

# ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

## BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного  
архитектурно-строительного университета.  
2025. Т. 27. № 2. С. 151–160.

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 (2): 151–160.  
Print ISSN 1607-1859  
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-151-160

EDN: LAZYIQ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗНОУРОВНЕВОГО ОСНОВАНИЯ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА МАССИВНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЗДАНИЯ

**Сергей Васильевич Ющубе, Иван Иванович Подшивалов**

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

*Аннотация.* Актуальность моделирования напряженно-деформированного состояния разноуровневого основания плитного фундамента массивного железобетонного здания в линейной и в конструктивно нелинейной постановке работы грунта.

*Целью* работы является определение напряженно-деформированного состояния разноуровневого основания плитного фундамента массивного железобетонного здания в линейно/конструктивно нелинейно деформируемой грунтовой среде с учетом совместной работы грунта как по подошве разноуровневых фундаментных плит, так и по боковой поверхности подземной части заглубленного блока здания.

*Методы.* Моделирование напряженно-деформированного состояния разноуровневого основания, как слоистого материала, в системе «основание – фундамент – здание» выполнено методом конечных элементов с помощью верифицированного программного комплекса Ing+2021 MicroFe.

*Результаты.* Расчеты показали, что в линейно/конструктивно нелинейно деформируемом разноуровневом грунтовом основании значения его абсолютных перемещений и относительной разности вертикальных перемещений соответствуют условиям по второй группе предельных состояний.

**Ключевые слова:** разноуровневое основание, плитный фундамент, моделирование, расчетная модель, напряженно-деформированное состояние

*Для цитирования:* Ющубе С.В., Подшивалов И.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния разноуровневого основания плитного фундамента массивного железобетонного здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 2. С. 151–160. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-151-160. EDN: LAZYIQ

## ORIGINAL ARTICLE

## MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF RAFT FOUNDATION SPLIT-LEVEL BASE OF MASSIVE CONCRETE-STEEL BUILDING

Sergei V. Yushchube, Ivan I. Podshivalov

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

**Abstract.** Purpose: The aim of the work is to determine the stress-strain state of raft foundation split-level base of a massive concrete-steel building in linear and nonlinear formulation of the soil behavior with respect both and on the lateral surface of the at the foundation.

Methodology/approach: The stress-strain state of the split-level base as a layered material in the base–foundation–building system is performed by the finite element method using the verified software package Ing+ 2021 MicroFe.

Research findings: It is shown that in the constructively linearly/nonlinearly deformable earth foundation, its absolute displacements and relative difference in vertical displacements correspond to the service limit state.

**Keywords:** split-level base, raft foundation, finite element modeling, calculation model, stress-strain state

**For citation:** Podshivalov I.I., Yushchube S.V. Modeling of Stress-Strain State of Raft Foundation Split-Level Base of Massive Concrete-Steel Building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (2): 151–160. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-2-151-160. EDN: LAZYIQ

Учет податливости плитного фундамента на разноуровневом основании при расчете массивного железобетонного здания плитно-стеновой конструктивной схемы весьма актуален [1]. 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 [2, 3, 4].

Модель линейно деформируемого основания, в которой грунтовая среда представляется упругим материалом, основана на двух допущениях: осадка точки поверхности основания прямо пропорциональна величине нагрузки в этой точке; осадки распространяются за пределы площади нагружения [5, 6].

В соответствии с действующими нормами проектирования в фундаментах на естественном основании допускается появление локальных областей предельного состояния – зон упругопластических деформаций [7]. При этом несущая способность основания в целом по первой группе предельных состояний должна быть обеспечена. В этом случае определяющим является выполнение условий по второй группе предельных состояний по деформациям и перемещениям основания.

Расчетным путем было установлено, что если в основании под фундаментной плитой нагрузка от здания соответствует вертикальным природным напряжениям на уровне подошвы фундаментной плиты, то развитие пластических деформаций в основании может происходить в контурной зоне фундаментной плиты [8, 9].

При появлении упругопластических деформаций в контурной зоне фундаментной плиты рекомендуется применять модели, которые учитывают нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями путем использования соответствующих физико-механических характеристик грунтов [10, 11].

ПК MicroFe позволяет учитывать как упругие, так и неупругие свойства грунта в конечно-элементном моделировании системы «основание – фундамент – здание» [12].

На площадке расположения здания по результатам инженерно-геологических изысканий в пределах изученной толщи грунтов выделено семь основных инженерно-геологических элементов (ИГЭ):

- ИГЭ-7 – супесь песчаная пластичная;
- ИГЭ-8 – песок пылеватый средней плотности и плотный от малой степени водонасыщения до водонасыщенного;
- ИГЭ-11 – суглинок тяжелый пылеватый твердый;
- ИГЭ-12 – суглинок тяжелый пылеватый полутвердый;
- ИГЭ-19 – песок пылеватый плотный средней степени водонасыщения и водонасыщенный;
- ИГЭ-21 – песок средней крупности плотный средней степени водонасыщения и водонасыщенный;
- ИГЭ-23 – глина полутвердая.

Инженерно-геологический разрез площадки с посадкой разноуровневого плитного фундамента здания показан на рис. 1. Расчетные физико-механические характеристики грунтов даны в таблице. Расчетный уровень подземных вод принят на отм. 157.310.

### Расчетные физико-механические характеристики грунтов

#### Calculated physical and mechanical soil properties

№ ИГЭ	Описание грунтов	Природная влажность $W$ , %	Плотность грунта $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Сцепление $C$ , кПа	Модуль деформации $E$ , МПа
7	Супесь песчаная пластичная	20,1	2,04	23	15	6
8	Песок пылеватый средней плотности и плотный...	13,6	2,20	34	8	33
11	Суглинок тяжелый пылеватый твердый	22,5	2,03	22	81	44
12	Суглинок тяжелый пылеватый полутвердый	24,0	2,02	23	43	37

Окончание таблицы  
End of table

№ ИГЭ	Описание грунтов	Природная влажность $W$ , %	Плотность грунта $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Сцепление $C$ , кПа	Модуль деформации $E$ , МПа
19	Песок пылеватый плотный...	19,9	2,06	34	6	59
21	Песок средней крупности плотный...	14,6	2,16	38	3	66
23	Глина полутвердая	23,2	2,02	23	102	34

Примечание. Полное наименование ИГЭ смотри выше.

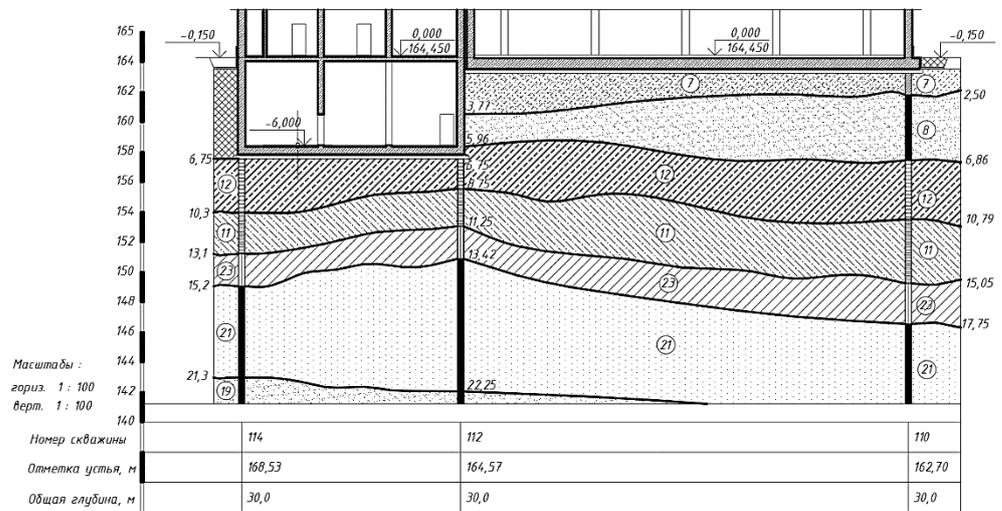


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез площадки с посадкой разноуровневого плитного фундамента

Fig. 1. Engineering-geological cross-section of the site with split-level raft foundation

Рассматриваемое здание состоит из двух монолитных железобетонных блоков: блок № 1 – подземная часть с отм. –6.000 до отм. +6.430 с размерами по габаритным осям 20,0×14,0 м и блок № 2 – надземная часть с отм. ±0.000 до отм. +17.560 с размерами по габаритным осям 29,5×21,0 м. Блоки разделены осадочным швом. Толщина монолитных фундаментных плит (МФП) на грунтовом разноуровневом основании составляет 500 мм в блоке № 1 и 800 мм – в блоке № 2. В каждом блоке наружные стены имеют толщину 500 мм, внутренние стены – толщину 200 и 400 мм, перекрытия – 300 мм. В блоке № 2 имеется мостовой кран грузоподъемностью 80/32 тс.

Пространственная жесткость каждого блока здания обеспечивается жестким соединением монолитных конструкций – стен, МФП и перекрытий.

Материал железобетонных конструкций – бетон класса В25 – рассматривался как изотропный.

В расчетной модели железобетонные монолитные стены, перекрытия, МФП моделировались конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки». Грунтовое основание моделировалось в виде трех слоистых оснований, одно из которых моделировало грунт обратной засыпки пазух, из объемных конечных элементов с послойным заданием модуля деформации и коэффициента Пуассона при использовании линейной модели работы грунтов. Расчетная модель массивного железобетонного здания и ее визуализация приведены на рис. 2.

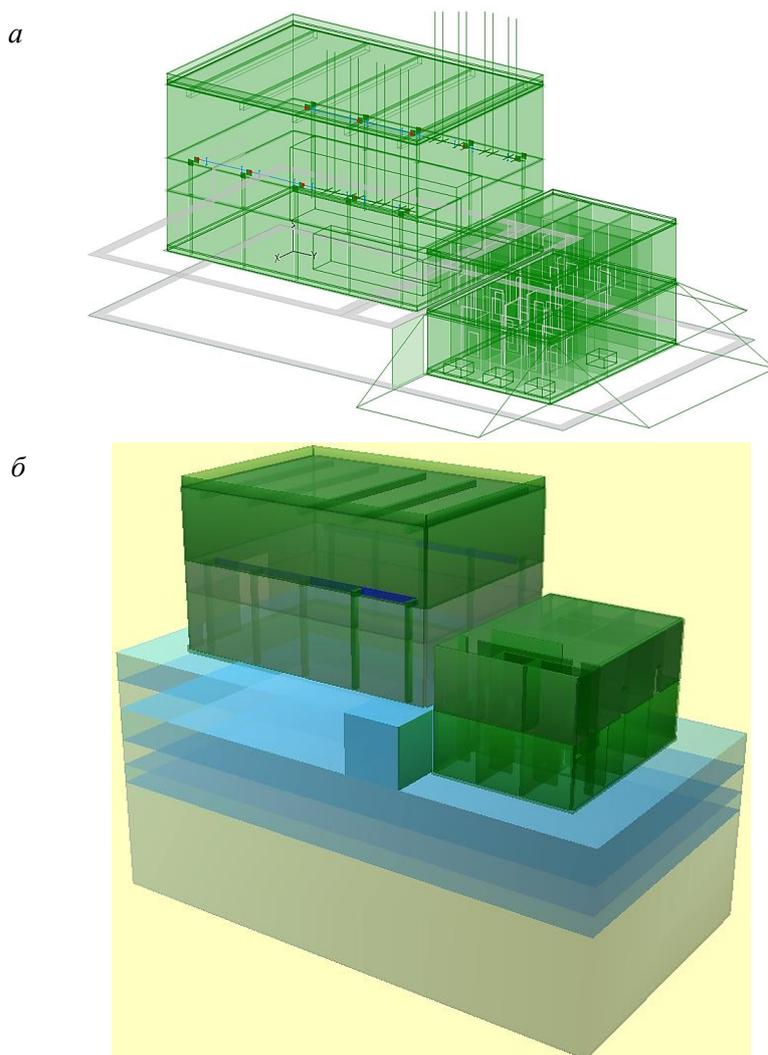


Рис. 2. Расчетная модель здания (а) и ее визуализация (б)  
Fig. 2. Computational FEM (a) and visualization (b) of building

Расчет выполнялся с использованием двух расчетных схем:  
– расчетная схема № 1 – с плитным фундаментом при линейной работе разнуровневого грунтового основания;

– расчетная схема № 2 – с плитным фундаментом при конструктивно нелинейной работе разноровневого грунтового основания, когда ограничиваются контактные напряжения по подошве фундаментных плит величиной соответствующего расчетного сопротивления грунта.

### Напряженное состояние

*Расчетная схема № 1.* При линейном деформировании разноровневого грунтового основания получены следующие значения нормальных напряжений (далее – напряжения) в грунте по характерным сечениям (рис. 3):

– в горизонтальном сечении  $XY$  на уровне подошвы нижней МФП наибольшие сжимающие вертикальные напряжения возникли в угловых зонах  $\sigma_{z \text{ уг}} = -326 \text{ кН/м}^2$  и в контурной зоне  $\sigma_{z \text{ кон}} = -186 \text{ кН/м}^2$ . Внутри контура в основании нижней МФП сжимающие вертикальные напряжения имеют значительно меньшие значения и составили  $\sigma_{z \text{ вн}} = -92 \text{ кН/м}^2$ ;

– в законтурной области нижней МФП наибольшая величина сжимающих напряжений равна  $\sigma_{z \text{ закон}} = -47 \text{ кН/м}^2$  с рассеиванием до значений, близких к нулевым, в направлении от подземной части здания;

– в вертикальном сечении  $YZ$  наблюдается перераспределение наибольших сжимающих напряжений в грунте с контурной зоны МФП внутрь грунтового массива сжимаемой толщи основания до величины  $\sigma_{z \text{ вн}} = -116 \text{ кН/м}^2$ .

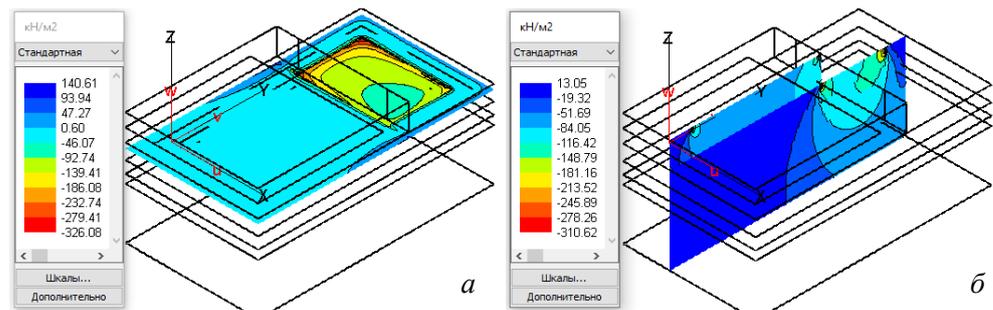


Рис. 3. Изополя вертикальных напряжений в расчетной схеме № 1:

$a$  – в горизонтальном сечении на уровне подошвы нижней МФП;  $b$  – в поперечном сечении в осях  $ZY$

Fig. 3. Isofields of vertical stresses in the design diagram 1:

$a$  – horizontal cross-section at the raft foundation bottom;  $b$  – longitudinal cross-section along  $ZY$  axis

*Расчетная схема № 2.* При конструктивно нелинейной работе разноровневого грунтового основания контактные напряжения по подошве МФП ограничивались следующей величиной расчетного сопротивления грунта:  $R = 250 \text{ кН/м}^2$  – нижняя МФП;  $R = 200 \text{ кН/м}^2$  – верхняя МФП;  $R = 100 \text{ кН/м}^2$  – пазухи под верхней МФП. В этом случае получены следующие значения нормальных напряжений в грунте по характерным сечениям (рис. 4):

– в горизонтальном сечении  $XY$  на уровне подошвы нижней МФП наибольшие сжимающие вертикальные напряжения возникли в контурной зоне  $\sigma_{z \text{ кон}} = -218 \text{ кН/м}^2$ . Внутри контура в основании нижней МФП сжимающие вер-

тикальные напряжения в грунте снизились практически в два раза до значения  $\sigma_{z\text{вн}} = -105 \text{ кН/м}^2$ ;

- в законтурной области нижней МФП наибольшая величина сжимающих напряжений равна  $\sigma_{z\text{закон}} = -67 \text{ кН/м}^2$  с рассеиванием до нулевых значений в направлении от подземной части здания;

- в вертикальном сечении  $YZ$  наблюдается перераспределение наибольших сжимающих напряжений в грунте с контурной зоны МФП внутрь грунтового массива сжимаемой толщи основания до величины  $\sigma_{z\text{вн}} = -86 \text{ кН/м}^2$ .

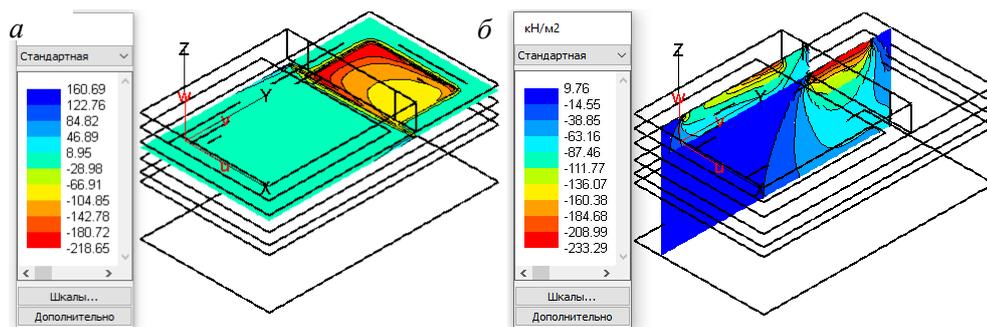


Рис. 4. Изополя вертикальных напряжений в расчетной схеме № 2:  
 а – в горизонтальном сечении на уровне подошвы нижней МФП; б – в поперечном сечении в осях  $ZY$   
 Fig. 4. Isofields of vertical stresses in the design diagram 2:  
 а – horizontal cross-section at the raft foundation bottom; б – longitudinal cross-section along  $ZY$  axis

Таким образом, при ограничении вертикальных напряжений грунта в контактной зоне под подошвами МФП соответствующими расчетными сопротивлениями произошло перераспределение вертикальных напряжений грунта, пиковые значения напряжений в грунте сгладились.

### Деформированное состояние

*Расчетная схема № 1.* При линейном деформировании разноуровневого основания максимальные вертикальные перемещения грунта на уровне подошвы нижней МФП составили  $f_{\text{max}} = 35,5 \text{ мм}$  (рис. 5), что значительно меньше предельных значений осадок основания для рассматриваемого типа зданий  $S_u^{\text{max}} = 150 \text{ мм}$ .

Относительная разность вертикальных перемещений основания составила  $(35,5-17,2)/20000 = 0,001$  и не превышает предельное значение разности осадок  $(\Delta l/L)_u = 0,003$ .

*Расчетная схема № 2.* При конструктивно нелинейной работе разноуровневого основания максимальные вертикальные перемещения грунта на уровне подошвы нижней МФП по сравнению с линейной работой грунта увеличились на 7 % до значения  $f_{\text{max}} = 38,2 \text{ мм}$  (рис. 6) и также не превысили предельные значения осадок и относительной разности вертикальных перемещений основания.

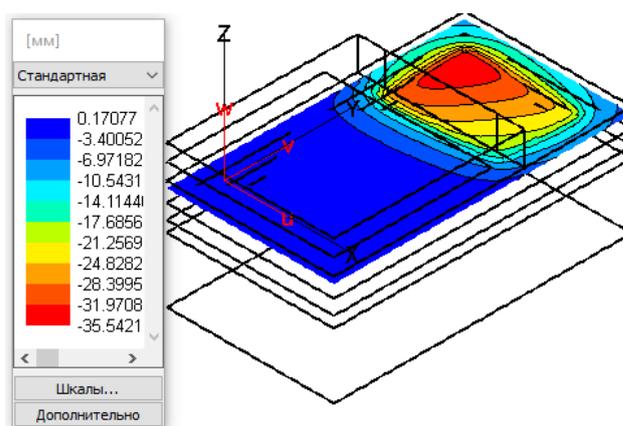


Рис. 5. Изополя вертикальных перемещений на уровне подошвы нижней МФП в расчетной схеме № 1

Fig. 5. Isofields of vertical displacements at the raft foundation bottom in the design diagram 1

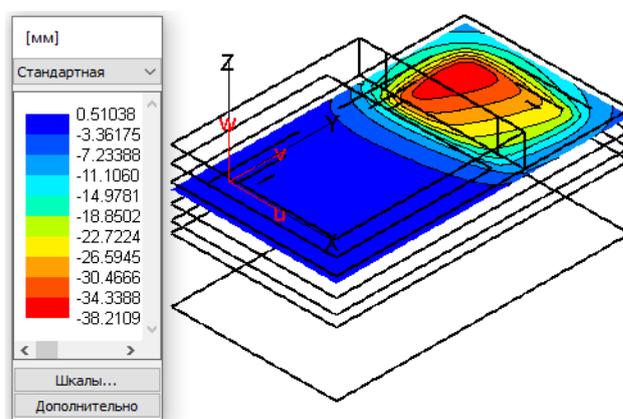


Рис. 6. Изополя вертикальных перемещений на уровне подошвы нижней МФП в расчетной схеме № 2

Fig. 6. Isofields of vertical displacements at the raft foundation bottom in the design diagram 2

### Заключение

При использовании плитного фундамента на разноуровневом естественном основании распределение нормальных напряжений в грунте при моделировании линейно/конструктивно нелинейно деформируемого основания в целом показало качественное совпадение результатов, когда в контурных зонах МФП возникли области с упругопластическими деформациями грунта.

При ограничении вертикальных напряжений грунта под подошвой МФП соответствующими расчетными сопротивлениями происходит перераспределение вертикальных напряжений в грунте со сглаживанием пиковых значений напряжений.

Расчеты показали, что в линейно/конструктивно нелинейном деформируемом разноуровневом основании значения абсолютных перемещений и от-

носительной разности вертикальных перемещений удовлетворяют условиям по второй группе предельных состояний.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *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. URL: <https://georec.narod.ru/mag/2001n4/19/19.htm>
2. *Шулятьев О.А.* Основания и фундаменты высотных зданий. Москва : Изд-во АСВ, 2016. 392 с.
3. *Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Кузнецов Е.Н.* О современных проблемах расчета высотных зданий из монолитного железобетона // Бетон и железобетон – пути развития : научные труды II Всерос. (Междунар.) конф. В пяти книгах. Том 1. Пленарные доклады. Москва, 2005. С. 149–166. EDN: SHURRP
4. *Лушиников В.В.* Использование мирового опыта при проектировании и строительстве фундаментов высотных зданий с учетом геологических условий Екатеринбурга // Академический вестник УралНИИПроект РААСН. 2009. № 1. С. 76–82. EDN: KVVVGP
5. *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. EDN: JUCZZN
6. *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.
7. *Крыжановский А.Л., Рубцов О.И.* Вопросы надежности проектного решения фундаментных плит высотных зданий // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 191–198. EDN: MUSPTZ
8. *Орехов В.В., Зарецкий Ю.К., Кельман М.И.* Расчет взаимодействия плитного фундамента с грунтовым основанием с учетом жесткости верхнего строения // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 15–17.
9. *Зарецкий Ю.К., Карабаев М.И.* Влияние последовательности возведения близко расположенных высотных зданий на осадки и крен фундаментных плит // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 50–56. EDN: MUSPNB
10. *Шашкин А.Г., Шашкин К.Г.* Расчет фундаментных плит в пространственной постановке с учетом нелинейных деформаций основания // Реконструкция городов и геотехническое строительство : интернет-журнал. 2000. № 3. С. 5. URL: <http://georeconstruction.net/journals/03/20/20.pdf>
11. *Кудрявцев С.А., Склярова К.М.* Натурные наблюдения и численное моделирование строительства высотного здания на плитном фундаменте в г. Хабаровске // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2 (38). С. 86–91. EDN: QCLXRZ
12. *Юцубе С.В., Подшивалов И.И.* Моделирование напряженно-деформированного состояния основания кирпичного здания повышенной этажности на монолитной фундаментной плите // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 118–132. URL: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2021-23-2-118-132>

#### REFERENCES

1. *Shashkin A.G., Shashkin K.G.* Concrete Foundation Analysis in Spatial Formulation with Regard to Nonlinear Foundation Deformations. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2000; (3): 5. (In Russian)
2. *Shulyat'ev O.A.* Bases and Foundations of High-Rise Buildings. Moscow: ASV, 2016. 392 p. (In Russian)
3. *Karpenko N.I., Karpenko S.N., Kuznetsov E.N.* Modern Problems of Structural Analysis of High-Rise Building of In-situ Reinforced Concrete. In: *Proc. 2nd Int. Sci. Conf. 'Concrete and Reinforced Concrete – Glance at Future'*, in 5 vol., Moscow, 2005. V. 1. Pp. 149–166. (In Russian)

4. Lushnikov V.V. International Experience in Foundation Design and Construction of High-Rise Buildings with Regard to Geological Conditions of Ekaterinburg. *Akademicheskii vestnik Ural-NIIProekt RAASN*. 2009; (1): 76–82. (In Russian)
5. Alekseev S.I. Stiffness Parameters of Buildings in Strength Analysis of Foundations. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007; (3): 165–172. (In Russian)
6. 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)
7. Kryzhanovskii A.L., Rubtsov O.I. Reliability of Design Solutions for Foundation Slabs of High-Rise Buildings. *Vestnik MGSU*. 2006; (1): 191–198. (In Russian)
8. Orekhov V.V., Zaretskii Yu.K., Kel'man M.I. Analysis of Interaction Between Concrete and Soil Foundations with Regard to Superstructure Stiffness. *Vestnik MGSU*. 2008; (2): 15–17. (In Russian)
9. Zaretskii Yu.K., Karabaev M.I. Influence of the Sequential Arrangement of Closely Spaced High-Rise Buildings on Slab Settlement and Roll. *Vestnik MGSU*. 2006; (1): 50–56. (In Russian)
10. Shashkin A.G., Shashkin K.G. Concrete Foundation Analysis in Spatial Formulation with Regard to Nonlinear Foundation Deformations. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2000; (3): 5. (In Russian)
11. Kudryavtsev S.A., Sklyarova K.M. Field Observations and Numerical Simulation of High-Rise Building Construction on Concrete Foundation in Khabarovsk. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie*. 2013; 2 (38): 86–91. (In Russian)
12. Yushchube S.V., Podshivalov I.I. Stress-Strain State Finite Element Modeling of Concrete Foundation of a Multistory Brick Building. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(1): 145–161. (In Russian)

#### Сведения об авторах

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

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

#### Authors Details

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

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ivanpodchivalov@list.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 19.02.2025

Submitted for publication 03.12.2024  
Approved after review 20.12.2024  
Accepted for publication 19.02.2025