуля упругости и коэффициента потерь приведены в таблице 6 и на графике (см. рисунок 8).

Таблица 6 – Результаты измерений динамического модуля упругости и коэффициента потерь герметизирующего материала (бутилсодержащая мастика)

№ п/п	Наименование материала	Динамический модуль упругости E_d , мПа, и коэффициент потерь материала η звукоизоляционного слоя при нагрузке на звукоизоляционный слой, мПа					
		0,005		0,010		0,020	
		E_d	η	E_d	η	E_d	η
1.	Образец 1	59,13	1,31	106,62	1,25	74,73	1,02
2.	Образец 2	39,15	1,51	119,38	1,24	88,85	1,05
3.	Образец 3	39,68	1,43	113,20	1,24	102,85	1,08
	Среднее значение	45,99		113,07		88,81	

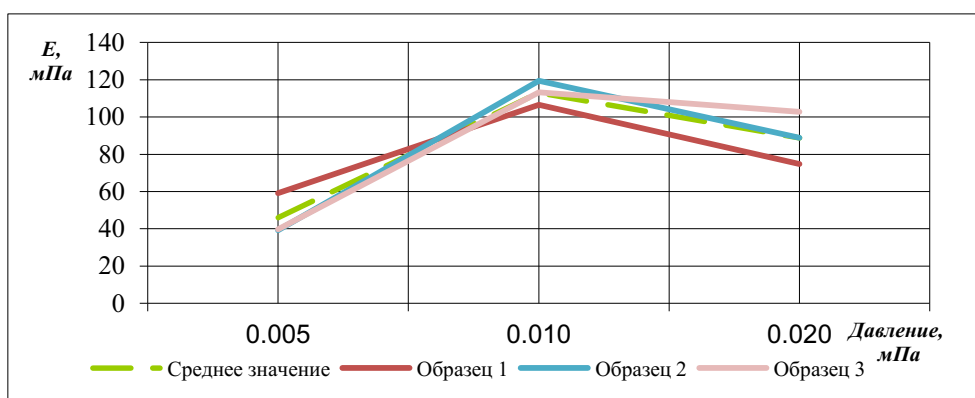


Рисунок 8 – Результаты измерений динамического модуля упругости

Выводы

Современное цифровое измерительное оборудование, имеющее программное обеспечение, позволяет автоматизировать и повысить точность измерений динамических характеристик конструкционных и герметизирующих материалов светопрозрачных конструкций. Для измерений параметров вибрации на пластинах использованы современные контактные методы измерений с использованием многоканального виброакустического анализатора. Полученные уточненные значения динамического модуля упругости и коэффициента потерь материалов позволяют использовать их в виброакустических расчетах светопрозрачных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова А.В., Кочкин Н.А., Шубин И.Л., Кочкин А.А. Проектирование звукоизоляции двойных ограждающих конструкций из слоистых элементов с вибропоглощением // Жилищное строительство. 2022. № 6. С. 3-7.
2. Монич Д.В. Методология расчета звукоизоляции и разработки рациональных конструктивных решений легких ограждающих конструкций // Приволжский научный журнал. 2022. № 1 (61). С. 52-61.
3. Кочкин А.А., Шашкова Л.Э., Кочкин Н.А., Иванова А.В. Способы повышения звукоизоляции ограждающих конструкций зданий // Приволжский научный журнал. 2022. № 1 (61). С. 41-51.
4. Monich D.V., Matveeva I.V., Grebnev P.A., Kuzmin D.S. Research of the influence of geometric parameters of rooms for sound insulation of lightweight partitions // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2022. No. 3 (55). Pp.7-18.
5. Лелюга О.В. Теоретические и экспериментальные исследования виброакустических систем с малым количеством элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 144-157.
6. Овсянников С.Н., Большанина Т.С. Статистическая энергетическая модель прохождения внешнего шума в помещения здания // Жилищное строительство. 2021. № 11. С. 34-39.
7. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Виброакустический подход к расчету звукоизоляции многослойных остеклений. Материалы XI Международной научно-практической конференции «Инвестиции,

- градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения». Томск, 2021. С. 410-416.
8. Cremer L., Heckl M., Ungar E. Structure-borne sound. Springer Verlag, 1973. 528 p.
 9. Овсянников С.Н. Распространение звуковой вибрации в гражданских зданиях. Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2000. 378 с.
 10. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. Л.: Судостроение, 1986. 368 с.
 11. Юдин Е.Я., Осипов Г.Л., Федосеева Е.Н. и др. Звукопоглощающие звукоизоляционные материалы. М.: Стройиздат, 1966. 248 с.
 12. Крейтан В.Г., Смирнов А.Е., Симбирский В.И. Методика и результаты исследований коэффициентов потерь на крупных бетонных образцах. Жилищно-гражданское строительство (отечественный и зарубежный опыт): Экспресс-информация. ЦНТИ Госгражданстроя. 1983. Вып. 6. С. 15-20.
 13. Heckl M.A. Investigation on the vibration of grillages and other simple beam structures. J. of the Acoustical Society of America. 1964. V. 36. No. 7. Pp. 1335-1343.
 14. Старцева О.В. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции перегородок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2 (39). С. 176-184.
 15. Старцева О.В. Исследование звукоизоляции однослойных и двухслойных перегородок // Жилищное строительство. 2012. № 6. С. 43-46.
 16. Овсянников С.Н., Лелюга О.В., Махмудов У.А.У. Исследование модуля упругости конструкционных материалов звукоизолирующих конструкций // Материалы X Международной научно-практической конференции «Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения». Томск, 2020. С. 381-387.
 17. Kirsten Th., Muller H.W. Berichte des Beirats fur Bauforschung beim Bundesminister fun Wohnungsbau, 13, Korperschall in Gebauden Berlin Ernst & Sohn, 1960.
 18. Овсянников С.Н. Лелюга О.В., Махмудов У.А., Щурова Н.Е. Исследование упруго-диссипативных свойств конструкционных материалов ограждающих конструкций // Бюллетень строительной техники. 2020. № 6(1030). С. 28-31.
 19. Ovsiannikov S.N., Leliuga O.V., Makhmudov U.A. Experimental studies of the elastic-dissipative properties of structural materials and the calculation of sound insulation of building envelopes based on refined characteristics by the SEA method. International Scientific and Technology Conference "Far East Con". Vladivostok, 2020. Vol. 1079, 042063. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/1079/4/042063
 20. . Росин Г.С. Установка для измерений динамических характеристик упругих материалов резонансным методом // Заводская лаборатория. 1960. Т. 26. № 10. С. 1180-1181.
 21. . Заборов В.И., Росин Г.С. Измерение динамических параметров звукоизолирующих материалов // Акустический журнал. 1961. Т. 7. № 1. С. 92-94.
 22. Скрипченко Д.С. Исследование динамических характеристик звукоизоляционных материалов при различных видах нагрузок // Материалы II Международной научной конференция «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы». Томск, 2015. С. 139-142.
 23. Овсянников С.Н., Скрипченко Д.С. Исследование звукоизоляционных свойств материалов при различных статических нагрузках // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 4 (364). С. 40-44.
 24. Шубин И.Л., Скрипченко Д.С., Кочкин Н.А. Исследование динамических характеристик вибродемпфирующих материалов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 6 (994). С. 18-19.

REFERENCES

1. Ivanova A.V., Kochkin N.A., Shubin I.L., Kochkin A.A. Proektirovanie zvukoizolyatsii dvoynykh ograzhdayushchikh konstruksii iz sloistnykh elementov s vibropogloshcheniem [Sound insulation design for double enclosing structures made of layered elements with vibration absorption]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2022. No. 6. Pp. 3-7. (in rus).
2. Monich D.V. Metodologiya rascheta zvukoizolyatsii i razrabotki ratsional'nykh konstruktivnykh reshenii legkikh ograzhdayushchikh konstruksii [Methodology for calculating sound insulation and developing rational design solutions for lightweight building envelopes]. Privolzhsky scientific journal. 2022. No. 1 (61). Pp. 52-61. (in rus).
3. Kochkin A.A., Shashkova L.E., Kochkin N.A., Ivanova A.V. Sposoby povysheniya zvukoizolyatsii ograzhdayushchikh konstruksii zdaniy [Methods for improving the sound insulation of building envelopes]. Privolzhsky scientific journal. 2022. No. 1 (61). Pp. 41-51. (in rus).
4. Monich D.V., Matveeva I.V., Grebnev P.A., Kuzmin D.S. Research of the influence of geometric parameters of rooms for sound insulation of lightweight partitions. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2022. No. 3 (55). Pp. 7-18.
5. Leliuga O.V. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vibroakusticheskikh sistem s malym kolichestvom elementov [Theoretical and experimental studies of vibroacoustic systems with a small number of elements]. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2019. Vol. 21. No. 3. Pp. 144-157. (in rus).

6. Ovsyannikov S.N., Bolshanina T.S. Statisticheskaya energeticheskaya model' prokhozhdeniya vneshnego shuma v pomeshcheniya zdaniya [Statistical energy model of the passage of external noise into the premises of the building]. Housing construction. 2021. No. 11. Pp. 34-39. (in rus).
7. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Vibroakusticheskii podkhod k raschetu zvukoizolyatsii mnogosloinykh osteklenii [Vibroacoustic approach to the calculation of sound insulation of multi-layer glazing]. Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Investments, urban planning, real estate as drivers of the socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population." Tomsk, 2021. Pp. 410-416.
8. Cremer L., Heckl M., Ungar E. Structure-borne sound. Springer Verlag, 1973. 528 p.
9. Ovsyannikov S.N. Rasprostraneniye zvukovoi vibratsii v grazhdanskikh zdaniyakh [Propagation of sound vibration in civil buildings]. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2000. 378 p. (in rus).
10. Bogolepov I.I. Promyshlennaya zvukoizolyatsiya [Industrial soundproofing]. L.: Shipbuilding, 1986. 368 p. (in rus).
11. Yudin E.Ya., Osipov G.L., Fedoseeva E.N. etc. Zvukopogloshchayushchie zvukoizolyatsionnye materialy [Sound-absorbing sound-proof materials]. Moscow: Stroyizdat, 1966. 248 p. (in rus).
12. Kreitan V.G., Smirnov A.E., Simbirsky V.I. Metodika i rezul'taty issledovaniy koeffitsientov poter' na krupnykh betonnykh obraztsakh [Methodology and results of studies of loss factors on large concrete samples]. Housing and civil construction (domestic and foreign experience): Express information. TsNTI Gosgrazhdanstroy. 1983. Issue. 6. Pp. 15-20. (in rus).
13. Heckl M.A. Investigation on the vibration of grillages and other simple beam structures. J. of the Acoustical Society of America. 1964. V.36. No. 7. Pp.1335-1343.
14. Startseva O.V. Ovsyannikov S.N. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya zvukoizolyatsii peregorodok [Theoretical and experimental studies of sound insulation of partitions]. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2013. No. 2 (39). Pp. 176-184. (in rus).
15. Startseva O.V. Ovsyannikov S.N. Issledovanie zvukoizolyatsii odnosloinykh i dvukhsloinykh peregorodok [Study of sound insulation of single-layer and two-layer partitions]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2012. No. 6. Pp. 43-46. (in rus).
16. Ovsyannikov S.N., Lelyuga O.V., Makhmudov U.A.U. Issledovanie modulya uprugosti konstruksionnykh materialov zvukoizoliruyushchikh konstruksii [Study of the modulus of elasticity of structural materials of soundproof structures]. Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Investitsii, stroitel'stvo, nedvizhimost' kak draivery sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya territorii i povysheniya kachestva zhizni naseleniya» [Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference "Investments, construction, real estate as drivers of the socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population"]. Tomsk, 2020. Pp. 381-387.
17. Kirsten Th., Muller H. W. Berichte des Beirats fur Bauforschung beim Bundesminister fun Wohnungs-bau, 13, Korperschall in Gebauden Berlin Ernst & Sohn, 1960.
18. Ovsyannikov S.N. Lelyuga O.V., Makhmudov U.A., Shchurova N.E. Issledovanie uprugo-dissipativnykh svoystv konstruksionnykh materialov ograzhdayushchikh konstruksii [Investigation of elastic-dissipative properties of structural materials of building envelopes]. Bulletin of building technology. 2020. No. 6(1030). Pp. 28-31. (in rus).
19. Ovsyannikov S.N., Leliuga O.V. and Makhmudov U.A. Experimental studies of the elastic-dissipative properties of structural materials and the calculation of sound insulation of building envelopes based on refined characteristics by the SEA method. International Scientific and Technology Conference "Far East Con". Vladivostok, 2020. Vol. 1079, 042063. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/1079/4/042063
20. Rosin G.S. Ustanovka dlya izmerenii dinamicheskikh kharakteristik uprugikh materialov rezonansnym metodom [Installation for measuring the dynamic characteristics of elastic materials by the resonance method]. Zavodskaya laboratoriya. 1960. Vol. 26. No. 10. Pp. 1180-1181. (in rus).
21. Zaborov V.I., Rosin G.S. Izmerenie dinamicheskikh parametrov zvukoizoliruyushchikh materialov [Measurement of dynamic parameters of soundproofing materials] // Akusticheskiy zhurnal. 1961. Vol. 7. No. 1. Pp. 92-94. (in rus).
22. Skripchenko D.S. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik zvukoizolyatsionnykh materialov pri razlichnykh vidakh nagruzok [Study of the dynamic characteristics of soundproof materials under various types of loads] Materialy II Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsiya «Molodezh', nauka, tekhnologii: novye idei i perspektivy» [Proceedings of the II International Scientific Conference "Youth, Science, Technology: New Ideas and Perspectives"]. Tomsk, 2015. Pp. 139-142.
23. Ovsyannikov S.N., Skripchenko D.S. Issledovanie zvukoizolyatsionnykh svoystv materialov pri razlichnykh staticheskikh nagruzkakh [Research of sound-proof properties of materials under various static loads. Izvestiya of higher educational institutions]. Technology of the textile industry. 2016. No. 4 (364). Pp. 40-44. (in rus).
24. Shubin I.L., Skripchenko D.S., Kochkin N.A. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik vibrodempfiruyushchikh materialov [Study of the dynamic characteristics of vibration-damping materials] // BST: Bulletin of construction equipment]. 2017. No. 6 (994). Pp. 18-19. (in rus).

Информация об авторах:

Овсянников Сергей Николаевич

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Архитектура гражданских и промышленных зданий».
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,
главный научный сотрудник.
E-mail: ovssn@tsuab.ru

Лелюга Ольга Владимировна

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий».
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,
старший научный сотрудник.
E-mail: olga.startseva27@gmail.com

Самохвалов Александр Сергеевич

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия,
старший преподаватель кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий».
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,
ведущий инженер.
E-mail: tomsk117@mail.ru

Лымарева Евгения Александровна

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия,
старший преподаватель кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий».
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,
инженер.
E-mail: evgeniya.lymareva@gmail.com

Большанина Таисия Сергеевна

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия,
старший преподаватель кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий».
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,
инженер.
E-mail: bolshaninats@gmail.com

Information about authors:

Ovsyannikov Sergey N.

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia,
doctor of technical sciences, professor, head of the department «Architecture of Civil and Industrial Buildings».
Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences, Moscow, Russia
chief scientific researcher.
E-mail: e-mail: ovssn@tsuab.ru

Lelyuga Ol'ga V.

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of «Architecture of Civil and Industrial Buildings».
Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences, Moscow, Russia,
senior researcher researcher.
E-mail: olga.startseva27@gmail.com

Samokhvalov Aleksandr S.

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia,
senior lecturer of the department of «Architecture of Civil and Industrial Buildings».
Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences, Moscow, Russia,
leading engineer.
E-mail: tomsk117@mail.ru

Lymareva Evgenia A.

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia,
senior lecturer of the department of «Architecture of Civil and Industrial Buildings».
Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences, Moscow, Russia,
engineer.
E-mail: evgeniya.lymareva@gmail.com

Bolshanina Taisya S.

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia,
senior lecturer of the department of «Architecture of Civil and Industrial Buildings».
Research Institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences, Moscow, Russia,
engineer.
E-mail: bolshaninats@gmail.com