

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

## BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2024. Т. 26. № 4. С. 176–186.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo  
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –  
Journal of Construction and Architecture.  
2024; 26 (4): 176–186.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-176-186

EDN: OXOMCR

### СОВМЕСТНАЯ РАБОТА ОПОРНОЙ ПЛИТЫ БАЗЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОЛОННЫ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТОЙ СТОЛБЧАТОГО ФУНДАМЕНТА ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ

**Иван Иванович Подшивалов**

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

**Аннотация.** Объектом исследования является совместная работа опорной металлической плиты базы колонны с нижерасположенной железобетонной плитой столбчатого фундамента на естественном основании в условиях реконструкции промышленного здания.

**Цель работы** состоит в получении напряженно-деформированного состояния опорной металлической плиты в базе колонны, железобетонной плиты столбчатого фундамента, а также значения контактных усилий между ними и характера их распределения по контактной плоскости.

**Методы.** Расчетное обоснование совместной работы опорной металлической плиты базы колонны с нижерасположенной железобетонной плитой столбчатого фундамента выполнено моделированием в программном комплексе Ing+2021 MicroFe с разработкой расчетной конечно-элементной пространственной модели.

**Результаты.** Получены напряженно-деформированное состояние двух контактных несущих элементов базы металлической колонны и совместная работа их взаимодействия, что позволило разработать рекомендации по восстановлению эксплуатационной пригодности бетона железобетонной плиты столбчатого фундамента в контурной зоне опорной металлической плиты колонн при реконструкции промышленного здания.

**Ключевые слова:** база колонн, опорная металлическая плита, железобетонная плита фундамента, совместная работа, моделирование

**Для цитирования:** Подшивалов И.И. Совместная работа опорной плиты базы металлической колонны с железобетонной плитой столбчатого фундамента промышленного здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 176–186. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-176-186. EDN: OXOMCR

## ORIGINAL ARTICLE

## JOINT OPERATION OF COLUMN BASE METAL PLATE AND REINFORCED CONCRETE SLAB OF POST FOOTING OF INDUSTRIAL BUILDING

**Ivan I. Podshivalov**

*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The paper studies the joint operation of the base metal plate of column base and reinforced concrete slab of post spread footing of industrial building of a reconstructed industrial building.

**Purpose:** The achievement of the stress-strain state of the base metal plate of the column base, reinforced concrete slab of the post footing, contact forces between them and their distribution along the contact plane.

**Methodology/approach:** The theoretical model of the joint operation of these elements is performed in Ing + 2021, MicroFe software with the proposed finite element model.

**Research findings:** The stress-strain state is determined for two contacting bearing elements of the metal column base and their joint operation.

**Practical implications:** Recommendations are given to the concrete reconstruction of the reinforced concrete slab of the post footing within the base metal plate perimeter of the industrial building.

**Keywords:** column base, base metal plate, reinforced concrete slab, joint operation, finite element model

**For citation:** Podshivalov I.I. Joint Operation of Column Base Metal Plate and Reinforced Concrete Slab of Post Footing of Industrial Building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (4): 176–186. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-176-186. EDN: OXOMCR

Анализ напряженно-деформированного состояния опорных узлов колонн металлических каркасов с железобетонными фундаментами при выполнении реконструкции промышленных зданий связан с необходимостью оценки несущей способности металлических конструкций с учетом фактического их состояния и соответствия современным нормам [1, 2].

Реконструкция промышленных предприятий, как правило, связана с изменением конструктивных решений зданий и технологических нагрузок на существующие конструкции и, как следствие, с необходимостью оценки их технического состояния [3]. Отказы отдельных элементов или всего здания обусловлены, как правило, ошибками при проектировании, дефектами при изготовлении и монтаже конструкций и в последующем длительной эксплуатацией в неблагоприятных условиях [4, 5].

Анализ надежности несущих металлоконструкций показывает, что минимизация ущерба возможна путем регулирования взаимодействия несущих элементов каркаса между собой. Например, для стропильных ферм достаточно реализовать конструктивные мероприятия применительно к связевым элементам покрытий [6, 7].

Как известно, основной задачей связей в покрытии каркасных зданий является восприятие и передача горизонтальных нагрузок от фахверковых колонн на несущие колонны каркаса и через их базы – на фундаменты [8].

Большое практическое значение представляет расчет несущей способности конструкций металлического каркаса, у которых в процессе эксплуатации из-за скрытых дефектов, ошибок проектирования, изготовления, монтажа, эксплуатации возможно повреждение отдельных конструкций, в том числе выход из строя некоторых стержней. В работе [9] представлена методика расчета конструкций с поврежденными стальными стержневыми элементами.

Представляют интерес численные исследования напряженно-деформированного состояния базы колонны, состоящей из одной опорной пластины [10, 11]. Целью являлось исследование работы базы колонны упрощенного типа при внецентренном сжатии. Решение задачи выполнялось варьированием толщины опорной плиты в расчетной модели. Получены следующие результаты: для опорной плиты толщиной от 70 мм характерна практически линейная деформация; от 20 до 70 мм – нелинейно-упругая деформация; при толщине до 20 мм – нелинейная деформация.

В настоящей статье объектом исследования является металлический каркас промышленного здания, находящегося в стадии реконструкции. Размеры здания в плане – 60×168 м, номинальная высота до низа конструкций покрытия – 10,8 м (рис. 1).

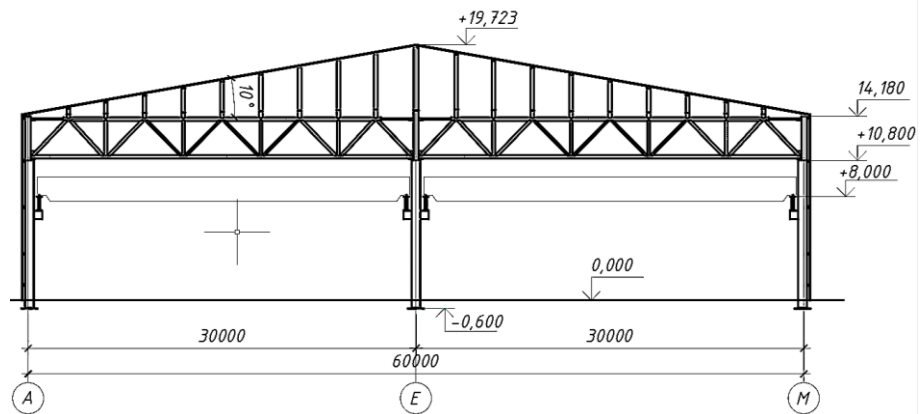


Рис. 1. Схема поперечного разреза

Fig. 1. Transverse section of the metal frame of industrial building

Каркас здания выполнен по рамно-связевой схеме. Продольная устойчивость каркаса обеспечивается вертикальными связями по колоннам, а поперечная устойчивость – за счет статической работы двух пролетных рам. Пролет

рам – 30 м, высота рам – 10,8 м. Сопряжение с фундаментом стоек рам, выполненных из прокатного широкополочного двутавра I70Ш4, жесткое. Фундамент под каждой колонной представляет собой плиту размером  $1,8 \times 1,8 \times 0,8$  (h) м. Фундаменты расположены на стабильном основании. Покрытие промышленного здания образовано стальными бесфасоночными фермами с параллельными поясами пролетом 30 м, высотой 2,9 м. Шаг ферм в продольном направлении здания – 12 м. Пояса и элементы решетки ферм выполнены из труб.

При обследовании баз несущих колонн металлического каркаса было зафиксировано наличие бетона пористой структуры в контурной области отдельных опорных металлических плит (рис. 2). В связи с этим возникла необходимость в определении характера совместной работы опорной металлической плиты с нижней железобетонной плитой столбчатого фундамента, в том числе по их контактной плоскости.



Рис. 2. Бетон пористой структуры в контурной области металлической плиты базы колонны  
Fig. 2. Cellular concrete in the perimeter of the base metal plate.

В программном комплексе Ing+2021 MicroFe с использованием плоских и объемных (для грунта), а также стержневых конечных элементов была разработана конечно-элементная модель, состоящая из колонны, жестко закрепленной на опорной металлической плите толщиной 20 мм, и нижерасположенной железобетонной плиты фундамента толщиной 800 мм на грунтовом основании (рис. 3, а). Расстояние между срединными плоскостями плит назначалось равным половине суммы их толщины так, чтобы происходил полный контакт поверхностей плит, в нашем случае – 410 мм. Взаимодействие плит между собой моделировалось стержнями типа «трос», которые могут работать на сжатие-растяжение, либо только на сжатие, либо только на растяжение. Для допущения возможности «отлипания» плит друг от друга стержни работали только на сжатие. Шаг стержней принят равным 0,1 м в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Площадь поперечного сечения каждого стержня равна  $A_{ст} = 0,01 \text{ м}^2$ , т. е. стержни примыкают друг к другу без зазора (рис. 3, б). При монтаже колонн,

после их выверки в вертикальное положение с помощью анкерных болтов, пространство между опорной металлической плитой и железобетонной плитой фундамента заполняется мелкозернистым бетоном. Поэтому модуль упругости для стержней принят равным  $E = 2,3 \cdot 10^7$  кН/м<sup>2</sup>, что соответствует модулю упругости бетона класса В15. Стержни типа «трос» работают по конструктивно нелинейной схеме с односторонними связями, работающими только на сжатие. В фундаменте установлены четыре анкерных болта Ø28 мм.

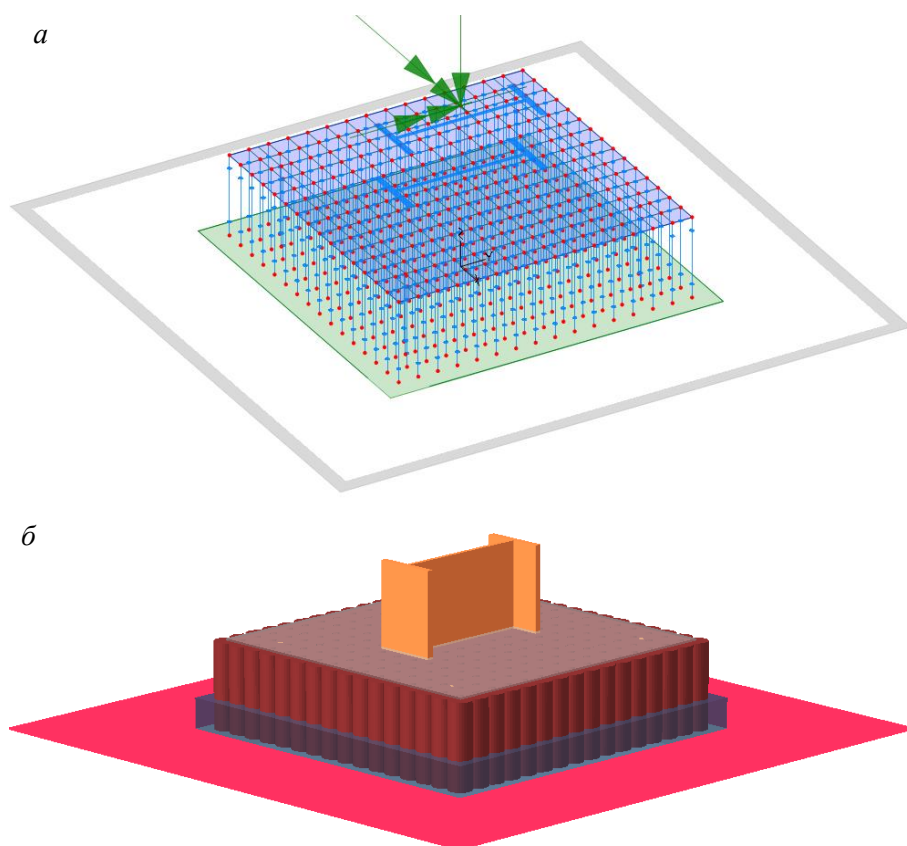


Рис. 3. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализация (б) (шарниры в узлах сопряжения стержней типа «трос» с плитами условно не показаны)

Fig. 3. FEM (a) and model visualization (b)

Железобетонная плита фундамента представлена слоистым материалом из 20 слоев, четыре из которых – арматурные слои, а 16 – слои из бетона. Железобетонная плита работает по физически нелинейной схеме по соответствующим диаграммам деформирования арматуры и бетона.

Из статического расчета металлического каркаса было установлено, что по нижнему обрезу крайних колонн наибольшая продольная сжимающая сила составила  $N = -820,8$  кН, два соответствующих изгибающих момента, создающих вертикальные нормальные напряжения в плитах, были равны:  $M_x = 188,6$  кНм,  $M_y = 3,4$  кНм.

Далее в статье представлены результаты статического анализа исследуемых конструкций. В опорной металлической плите базы крайней колонны изополя изгибающих моментов  $M_x$  относительно оси  $X$  приведены на рис. 4, наибольшие значения которых составили: растягивающие верхние волокна металлической плиты  $M_x = -59,3$  кНм/м; растягивающие нижние волокна металлической плиты  $M_x = 81,9$  кНм/м. На рис. 5 показаны изополя вертикальных перемещений опорной металлической плиты, где отражен характер этих перемещений в форме лунки.

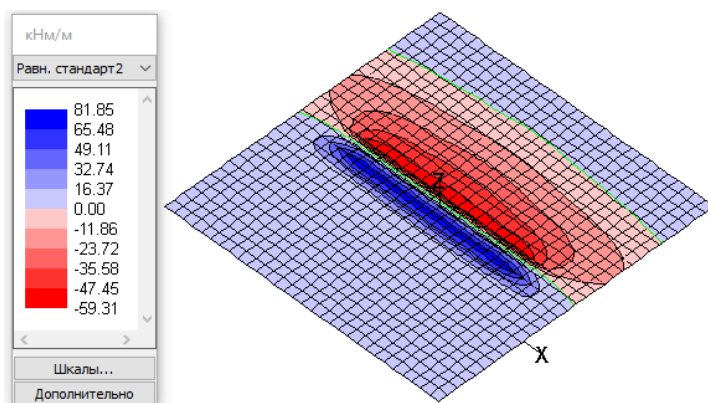


Рис. 4. Изополя изгибающих моментов  $M_x$  относительно оси  $X$  в опорной металлической плите  
 Fig. 4. FEM of base metal plate with bending moment isofields relative to  $X$  axis

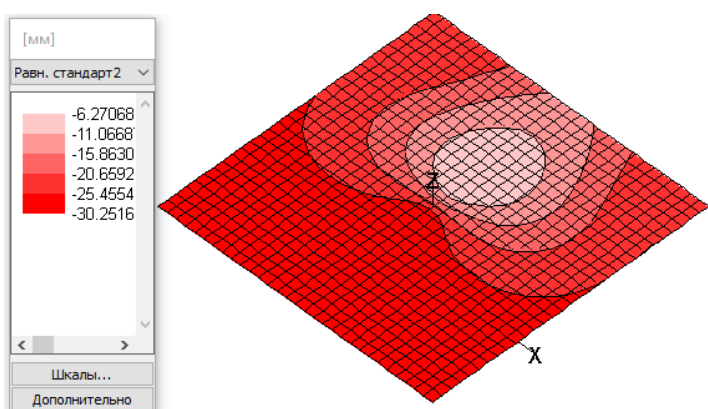


Рис. 5. Вертикальные перемещения опорной металлической плиты  
 Fig. 5. Vertical displacement of base metal plate

Эпюры продольных сил в стержнях типа «трос», моделирующих совместную работу плит, показаны на рис. 6. Анализируя данные, можно отметить следующее:

– все продольные силы в стержнях сжимающие, что соответствует действительному характеру совместной работы плит, где возможно «отлипание» плит относительно друг друга, чему связи не должны препятствовать;

– наибольшие сжимающие силы в стержнях между плитами возникают под стволом колонны  $N_{\max} = -349,4$  кН и в контурных углах под опорной металлической пластиной  $N_{\text{кон}} = -15,3$  кН в плоскости действия изгибающего момента от колонны каркаса;

– в остальной части контакта между плитами сжимающие силы в стержнях не возникают.

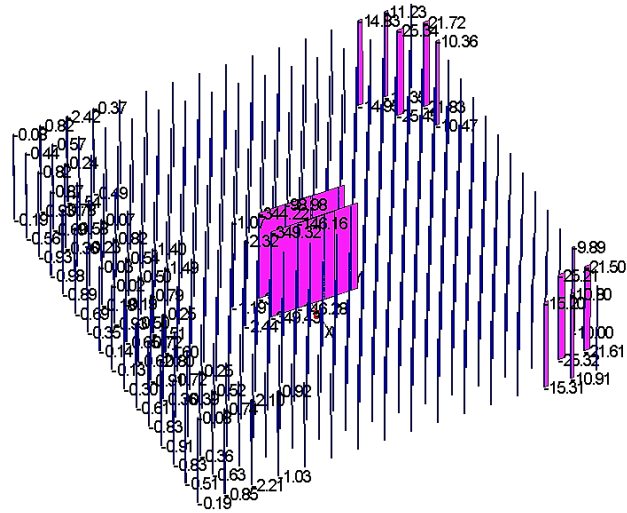


Рис. 6. Эпюры продольных сил (кН) в стержнях типа «трос» между плитами  
Fig. 6. Longitudinal forces (kN) in rope-between-plate rods

В анкерных болтах  $\varnothing 28$  мм фундамента появляются растягивающие усилия с максимальным значением  $N_{\text{анк max}} = 144$  кН (рис. 7). Наибольшие растягивающие усилия в анкерных болтах возникают у грани опорной металлической плиты, где в стержнях типа «трос» наблюдаются максимальные сжимающие усилия между плитами, что соответствует принципу работы статически неопределимых систем «сжатие-растяжение».

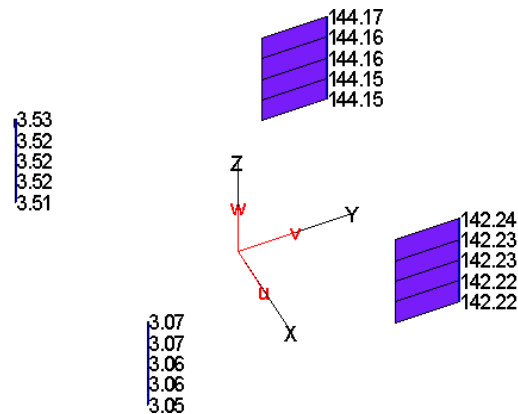


Рис. 7. Эпюры продольных сил (кН) в анкерных болтах фундамента  
Fig. 7. Longitudinal forces (kN) in anchoring screws of post footing

В качестве сравнения на рис. 8 показаны эпюры продольных сил в стержнях типа «трос» под средней колонной. На изображении видно, что наибольшие сжимающие силы в стержнях между плитами возникают под стволом колонны  $N_{\max} = -905,6$  кН, а также, как и в предыдущем случае, в стержнях, расположенных в контурных углах под опорной металлической пластиной  $N_{\text{кон}} = -4,9$  кН в плоскости действия изгибающего момента от колонны каркаса. Здесь заданы по нижнему обрезу средней колонны сжимающая продольная сила  $N = -2718$  кН и один изгибающий момент  $M_x = 44,5$  кНм. В целом характеры напряженного состояния в стержнях по контактным зонам между плитами под крайней и под средней колоннами подобны.

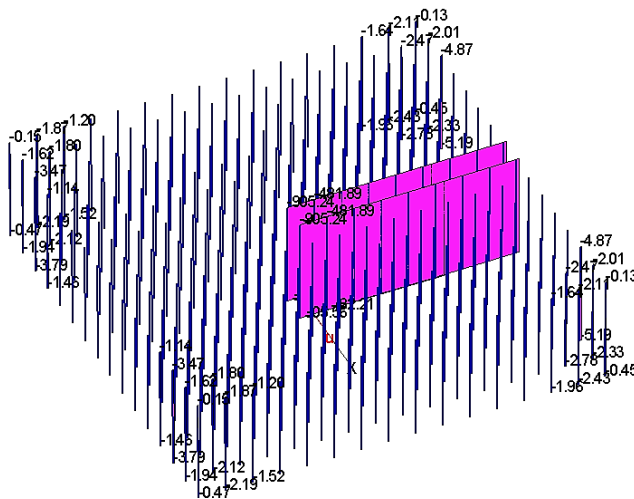


Рис. 8. Эпюры продольных сил (кН) в стержнях типа «трос» между плитами под средней колонной (в качестве сравнения)

Fig. 8. Longitudinal forces (kN) in in rope-between-plate rods under central column (for comparison)

В железобетонной плите фундамента изополя изгибающих моментов  $M_x$  относительно оси  $X$  показаны на рис. 9, все значения этих моментов имеют один знак и растягивают нижние волокна плиты. Максимальное значение  $M_{x\max} = 173,8$  кНм/м возникает в плите под стволом колонны. На рис. 10 даны изополя вертикальных перемещений железобетонной плиты фундамента, распределение которых имеет наклонный характер в плоскости действия изгибающего момента от колонны несущего каркаса.

Поскольку железобетонная плита фундамента представлена слоистым материалом с возможностью нелинейной работы бетона и арматуры, то достаточно интересным является выполнение анализа изменения модуля упругости бетона в нижнем слое, контактирующем с грунтом (рис. 11).

На представленном рисунке видно, что область слоя, расположенная под колонной, получила значительные деформации с уменьшением значения модуля упругости бетона практически до нуля. При этом в угловых зонах плиты значения модуля упругости бетона в целом не изменились, в верхнем слое плиты модуль упругости бетона также не изменился.



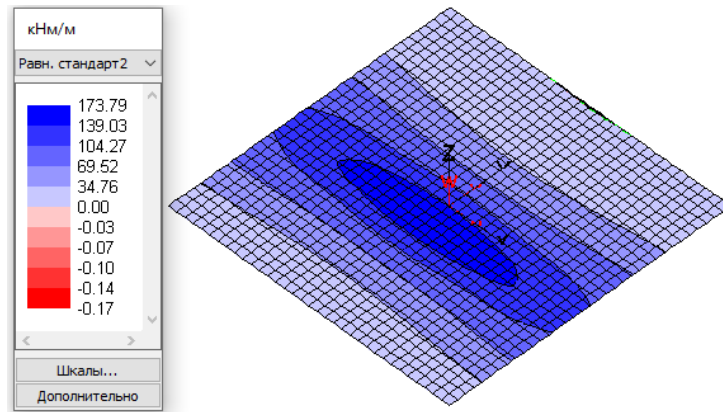


Рис. 9. Изополя изгибающих моментов  $M_x$  относительно оси  $X$  в железобетонной плите фундамента

Fig. 9. FEM of reinforced concrete slab with bending moment isofields relative to  $X$  axis

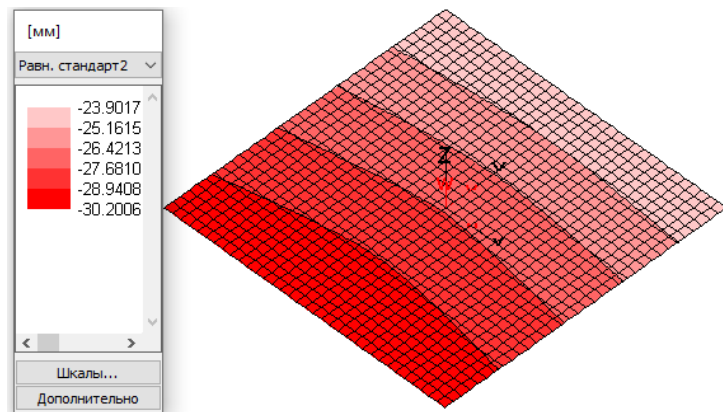


Рис. 10. Вертикальные перемещения железобетонной плиты фундамента

Fig. 10. Vertical displacement of reinforced concrete slab

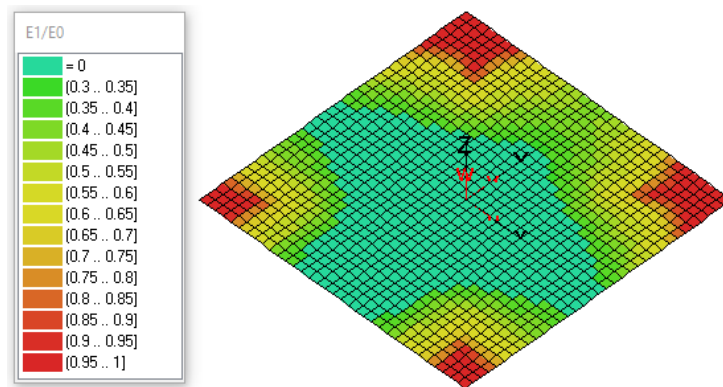


Рис. 11. Изменение модуля упругости бетона в нижнем слое железобетонной плиты фундамента, контактирующем с грунтом

Fig. 11. Elastic modulus of concrete at the bottom of reinforced concrete slab contacting with soil

### Выводы

В заключение можно отметить следующие результаты:

1. Разработана расчетная модель базы металлической колонны, совместно работающей с железобетонной плитой столбчатого фундамента на естественном основании.
2. Выполнено моделирование совместной работы опорной металлической плиты с железобетонной плитой фундамента с помощью специальных стержней типа «трос», работающих только на сжатие.
3. Получено напряженно-деформированное состояние элементов баз колонн каркаса, а также распределение контактных усилий между плитами.
4. Результаты моделирования позволили разработать рекомендации по восстановлению бетона железобетонных плит фундамента в контактной зоне с опорными металлическими плитами баз металлических колонн при реконструкции промышленного здания.

### 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.
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 строительство. 2013. № 10. С. 25–28.
5. Лебедь Е.В., Григорян А.А. Влияние монтажных расчетных схем ребер двухъярусного металлического купола на начальные усилия при устранении погрешностей // Вестник МГСУ. 2015. № 8. С. 66–79.
6. Еремин К.И., Матвеевский С.А. Анализ риска несущих конструкций покрытий стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 16–18.
7. Еремин К.И., Матвеевский С.А. Анализ надежности несущих конструкций покрытий стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 10. С. 19–21.
8. Туснина О.А. Работа связей в покрытии промышленного здания со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 1. С. 37–42.
9. Туснин А.Р., Бергер М.П. Расчет металлической фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35–41.
10. Алтатов В.Ю., Лукин А.О., Сахаров А.А. Исследование жесткости узла базы стальной колонны, состоящей из одной опорной плиты // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 9–14.
11. Алтатов В.Ю. Анализ влияния жесткости опор на напряженно-деформированное состояние структурной конструкции // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре: мат-лы 63-й Всерос. науч.-техн. конф. по итогам НИР университета за 2005 г. Самара : СГАСУ, 2006. С. 428–431.

### REFERENCES

1. Zolina T.V., Tushnin 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., Iskenderov V.G., Farfel M.I. Design, Manufacture and Construction Errors Leading to Emergency of Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013; (10): 25–28. (in Russian)
5. Lebed E.V., Grigoryan A.A. Influence of Analytical Rib Models of Double Metal Dome on Initial Forces at Error Elimination. *Vestnik MGSU*. 2015; (8): 66–79. (in Russian)
6. Eremin K.A., Matveyushkin S.A. Risk Analysis of Bearing Structures of Steel Frame Covering of One-Storey Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011; (3): 16–18. (in Russian)
7. Eremin K.A., Matveyushkin S.A. Reliability Analysis of Load-Bearing Structures of Steel Frame Coverings of One-Storey Industrial Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2010; (10): 19–21. (in Russian)
8. Tushina O.A. Performance of Covering Bonds of Industrial Building with Steel Frame. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019; (1): 37–42. (in Russian)
9. Tushin A.R., Berger M.P. Calculation of Metal Truss with Damaged Elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (11): 35–41. (in Russian)
10. Alpatov V.Yu., Lukin A.O., Sakharov A.A. Stiffness of Base Node of Steel Column with Single Tipped Plate. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015; (9): 9–14. (in Russian)
11. Alpatov V.Yu. Influence of Support Stiffness on Stress-Strain State of Structural Design. In: *Proc. 63rd All-Russ. Sci. Conf. 'Relevant Problems in Construction and Architecture'*. Samara, 2006. Pp. 428–431. (in Russian)

#### Сведения об авторе

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

#### Author Details

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