

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 1. С. 132–141.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (1): 132–141.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-132-141

EDN: OKCIRA

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПЛОЩАДКИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**Иван Иванович Подшивалов, Сергей Васильевич Ющубе,
Александр Александрович Тарасов**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность работы заключается в разработке методики оценки влияния нового технологического оборудования с динамическим воздействием от вибрационного грохота на напряженно-деформированное состояние металлического каркаса действующей производственной площадки цеха мокрого обогащения песка обогатительной фабрики.

Цель работы состоит в расчетном обосновании допустимости размещения нового технологического оборудования с обеспечением надежности металлических конструкций каркаса, который установлен в железобетонном прямке с монолитными стенами и фундаментной плитой на естественном основании.

Методы. Расчетное обоснование выполнено моделированием напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и грунтового основания производственной площадки в ПВК Ing+2021 MicroFe с разработкой расчетной конечно-элементной пространственной модели. При появлении новой динамической нагрузки от вибрационного грохота моделирование выполнено с учетом демпфирующих свойств материалов конструкций и грунта, а также динамических свойств грунта.

Результаты. После проведения раздельного статического расчета от стационарных нагрузок и динамического расчета от вибрационного воздействия грохота конструктивный расчет металлических элементов площадки на совместное действие статических и динамических нагрузок показал, что прочность/устойчивость и жесткость металлических конструкций каркаса при установке нового вибрационного грохота будут обеспечены.

Ключевые слова: производственная площадка, конструкции, основание, технологическая нагрузка, моделирование, расчет, статика, динамика

Для цитирования: Подшивалов И.И., Ющубе С.В., Тарасов А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлического каркаса производственной площадки при динамическом воздействии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 132–141. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-132-141. EDN: OKCIRA

ORIGINAL ARTICLE

FINITE ELEMENT MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF MANUFACTURING SITE METAL STRUCTURE UNDER DYNAMIC LOAD

Ivan I. Podshivalov, Sergei V. Yushchube, Aleksandr A. Tarasov
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Purpose: The aim of this work is to calculate the admissible allocation of new technological equipment with reliable metal frame in reinforced-concrete area with cast-in-situ walls and foundation slab on earth foundation.

Methodology/approach: The stress-strain state of structures and earth foundation of the manufacturing site is performed by the finite element method using the verified software package Ing+ 2021 MicroFe and proposed finite element model. Static analysis of loads, dynamic analysis of the vibratory screen, joint analysis of static and dynamic loads.

Research findings: It is found that under new dynamic load from the vibratory screen, FEM is performed with consideration of damping properties of the structural materials and soil as well as dynamic properties of the latter. It is shown that strength/stability and rigidity of metal structures is ensured for the frame at the installation of the vibratory screen.

Keywords: manufacturing site, structure, base, technological load, rigidity, finite element modeling, strength analysis, static load, dynamic load

For citation: Podshivalov I.I., Yushchube S.V., Tarasov A.A. Finite Element Modeling of Stress-Strain State of Manufacturing Site Metal Structure Under Dynamic Load. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (1): 132–141. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-132-141. EDN: OKCIRA

В процессе эксплуатации промышленных зданий довольно часто возникает необходимость замены технологического оборудования, что вызывает потребность в анализе изменившегося напряженно-деформированного состояния каркаса здания с учетом его фактического технического состояния и в соответствии с современными нормативными документами [1, 2]. При этом следует исключить возможность отказа отдельных элементов или всего каркаса, который может быть вызван некорректной оценкой влияния нового технологического оборудования на напряженно-деформированное состояние существующего каркаса [3, 4].

Анализ надежности несущих металлических конструкций показывает, что минимизация ущерба возможна путем корректной оценки взаимодействия несущих элементов между собой [5]. Например, для стропильных ферм доста-

точно реализовать конструктивные мероприятия применительно к связевым элементам покрытий [6].

Как известно, расчет зданий следует выполнять совместно с основаниями. Выбор расчетной модели, которая может наиболее полно отразить конструктивную схему здания, является одним из важнейших факторов при определении напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, фундаментов и оснований [7].

Модель линейно деформированного основания, в которой грунтовая среда представляется упругим материалом, основана на двух допущениях: осадка точки поверхности основания прямо пропорциональна величине нагрузки; осадки распространяются за пределы площади нагружения [8, 9].

Известно, что динамические свойства грунтов зависят от характера динамического воздействия [10, 11]. Наиболее корректные данные можно получить путем проведения соответствующих изысканий. В работе [12] было выполнено сравнение экспериментально полученных первых трех форм собственных колебаний 9-этажного панельного здания на свайном фундаменте с соответствующими модальными значениями в разработанной конечно-элементной модели в ПК SCAD при различной жесткости грунтового основания. Авторы публикации подтверждают нормативное положение о том, что при динамических воздействиях следует учитывать динамические свойства грунтов, например, заданием модуля упругости грунта по зависимости $E_e = 8E_0$, где E_0 – модуль деформации нескального грунта.

Динамические испытания позволяют определить параметры собственных колебаний здания путем регистрации микросейсмических колебаний отдельных конструкций здания [13]. Результатом динамических исследований являлись собственные частоты, построенные схемы распределения амплитуд и карты фаз колебаний. Анализ полученных динамических параметров позволил сделать интегральную оценку технического состояния исследуемого здания.

В работе [14] получены экспериментальные значения ускорений и перемещений отдельных точек фундамента при циклическом динамическом воздействии от электроприводов. После обработки сигналов акселерометров получены спектры частот в диапазоне 0–250 Гц. Экспериментальные амплитуды колебаний тела фундамента сравнивались с предельно допустимыми амплитудами колебаний.

В натурных исследованиях [15] выполнено измерение параметров колебаний несущих конструкций каркаса производственного здания и работающих механизмов, получены акселерограммы ускорений во времени и диаграммы спектральной плотности ускорений колебаний несущих элементов каркаса и работающих механизмов. Установлены резонансные явления по спектру частот в работе шаровых мельниц оборудования.

Основной задачей исследований [16] являлось определение причин появления повышенных амплитуд колебаний колонн металлического каркаса и сравнение частот собственных колебаний металлических конструкций каркаса с частотой вынужденных колебаний технологического оборудования с помощью установки акселерометров на несущие элементы каркаса и на технологическое оборудование. В конструкциях каркаса экспериментально опреде-

лены частоты колебаний, получены графики перемещений во времени, амплитудный спектр колебаний в координатах «ускорение – частота». Для оценки собственных частот колебаний элементов металлического каркаса была разработана пространственная конечно-элементная модель в ПК SCAD, где задавались как статические, так и динамические воздействия.

В настоящей статье рассматривается производственная площадка цеха мокрого обогащения песка обогатительной фабрики. Опорная часть площадки расположена в заглубленном приямке на отм. –6.000 с монолитными железобетонными стенами и фундаментной плитой на естественном основании. Конструктивно площадка выполнена из металлического каркаса, состоящего из колонн (двутавр I20Ш1), главных и второстепенных балок (двутавры I45Б1, I35Б1, I25Б1). На площадке предполагается размещение нового технологического оборудования в виде вибрационного грохота Derrick весом 42,2 кН с характеристиками: число оборотов вращения вала $n = 800$ об/мин с частотой $f = 84$ рад/с (рис. 1).

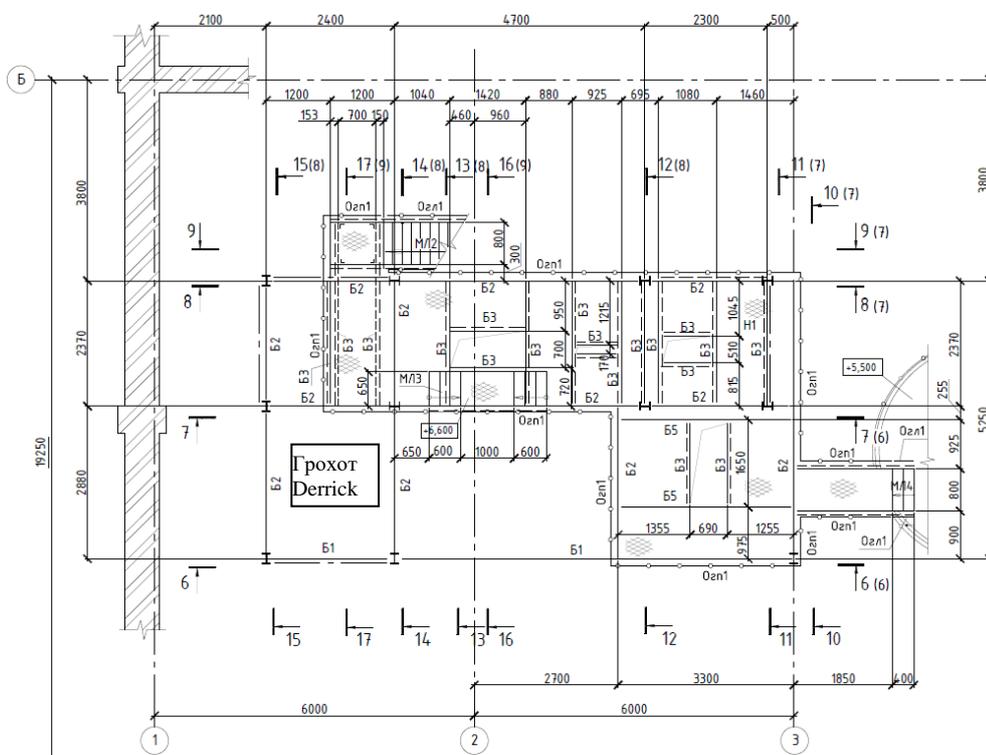


Рис. 1. Схема размещения вибрационного грохота Derrick на площадке отм. +6.000
 Fig. 1. Schematic of Derrick vibratory screen at +6 000 level site

Моделирование взаимодействия надземных конструкций с грунтовым основанием в настоящее время является достаточно актуальным [17]. Верифицированный ПВК Ing+2021 MicroFe позволяет реализовать конечно-элементное моделирование в системе «основание – фундамент – здание», на основании

которой была разработана пространственная расчетная конечно-элементная модель производственной площадки (рис. 2). В расчетной модели железобетонные монолитные стены и фундаментная плита приямка моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», металлические колонны и балки моделировались конечным элементом типа «стержень». Грунт снизу и сбоку приямка моделировался в виде слоистого основания из объемных конечных элементов.

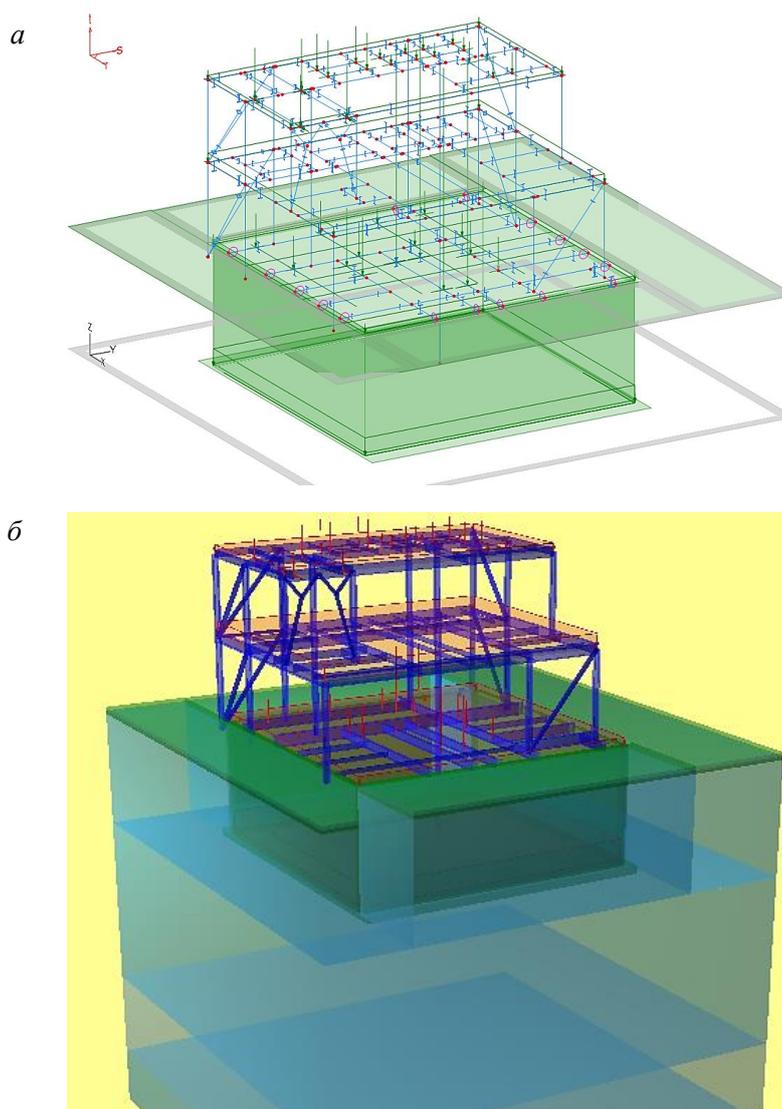


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализация (б)
Fig. 2. FEM (a) and visualization (b)

В расчетной схеме конечно-элементной модели в условиях динамического воздействия приняты следующие нормативные положения:

- материалы конструкций и грунт основания – линейно изотропные;
- расчетные и нормативные статические нагрузки, только нормативные динамические нагрузки;
- демпфирующие свойства материалов металлического каркаса и железобетонного монолитного приямка задавались с помощью вычисленных (по собственным частотам колебаний) коэффициентов демпфирования для массы c_m и коэффициентов демпфирования для жесткости c_k ;

– слоистое основание принято в виде упруговязкого линейно деформируемого основания¹, свойства которого определяются коэффициентами сжатия и сдвига, характеризующими демпфирование. Демпфирующие свойства грунта, при неучете его массы в линейном расчете, были смоделированы заданием коэффициента демпфирования для жесткости грунта c_k увеличением в десять раз. Динамические свойства грунта учитывались увеличением модуля деформации слоев грунта в восемь раз [12].

Раздельный статический и динамический расчеты выполнялись по комбинациям нагрузок: 1-я комбинация – только статические нагрузки; 2-я комбинация – только динамическое воздействие от вибрационного грохота. В конструктивном расчете в расчетное сочетание усилий (PCY) к статическим нагрузкам было добавлено динамическое особое воздействие – динамические максимумы усилий из динамического расчета.

При выполнении динамической части расчета динамическое воздействие на металлический каркас площадки от работы вибрационного грохота задавалось в виде временной зависимости, приведенной на рис. 3.

Полученные из статического расчета от стационарных нагрузок, в том числе от собственного веса грохота, изополя продольных сил и вертикальных перемещений металлического каркаса приведены на рис. 4, 5, на которых показано, что наибольшая продольная сила возникла в центральной колонне приямка и составила $N_{\max \text{ кол}} = -281,75 \text{ кН}$, а максимальные вертикальные перемещения характерны для пролетной части балок перекрытия приямка и равны 29,7 мм, прогибы составляют $f_{\max} = 20,3 \text{ мм}$, что меньше предельно допустимых значений $f_{и \text{ верт}} = 29,0 \text{ мм}$.

Из конструктивного расчета элементов металлического каркаса по PCY по заданной комбинации нагрузок, в которой к статическому нагружению добавлены динамические максимумы усилий от работающего вибрационного грохота Derrick (параметры динамического воздействия приведены на рис. 3),

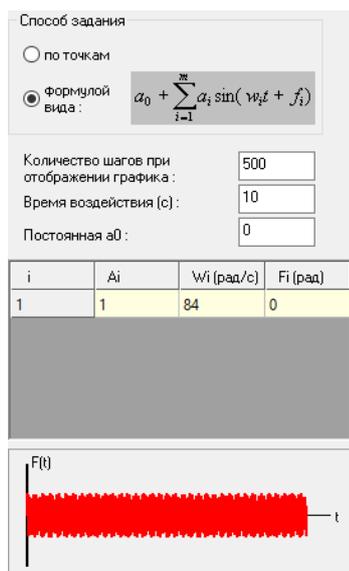


Рис. 3. Задание динамического воздействия от вибрационного грохота Derrick

Fig. 3. Dynamic load from Derrick vibratory screen

¹ СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками.

следует, что наибольший коэффициент использования сечения конструкций по условию устойчивости плоской формы изгиба $K_{ик} = 0,86 < 1$ (рис. 6). Таким образом, прочность/устойчивость и жесткость элементов металлического каркаса обеспечены при статическом нагружении и динамическом воздействии от вибрационного грохота.

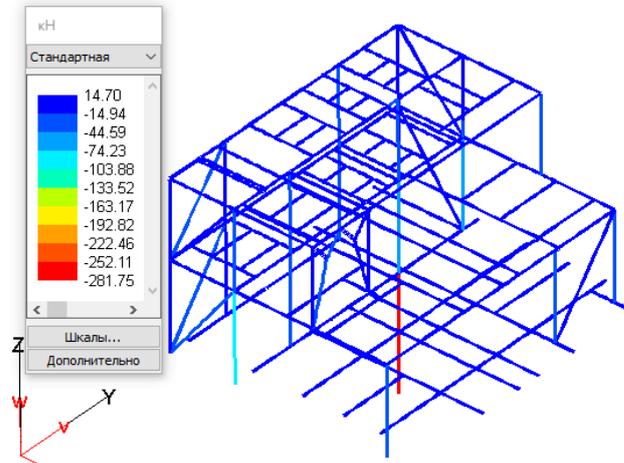


Рис. 4. Изополя статических продольных сил в элементах каркаса

Fig. 4. Isofields of static longitudinal forces in frame elements

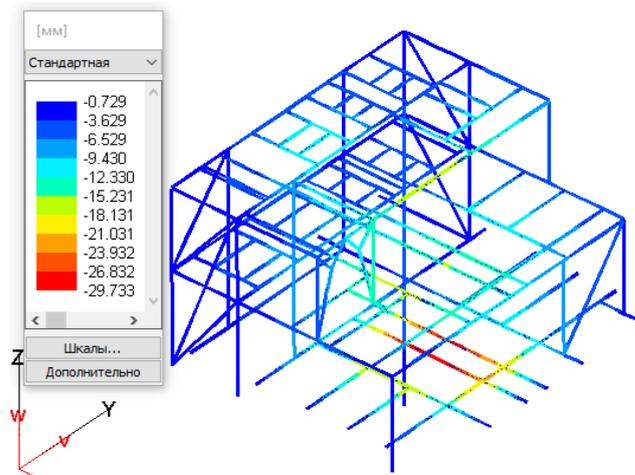


Рис. 5. Изополя статических вертикальных перемещений элементов каркаса

Fig. 5. Isofields of static vertical forces in frame elements

В заключение можно отметить следующие результаты: при установке нового технологического оборудования в виде вибрационного грохота Derrick на верхнем уровне перекрытия производственной площадки изменится напряженно-деформированное состояние конструкций металлического каркаса, монолитного железобетонного перекрытия и грунтового основания.

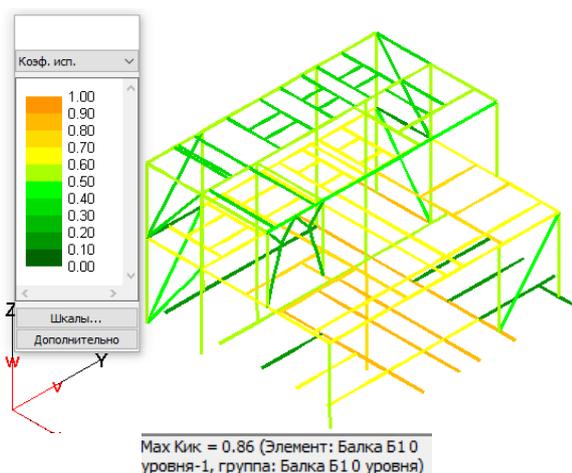


Рис. 6. Изополя коэффициентов использования сечения конструктивных элементов каркаса
 Fig. 6. Isofields of use factors of cross-sections in frame elements

Для оценки сложившейся ситуации выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций площадки, прямка и основания при появлении новой динамической нагрузки с учетом демпфирующих свойств материалов конструкций и грунта, а также динамических свойств грунта.

После проведения отдельного статического расчета от стационарных нагрузок и динамического расчета от вибрационного воздействия грохота конструктивный расчет металлических элементов площадки на совместное действие статических и динамических нагрузок в РСУ показал, что прочность/устойчивость и жесткость элементов каркаса при установке нового вибрационного грохота будут обеспечены.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Золина Т.В., Туснин А.Р. Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49.
2. Золина Т.В. Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 98–108.
3. Боровский Д.С. Расчет на прочность усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 36–41. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-36-41
4. Гукова М.И., Искендеров В.Г., Фарфель М.И. Ошибки проектирования, изготовления и монтажа, приводящие к аварийному состоянию строительных конструкций производственных зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительства. 2013. № 10. С. 25–28.
5. Еремин К.И., Матвеевский С.А. Анализ риска несущих конструкций покрытий стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительства. 2011. № 3. С. 16–18.
6. Еремин К.И., Матвеевский С.А. Анализ надежности несущих конструкций покрытия стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительства. 2010. № 10. С. 19–21.
7. Шашкин К.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния основания фундаментов и здания с учетом их взаимодействия // Реконструкция городов и геотехническое строительство : интернет-журнал. 2001. № 4. С. 6.

8. *Алексеев С.И., Камаев В.С.* Учет жесткостных параметров зданий при расчетах оснований и фундаментов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 3. С. 165–172.
9. *Михайлов В.С., Теплых А.В.* Учет характерных особенностей различных моделей основания при расчете взаимного влияния зданий на больших фундаментных плитах с использованием расчетно-аналитической системы SCAD Office // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : VI Международный симпозиум. Владивосток, 2016. С. 133–134.
10. *Цытович Н.А.* Механика грунтов (краткий курс). Москва : Высшая школа, 1983. 288 с.
11. *Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях / пер. с англ. под ред. А.Б. Фадеева, М.Б. Лисюка. Санкт-Петербург : НПО «Геореконструкция – Фундамент – Проект», 2006. 384 с.
12. *Волгин Г.А., Рожков А.Ф., Инжутов И.С., Гончаров Ю.М.* Численно-экспериментальное исследование динамических параметров крупнопанельного здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3. С. 111–120.
13. *Хорошавин Е.А.* Динамические испытания административного здания «Красноярскгражданпроект» в г. Красноярске // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 128–143.
14. *Кумпяк О.Г., Галютдинов З.Р., Однокопылов Г.И., Пахмурин О.Р.* Особенности диагностики нагруженных фундаментов электроприводов газокomppressorной станции без остановки технологических процессов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1. С. 114–121.
15. *Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Савченко В.И., Коштинков В.Г., Пляскин А.С.* Биение пространственного каркаса обогатительной фабрики под действием периодических нагрузок // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 2. С. 139–143.
16. *Плевков В.С., Саркисов Д.Ю., Балдин С.В.* Анализ параметров колебательных процессов несущего каркаса производственного здания // Строительство и реконструкция. 2017. № 4 (72). С. 47–56.
17. *Ющубе С.В., Подшивалов И.И., Ларионов А.С.* Оценка надежности сооружения, расположенного на склоне горы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 23 (1). С. 126–139. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-1-126-139

REFERENCES

1. *Zolina T.V., Tushin A.R.* Extending of Operation Life of Industrial Building. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 41–49. (In Russian)
2. *Zolina T.V.* Examination Procedure for Building Residual Operation Life. *Vestnik MGSU*. 2014; (11): 98–108. (In Russian)
3. *Borovskiy D.S.* Strength Analysis of Rod Elements of Steel Structures under Multiparameter Loading. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2 (85): 36–41. (In Russian)
4. *Gukova M.I., Iskendiroy V.G., Farfel M.I.* Design, Manufacturing and Installation Errors Leading to Emergency Condition of Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013; (10): 25–28. (In Russian)
5. *Eremin K.A., Matveyushkin S.A.* Risk analysis of Bearing Structures of Steel Frame Coverings of One-Storey Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; (3): 16–18. (In Russian)
6. *Eremin K.A., Matveyushkin S.A.* Strength Analysis of Bearing Structures of Steel Frame Coverings of One-Storey Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2010; (10): 19–21. (In Russian)
7. *Shashkin K.G.* Stress-Strain State Analysis of Building Foundations with Regard to their Interaction. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2001; (4): 6. (In Russian)
8. *Alekseev S.I., Kamaev V.S.* Stiffness Parameters of Buildings in Strength Analysis of Foundations. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007; (3): 165–172. (In Russian)
9. *Mikhailov V.S., Teplykh A.V.* Allowing for Characteristics of Various Design Models in Calculating Mutual Influence of Buildings on pile-Raft Foundation in SCAD Software. In: *Proc. 6th*

- Int. Sci. Symp. 'Relevant Computer Modeling Problems of Structures'*. Vladivostok. 2016. Pp. 133–134. (In Russian)
10. *Tsytoovich N.A.* Soil Mechanics. Moscow: Vysshaya shkola, 1983, 288 p. (In Russian)
 11. *Ishihara K.* Soil Behavior in Earthquakes: Saint-Petersburg: NPO "Georeconstruction-Fundament-Project", 2006. 384 p. (Russian translation)
 12. *Volgin G.A., Rozhkov A.F., Inzhutov I.S., Goncharov Yu.M.* Experimental and Numerical Analysis of Dynamic Parameters of Large-Panel Building. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016; (3): 111–120. (In Russian)
 13. *Khoroshavin E.A.* Dynamic Tests of Administrative Building "Krasnoyarskgrazhdanproekt" in Krasnoyarsk. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (2): 128–143. (In Russian)
 14. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Odnokopylov G.I., Pakhmurin O.R.* Diagnostics of Loaded Foundations of Gas Compressor Station Without Process Shutdown. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; (1): 114–121. (In Russian)
 15. *Kopanitsa D.G., Kaparulin S.L., Savchenko V.I., Koshtunkov V.G., Plyaskin A.S.* Beating of Spatial Framework of Concentrating Plant Under Periodic Loads. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007; (2): 139–143. (In Russian)
 16. *Plevkov V.S., Sarkisov D.Yu., Baldin S.V.* Analysis of Vibrational Process Parameters of Load-Bearing Frame of Industrial Building. *Teoriya inzhenernykh sooruzhenii. Stroitel'nye konstruksii*. 2017; 72 (4): 47–56. (In Russian)
 17. *Yushchube S.V., Podshivalov I.I., Larionov A.S.* Safety of Building Constructed on Hillside Slope. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (1): 126–139. (In Russian)

Сведения об авторах

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

Ющубе Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

Тарасов Александр Александрович, канд. техн. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tar.a.a@mail.ru

Authors Details

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; ivanpodchivalov@list.ru

Sergei V. Yushchube, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; sv@tsuab.ru

Aleksandr A. Tarasov, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tar.a.a@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.12.2024
Одобрена после рецензирования 20.12.2024
Принята к публикации 15.01.2025

Submitted for publication 03.12.2024
Approved after review 20.12.2024
Accepted for publication 15.01.2025