

УДК 69.04

А.В. КОРГИН, В.А. ЕРМАКОВ, Л.З. ЗЕЙД КИЛАНИ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

В статье проанализирована роль логарифмического декремента колебаний при проектировании строительных конструкций зданий и сооружений, а также мостовых конструкций. Приведены рекомендуемые значения логарифмического декремента колебаний конструкций в зависимости от области применения в соответствии с действующими нормативными документами РФ. Описана методика проведения и обработки результатов динамических испытаний конструкций. Исследованы конструкции пешеходных мостов из алюминиевых сплавов, отдельная ферма пешеходного моста, а также ортотропные плиты из алюминиевого сплава EN AW-6082 T6 (без покрытия, с покрытием на эпоксидно-полиуретановой основе с корундовой крошкой, с покрытием в виде асфальтобетона).

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** Свод правил, частоты собственных колебаний, логарифмический декремент колебаний, проектирование мостов из алюминиевых сплавов, динамические исследования конструкций.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-746-2-61-70

В рамках работ по расширению области применения действующего СП 443.1325800.2019 «Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования» на проектирование автодорожных мостов авторами статьи проведены динамические испытания существующих пешеходных мостов и элементов мостовых конструкций из алюминиевых сплавов.

Целью испытаний являлось определение собственных частот колебаний и логарифмического декремента колебаний, отражающего степень затухания свободных колебаний конструкции и являющегося неотъемлемой характеристикой для расчетов зданий и сооружений на динамические нагрузки, в частности, на ветровые воздействия. В зависимости от типа конструкции (стальные или железобетонные) принимается коэффициент динамичности при определении пульсационной составляющей ветровой нагрузки в соответствии с п. 11.1.86<sup>1</sup>. Также декремент колебаний влияет на предельное значение частоты колебаний, относительно которой решается вопрос о количестве учитываемых при расчете первых форм колебаний в соответствии с табл. 11.5<sup>1</sup>.

Значения логарифмических декрементов в соответствии со стандартами должны приниматься на основе специальных обоснований, но при их отсутствии могут быть приняты по действующим нормативным документам Российской Федерации в зависимости от области применения (табл. 1).

<sup>1</sup> СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*.

Таблица 1. Значения логарифмического декремента колебаний по нормам РФ

Тип конструкций	Область применения		
	определение коэффициента динамичности для расчета пульсационной ветровой нагрузки <sup>1</sup>	определение интенсивности резонансного вихревого воздействия <sup>1</sup>	расчет систем и элементов атомных станций <sup>2</sup>
Сварные стальные конструкции	0,15	0,05	0,12–0,25*
Стальные конструкции на болтах			0,25–0,44*
Железобетонные сооружения	0,3**	0,1	0,25–0,44*
Железобетонные конструкции преднапряженные			0,12–0,31*

\* В зависимости от уровня расчетных напряжений.

\*\* А также для зданий со стальным каркасом при наличии ограждающих конструкций.

При сборе нагрузок при проектировании мостов учет декремента колебаний осуществляется в соответствии СП 20.13330.2016, однако имеются отдельные дополнения, касающиеся проектирования мостов в сейсмических районах<sup>3, 4</sup>.

В соответствии с СП 268.1325800.2016 в формуле, определяющей сейсмическую нагрузку от масс сооружений спектрально-модальным методом, в качестве одного из сомножителей выступает коэффициент  $k_{\psi}$ , учитывающий влияние на нагрузку нестандартного поглощения и рассеяния энергии колебаний по основной форме. Коэффициент  $k_{\psi}$  в зависимости от условий поглощения и рассеяния энергии может принимать значения от 0,7 до 1,5 и рассчитывается по формуле

$$k_{\psi} = \frac{1,5}{40h} + 0,5,$$

где  $h$  – относительный коэффициент затухания колебаний сооружений.

В качестве справочного материала допускается использовать значения  $h$ , приведенные в СП 268.1325800.2016 (стальные пролетные строения  $0,02 \leq h \leq 0,03$ , стальные опоры  $0,03 \leq h \leq 0,05$ , железобетонные опоры  $0,05 \leq h \leq 0,10$ ), но для получения качественного результата рекомендуется использовать значения декрементов, полученные ранее при испытаниях объектов, аналогичных проектируемым<sup>3</sup>.

В настоящее время действующим нормативным документом РФ для пешеходных мостов из алюминиевых сплавов является СП 443.1325800.2019, предварительно рекомендующий принимать логарифмический декремент равным 0,22. Однако точное значение для каждого конкретного объекта в

<sup>2</sup> НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций.

<sup>3</sup> Пособие по проектированию мостов в сейсмических районах. М., 2017.

<sup>4</sup> СП 268.1325800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования.

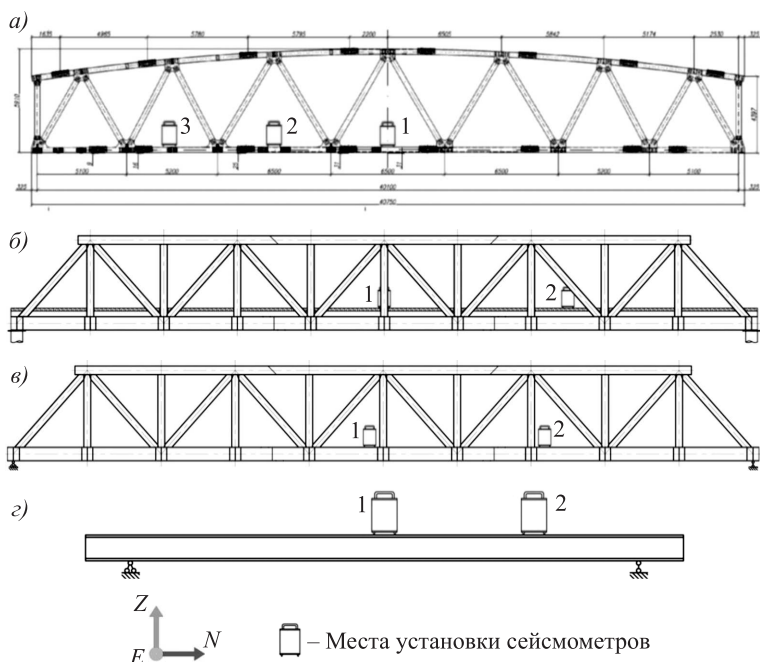


Рис. 1. Схема расположения точек измерения колебаний на конструкциях пешеходного моста через Рязанскую улицу в г. Тула (а), моста на р. Яуза (б), на ферме пешеходного моста в испытательной лаборатории (в) и на ортотропной плите в испытательной лаборатории (г)

данном документе настоятельно рекомендуется определять в ходе научно-технического сопровождения проектирования объекта.

Анализ зарубежных нормативных документов<sup>5</sup> и проведенных исследований [1–9] показал, что учет логарифмического декремента при проектировании объектов зависит от области их применения, а само значение логарифмического декремента может различаться в зависимости от конструктивного решения даже для конструкций из одного материала. По этим причинам для выявления реальных значений логарифмического декремента для мостовых конструкций из алюминиевых сплавов были проведены исследования динамической работы конструкций ряда объектов, а именно: пешеходного моста в г. Тула (пролетом 40,1 м), пешеходного моста в пойме р. Яуза (пролетом 10 м), фермы пешеходного моста (пролетом 10 м) из алюминиевого сплава 1915Т, а также отдельные ортотропные плиты из алюминиевого сплава EN AW-6082 Т6 (без покрытия, с покрытием на эпоксидно-полиуретановой основе с корундовой крошкой, с покрытием в виде асфальтобетона).

Для решения поставленных задач проводились исследования при ударном воздействии и в фоновом режиме. Измерение колебаний исследуемых конструкций осуществлялось в середине и четверти пролета.

Схемы расположения точек установки оборудования на исследуемых объектах представлены на рис. 1.

<sup>5</sup> Eurocode EN 1991-1-4:2005+A1: Actions on structures. Part 1–4: General actions. Wind actions, 2010.



Рис. 2. Цифровой трехкомпонентный сейсмометр SMG-6TD

В ходе испытаний регистрировались скорости колебаний (мм/с). В каждой точке записывались колебания по трем взаимно-перпендикулярным направлениям  $N$ ,  $E$  и  $Z$ .

Для регистрации параметров использовался цифровой трехкомпонентный сейсмометр SMG-6TD (рис. 2), состоящий из трех однокомпонентных датчиков, расположенных в общем герметичном корпусе. Каждый датчик обеспечивает измерение колебаний в широком диапазоне частот от 0,033 до 50 Гц. Наличие встроенного цифрового преобразователя с разрешающей способностью 24 бита позволяет получать данные в цифровом виде с максимальной точностью.

Примеры установки сейсмометра на исследуемых конструкциях представлены на рис. 3.

Контроль текущих показаний сейсмометров и запись виброграмм осуществляется в ПО Scream!. С помощью настройки COM-порта сейсмометра он автоматически подключается и показывает текущее состояние скоростей по осям, записываемое в файл (рис. 4).

Файлы по умолчанию создаются в формате \*.gcf. Для преобразования в текстовый файл используется программа gcf2asc.exe. Дальнейшая математическая обработка осуществляется в ПО GNU Octave.

В данной программе решается две задачи.

1. Определение энергетического спектра частот собственных колебаний из фоновой записи с помощью быстрого преобразования Фурье (рис. 5);

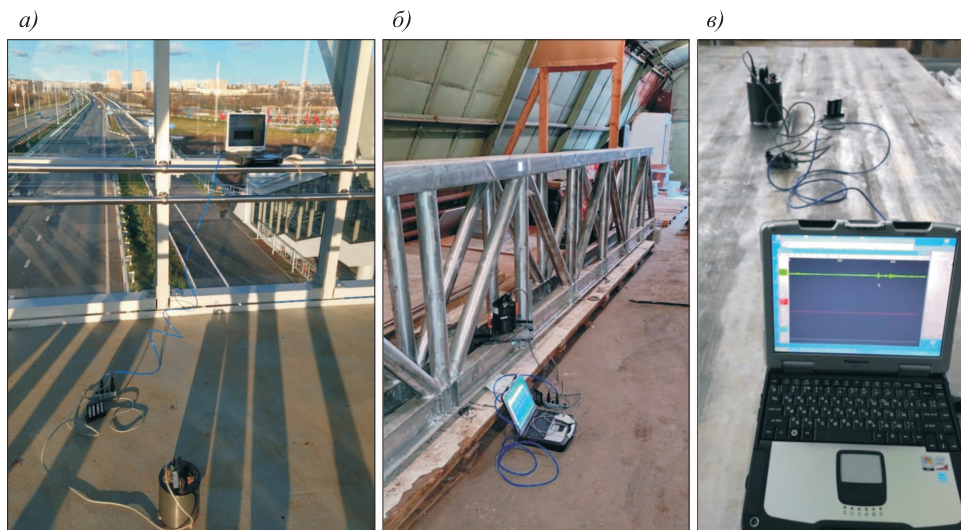


Рис. 3. Установка сейсмометра на настиле пешеходного моста в г. Тула (а), на ферме пешеходного моста из алюминиевого сплава 1915Т (б) и на ортотропной плите из алюминиевого сплава EN AW-6082 Т6 (в)

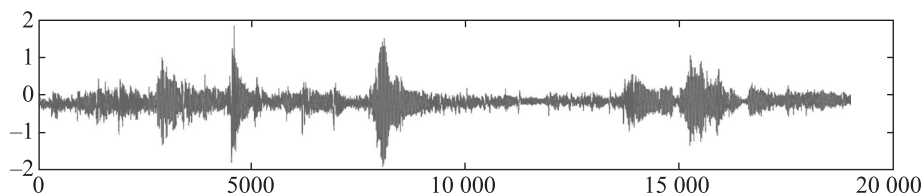


Рис. 4. Фрагмент записи скорости колебаний по направлению Z (ось ординат – мм/с, ось абсцисс – 1/100 с)

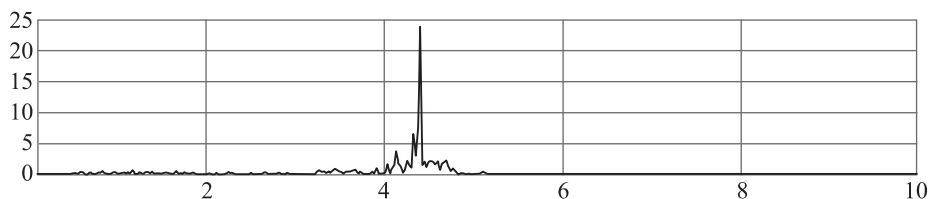


Рис. 5. Пример энергетического спектра частот колебаний по направлению N, преобладающий пик – 4,39 Гц

2. Выделение затухающей синусоиды колебаний по основной частоте колебаний из фрагмента записи колебаний с ударным воздействием с помощью полосового фильтра Баттерворта (рис. 6).

Далее логарифмический декремент колебаний определяется по формуле

$$\delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{2a_1}{2a_n},$$

где  $2a_1, 2a_n$  – двойные амплитуды в начале и конце выбранного участка виброграммы  $l_1$ , определяемые графически в ПО AutoCAD (рис. 7);

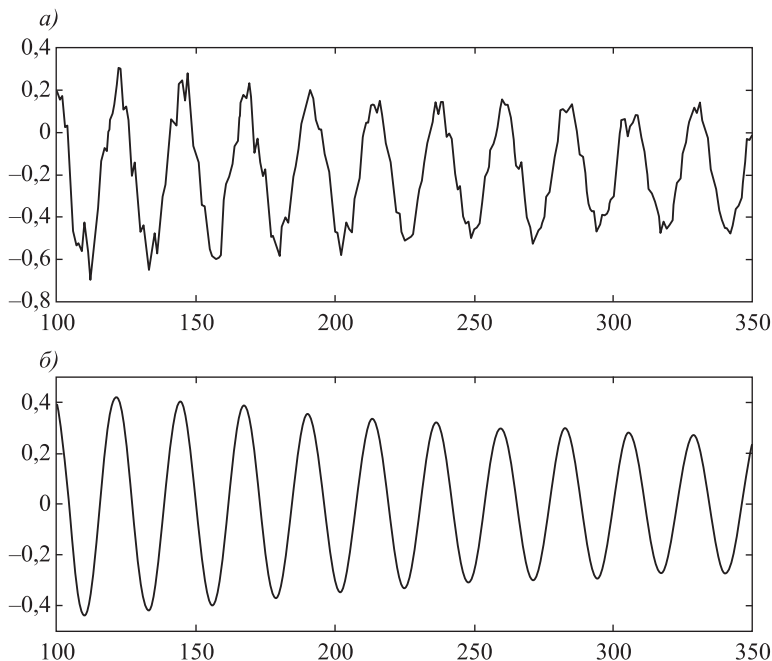


Рис. 6. Пример работы полосового фильтра Баттерворта  
*а* – исходная запись колебаний после ударного воздействия; *б* – график затухающих колебаний, соответствующий частоте 4,39 Гц

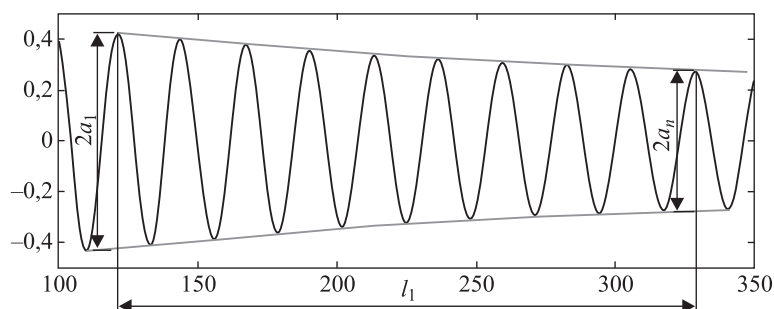


Рис. 7. Пример обработки виброграммы в ПО AutoCAD

$n$  – количество полных колебаний на рассматриваемом участке виброграммы  $l_1$ .

Для повышения точности результатов логарифмический декремент рассчитывается для трех контрольных участков виброграммы.

Данные по зарегистрированным частотам собственных колебаний и определенным логарифмическим декрементам колебаний представлены в табл. 2.

Таблица 2. Данные по основным частотам и найденным значениям логарифмического декремента колебаний

Конструкция	Место измерения	Направление	Экспериментальная частота, Гц	Декремент	
1	2	3	4	5	
Пешеходный мост в г. Тула	Точка 1	$N$ (поперек конструкции)	1,92	0,077	
		$Z$ (по высоте)	4,39	0,046	
	Точка 2	$N$ (поперек конструкции)	1,9	0,080	
		$Z$ (по высоте)	10,5	0,073	
			4,35	0,044	
	Точка 3	$Z$ (по высоте)	10,5	0,036	
			$N$ (поперек конструкции)	1,92	0,074
			4,35	0,046	
	Пешеходный мост в пойме р. Яуза	Точка 1	$E$ (поперек конструкции)	2,91	0,151
6,75				0,119	
20,8				0,033	
25,8				0,027	
Точка 2		$E$ (поперек конструкции)	7,25	0,133	
			22,4	0,057	
			43	0,034	
Ферма пешеходного моста	Точка 1	$E$ (поперек конструкции)	4,0	0,058	
	Точка 2	$E$ (поперек конструкции)	4,5	0,058	

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Ортотропная плита без покрытия	Точка 1	$E$ (поперек конструкции)	8,35	0,072
		$Z$ (по высоте)	30,2	0,051
	Точка 2	$E$ (поперек конструкции)	4,8	–
			8,5	0,073
		$Z$ (по высоте)	7,98	0,248
			30,44	0,11
Ортотропная плита с покрытием на эпоксидно-полиуретановой основе с корундовой крошкой	Точка 1	$E$ (поперек конструкции)	3,75	0,089
			17,36	0,034
			20,4	0,032
		$Z$ (по высоте)	8,67	0,052
	25,7		0,037	
	Точка 2	$E$ (поперек конструкции)	3,84	0,056
			10,55	0,085
			17	0,036
		$Z$ (по высоте)	8,59	0,113
			26	0,028
Ортотропная плита с асфальтобетонным покрытием	Точка 1	$E$ (поперек конструкции)	4,3	0,058
		$Z$ (по высоте)	8,93	0,072
			26,7	0,053
	Точка 2	$E$ (поперек конструкции)	4,5	0,044
			23,4	0,048
		$Z$ (по высоте)	9,2	0,060
			26,07	0,024

В результате анализа табл. 2 получены средние значения частот колебаний и соответствующих им декрементов (табл. 3).

Из представленного материала видно, что значение декремента колебаний с увеличением частоты заметно снижается, каждой собственной частоте колебаний соответствует свое значение декремента, при этом оно мало зависит от пролета и размеров мостовых конструкций. Данные экспериментальных исследований подтверждаются информацией из Eurocode EN 1991-1-4:2005+A1:2010, в соответствии с которым рекомендуемое значение декремента для мостов из алюминиевых сплавов составляет 0,02 (что идет в запас прочности проектируемых конструкций).

Сравнение значений декремента отдельной мостовой фермы и целиком пешеходного моста пролетом 10 м показывает, что значение декремента для отдельных конструктивных элементов еще ниже, чем у конструкции в целом, и зависит от условий закрепления элемента при проведении испытаний.

Таблица 3. Средние значения частот и декрементов колебаний исследованных конструкций

Конструкция	1-я частота, Гц	Декремент 1-й частоты	2-я частота, Гц	Декремент 2-й частоты
Пешеходный мост в г. Тула	1,91	0,077	4,36	0,045
Пешеходный мост в пойме р. Яуза	7	0,126	21,6	0,045
Ферма пешеходного моста	4,5	0,058	–	–
Ортотропная плита без покрытия	8,4	0,073	30,3	0,081
Ортотропная плита с покрытием на эпоксидно-полиуретановой основе с корундовой крошкой	3,8	0,073	17,2	0,035
Ортотропная плита с асфальтобетонным покрытием	4,4	0,051	9,1	0,066

В процессе проектирования конструкций из алюминиевых сплавов, как правило, обязательно учитывается первая частота и в определенных ситуациях может учитываться вторая частота, остальные частоты не принимаются во внимание. В редких, наиболее ответственных ситуациях может учитываться более широкий спектр частот.

Таким образом, результаты анализа документации и экспериментальных исследований, представленных в настоящей статье, подтверждают актуальность и необходимость внесения изменений в методы проектирования конструкций из алюминиевых сплавов и их отражения в действующих нормативных документах РФ, регламентирующих строительство мостов из алюминиевых сплавов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пожалостин А.А., Гончаров Д.А.* Экспериментально-аналитический метод определения логарифмического декремента колебаний для случая осесимметричных колебаний упругого бака с жидкостью // *Естественные и технические науки*. 2018. № 6. С. 93–94.
2. *Мондрус В.Л., Каракозова А.И.* К вопросу об определении логарифмических декрементов колебаний высотных металлических сооружений // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2012. № 2. С. 45–47.
3. *Остроумов Б.В., Каракозова А.И.* Способ вычисления фактических логарифмических декрементов колебаний высотных сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 6. С. 40–41.
4. *Дорофеев В.М., Булыкин И.И., Назьмов Н.В.* Методика определения периода и логарифмического декремента основного тона собственных колебаний зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2006. № 4. С. 28–29.
5. Пат. РФ № 2003109228/28. Способ определения устойчивости зданий и сооружений и система для определения устойчивости зданий и сооружений / М.А. Шахраманьян, Г.М. Нигметов. № 2245531; заявл. 27.10.2004; опубл. 27.01.2005.
6. *Шишкин В.М., Левашов А.П.* Моделирование затухающих колебаний пластины с учетом амплитудно-зависимого рассеяния энергии в материале // *Advanced Science*. 2017. № 3. С. 367–376.



7. Brunetti M., Ciambella J., Evangelista L., Lofrano E., Paolone A., Vittozzi A. Experimental results in damping evaluation of a high-speed railway bridge // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 199. P. 3015–3020.
8. Brownjohn J.M.W. Estimation of damping in suspension bridges // *Structures & Buildings*. 1994. Vol. 104, Issue 4. P. 401–415.
9. Gattulli V., Lofrano E., Paolone A., Potenza F. Measured properties of structural damping in railway bridges // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2019. No. 9. P. 639–653.

**Коргин Андрей Валентинович**, д-р техн. наук, проф.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Ермаков Валентин Алексеевич**, канд. техн. наук

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Зейд Килани Лейс Зейдович**, ст. препод.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено 22.01.2021

**Korgin Andrey Valentinovich**, DSc, Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Ermakov Valentin Alekseevich**, PhD

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

**Zeyd Kilani Leys Zeydovich**, Senior Lecturer

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

## **DETERMINATION OF THE STRUCTURAL DYNAMIC PARAMETERS OF THE ALUMINIUM ALLOY BRIDGES**

The article analyzes the influence of the damping coefficient in the design of building structures of buildings and structures, as well as bridge structures. The recommended values of the damping coefficient were determined for the structures depending on the field of application in accordance with the current regulatory documents of the Russian Federation. The paper describes a technique for conducting and processing the results of dynamic tests of structures. The designs of existing pedestrian bridges made of aluminum alloys, a pedestrian bridge truss, as well as orthotropic deck of aluminum alloy EN AW-6082 T6 (uncoated, epoxy-polyurethane coating, asphalt coating) have been investigated.

**Key words:** Codes, eigenvalues, structural damping coefficient, aluminium alloy bridges design, dynamic tests.

### REFERENCES

1. *Pozhalostin A.A., Goncharov D.A.* Eksperimental'no-analiticheskiy metod opredeleniya logarifmicheskogo dekrementa kolebaniy dlya sluchaya osesimmetrichnykh kolebaniy uprugogo baka s zhidkost'yu [Experimental-analytical method for determining the logarithmic decrement of vibrations for the case of axisymmetric vibrations of an elastic tank with a liquid]. *Estestvennye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and technical sciences]. 2018. No. 6. Pp. 93–94. (in Russian)
2. *Mondrus V.L., Karakozova A.I.* K voprosu ob opredelenii logarifmicheskikh dekrementov kolebaniy vysotnykh metallicheskih sooruzheniy [About the calculation of the real logarithmic oscillation decrement]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet*

- sooruzheniy [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]. 2012. No. 2. Pp. 45–47. (in Russian)
3. *Ostroumov B.V., Karakozova A.I.* Sposob vychisleniya fakticheskikh logarifmicheskikh dekrementov kolebaniy vysotnykh sooruzheniy [The method of calculation of a real logarithmic oscillation decrement of the high-rise structures]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering]. 2011. No. 6. Pp. 40–41. (in Russian)
  4. *Dorofeev V.M., Bulykin I.I., Naz'mov N.V.* Metodika opredeleniya perioda i logarifmicheskogo dekrementa osnovnogo tona sobstvennykh kolebaniy zdaniy i sooruzheniy [Methods of determining the period and the logarithmic decrement of the basic tone of the natural oscillations of buildings and structures]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering]. 2006. No. 4. Pp. 28–29. (in Russian)
  5. Pat. No. 2003109228/28 Russian Federation. Sposob opredeleniya ustoychivosti zdaniy i sooruzheniy i sistema dlya opredeleniya ustoychivosti zdaniy i sooruzheniy [A metod for determining the stability of buildings and structures and a system for determining the stability of buildings and structures]. M.A. Shahraman'yan, G.M. Nigmatov. No. 2245531; appl. 27.10.2004; publ. 27.01.2005.
  6. *Shishkin V.M., Levashov A.P.* Modelirovaniye zatukhayushchikh kolebaniy plastiny s uchetom amplitudno-zavisimogo rasseyaniya energii v materiale [Modeling damped vibrations of a plate taking into account the amplitude-dependent energy dissipation in the material]. *Advanced Science*. 2017. No. 3. Pp. 367–376. (in Russian)
  7. *Brunetti M., Ciambella J., Evangelista L., Lofrano E., Paolone A., Vittozzi A.* Experimental results in damping evaluation of a high-speed railway bridge. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 199. Pp. 3015–3020.
  8. *Brownjohn J.M.W.* Estimation of damping in suspension bridges. *Structures & Buildings*. 1994. Vol. 104, Issue 4. Pp. 401–415.
  9. *Gattulli V., Lofrano E., Paolone A., Potenza F.* Measured properties of structural damping in railway bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2019. No. 9. Pp. 639–653.
-