

---

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

## BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES. BASES AND FOUNDATIONS

Известия вузов. Строительство. 2022. № 6. С. 5–14.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (6): 5–14.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 699.842

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-5-14

### ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ ОТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ПРОМЫШЛЕННОЕ ЗДАНИЕ

**Имран Шири оглы Алирзаев, Николай Семенович Сова**

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

**Аннотация.** С целью оценки воздействия вибрации, вызванной движением железнодорожных поездов, на грунты основания, фундаменты и надземные конструкции промышленного здания проведены исследования на одном из объектов АО «Воронежсинтезкаучук» на стадиях проектирования и эксплуатации. В ходе виброобследований определены параметры исходного динамического воздействия от железнодорожного транспорта, расчетные и фактические значения вибрации на поверхности грунта вблизи здания, уровни вибрации фундамента и элементов каркаса. Расчетные значения параметров вибрации установлены аналитическими расчетами и численными исследованиями с помощью программного комплекса midas GTS NX на стадии проектирования. Фактические значения величин виброскоростей и виброускорений получены с применением виброметра ЭКОФИЗИКА-111В в ходе виброобследований.

**Ключевые слова:** движение поезда, промышленное здание, оценка вибрации, виброскорость, виброускорение

**Для цитирования:** Алирзаев И.Ш., Сова Н.С. Оценка воздействия вибрации от железнодорожного транспорта на промышленное здание // Известия вузов. Строительство. 2022. № 6. С. 5–14. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-5-14.

Original article

## EVALUATION OF IMPACT OF VIBRATION FROM RAIL TRANSPORT ON INDUSTRIAL BUILDING

**Imran Sh. Alirzaev, Nikolai S. Sova**

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract.** In order to assess the impact of vibration caused by the movement of railway trains on the foundation soils, foundations and elevated structures of an industrial building, studies were carried out at one of the facilities of «Voronezhskintezkauchuk» JSC at the design and operation stages. In the course of vibration surveys, the parameters of the initial dynamic impact from railway transport, the calculated and actual values of vibration on the soil surface near the building, the levels of vibration of the foundation and frame elements were determined. The design values of the vibration parameters were established by analytical calculations and numerical studies using the midas GTS NX software package at the design stage. The actual values of vibration velocities and vibration accelerations were obtained using the EKOPHYSIKA-111V vibrometer during vibration surveys.

**Keywords:** train movement, industrial building, vibration assessment, vibration velocity, vibration acceleration

**For citation:** Alirzaev I.Sh., Sova N.S. Evaluation of impact of vibration from rail transport on industrial building. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (6): 5–14. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-762-6-5-14.

**Введение.** Согласно требованиям действующих нормативных документов, при проектировании и оценке технического состояния зданий и сооружений вблизи источников динамических нагрузок требуется проведение вибрационных обследований в целях получения расчетных и фактических данных об уровнях колебаний грунта и строительных конструкций<sup>1, 2</sup>. Помимо изменений напряженно-деформационного состояния (НДС) надземных конструкций вибрационные воздействия приводят к снижению несущей способности грунтов основания и развитию дополнительных неравномерных осадок фундаментов, которые, в свою очередь, провоцируют развитие дополнительных усилий в несущих элементах здания<sup>3, 4</sup>.

**Объект исследования** – пятиэтажное здание объекта «Организация технологического узла утилизации воздушных выбросов цеха № 28 с выработкой пара АО «Воронежсинтезкаучук»» с размерами в плане 18×51 м и высотой 22,57 м.

Стальной каркас здания является основной несущей конструкцией, воспринимающей и передающей на фундаменты все вертикальные и горизонтальные нагрузки. Каркас корпуса выполнен по рамно-связевой схеме. Поперечные рамы каркаса обеспечивают жесткость здания в поперечном

---

<sup>1</sup> ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М., 2014. 59 с.

<sup>2</sup> ГОСТ Р 52892–2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М., 2008. 20 с.

<sup>3</sup> СП 22.13330. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83\*. М., 2016.

<sup>4</sup> СП 413.1325800.2018. Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования. М., 2018.



Рис. 1. Взаимное расположение строящегося здания и железнодорожного пути

Fig. 1. Mutual arrangement of the building under construction and the railway track

направлении, а вертикальные связи между колоннами – в продольном. Поперечная рама включает в себя пять стальных колонн. На колонны на разных отметках опираются конструкции рабочих площадок и покрытия. Фундамент здания выполнен в виде сплошной монолитной железобетонной плиты. Площадка строительства сложена следующими грунтами: насыпной грунт мощностью 0,9 м, песок средней крупности, средней плотности мощностью 1,8 м и песок средней крупности, плотный мощностью 14 м.

Основным источником динамического воздействия для рассматриваемого здания является движение грузовых поездов. Расстояние от здания до оси железнодорожного пути составляет 18 м (рис. 1), что меньше ориентировочного значения ширины полосы влияния<sup>5</sup>. Следовательно, есть основания предполагать, что вибрация, создаваемая железнодорожным транспортом, может привести к повреждению строительных конструкций и дополнительным осадкам (локальным уплотнениям) грунтового основания здания [1–3].

**Методика проведения виброобследований.** С целью обеспечения достоверности результатов исследования выполнялись на основе сопоставления расчетных значений с экспериментальными данными. Инженерные расчеты произведены в двух приближениях на этапе проектирования. В первом приближении выполнялся модальный анализ для оценки близости частот собственных колебаний сооружения и частот возмущения [4]. С учетом соотношения частот осуществлен предварительный расчет для кинематического воздействия в соответствии с требованиями действующих нормативных документов<sup>5, 6, 7</sup>. Во втором приближении произведен линейный нестациона-

<sup>5</sup> СП 441.1325800.2019. Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом. Правила проектирования. М., 2019.

<sup>6</sup> СП 119.13330.2017. Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95. М., 2018.

<sup>7</sup> ГОСТ Р ИСО 10137–2016. Основы расчета строительных конструкций. Эксплуатационная надежность зданий в условиях воздействия вибрации. М., 2017.

нарный расчет для силового воздействия прямым динамическим методом с применением программного комплекса midas GTS NX. Полученные теоретические результаты, установленные виброобследованиями, проводимыми с применением виброметра ЭКОФИЗИКА-111В, сравниваются с фактическими параметрами вибрации здания на стадии эксплуатации.

В качестве вибрационных критериев для строительных конструкций и грунтов основания выбраны максимальные значения виброскоростей и виброускорений в нескольких частотных диапазонах. Предельные значения виброскоростей для надземных конструкций приняты по ГОСТ Р 52892–2007. Прогноз развития виброползучести (локального уплотнения грунтов основания) выполняется по допустимым значениям виброускорений, указанным в документах<sup>3, 4, 5</sup>.

**Определение параметров вибрации при кинематическом воздействии в соответствии с требованиями норм.** В качестве внешнего кинематического воздействия принималось начальное значение виброскорости на расстоянии от источника колебаний с учетом демпфирования грунта. Виброскорость колебаний грунта  $v$ , м/с, в точке на расстоянии  $r$  от источника колебаний устанавливается по известной виброскорости  $v_0$  на расстоянии  $r_0$  от оси железнодорожного пути произведением ее на коэффициент геометрического ослабления  $C$  и коэффициент демпфирования материала  $D$  по СП 441.1325800.2019

$$v(r) = v(r_0)CD. \quad (1)$$

Параметры  $C$  и  $D$  определяли по ГОСТ Р ИСО 10137–2016

$$C = \left(\frac{r_0}{r}\right)^n, \quad D = e^{-\rho\pi f_{cr}(r-r_0)}, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель степени, выбираемый в зависимости от типа механизма распространения волн<sup>5</sup>;

$f_{cr}$  – среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц;

$\rho = \frac{\eta}{c}$  – параметр, вычисляемый исходя из результатов динамических испытаний грунта;

$\eta = \frac{\delta}{\pi}$  – коэффициент потерь грунта, где  $\delta$  – логарифмический декремент затухания колебаний;

$c$  – скорость продольной волны. В дальнейших расчетах значение параметра  $\eta$  принималось по СП 441.1325800.2019.

Частота свободных колебаний здания определялась как для жестких конструкций на упругом основании согласно СП 441.1325800.2019

$$f_{bs} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_b}}, \quad (3)$$

где  $k_s$  – жесткость грунта основания;

$m_b$  – масса сооружения с учетом нормативных значений временной нагрузки и технологического оборудования.

Коэффициент жесткости при упругом равномерном сжатии вычисляется по СП 26.13330.2012<sup>8</sup>

$$K_z = C_z A, \quad (4)$$

где  $C_z$  – коэффициент упругоравномерного сжатия, кН/м<sup>3</sup>;  
 $A$  – площадь подошвы фундамента, м<sup>2</sup>.

Значение коэффициента упругоравномерного сжатия определялось по формуле СП 26.13330.2012

$$C_z = b_0 E \left( 1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A}} \right), \quad (5)$$

где  $b_0$  – коэффициент, принимаемый 1, для песчаных грунтов;  
 $E$  – модуль деформации грунта под подошвой фундамента;  
 $A_{10} = 10 \text{ м}^2$ ,  $A$  – площадь подошвы плитного фундамента.

Передаточная функция для фундамента как массивного тела на упругом основании устанавливалась по формуле СП 441.1325800.2019

$$k_{fund} = \sqrt{\frac{1 + z^2 \eta^2}{(z^2 - 1) + z^2 \eta^2}}, \quad (6)$$

где  $z = \frac{f_{bs}}{f}$  – коэффициент расстройки.

Значение виброскорости в каждой октавной полосе для фундамента здания определялось по формуле

$$v_{fund,i}(f) = v_i(f) k_{fund,i}, \quad (7)$$

где  $v_i(f)$  – виброскорость колебаний грунта в исследуемой точке вблизи фундамента в  $i$ -й октавной полосе частот;

$k_{fund,i}$  – значение передаточной функции для  $i$ -й октавной полосы частот.

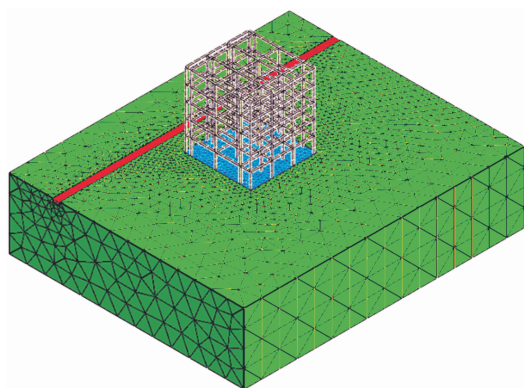
Эквивалентное значение виброускорения около фундамента для оценки влияния вибрации на осадки здания вычислялось по значению виброскорости

$$a_{fund,i}(f) = 2\pi v v_{fund,i}(f). \quad (8)$$

**Определение параметров вибрации при силовом воздействии методом конечных элементов.** Расчеты для случая силового воздействия выполнены в рамках численного моделирования в программном комплексе midas GTS NX в два этапа (рис. 2). На первом этапе проводился модальный анализ для определения собственных форм колебаний и соответствующих частот (рис. 3). Результаты модального анализа использовались для оценки близости частот собственных колебаний сооружения и частот возмущения. На втором этапе производился линейный нестационарный расчет прямым динамическим методом.

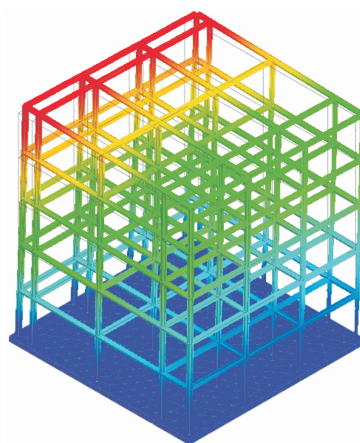
Для предварительных расчетов погонная статическая нагрузка принималась равной 103 кН/м, а динамическая – 168 кН/м для существующих и вновь

<sup>8</sup> СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05–87. М., 2012.



*Рис. 2. Конечно-элементная модель в ПК midas GTS NX*

*Fig. 2. Finite element model in PC midas GTS NX*



*Рис. 3. Первая форма собственных колебаний*

*Fig. 3. The first form of natural oscillations*

проектируемых путей колеи 1520 мм в соответствии с СП 119.13330.2017. При определении динамических нагрузок считается, что приложенная нагрузка от железнодорожного транспорта является гармонической (шпалы расположены на поверхности грунтового основания). Скорость поезда согласно техническому заданию на проектирование равна 30 км/ч. Время приложения динамической нагрузки от поезда с учетом геометрии расчетной области принималось равным 5 с.

Для создания динамической нагрузки в ПК midas GTS NX использовались величина скорости поезда, начальный и конечный узел, узлы приложения нагрузок и расстояния между узлами. Созданная нагрузка автоматически используется в расчете как динамическая узловая. Размеры расчетной области основания выбирались таким образом, чтобы динамическое взаимодействие основания и сооружения не оказывало влияния на НДС в окрестности его границы. Во избежание фиктивных отражений на внешних границах модели устанавливались вязкие границы. Размеры конечных элементов назначались с учетом скорости распространения волн. Характеристики упругих и поглощающих свойств грунтов приняты по данным физико-механических испытаний грунтов<sup>9</sup> [5] и приложению А (ГОСТ 31937–2011).

**Определение фактических параметров вибрации здания по результатам измерений.** Основной целью виброобследования являлись определение фактических вибраций здания и сопоставление результатов с предельными значениями нормативных документов. Колебания сооружения регистрировались виброметром ЭКОФИЗИКА-111В (в госреестре № 66279-16). Измерения проводились тремя однокомпонентными датчиками (АР 2099-100), которые позволяют регистрировать вибрации по трем независимым синхронным каналам, в трех режимах: «Общая вибрация ЭФБ-110В», «Локальная вибрация ЭФБ-110В» и «1/3 – октавный анализатор XYZ», не менее трех раз. При этом

<sup>9</sup> ГОСТ Р 56353–2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. М., 2015.

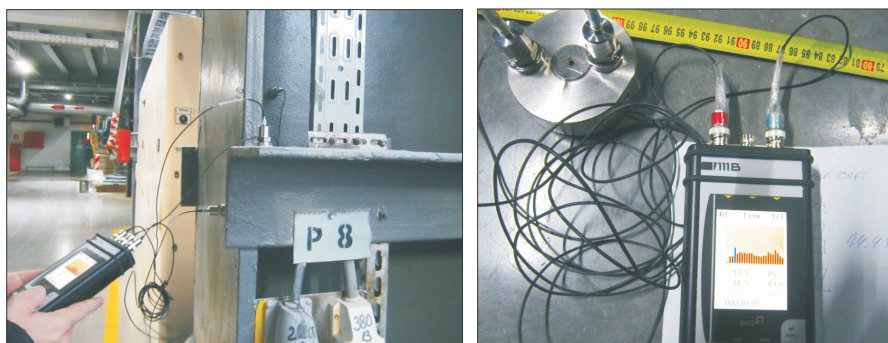


Рис. 4. Измерение вибрации колонн основного каркаса и фундаментной плиты  
 Fig. 4. Measurement of vibration of columns of the main frame and foundation slab

**Значения виброскоростей, мм/с**

**Vibration velocity values, mm/s**

Метод	Фундамент	Колонны	Ригели
I	0,354	–	–
II	0,165 (0,135)	0,32 (0,28)	0,23 (0,19)
III	0,149	0,254	0,18

измеренные на каждом периоде пиковые значения не должны отличаться от среднего значения более чем на 10 %. Обработка результатов измерений проводилась с помощью программного обеспечения Signal+.

Измерения значений виброускорений и виброскоростей проводились для трех проходов поезда в соответствии с требованиями документов<sup>10, 11</sup>. В ходе виброобследований для фундаментной плиты и грунтов оснований измерения проводились в вертикальном направлении, а для элементов каркаса – в трех ортогональных направлениях. Значения виброскоростей и виброускорений для грунтов измерялись на поверхности грунта с шагом 2 м в перпендикулярном к железнодорожной линии направлении в сторону строящегося здания в нормируемых октавных диапазонах со среднегеометрическими частотами 4, 8, 16, 31,5 и 63 Гц для поездов 2-й категории по СП 441.1325800.2019 (рис. 4).

**Оценка вибрационного воздействия на грунты основания, фундамент и элементы каркаса.** Максимальные значения виброскоростей, полученные по результатам расчетов в соответствии с нормативными документами (I метод), в midas GTS NX (II метод) и непосредственных измерений (III метод) в октавных полосах частот 4–63 Гц, приведены в сводной таблице. Для варианта II в скобках даны результаты с учетом возможности сдвига между боковыми поверхностями фундаментной плиты и окружающим грунтом по СП 22.13330. Условия контакта в midas GTS NX были заданы интерфейсными элементами.

<sup>10</sup> ГОСТ Р 53964–2010. Вибрация. Измерения вибрации сооружений. Руководство по проведению измерений. М., 2019.

<sup>11</sup> ГОСТ ИСО 5348–2002. Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров. М., 2007.

Согласно представленным результатам, максимальный уровень вибростороостей фундамента здания и элементов каркаса не превышает предельные значения для здания 1-й категории по ГОСТ Р 52892–2007.

Проверка по ограничению уровней скоростей колебаний поверхности грунта проводилась в соответствии с пунктом 6.14.3 СП 22.13330. Ограничение уровней ускорений, провоцирующих развитие дополнительных осадок, установлено согласно таблице Г1 СП 441.1325800.2019. Максимальное значение виброускорения поверхности грунта, полученное по трем методам, составляло 13,5 мм/с<sup>2</sup>. Согласно таблице Г1 СП 441.1325800.2019 при таком значении возможны весьма незначительные незатухающие или слабозатухающие осадки (1–2 мм в год). С целью уменьшения динамического воздействия на грунты основания рекомендовано устройство виброзащитной конструкции верхнего строения пути.

**Выводы.** 1. Результаты расчета в программном комплексе midas GTS NX и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются. Незначительное различие результатов по вибростороостям для несущих элементов здания объясняется влиянием моделирования узлов сопряжения элементов каркаса и конструктивного демпфирования на их частотные характеристики [6, 7].

2. Существенное отличие результатов для фундаментной плиты, полученных в соответствии с требованиями нормативных документов и фактическими параметрами, связано со сложностью определения коэффициента демпфирования для грунтов основания (передающей среды) и параметра затухания колебательного процесса при переходе с грунта на фундамент (передаточной функции) и влиянием заглубления фундамента [8–10].

3. При вибрационных воздействиях для достоверной оценки технического состояния грунтов оснований и строительных конструкций необходимо нормативные методы использовать в комбинации с численными решениями и результатами измерений.

#### Список источников

1. *Чернов Ю.Т.* Проектирование зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 73–77.
2. *Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М.* Опыт использования сейсмической регистрации вибраций от поездов для оценки состояния конструкций зданий и сооружений // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76, № 5. С. 281–287.
3. *Шутова О.А., Пономарев А.Б.* Численное моделирование вибрационного воздействия автотранспорта на фундаменты зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. № 1. С. 93–102.
4. *Айзенберг Я.М., Мамаева Г.В.* Определение динамических характеристик каркасных зданий для практических расчетов на сейсмические воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 6. С. 44–53.
5. *Alirzaev I.S., Rakhimov A. S., Sova N.S.* An indirect method for determining the dynamic properties of soils at modeling the vibrating effects of technological equipment on the building structures. IOP Conference series: Materials science and engineering. 2019. P. 012015.



6. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Сталь, 2002. 600 с.
7. Смирнов В.А., Филиппова П.А., Цукерников И.Е. Анализ вибрации в жилом здании, находящемся в технической зоне метрополитена // Биосферная совместимость: Человек, регион, технологии. 2017. № 3. С. 87–95.
8. Смирнов В.А. Защита несущих конструкций зданий от влияния вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом // Жилищное строительство. 2020. № 12. С. 40–46.
9. Баженов В.Г., Дюкина Н.С. Численное исследование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5, № 1. С. 19–24.
10. Колесников А.О., Попов В.Н. Расчет собственной частоты колебаний заглубленного фундамента при импульсном нагружении // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14, № 5. С. 360–368.

### References

1. Chernov Yu.T. Design of buildings and structures subject to dynamic influences. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction*. 2018; (4): 73–77. (In Russ.).
2. Kapustyan N.K., Antonovskaya G.N., Basakina I.M. Experience in using seismic registration of vibrations from trains to assess the state of structures of buildings and structures. *Vestnik VNIIZhT = Bulletin VNIIZhT*. 2017; 76 (5): 281–287. (In Russ.).
3. Shutova O.A., Ponomarev A.B. Numerical modeling of the vibration impact of vehicles on the foundations of buildings. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of PNRPU. Construction and architecture*. 2018; (1): 93–102. (In Russ.).
4. Aizenberg Ya.M., Mamaeva G.V. Determination of the dynamic characteristics of frame buildings for practical calculations on seismic effects. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy = Structural mechanics and design of structures*. 2009; (6): 44–53. (In Russ.).
5. Alirzaev I.S., Rakhimov A.S., Sova N.S. An indirect method for determining the dynamic properties of soils at modeling the vibrating effects of technological equipment on the structures. IOP Conference series: Materials science and engineering. 2019. P. 012015.
6. Perelmuter A.V., Slivker V.I. Calculation models of structures and the possibility of their analysis. Kiev, 2002. 600 p. (In Russ.).
7. Smirnov V.A., Filippova P.A., Tsukernikov I.E. Vibration analysis in a residential building located in the technical area of the subway. *Biosferная совместимость: человек, регион, технологии = Biospheric compatibility: man, region, technologies*. 2017; (3): 87–95. (In Russ.).
8. Smirnov V.A. Protection of load-bearing structures of buildings from the influence of vibration created by railway transport. *Zhilishchnoye stroitel'stvo = Housing construction*. 2020; (12): 40–46. (In Russ.).
9. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Numerical study of the interaction of structures with soil under seismic impact. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred = Computational mechanics of continuous media*. 2012; 5 (1): 19–24. (In Russ.).
10. Kolesnikov A.O., Popov V.N. Calculation of the natural frequency of vibrations of a buried foundation under impulse loading. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy = Structural mechanics of engineering structures and facilities*. 2018; 14 (5): 360–368. (In Russ.).

**Информация об авторах**

**И.Ш. Алирзаев** – кандидат физико-математических наук, доцент, imranalirzaev@yandex.ru

**Н.С. Сова** – старший научный сотрудник, sova1950@yandex.ru

**Information about the authors**

**I.Sh. Alirzaev** – PhD, Ass. Professor, imranalirzaev@yandex.ru

**N.S. Sova** – Senior Researcher; sova1950@yandex.ru

**Вклад авторов:** авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.04.2022  
Одобрена после рецензирования 18.05.2022  
Принята к публикации 25.05.2022

The article was submitted 18.04.2022  
Approved after reviewing 18.05.2022  
Accepted for publication 25.05.2022