

УДК 624.042.8

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-73-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-73-80)

Теоретические и экспериментальные исследования

Моделирование акселерограмм высокой интенсивности на основе вейвлет-преобразования

Харланова Светлана Владимировна¹, Харланов Владимир Леонтьевич²
^{1,2} ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
Волгоград, Российская Федерация

Аннотация: При детерминированном анализе строительных конструкций в качестве исходных данных применяют инструментальные или синтезированные акселерограммы. Как правило, на каждой площадке имеются записи землетрясений, соответствующие акселерограммам низкой интенсивности. Очень часто инструментальные записи землетрясений высокой интенсивности отсутствуют. Чтобы исправить данную ситуацию был разработан алгоритм моделирования акселерограмм низкой интенсивности к акселерограммам высокой интенсивности с помощью вейвлет-преобразования.

Для подтверждения эффективности данного алгоритма проведен сравнительный анализ спектров реакций линейных осцилляторов, а также энергетических критериев импульса и Ариаса для синтезированной и инструментальной акселерограмм.

Ключевые слова: инструментальные акселерограммы землетрясения, вейвлет-преобразование, спектры реакций, энергетические критерии

Для цитирования: Харланова С.В., Харланов В.Л. Моделирование акселерограмм высокой интенсивности на основе вейвлет-преобразования // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 3. С. 73–80.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-73-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-73-80)

Theoretical and experimental studies

Modeling of high-intensity accelerograms based on the wavelet transform

Svetlana V. Kharlanova¹, Vladimir L. Kharlanov²
^{1,2} FSFEI HE Volgograd State Technical University
Volgograd, Russian Federation

Abstract: In the deterministic analysis of building structures, instrumental or synthesized accelerograms are used as initial data. As a rule, earthquake records corresponding to low-intensity accelerograms are available at each site. Very often instrumental recordings of high-intensity earthquakes are missing. To correct this situation, an algorithm has been developed for modeling low-intensity accelerograms to high-intensity accelerograms using a wavelet transform.

As an efficiency of this algorithm, a comparative analysis of the reaction spectra of linear

@ S. V. Kharlanova, V. L. Kharlanov, 2023

oscillators, as well as the pulse and Arias energy criteria for synthesized and instrumental accelerograms was carried out.

Keywords: instrumental accelerograms of an earthquake, wavelet transform, reaction spectra, energy criteria

For citation: Kharlanova S.V., Kharlanov V.L. Modeling of high-intensity accelerograms based on the wavelet transform. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 3, pp. 73–80. [In Russian] DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-73-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-73-80)

Введение

В арсенале инженеров-проектировщиков имеются различные акселерограммы интенсивности: от 3–4 до 7–8 баллов по шкале МСК-64. В то же время не на каждой площадке имеются акселерограммы высокой интенсивности. Поэтому возникает задача на основе акселерограмм землетрясений малой интенсивности получить акселерограммы большей интенсивности, применяемые при расчете зданий и сооружений.

Рассмотрим две инструментальные записи землетрясений (с различной интенсивностью), зафиксированных в 1976 году на одной площадке станцией Газли: одна с максимальным ускорением $7,1 \text{ м/с}^2$, другая – $0,47 \text{ м/с}^2$. Записи землетрясений длиной 10 с приведены на рисунке 1.

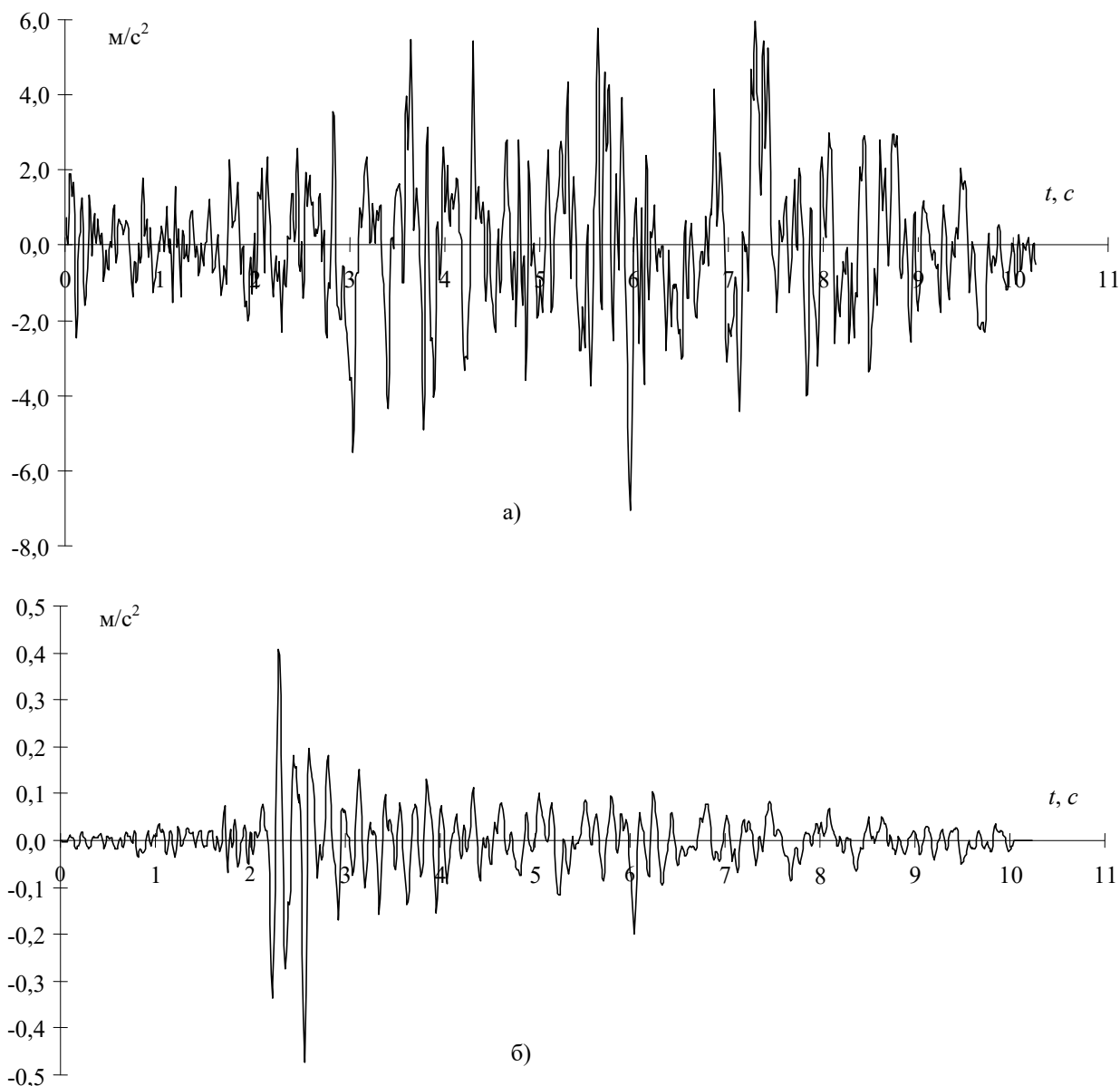


Рисунок 1 – Инструментальные акселерограммы землетрясения: а) высокой интенсивности; б) низкой интенсивности

Figure 1 – Instrumental accelerograms of an earthquake: a) high intensity; b) low intensity

Согласно шкале МСК-64 [1] критерий балльности землетрясения определяется по формуле:

$$I = 1,44 \ln (\ddot{y}_{o, \max}) + 7, R^2 = 0,7 \quad (1)$$

где I – интенсивность землетрясения, R^2 – коэффициент детерминации.

Следовательно, по формуле (1), акселерограмма 1-го землетрясения (рис. 1а) оценивается в 9 баллов, 2-го землетрясения (рис. 1б) – в 5 баллов.

Согласно требованиям [2]: «Расчёты, соответствующие контрольному землетрясению (КЗ), следует выполнять во временной области с использованием инструментальных или синтезированных акселерограмм».

Существуют различные методики построения синтезированных акселерограмм [3, 4]. Относительно новым подходом является построение синтезированных акселерограмм на основе вейвлет-преобразования [5].

В основе вейвлет-преобразования лежит разделение исходного сигнала на аппроксимирующие коэффициенты, представляющие сглаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, представляющие собой колебания [6].

Пусть y_i – наблюдаемое значение одномерного дискретного сигнала, представляющего собой инструментальную акселерограмму. Исходный сигнал пропускают через 2 фильтра: низкочастотный (g) и высокочастотный (h). В итоге получают 2 последовательности коэффициентов: $A_1 = \{a_{j,i}\}$ – коэффициенты аппроксимации уровня разложения 1, $D_1 = \{d_{j,i}\}$ – коэффициенты детализации уровня разложения 1. Далее коэффициенты A_1 подвергают опять разложению на $A_2 = \{a_{j+1,i}\}$ – коэффициенты аппроксимации уровня разложения 2 и $D_2 = \{d_{j+1,i}\}$ – коэффициенты детализации уровня разложения 2. Повторяя процедуру J раз, исходный сигнал схематично можно представить в виде:

$$y_i = A_1 + D_1 = A_2 + D_2 + D_1 = \dots = A_J + D_{J-1} + D_{J-2} + \dots + D_1.$$

Искомые коэффициенты $a_{j,i}$, $d_{j,i}$ находят по формулам [7]:

$$\begin{aligned} a_{j+1,i} &= \sum_n h_n a_{j,n+2i} \\ d_{j+1,i} &= \sum_n g_n a_{j,n+2i} \end{aligned} \quad (2)$$

где $a_{j,i} = y_i$, $g_n = (-1)^i \cdot \overline{h_{2M-1-i}}$, $i = \overline{0, N-1}$, $2M$ – определяет число коэффициентов h_i . В качестве фильтра h применим коэффициенты вейвлета – Добеши D^8 , обладающего свойством ортогональности [8]:

$$h_0 \approx 0,2304, h_1 \approx 0,7148, h_2 \approx 0,6309, h_3 \approx -0,028, h_4 \approx -0,187, h_5 \approx 0,0308, h_6 \approx 0,0329, h_7 \approx -0,0106.$$

Формулы (2) представляют собой прямое дискретное вейвлет-преобразование исходного сигнала.

При восстановлении исходного сигнала применяют обратное дискретное вейвлет-преобразование по формуле:

$$a_{j+1,n} = \sum_i h_{n-2i} \cdot a_{j+1,i} + \sum_i g_{n-2i} \cdot d_{j+1,i} \quad (3)$$

Более подробно о вейвлет-преобразовании приведено в работе [9].

Для моделирования синтезированной акселерограммы с высокой интенсивностью применим следующий алгоритм:

- 1) разложим исходный сигнал y_i инструментальных акселерограмм, представленных на рис. 1, на коэффициенты $a_{j,i}$ и $d_{j,i}$: коэффициенты $a_{j,i}^1$ и $d_{j,i}^1$ соответствуют акселерограмме высокой интенсивности, а $a_{j,i}^2$ и $d_{j,i}^2$ – низкой интенсивности.
- 2) при восстановлении исходного сигнала по формулам (3) в качестве $a_{j,i}$ возьмем коэффициенты $a_{j,i}^1$, а в качестве коэффициентов $d_{j,i}$: – коэффициенты $d_{j,i}^2$.

В результате применения данного алгоритма получим синтезированную акселерограмму высокой интенсивности, представленную на рисунке 2.

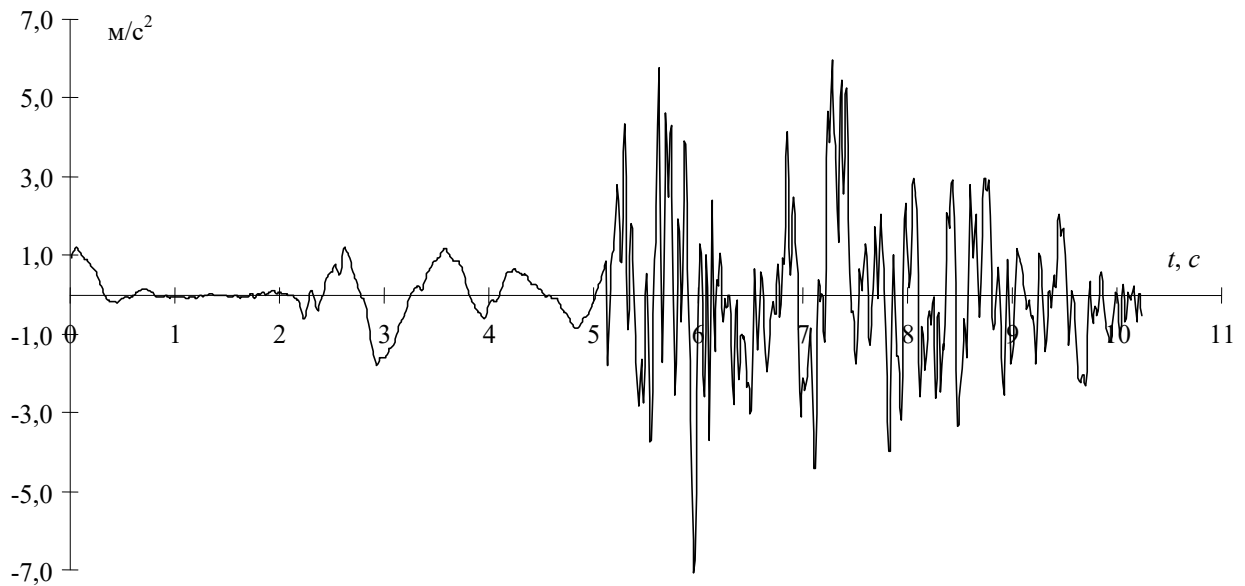


Рисунок 2 – Синтезированная акселерограмма на основе вейвлет-преобразования

Figure 2 – Synthesized accelerogram based on the wavelet transform

На рисунке 3 представлены спектры реакций линейных осцилляторов для инструментальных акселерограмм низкой и высокой интенсивностей и смоделированной акселерограммы.

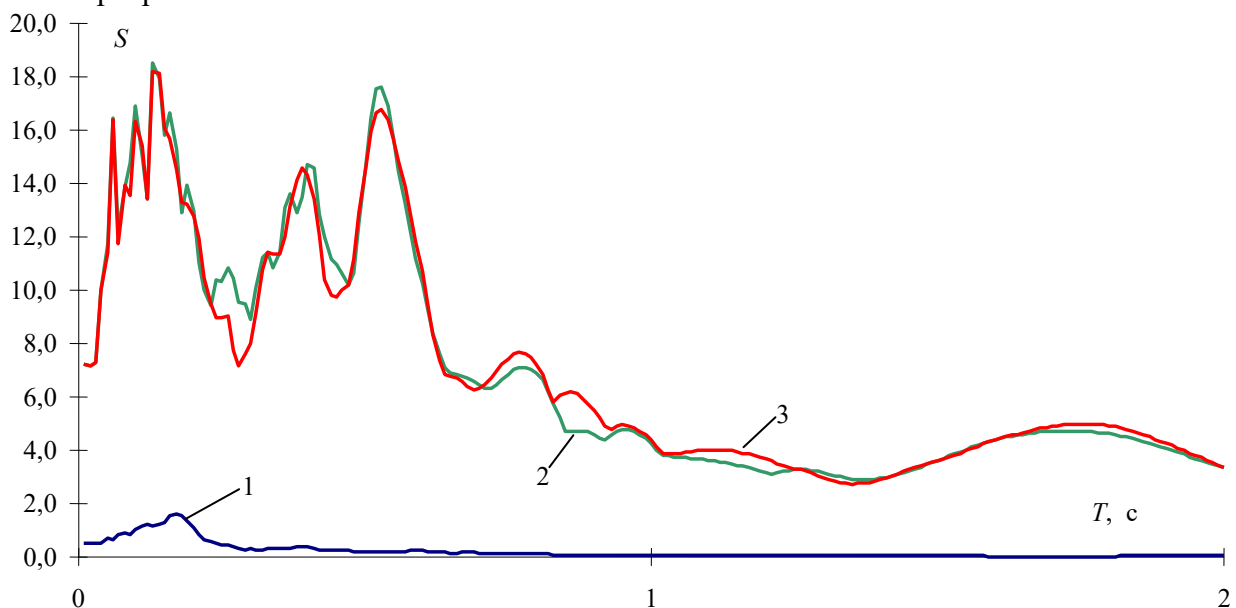


Рисунок 3 – Спектры реакций линейных осцилляторов: 1 – инструментальной акселерограммы низкой интенсивности; 2 – инструментальной акселерограммы высокой интенсивности; 3 – синтезированной акселерограммы

Figure 3 – Reaction spectra of linear oscillators: 1 – instrumental accelerogram of low intensity; 2 – instrumental accelerogram of high intensity; 3 – synthesized accelerogram

Из рисунка 3 следует, что спектры реакций синтезированной и инструментальной высокой интенсивности акселерограмм близки между собой.

Сравним энергетические критерии: критерий импульса и критерий Ариаса [10, 11], синтезированной и инструментальных акселерограмм, приведенных в таблице.

Таблица

Table

Критерий	Инструментальная акселерограмма низкой интенсивности	Инструментальная акселерограмма высокой интенсивности	Синтезированная акселерограмма с помощью вейвлет-преобразования
Импульс	0,39	12,95	9,28
Ариас	0,04	28,75	19,52

Из таблицы следует, что энергетические критерии синтезированной акселерограммы на 30% меньше инструментальной высокой интенсивностью, но в десятки раз больше, чем у инструментальной акселерограммы низкой интенсивностью.

Расчеты, выполненные в данной работе, сделаны по авторской методике с использованием открытой среды программирования Lazarus.

Выводы

1. Разработан алгоритм преобразования акселерограммы низкой интенсивности в акселерограмму высокой интенсивности с помощью вейвлет-преобразования.
2. Спектры реакций линейных осцилляторов преобразованной и исходной акселерограмм близки между собой.
3. Энергетические критерии преобразованной акселерограммы возросли в десятки раз по сравнению с инструментальной низкой интенсивности.
4. Предложенный алгоритм может быть использован на площадках с отсутствующими записями инструментальных акселерограмм высокой интенсивности.

Список литературы

1. Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. Москва: Наука. 1968. 476 с.
2. СП 14.13330.2018. «Строительство в сейсмических районах» / Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва: ОАО «ЦПП». 2018. 126 с.
3. Ицков И.Е., Чернов Н.Б. Использование акселерограмм, созданных по заданным спектрам реакции, для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2001. № 4. С. 7–12.
4. Хачиян Э.Е. Метод получения синтетической акселерограммы грунта по модели землетрясения как мгновенного разрыва среды // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2009. № 5. С.19–23.
5. Решетов А.А. Моделирование акселерограмм землетрясений в виде нестационарного случайного процесса: автореферат дисс. к.т.н.: 05.23.17 / А.А. Решетов / Место защиты: Моск. гос. строит. ун-т. Москва. 2013.19 с.
6. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166. № 11. С.1145 – 1170.
7. Воскобойников Ю. Е. Вейвлет-фильтрации сигналов и изображений (с примерами в пакете Mathcad): монография / Ю. Е. Воскобойников; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). 2015. 188 с.
8. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 464 с.

9. Харланова С.В., Харланов В.Л. Применение вейвлет-преобразования в фильтрации шума реальных акселерограмм землетрясений // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 3. С.19–27. DOI 10.3715312618-9283-2021-3-19-27.
10. EPRI TR-100082. Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by Yankee Atomic Electric Company, December 1991.
11. Arias A. A measure of earthquake intensity, in: *Seismic design for nuclear power points* edited by Hansen R.J., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970, pp. 438–483.

References

1. Medvedev S.V. Mezhdunarodnaya shkala seismicheskoy intensivnosti. *Sejsmorajonirovanie SSSR*. Moscow: Nauka. 1968. 476 p. [In Russian]
2. SP 14.13330.2018. "Stroitelstvo v seismicheskikh rajonah". Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81*. Moscow: OAO "TsPP". 2018.126 p. [In Russian]
3. Itskov I.E., Chernov N.B. Ispolzovanie akselerogram, sozdannyeh po zadannym spektram reaktsii, dlya otsenki seismostojkosti zdaniy i sooruzhenij. *Sejsmostojkoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenij*. 2001, no. 4, pp. 7–12. [In Russian]
4. Hachiyani E.E. Metod polucheniya sinteticheskoy akselerogrammy ghrunta po modeli zemletryaseniya kak mghnovennogo razryeva sredye. *Sejsmostojkoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenij*. 2009, no. 5, pp. 19–23. [In Russian]
5. Reshetov A.A. Modelirovanie akselerogram zemletryaseniya v vide nestatsionarnogo sluchajnogo protsessa: avtoreferat diss. k.t.n.:05.23.17/ A.A. Reshetov/ Mesto zashchitye: Mosk. gos. stroit. un-t. Moskva. 2013. 19 p. [In Russian]
6. Astafeva N.M. Veivlet-analiz: osnovnye teorii i primerye primeneniya. *Uspehi fizicheskikh nauk*. 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145 – 1170. [In Russian]
7. Voskoboynikov Yu.E. Veivlet-filtratsii signalov i izobrazhenij (s primerami v pakete Mathcad): monografiya / Yu.E. Voskoboynikov; Novosib. gos. arhitektur.-stroit. un-t (Sibstrin). Novosibirsk: NGHASU (Sibstrin). 2015. 188 p. [In Russian]
8. Dobeshi I. Desyat lektsij po veivletam. Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika". 2001. 464 p. [In Russian]
9. Harlanova S.V., Harlanov V.L. Primenenie veivlet-preobrazovaniya v filtratsii shuma realnyeh akselerogram zemletryaseniya. *Sejsmostojkoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenij*. 2021, no. 3, pp. 19–27. DOI 10.3715312618-9283-2021-3-19-27. [In Russian]
10. EPRI TR-100082. Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by Yankee Atomic Electric Company, December 1991.
11. Arias A. A measure of earthquake intensity, in: *Seismic design for nuclear power points* edited by Hansen R.J., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970, pp. 438–483.

Информация об авторах / Information about authors

Харланова Светлана Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины». ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Волгоград, Российская Федерация
e-mail: svetlh@mail.ru

Svetlana V. Kharlanova, Cand. Sci. (Engineering), associate Professor of the Department of Mathematical and Natural Sciences. FSFEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Харланов Владимир Леонтьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, основания и надежность сооружений». ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Волгоград, Российская Федерация
e-mail: harlanovvl@yandex.ru

Vladimir L. Kharlanov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department "Building constructions, bases and reliability of structures". FSFEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation