

3
НОМЕР

БОИЦ

ISSN 2304-9081

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ
On-line версия журнала на сайте
<http://www.elmag.uran.ru>



2017
ГОД ЭКОЛОГИИ
В РОССИИ

БЮЛЛЕТЕНЬ

ОРЕНБУРГСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА УРО РАН



2017

УЧРЕДИТЕЛИ

УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН
ОРЕНБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР УРО РАН

© А.М. Нестеренко, М.Ю. Нестеренко, 2017

УДК 69-04, 534-16

А.М. Нестеренко^{1,2}, М.Ю. Нестеренко¹

АПРОБАЦИЯ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАТУХАНИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

¹ Оренбургский научный центр УрО РАН, Отдел геоэкологии, Оренбург, Россия

² Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Цель. Исследовать затухание колебательных процессов в конструкционном материале.

Материалы и методы. Проведены испытания двух железобетонных (ж/б) балок на степень затухания ухи упругих колебаний. Проверена применимость свойств поглощающих сред к материалу СК. Применялось импульсное воздействие для возбуждения собственных колебаний. Демпфирующие свойства оценены через вычисление безразмерного физического показателя — логарифмического декремента колебаний.

Результаты. Получено превышающее значение декремента колебаний для балки с нарушением над значением для целой балки.

Заключение. Конструктивные нарушения в строительных конструкциях значительно влияют на их колебательные процессы, в частности, на показатель затухания собственных колебаний. Данная зависимость может быть использована при оценке остаточной фактической несущей способности строительных конструкций.

Ключевые слова: динамика, колебательные процессы, строительные конструкции, дефектоскопия, демпфирующие свойства.

А.М. Nesterenko^{1,2}, М.Yu. Nesterenko¹

APPROBATION OF SEISMOMETRIC MODEL OF NATURAL OSCILLATIONS DUMPING PROCESSES FOR CONSTRUCTIONAL SAMPLES

¹ Orenburg Scientific Center UrB RAS, Department of geology, Orenburg, Russia

² Orenburg State University, Orenburg, Russia

Purpose. Investigate the damping of vibrational processes in a structural material.

Materials and methods. Two reinforced concrete (w / w) beams were tested for the degree of attenuation of the ear of elastic vibrations. The applicability of the properties of absorbing media to the SC material is checked. Impulse action was used to excite natural oscillations. Damping properties are estimated through the calculation of a dimensionless physical parameter - the logarithmic decrement of oscillations.

Results. An excess of the oscillation decrement value for a beam with a violation above the value for the intact beam is obtained.

Conclusions. Constructive violations in building structures significantly affect their oscillatory processes, in particular, the damping of natural oscillations. This dependence can be used for estimating the residual actual bearing capacity of building structures.

Key words: dynamics, oscillatory processes, building constructions, defectoscopy, damping properties.

Введение

В настоящее время существует большое количество приборов и методов неразрушающего контроля (МНК), которые применяются к объектам из различных материалов. Многие из них используются для обследования и мониторинга технического состояния зданий и сооружений. Можно выделить приборы и методы, направленные на выявление скрытых нарушений, а также приборы и методы, позволяющие вести непрерывный контроль технического состояния.

Однако существующие подходы малоэффективны при мониторинге крупных объектов: например, ультразвуковая дефектоскопия отличается большой трудоёмкостью из-за требований предварительной обработки исследуемой поверхности. Необходимость создания комплексного метода непрерывного контроля и выявления скрытых нарушений в элементах строительных конструкций объекта обосновывается произошедшими авариями, которые можно было бы предотвратить, выполняя постоянный мониторинг целостности наиболее ответственных элементов и узлов (например, авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г.) [1]. Развитие и повышение доступности информационных технологий также способствуют внедрению постоянного инструментального наблюдения за наиболее ответственными и дорогостоящими зданиями и инженерными сооружениями.

Одним из подходов, позволяющих решить поставленную задачу, является контроль и анализ резонансно-волновых процессов в зданиях и сооружениях. Появление трещин и нарушений в элементах конструкции влечет за собой изменения их резонансно-волновых характеристик, в частности резонансных частот и поглощающих свойств. Об этом свидетельствует низкий коэффициент корреляции записей колебаний с разных частей конструкции при наличии трещины [1, 2]. Относительно невысокая стоимость и низкая трудоёмкость эксплуатации сейсмологической аппаратуры создаёт предпосылки для исследования колебательных и волновых процессов в строительных конструкциях с целью использования в аппаратных комплексах для мониторинга технического состояния зданий и сооружений.

Инструментальное сейсмическое обследование и мониторинг состояния зданий выполняются в основном с помощью методик, которые можно разделить на три группы, различающиеся способом получения волновых полей и применяемыми схемами обработки [3]:

1. Искусственное возбуждение колебаний здания ударами разной силы по зданию и вне его. Основные недостатки связаны с получением идентичного воздействующего сигнала для накопления отклика; доступны лишь отдельные части здания.

2. Воздействие на здание микросейсм и их регистрация на коротких профилях в здании с последующей корреляционной обработкой. Работы ориентированы на здания и лишь косвенно затрагивают свойства грунтов основания. Под *микросейсмами* понимают результат наложения сейсмических волн от локальных источников (других зданий, транспорта, электрических машин и т.д.) [3].

3. Использование в качестве источника, возбуждающего собственные колебания здания, постоянно присутствующих пульсаций атмосферного давления. Регистрируются одновременно пульсации давления и ветровые колебания здания.

Отсутствие универсального метода инструментального сейсмического обследования для контроля реальных строительных объектов создаёт необходимость исследования резонансно-волновых процессов в строительных конструкциях, а также разработки соответствующей методики для решения поставленных задач.

Цель работы – дополнить имеющиеся сведения о протекании колебательных процессов и распространении волн в строительных конструкциях.

Основные задачи — определить скорость ослабления интенсивности волны, прошедшей через трещиноватую область в материале строительной конструкции; выделить собственные частоты обследуемого объекта; предложить параметр, отражающий поглощающие свойства материала, и сравнить полученные значения для целого и нарушенного объектов исследования.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана железобетонная (ж/б) перемычка с размерами 120x140x1400. Два варианта перемычки: одна целая, без видимых нарушений; вторая – с трещиной (ширина раскрытия 3 мм). Армирование балки симметричное: продольное – 4А-IIIØ6, каркас – Вр-IØ3, S=200 мм. Необходимо отметить, что оценка влияния класса арматуры и бетона, а также процента армирования на скорость затухания свободных колебаний, является задачей для дальнейших исследований, которые не проводились в данной работе.

Регистрирующая аппаратура: регистратор «Байкал-8» с настройками частоты дискретизации 2000 и коэффициентом усиления $G=1$. Датчики – ёмкостные акселерометры компании Zetlab с чувствительностью ≈ 100 мВ/(м/с²) и диапазоном регистрируемых частот 0,1-500 Гц и велосиметры СМЗ-КВ с диапазоном 0,01-50 Гц.

Для исследования резонансно-волновых характеристик производится запись колебаний балок. Регистрирующие датчики устанавливаются на перемычку в точках по разные стороны от трещины и располагаются на одной прямой линии на одинаковом расстоянии от нарушенной зоны вдоль взаимно перпендикулярных осей Z, N, E, заданных соответственно по высоте, ширине и длине балки (рис. 1-3). Аналогичное расположение датчиков в эксперименте с целой перемычкой.



Рис. 1. Испытание нарушенной ж/б перемычки.



Рис. 2. Испытание целой ж/б перемычки.

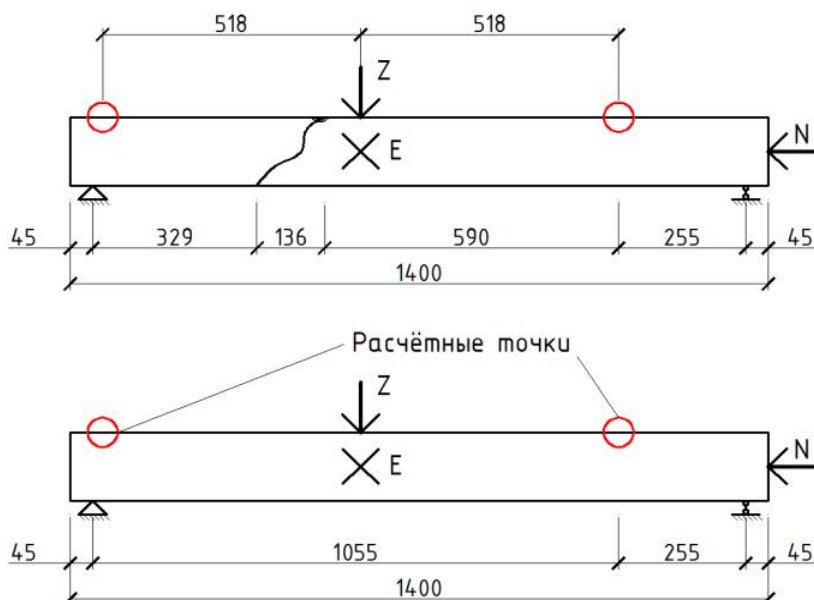


Рис. 3. Расчётные схемы для испытаний ж/б перемычек.

Для возбуждения колебаний в балках производятся удары в направлении заданных осей. Подобные удары являются «импульсной» нагрузкой, после приложения которой, система выводится из состояния равновесия и в ней устанавливаются свободные колебания с начальной скоростью, сообщённой системе импульсом. Сила удара влияет лишь на интенсивность свободных колебаний и длительность их затухания; частота же свободных колебаний системы и скорость их затухания не зависят от силы «импульса» [6]. Задача работы – определить скорость затухания и влияние нарушения на неё, следовательно, в данном случае идентичность ударов не является необходимым условием.

Для количественной оценки влияния трещины на распространение упругой волны целесообразно использовать логарифмический декремент затухания. Он показывает, насколько быстро уменьшается амплитуда во времени. Логарифмический декремент затухания [4] – безразмерная величина, равная натуральному логарифму отношению двух амплитуд, следующих друг за другом через промежуток времени, равному периоду T колебаний [4]. Значение периода T в данном случае равно промежутку времени между соседними гребнями волны на отфильтрованной по определённой частоте сейсмограмме. Значение амплитуды для числителя — значение отсчёта из 1-ой сейсмограммы $A_1(t)$, полученной с 1-ой точки на конструкции; амплитуда для знаменателя — значение отсчёта со 2-ой сейсмограммы $A_2(t+T)$, которая получена со 2-ой точки конструкции. Выбор значений, полученных с разных

точек конструкции, позволяет оценить уменьшение амплитуды с расстоянием (расстояние между датчиками). При этом в расчёт принимались только отсчёты, имеющие значение по модулю выше принятого уровня шума, а также имеющие нулевое значение производной функции сейсмограммы по времени для выделения гребня. Таким образом, значения амплитуд в 1-ой и 2-ой сейсмограммах определяются по условию:

$$A_1(t) = y_1(t), \quad (1)$$

при $\frac{dy_1}{dt} = 0$ и $y_1(t) \in (-\infty; -a] \cup [a; +\infty)$

$$A_2(t+T) = y_2(t+T), \quad (2)$$

при $\frac{dy_2}{dt} = 0$ и $y_2(t+T) \in (-\infty; -a] \cup [a; +\infty)$

где: $A_1(t)$ – значение амплитуды по 1-ой сейсмограмме в момент времени t ;

$A_2(t+T)$ — значение амплитуды по 2-ой сейсмограмме в момент времени $(t+T)$, T — период отфильтрованной сейсмограммы, с;

$y_1(t)$ — функция 1-ой сейсмограммы;

$y_2(t+T)$ — функция 2-ой сейсмограммы;

a — пороговое значение амплитуды сейсмограмм (принятый уровень фонового шума), ниже которого расчёт не выполняется.

Графические изображения и схемы точек на сейсмограммах, значения в которых отбираются для расчёта логарифмического декремента затухания, приведены на рисунках 4 и 5.

Составив отношения амплитуд, следующих друг за другом через промежуток времени, равный периоду T колебаний, получим ряд значений логарифмического декремента затухания для расчёта по двум сейсмограммам. Тогда логарифмический декремент затухания рассчитывается как среднее арифметическое значений ряда:

$$\delta = \frac{\sum_1^n \ln \frac{|A_{1,k}|}{|A_{2,k+1}|}}{n}, \quad (3)$$

где: $A_{1,k}$ – значение k -ой амплитуды (отсчёта) по 1-ой сейсмограмме с 1-ой точки;

$A_{2,k+1}$ – следующая через период T после $A_{1,k}$ амплитуда по 2-ой сейсмограмме со 2-ой точки;

n – количество расчётных точек.

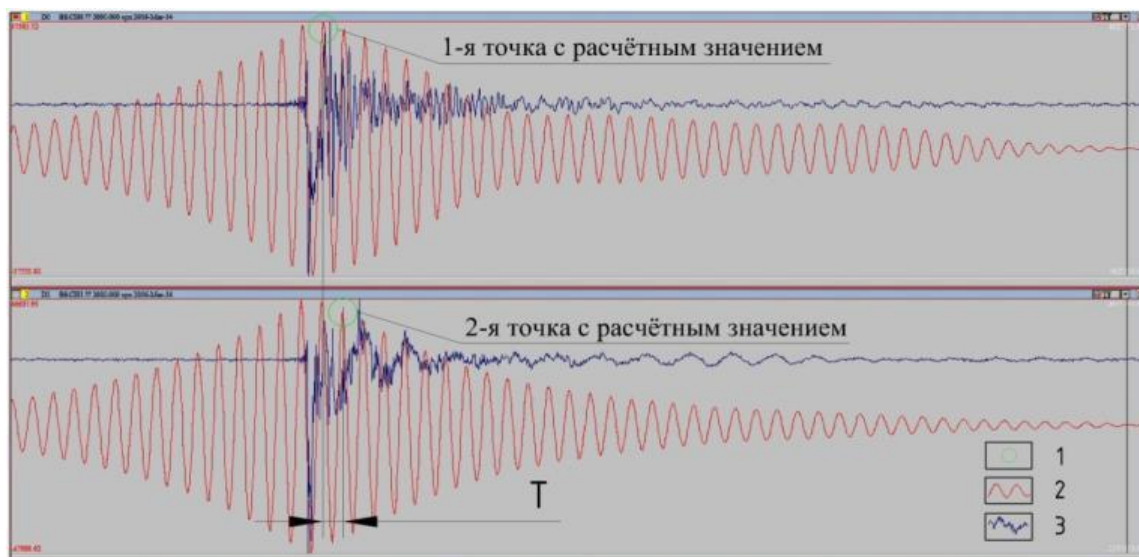


Рис. 4. К расчету логарифмического декремента затухания.

Условные обозначения: 1 – расчётные точки-отсчёты с 0-ой производной; 2 – полосовой фильтр Баттерворта; 3 – сейсмограмма; T – период колебаний по отфильтрованной сейсмограмме.

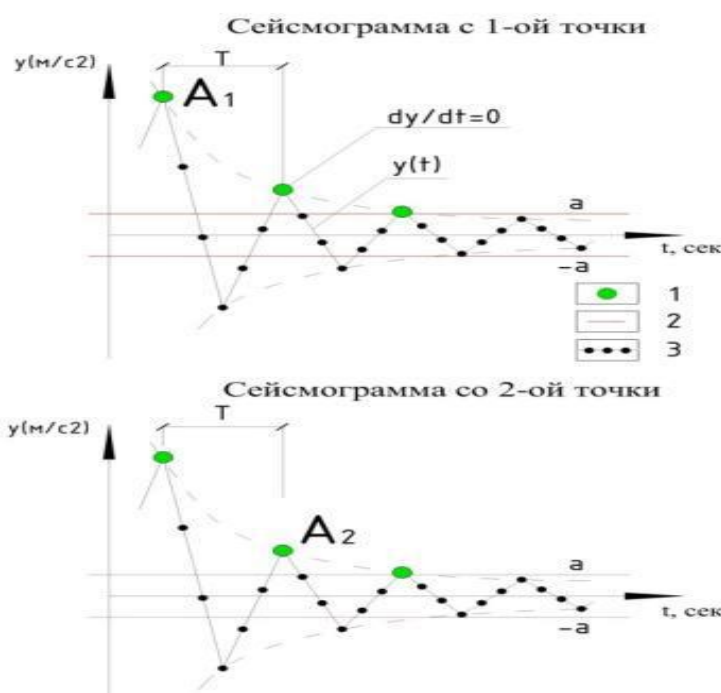


Рис. 5. Расчётные схемы для вычисления декремента затухания.

Условные обозначения: 1 – расчётные точки-отсчёты с 0-ой производной; 2 – принятый уровень шума; 3 – линии сейсмограммы с точками-отсчётами.

Искусственное возбуждение колебаний балки вызывает на амплитудном спектре волнового процесса серию пиков, которые соответствуют собственным частотам основного тона и обертонов [3]. Собственные частоты определяются изгибной жёсткостью и напряженно-деформированным состоянием объекта [6]. Записи с датчиков подвергаются

полосовой фильтрации фильтром Баттерворта, подходящим по своим амплитудно-частотным характеристикам, с настройками частот, выделенных из спектра (рис. 6 и 7).



Рис. 6. Амплитудные спектры записей слева и справа от трещины.

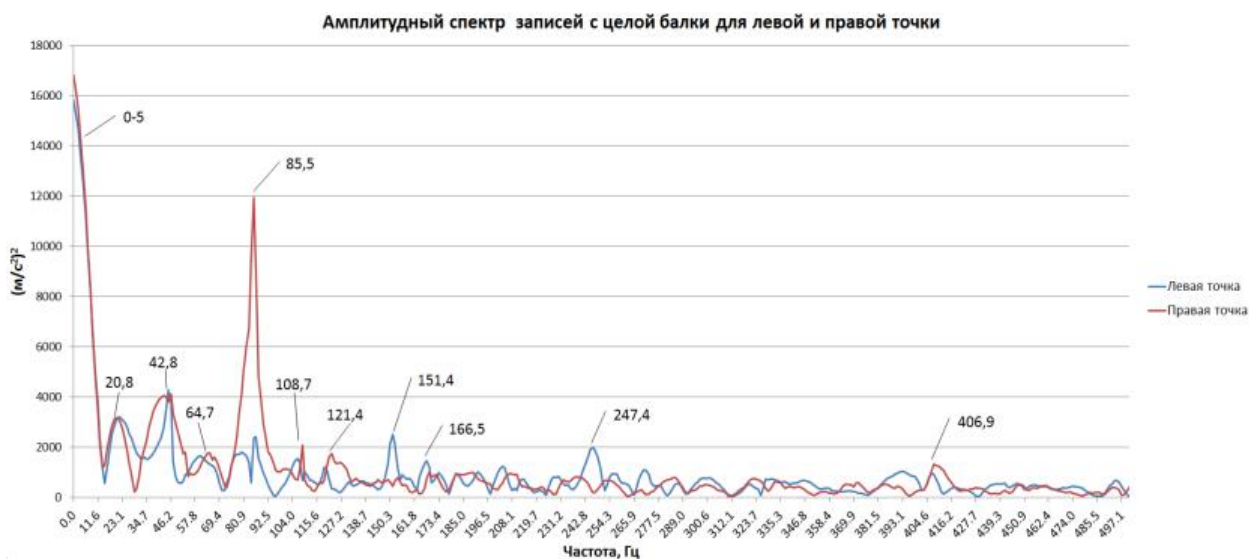


Рис. 7. Амплитудные спектры записей с целой балки для левой и правой точки

В таблице 1 для перемычки с трещиной указано значение декремента затухания δ , который варьируется в пределах 0,033-1,41 и имеет $\bar{\delta}=0,501$ по трём осям. В таблице 2 для целой перемычки декремент затухания δ имеет меньший порядок. Значение варьируется в пределах от -0,105 до 0,102 ($\bar{\delta}=0,014$ по трём осям). При этом наличие положительных и отрицательных значений показывает, что отношение амплитуд с датчиков слева и справа от

удара меняется вокруг значения 1.

Таблица 1. Перемычка с трещиной. Логарифмический декремент затухания по осям Z, N, E для частот, выделенных из спектра

Частота пика на спектре, Гц	Ось		
	Z	N	E
9,6	0,539	0,276	0,523
24	0,505	0,253	0,489
27,6	0,361	0,775	0,635
51,6	0,095	0,342	0,311
55,2	0,091	0,701	0,611
157,1	1,126	0,432	0,774
182,3	1,833	0,376	0,813
190,6	0,877	0,298	0,736
198	0,202	0,234	0,549
211	0,528	0,189	0,503
235	0,445	0,236	0,462
259	0,555	0,033	0,433
271	0,642	0,478	0,364
298,6	0,201	0,412	0,665
327,3	0,174	0,623	0,334
371,7	0,486	0,512	0,301
386,1	0,252	0,742	0,259
406,5	1,41	0,267	0,395
446,3	0,121	0,250	0,415
470	0,270	0,459	0,918
491,6	0,473	0,746	0,522
	0,552	0,425	0,527
	0,501		

Согласно определению логарифмического декремента затухания [4] чем выше его значение, тем круче аппроксимирующий график колебания и тем быстрее процесс затухания. Для случая с нарушенной балкой значение больше примерно в $\frac{0,501}{0,014} \approx 36$ раз по сравнению с результатами по целой. Различие полученных значений лог. декремента затухания для целой и нарушенной балок может быть вызвано уменьшением интенсивности волны при прохождении через трещиноватую область.

На данный момент существует ряд теорий, описывающих поглощающие свойства сред. Необходимо отметить, что было выявлено отсутствие зависимости, при которой большему значению частоты соответствует большее значение логарифмического декремента затухания.

Данная зависимость записывается в виде [5]:

$$\bar{\alpha}(\omega) = b_1 * \omega, \quad (4)$$

где $\bar{\alpha}(\omega)$ — амплитудный коэффициент поглощения;

b_1 — постоянная поглощения;

ω — угловая частота, рад/с.

Таблица 2. Целая перемычка. Логарифмический декремент затухания по осям Z, N, E для частот, выделенных из спектра

Частота пика на спектре, Гц	Ось		
	Z	N	E
0-5	0,018	0,021	0,042
20,8	-0,039	0,015	0,017
42,8	-0,017	-0,02	0,028
64,7	-0,105	0,004	-0,011
85,5	0,023	-0,008	-0,010
108,7	0,016	0,035	0,054
121,4	0,045	0,041	-0,007
151,4	0,034	-0,013	0,065
166,5	-0,011	0,102	0,075
247,4	-0,005	0,042	0,064
406,9	0,026	0,054	-0,065
	-0,001	0,020	0,023
	0,014		

Отсутствие зависимости обосновывается малыми объемами и расстояниями, на которых производилось исследование. При размере препятствия меньше четверти длины волны отражение, поглощение и рассеивание волн происходит в меньшей степени, а доминирует их дифракция [4]. Поэтому для получения соответствующей зависимости требуется значительно увеличивать частоту регистрируемых сигналов, что является технически сложной задачей, поскольку при выборе датчика с ростом регистрируемой частоты падает и его чувствительность.

Заключение

Выявлена зависимость между значениями логарифмического декремента затухания и наличием нарушений в железобетонной балке: значения логарифмического декремента отличаются более чем в 36 раз.

На основе выявленной зависимости предложен подход к определению резонансно-волновых и поглощающих свойств материалов строительных конструкций. Имеется возможность разработать метод дефектоскопии и мо-

нитинга технического состояния зданий и сооружений.

Сложность применения предложенного подхода заключается в соотношении значений логарифмического декремента затухания на выходе с размерами нарушенной зоны, что требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеренко М.Ю., Нестеренко А.М. Обследование зданий и сооружений методом сейсмического зондирования. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2014. 2. 5с. [Электр. ресурс] (URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2014-2/Articles/Nesterenko%20MY-Nesterenko%20AM-2014-2.pdf>).
2. Жаданов В.И. Нестеренко М.Ю., Столповский Г.А., Нестеренко А.М. Исследование поглощающих свойств материала строительных конструкций на примере железобетонной перемычки. Известия ВУЗов. Строительство. 2016. 9 (693): 76-86.
3. Котляревский В.А., Суцев С.П., Ларионов В.И. Применение мобильных диагностических комплексов для оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса зданий и сооружений. Безопасность труда в промышленности. 2004. 3: 42-45.
4. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. М.: Стройиздат, 1979.

Поступила 24.08.2017 г.

(Контактная информация: Нестеренко Алексей Максимович – ведущий инженер Отдела геоэколог Оренбургского научного центра УрО РАН; адрес: Оренбург, ул. Набережная, 29; E-mail: Alexnes@mail.ru), аспирант Оренбургского государственного университета по направлению «Строительные конструкции. Здания и сооружения»; Нестеренко Максим Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Отдела геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН; адрес: Оренбург, ул. Набережная, 29; E-mail: geoecol-ONC@mail.ru).

LITERATURA

1. Nesterenko M.Yu., Nesterenko A.M. Survey of buildings and structures using the method of seismic sounding. Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2014. 2. 5с. [Electr. resource] (URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2014-2/Articles/Nesterenko%20MY-Nesterenko%20AM-2014-2.pdf>).
2. Zhadanov V.I. Nesterenko M.Yu., Stolpovskiy GA, Nesterenko A.M. Investigation of the absorbing properties of the material of building structures using the example of a reinforced concrete bridge. Proceedings of high schools. Building. 2016. 9 (693): 76-86.
3. Kotlyarevsky VA, Sushev SP, Larionov VI The use of mobile diagnostic complexes to assess the strength, stability and residual life of buildings and structures. Occupational safety in industry. 2004. № 3: 42-45.
4. Clough R., Penzien J. Dynamics of constructions. Moscow: Stroiizdat, 1979.

Образец ссылки на статью:

Нестеренко А.М., Нестеренко М.Ю. Апробация сейсмометрической модели затухания собственных колебаний образцов из конструкционного материала. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2017. 3: 11 с. [Электр. ресурс] (URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2017-3/Articles/NAM-2017-3.pdf>).