

УДК 624.042.8

DOI [10.37153/2618-9283-2021-3-19-27](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-3-19-27)

Теоретические и экспериментальные исследования

Применение вейвлет-преобразования в фильтрации шума реальных акселерограмм землетрясений

Харланова С.В.¹, Харланов В.Л.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».
Российская Федерация, Волгоград

Аннотация: При детерминированном анализе строительных конструкций в качестве исходных данных применяют реальные акселерограммы. Очень часто в открытом доступе есть только инструментальные записи акселерограмм, не очищенные от шума. Такие акселерограммы нельзя применять непосредственно при анализе строительных конструкций. Для корректировки инструментальных записей акселерографов применяются различные широкополосные фильтры. В данной статье рассматривается возможность применения фильтров, основанных на вейвлет-преобразовании.

Рассмотрена методика алгоритма фильтрации от шума исходных данных. В качестве эффективности данного алгоритма фильтрации проведен сравнительный анализ коэффициента динамичности и энергетических критериев импульса и Ариаса для откорректированной и инструментальной акселерограмм.

Ключевые слова: акселерограммы землетрясения, вейвлет-преобразование, коэффициент динамичности, энергетический критерий

Для цитирования: 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: [10.37153/2618-9283-2021-3-19-27](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-3-19-27)

Theoretical and experimental studies

Application of the wavelet transform in filtering the noise of real earthquake accelerograms

Kharlanova Svetlana V.¹, Kharlanov Vladimir L.²

^{1,2} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

Abstract: In the deterministic analysis of building structures, real accelerograms are used as input data. Very often, only instrumental recordings of accelerograms that are not cleared of noise are publicly available. Such accelerograms cannot be used directly in the analysis of building structures. Various broadband filters are used to adjust the instrumental recordings of accelerographs. This article discusses the possibility of applying filters based on the wavelet transform.

@ Харланова С.В., Харланов В.Л., 2021

The technique of the algorithm of filtering from the noise of the source data is considered. As an efficiency of this filtering algorithm, a comparative analysis of the dynamic coefficient and the energy criteria of the pulse and Arias for the corrected and instrumental accelerograms is carried out.

Keywords: earthquake accelerograms, wavelet transform, dynamism coefficient, energy criterion

For citation: Kharlanova S. V., Kharlanov V. L. Application of the wavelet transform in filtering the noise of real earthquake accelerograms. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 3, pp. 19-27. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-3-19-27](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-3-19-27)

Акселерограммы землетрясений можно рассматривать как одномерный дискретный сигнал, измеряемый в точках t со случайным шумом (погрешностью). Как правило, шум представляет собой погрешность измерительной аппаратуры. В этом случае получают так называемые «некорректные» записи землетрясений. Землетрясения, зафиксированные станциями Северной Америки, Канады, Японии выдают откорректированные записи. Станции Южной Америки выдают очень часто только неоткорректированные записи землетрясений. Для получения корректных записей необходимо исходный зарегистрированный сигнал пропустить через фильтр. В основном при решении этой проблемы применяют широкополосные фильтры. Относительно новым направлением в фильтрации исходных сигналов является вейвлет-преобразование.

В основе вейвлет-преобразования лежит разделение исходного сигнала на аппроксимирующие коэффициенты, представляющие сглаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, представляющие собой колебания [1,2]. Информация о шумовой составляющей исходного сигнала обычно содержится в детализирующих коэффициентах, поэтому именно они обрабатываются при очистке от шумов.

Пусть исходный сигнал представим в виде

$$y_i = f(t_i) + \xi_i, \quad 0 \leq i \leq N_t - 1, \quad (1)$$

где y_i – наблюдаемое значение одномерного дискретного сигнала, $f(t)$ – некоторая функция (сигнал), измеряемая в точках t_i со случайным шумом ξ_i .

Для очищения сигнала от шума 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 [3]:

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

где $a_{j,i} = y_i$, $g_n = (-1)^i \cdot h_{2M-1-i}$, $i = \overline{0, N-1}$, $2M$ – определяет число коэффициентов h_i . В качестве фильтра h применим коэффициенты вейвлета – Добеши D^8 , обладающего свойством ортогональности [4]:

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

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

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

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

При реализации алгоритмов прямого и обратного вейвлет-преобразования число N коэффициентов $a_{j,i}$ должно быть кратным 2. Если это условие не выполняется, то исходная последовательность сигналов дополняется нулями до требуемой длины.

При прямом вейвлет-преобразовании количество коэффициентов $a_{j,i}$ и $d_{j,i}$ при переходе от уровня j к уровню $j + 1$ уменьшается в 2 раза, а при обратном вейвлет-преобразовании количество коэффициентов $a_{j,i}$ и $d_{j,i}$ при переходе от уровня j к уровню $j - 1$ увеличивается в 2 раза.

В матричном виде один шаг прямого вейвлет-преобразования выглядит следующим образом:

$$M_j \cdot A_j = V_j, \quad (4)$$

где

$$M_j = \begin{pmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & h_4 & h_5 & h_6 & h_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & h_4 & h_5 & h_6 & h_7 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & h_4 & h_5 & h_6 & h_7 \\ h_6 & h_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 & h_4 & h_5 \\ h_4 & h_5 & h_6 & h_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_0 & h_1 & h_2 & h_3 \\ h_2 & h_3 & h_4 & h_5 & h_6 & h_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 & g_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 & g_7 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 & g_7 \\ g_6 & g_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 & g_4 & g_5 \\ g_4 & g_5 & g_6 & g_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 & g_2 & g_3 \\ g_2 & g_3 & g_4 & g_5 & g_6 & g_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_0 & g_1 \end{pmatrix}, \quad A_j = \begin{pmatrix} a_{j,0} \\ a_{j,1} \\ \dots \\ a_{j,N_j/2-3} \\ a_{j,N_j/2-2} \\ a_{j,N_j/2-1} \\ a_{j,N_j/2} \\ a_{j,N_j/2+1} \\ a_{j,N_j/2+2} \\ \dots \\ a_{j,N_j-4} \\ a_{j,N_j-3} \\ a_{j,N_j-2} \\ a_{j,N_j-1} \end{pmatrix}, \quad V_j = \begin{pmatrix} a_{j+1,0} \\ a_{j+1,1} \\ \dots \\ a_{j+1,N_j/2-4} \\ a_{j+1,N_j/2-3} \\ a_{j+1,N_j/2-2} \\ a_{j+1,N_j/2-1} \\ d_{j+1,0} \\ d_{j+1,1} \\ \dots \\ d_{j+1,N_j/2-4} \\ d_{j+1,N_j/2-3} \\ d_{j+1,N_j/2-2} \\ d_{j+1,N_j/2-1} \end{pmatrix},$$

N_j – длина сигнала на j -м уровне разложения.

При обратном вейвлет-преобразовании $A_j = M_j^{-1} \cdot V_j = M_j^T \cdot V_j$.

Алгоритм фильтрации зашумленных данных выглядит следующим образом [3]:

- 1) находят коэффициенты $a_{j,i}$ и $d_{j,i}$, вычисленные по формулам (2);
- 2) к найденным коэффициентам детализации $d_{j,i}$ применяют алгоритм с так называемой «жесткой» пороговой функцией вида

$$H(\lambda) = \begin{cases} d_{j,i}, & \text{если } |d_{j,i}| \geq \lambda \\ 0, & \text{если } |d_{j,i}| < \lambda \end{cases} \quad (5)$$

- 3) восстанавливают сигнал путем взятия обратного вейвлет-преобразования от коэффициентов $a_{j,i}$ и $d_{j,i}$, найденных в пунктах 1 и 2.

В качестве параметра λ взят универсальный порог вида [5]

$$\lambda_j = \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \ln N_j}, \quad \sigma = \frac{\text{median}(d_{1,k})}{0.6547}, \quad (6)$$

где N_j – количество детализирующих коэффициентов на j -м уровне разложения. Следовательно, чем выше уровень разложения j , тем меньше порог λ_j .

Максимальный уровень разложения J находится по формуле $J = \frac{\ln N}{\ln 2}$, где N – длина исходного сигнала. Опытным путем было установлено, что достаточно брать $J = 5$, т.к. увеличение глубины разложения не сильно влияет на фильтрацию исходного сигнала от шума [2].

В качестве примера рассмотрим 2 инструментальных записи землетрясения: первую – в направлении С – Ю, зарегистрированную станцией Газли в 1976 году, вторую – в направлении З – В, зарегистрированную станцией Бухарест в 1996 году. На рис. 1 приведены соответствующие записи землетрясений.

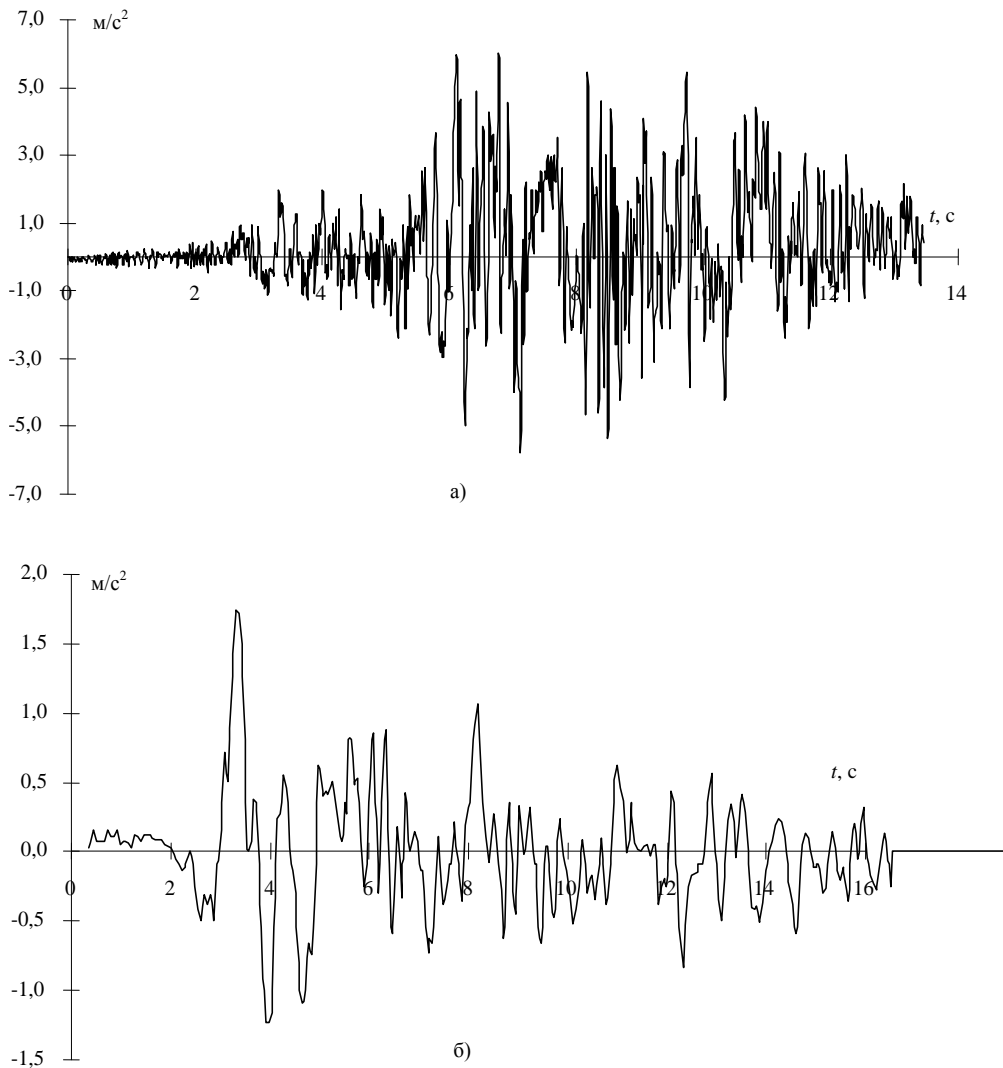


Рисунок 1 – Инструментальные записи землетрясений, зарегистрированные станциями:
а) Газли, б) Бухареста

Figure 1 – Instrumental earthquake records recorded by stations: a) Gazli, b) Bucharest

Применяя вышеизложенный алгоритм фильтрации исходных данных от шума, были получены откорректированные записи землетрясений. Кроме того, перед началом фильтрации предусмотрена очистка исходных данных от тренда, т.е. приведение к нулевому среднему.

Для возможности применения вейвлет-преобразования в качестве средства очистки исходных акселерограмм от шума проведено сравнение с традиционными методами фильтрации.

На рисунке 2 представлены спектры реакций линейных осцилляторов для инструментальной акселерограммы, откорректированной, пропущенной через эллиптический фильтр и акселерограммы, полученной в результате вейвлет-преобразования.

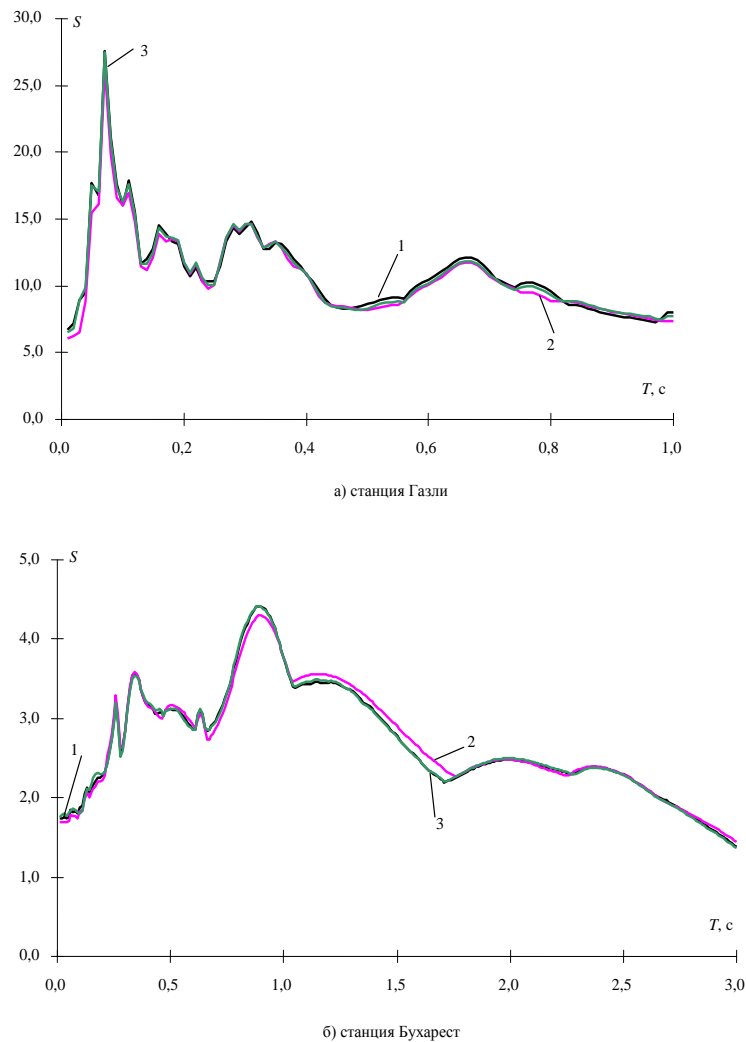


Рисунок 2 – Спектры реакций линейных осцилляторов: 1 – инструментальной акселерограммы, 2 – акселерограммы, пропущенной через эллиптический фильтр, 3 – акселерограммы, полученной с помощью вейвлет-преобразования

Figure 2 – The reaction spectra of linear oscillators: 1 – instrumental accelerogram, 2 – accelerogram passed through an elliptic filter, 3 – accelerogram obtained using the wavelet transform.

Анализ рис. 2 показывает, что спектры откорректированных акселерограмм с помощью эллиптического фильтра и с помощью вейвлет-преобразования практически идентичны.

Для проверки сохранения энергии инструментальной и отфильтрованной акселерограмм применили энергетические критерии: критерий импульса (CAV) и критерий Ариаса.

Энергетический критерий CAV, вычисляется по формуле [6]

$$CAV = \int_0^t |\ddot{y}_0(t)| dt, \quad (7)$$

критерий Ариаса [7]:

$$I_A = \int_0^t \ddot{y}_o(t)^2 dt, \quad (8)$$

где $\ddot{y}_o(t)$ — акселерограмма свободной поверхности.

В таблице 1 приведен расчет энергетического критерия SAV, а в таблице 2 – критерия Ариаса для откорректированных и инструментальной акселерограмм.

Таблица 1
Table 1

Станция	Инструментальная акселерограмма	Акселерограмма, пропущенная через эллиптический фильтр	Акселерограмма, полученная с помощью вейвлет-преобразования
Газли	14,129	13,277	14,411
Бухарест	4,619	4,482	4,619

Таблица 2
Table 2

Станция	Инструментальная акселерограмма	Акселерограмма, пропущенная через эллиптический фильтр	Акселерограмма, полученная с помощью вейвлет-преобразования
Газли	31,666	27,415	30,472
Бухарест	2,622	2,588	2,621

Из таблиц 1 и 2 следует, что фильтрация акселерограммы от шума с помощью вейвлет-преобразования не уменьшает энергетические критерии.

Все расчеты выполнены с использованием открытой среды программирования Lazarus по авторской методике.

Выводы

1. Рассмотрен алгоритм фильтрации записей землетрясений от шума с помощью вейвлет-преобразования с глубиной разложения $J = 5$.
2. Данный алгоритм фильтрации практически не изменяет коэффициент динамичности для инструментальной и отфильтрованной акселерограмм.
3. Рассмотренный алгоритм фильтрации не уменьшает энергетические критерии отфильтрованных акселерограмм.
4. Недостатком данного алгоритма является необходимая длина исходных данных, кратная 2. При невыполнении этого условия требуемая длина данных заполняется нулями или отсекается до необходимой длины.

Литература

1. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. № 11. Т. 166. С. 1145-1170.
2. Московский С.Б., Сергеев А.Н., Лалина Н.А. Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет преобразования // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. 2015. № 2 (15). <https://7universum.com/ru/tech>

3. Воскобойников Ю.Е. Вейвлет-фильтрации сигналов и изображений (с примерами в пакете Mathcad): монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). 2015. 188 с.
4. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 464 с.
5. Donoho D.L., Johnstone I.M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. *Biometrika*. 1994, V.81, no. 3, pp. 425-455.
6. EPRI TR- 100082. Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by Yankee Atomic Electric Company, December 1991.
7. Arias A. A measure of earthquake intensity. *Seismic design for nuclear power points* (ed. R.J. Hansen). MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1970, pp. 438-483.

References

1. Astaf'eva N. M. Veivlet-analiz: Osnovy teorii i primery primeneniia. *Uspehi fizicheskikh nauk*. 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145-1170. (In Russian)
2. Moskovskii S.B. Ochistka signala ot шумов s ispolzovaniem veivlet preobrazovaniya. Moskovskii S.B., Sergeev A.N., Lalina N.A. *Universum: Tehnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn*. 2015. No 2 (15). <https://7universum.com/ru/tech> (In Russian)
3. Voskoboinikov Yu. E. Veivlet-filtratsii signalov i izobrazhenii (s primerami v pakete Mathcad): monografiya . Yu. E. Voskobojnikov. Novosib. gos. arhitektur.-stroit. un-t (Sibstrin). Novosibirsk: NGHASU (Sibstrin), 2015, 188 p. (In Russian)
4. Dobeshi I. Desiat' lektzii po veivletam. Izhevsk: NITs «Regulyarnaia i haoticheskaia dinamika». 2001, 464 p. (In Russian)
5. Donoho D.L. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. D.L. Donoho, I.M. Johnstone. *Biometrika*. 1994, vol.81, no. 3, pp. 425-455.
6. EPRI TR- 100082. Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by Yankee Atomic Electric Company, December 1991.
7. Arias A. A measure of earthquake intensity. *Seismic design for nuclear power points* (ed. R.J. Hansen). MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1970, pp. 438-483.

Сведения об авторах / Information about the authors

Харланова Светлана Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и информатика», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Волгоград, Российская Федерация

Харланов Владимир Леонтьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, основания и надежность сооружений», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Волгоград, Российская Федерация

Kharlanova Svetlana V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics and Informatics, Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Kharlanov Vladimir L., Doctor of technical Sciences, Professor of the Department «Building constructions, bases and reliability of structures» Department, Volgograd state technical University. Volgograd, Russian Federation

Поступила в редакцию / Received – 17.05.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised – 28.05.2021

Принята к публикации / Accepted – 11.06.2021