

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 4. С. 163–173.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28(4): 163–173.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-4-163-173>



EDN: MQJYBD

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА С МНОГОУРОВНЕВЫМ ПОДЗЕМНЫМ ПАРКИНГОМ

Сергей Васильевич Юшубе, Иван Иванович Подшивалов

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

Аннотация. Актуальность статьи заключается в получении напряженно-деформированного состояния грунтового основания под плитным фундаментом и по боковой поверхности стен многоуровневого подземного паркинга в линейной и нелинейной постановках работы грунта.

Целью работы являлась оценка напряженно-деформированного состояния грунтового основания в условиях линейно/нелинейно деформируемой среды под плитой фундамента и сбоку от стен многоуровневого подземного паркинга.

Методы. Напряженно-деформированное состояние грунтового основания получено путем моделирования в разработанной расчетной модели как слоистого основания в системе «основание – фундамент – здание» с использованием программы Ing+ MicroFe.

Результаты. Установлено, что как при линейных деформациях основания, так и при нелинейной работе грунта в основании по теории прочности Кулона – Мора вертикальные перемещения и относительная разность вертикальных перемещений основания плитного фундамента не превышают предельно допустимых значений.

Ключевые слова: здание, подземный паркинг, плитный фундамент, моделирование, расчетная модель, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Юшубе, С.В., Подшивалов, И.И. Анализ напряженно-деформированного состояния грунтового основания плитного фундамента с много-

уровневым подземным паркингом // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 4. С. 163–173. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-4-163-173>. EDN: MQJYBD

ORIGINAL ARTICLE

STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS OF SOIL FOUNDATION SLAB WITH MULTI-LEVEL UNDERGROUND PARKING**Sergei V. Yushchube, Ivan I. Podshivalov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. This work focuses on the stress-strain state of the soil foundation slab and on the lateral surface of walls of a multi-level underground car parking using linear and nonlinear soil behavior models.

Purpose: The aim of the work is to analyze the stress-strain state of the soil foundation slab in a linearly/non-linearly deformable medium and on the lateral surface of walls of a multi-level underground car parking.

Methodology: The stress-strain state of the soil foundation is obtained by its modelling in the developed calculation model as a layered foundation in the foundation–base–building system using the finite element modeling in the Ing+ MicroFe software package.

Research findings: It is found that with linear deformation of the soil foundation, vertical displacements and relative difference in vertical displacements of soil in the slab foundation do not exceed the limit values. At the load level of the soil foundation slab, when the average value of the bearing reaction under the base is 17 % less than theoretically calculated soil resistance of the underlying layer, the foundation work also satisfies conditions of the second-order limit states in accordance with the Mohr-Coulomb model.

Keywords: building, underground parking, foundation slab, modelling, design model, stress-strain state

For citation: Yushchube, S.V., Podshivalov, I.I. Stress-strain State Analysis of Soil Foundation Slab with Multi-level Underground Parking. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28(4): 163–173. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-4-163-173>. EDN: MQJYBD

В каркасном здании, построенном из монолитных железобетонных конструкций с многоуровневой подземной частью на плитном фундаменте, учет податливости грунта под подошвой монолитной фундаментной плиты приобретает большое значение [1].

Для получения напряженно-деформированного состояния грунта в основании плитного фундамента и за боковой поверхностью подземной части здания, а также напряженно-деформированного состояния монолитных железобетонных конструкций в надземной части здания следует разрабатывать пространственные расчетные модели, адекватно отражающие конструктивное решение здания с развитой подземной частью [2–4].

В расчетной модели линейно-деформируемого основания грунт работает упруго с применением двух зависимостей: между величиной приложенной нагрузки и осадкой основания в этой точке – прямо пропорциональная зависимость. Такая зависимость сохраняется и за контуром площадки нагружения основания [5, 6].

Нормами проектирования при расчете оснований плитных фундаментов по осадкам и относительной разности осадок (вторая группа предельных состояний) допускается появление упругопластических деформаций грунта в контурной части плитных фундаментов [7]. При этом устойчивость грунтового основания плитных фундаментов по первой группе предельных состояний, как правило, обеспечивается с достаточным запасом.

Как известно, образование зон упругопластических деформаций в контурной части плиты фундамента обусловлено тем, что под подошвой фундаментной плиты напряжения в грунте, возникающие от веса здания и полезной нагрузки, сопоставимы с величиной вертикальных природных напряжений грунта [8, 9]. В этом случае рекомендуется использовать модели грунта, в которых в соответствии с его физико-механическими характеристиками применяется зависимость между напряжениями и деформациями грунта в нелинейной постановке [10, 11].

В программе Ing+ MicroFe неупругие деформации грунта можно учесть с помощью теории прочности Кулона – Мора или «шатровой» модели работы грунта Cam-Clay. Моделирование нелинейных свойств грунта можно выполнить в системе «основание – фундамент – здание» [12].

Рассматриваемая площадка здания расположена в ЦАО г. Москвы. В геологическом строении до изученной глубины 27 м принимают участие четыре стратиграфогенетических комплекса (рис. 1):

- современные техногенные образования (tQ_{IV});
- верхнечетвертичный комплекс аллювиальных отложений (α , fQ_{III});
- верхнеюрские отложения (J_3);
- верхнекаменноугольный комплекс карбонатных отложений (C_3).

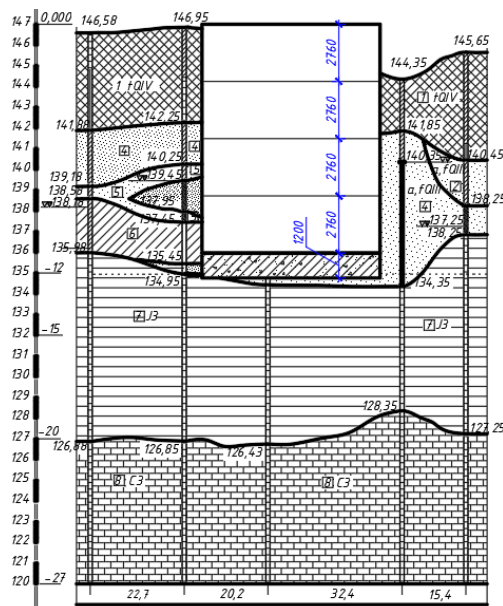


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез с посадкой плитного фундамента
Fig. 1. Geotechnical cross-section with foundation slab

В пределах многоуровневого подземного паркинга высотой 12 м, до глубины 12...13 м (ниже современных техногенных образований (tQ_{IV}) мощностью до 3...4 м) залегают верхнечетвертичные аллювиальные отложения (α , fQ_{III}), представленные песком мелким пылеватым (ИГЭ-4). С глубины 12...13 м располагаются верхнеюрские отложения (J_3), представленные глиной черной полутвердой слюистой мощностью до 8 м (ИГЭ-7). Далее до изученной глубины 27 м находится верхнекаменноугольный комплекс карбонатных отложений (C_3), состоящих из измайловских известняков, трещиноватых, средней прочности (ИГЭ-8), мощность слоя – более 7 м (таблица).

Основные физико-механические свойства грунтов

Main physical and mechanical properties of soils

№ п/п	№ ИГЭ	Наименование грунта	Плотность, г/см ³	Удельное сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град	Модуль общей деформации, МПа
1	ИГЭ-4	Песок мелкий пылеватый	1,80	–	18	21
2	ИГЭ-7	Глина полутвердая	1,85	54	17	32
3	ИГЭ-8	Известняк	Предел прочности на сжатие $R_{сж} = 16$ МПа			

Гидрогеологические условия площадки характеризуются развитием безнапорного водоносного горизонта, вскрытого на глубине 7,4...8,4 м, приуроченного к аллювиальным отложениям из песков.

Рассматриваемое шестиэтажное здание с внутренним каркасом из монолитного железобетона имеет размеры в плане 129,0×18,6, высота составляет 19,35 м. В подземной части здания по всей его площади расположен четырехуровневый подземный гаражный паркинг высотой 12 м. Вертикальные железобетонные элементы каркаса состоят из колонн сечением 40×40 см в подземной части здания и на первом этаже надземной части здания, выше расположены пилоны сечением 120×20 см. Монолитные железобетонные перекрытия и покрытие, а также фундаментная плита имеют толщину 20 и 100 см соответственно. При моделировании бетон принят как изотропный материал.

Монолитные плоскостные железобетонные конструкции моделировались конечными элементами типа «плоский прямоугольный элемент оболочки», монолитные железобетонные колонны – типа «стержень». Моделирование слоистого грунтового основания из объемных конечных элементов в линейной постановке проводилось с заданием модуля деформации и коэффициента Пуассона в каждом слое. Слоистое грунтовое основание в нелинейной постановке моделировалось по теории прочности Кулона – Мора заданием следующих физико-механических параметров грунта: плотность; сцепление; угол внутреннего трения; угол делатансии (принят равным 1°); коэффициент всестороннего сжатия – равен нулю. Нижний слой грунта из известняка моделировался скальным грунтом с заданием предела прочности на сжатие $R_{сж}$ и предела прочности на растяжение R_p .

В расчетной модели, приведенной на рис. 2, были разработаны две расчетные схемы:

- расчетная схема № 1 – с плитным фундаментом при линейной работе грунтового основания;
- расчетная схема № 2 – с плитным фундаментом при нелинейной работе грунтового основания по теории прочности Кулона – Мора.

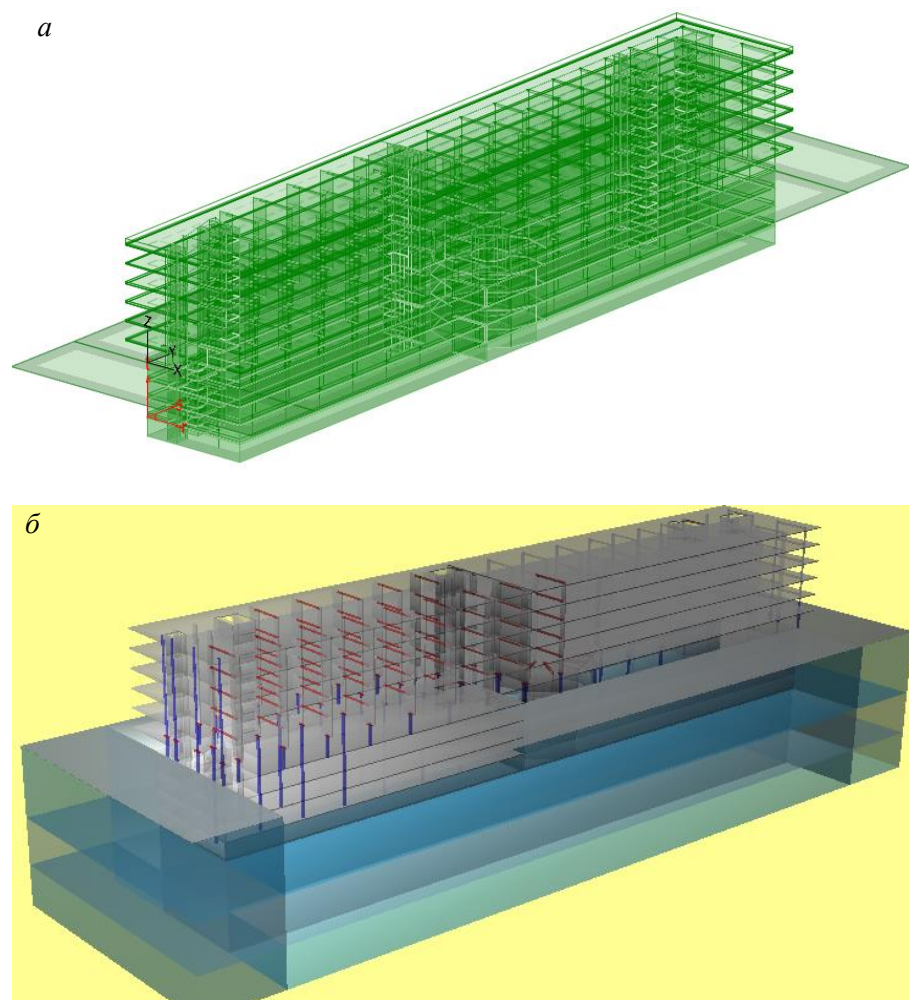


Рис. 2. Расчетная модель заглубленного здания (а) и ее визуализация (б)

Fig. 2. Design model of recessed building (a) and its visualization (b)

Краткий анализ напряженного состояния

Анализ напряженного состояния основания выполнен в соответствии с СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»¹.

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г.

Расчетная схема № 1. Изополя нормальных напряжений (далее – напряжения) в характерных сечениях основания при линейной деформации грунта показаны на рис. 3:

– в сечении XU в горизонтальной плоскости в уровне нижней поверхности фундаментной плиты наибольшие сжимающие вертикальные напряжения в грунте возникли в угловых областях $\sigma_{z\text{ уг}} = -345 \text{ кН/м}^2$ и в контурной зоне $\sigma_{z\text{ кон}} = -289 \text{ кН/м}^2$. Во внутренней части основания под фундаментной плитой сжимающие вертикальные напряжения в грунте уменьшились до величины $\sigma_{z\text{ вн}} = -233 \text{ кН/м}^2$;

– в вертикальном сечении YZ по с увеличением глубины основания произошло перераспределение максимальных сжимающих напряжений в грунте с контурной зоны внутрь грунтового массива до величины $\sigma_{z\text{ вн}} = -199 \text{ кН/м}^2$;

– с внешней стороны фундаментной плиты наибольшие значения сжимающих напряжений были равны $\sigma_{z\text{ закон}} = -94 \text{ кН/м}^2$ с уменьшением практически до нуля в периферийном направлении.

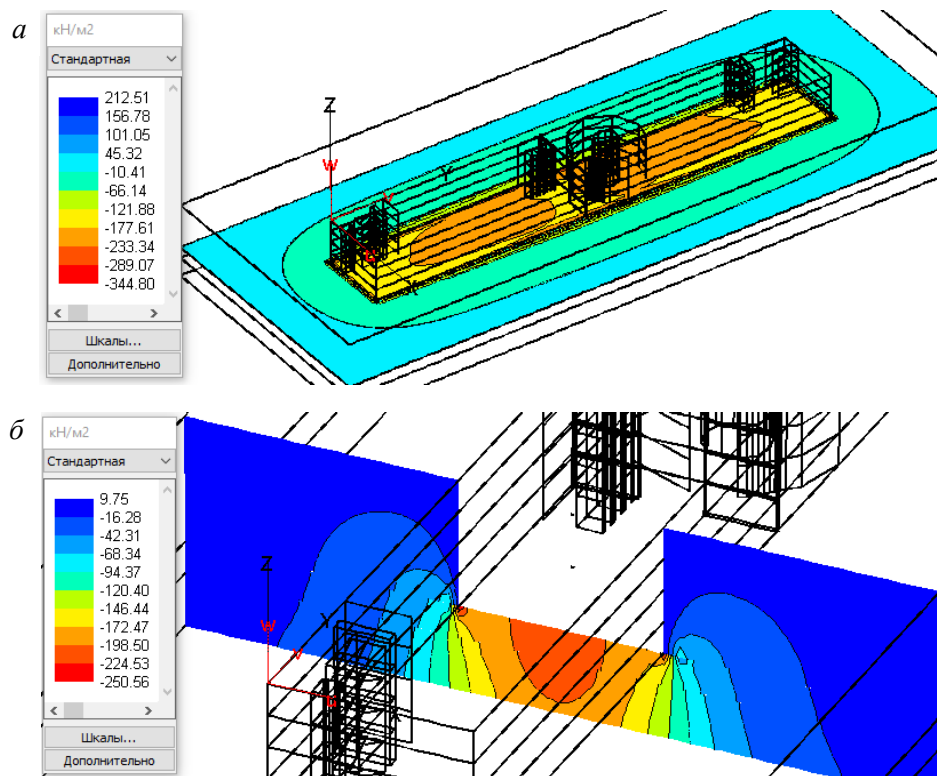


Рис. 3. Изополя вертикальных напряжений в расчетной схеме № 1:

a – в горизонтальном сечении на уровне подошвы МФП; b – в поперечном сечении в осях ZX

Fig. 3. Isofields of vertical stresses in design model 1:

a – horizontal section at the foundation slab; b – cross-section along Z and X axes

Среднее значение отпора грунта под подошвой фундаментной плиты можно найти из отношения вертикальной нагрузки от здания, полученной в статическом расчете, к площади фундаментной плиты – $\sigma_z = P/S = 827\,655/2399 = 345 \text{ кН/м}^2$. В подстилающем слое фундаментной плиты залегает ИГЭ-7 – глина полутвердая, у которой расчетное сопротивление равно $R = 322 \text{ кН/м}^2$. Условие $\sigma_{z \text{ ут}} = 345 \text{ кН/м}^2 > R = 322 \text{ кН/м}^2$ показывает, что упруго-пластические деформации грунта появляются в угловых зонах основания фундаментной плиты.

Расчетная схема № 2. В плитном фундаменте при нелинейной модели деформирования грунта в вертикальном сечении YZ с увеличением глубины основания также наблюдается перераспределение наибольших сжимающих напряжений с контурных зон внутрь грунтового массива до величины $\sigma_{z \text{ вн}} = -193 \text{ кН/м}^2$ (рис. 4).

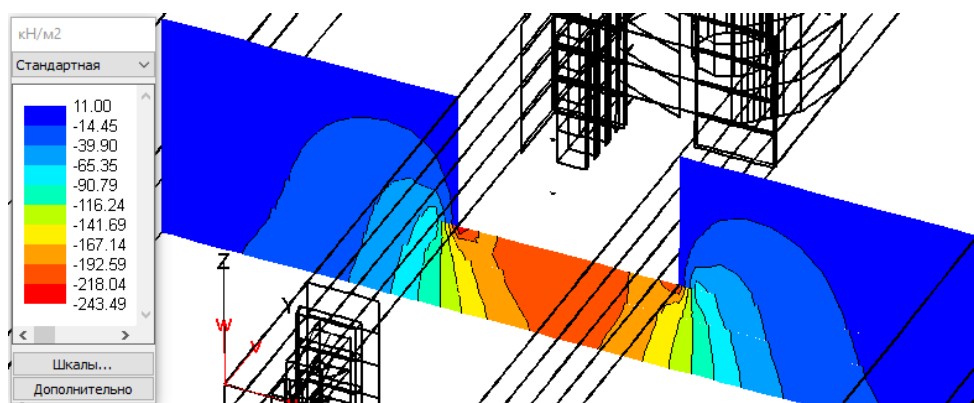


Рис. 4. Изополя вертикальных напряжений в поперечном сечении основания в расчетной схеме № 2

Fig. 4. Isofields of vertical stresses in the foundation cross-section in design model 2

Краткий анализ деформированного состояния

Расчетная схема № 1. При учете только упругой работы грунта, максимальные вертикальные перемещения основания по нижней горизонтальной грани фундаментной плиты были равны $f_{\text{max}} = 60,0 \text{ мм}$ (рис. 5, а), что значительно меньше предельно допустимых значений осадок основания $S_u^{\text{max}} = 150 \text{ мм}$.

Во внутренней области основания плитного фундамента, в месте появления так называемой воронки оседания, с глубиной вертикальные перемещения уменьшились с максимальных значений $f_{\text{max}} = 60 \text{ мм}$ на уровне подошвы фундаментной плиты практически до нуля к отметке -27.000 (рис. 5, б).

Разность относительных вертикальных перемещений грунтового основания составляет $(60,0 - 30,2)/(129\,000/4) = 0,0001$ и не превышает предельно допустимых значений разности осадок $(\Delta/L)_u = 0,003$.

Расчетная схема № 2. При неупругой работе грунта основания под подошвой фундаментной плиты вертикальные перемещения основания в сравнении с линейным деформированием основания немного увеличились до величины $f_{\text{max}} = 61,4 \text{ мм}$ (рис. 6). Так был получен результат, при котором вертикальные перемещения также не превысили предельные осадки и относительную разность вертикальных перемещений основания.

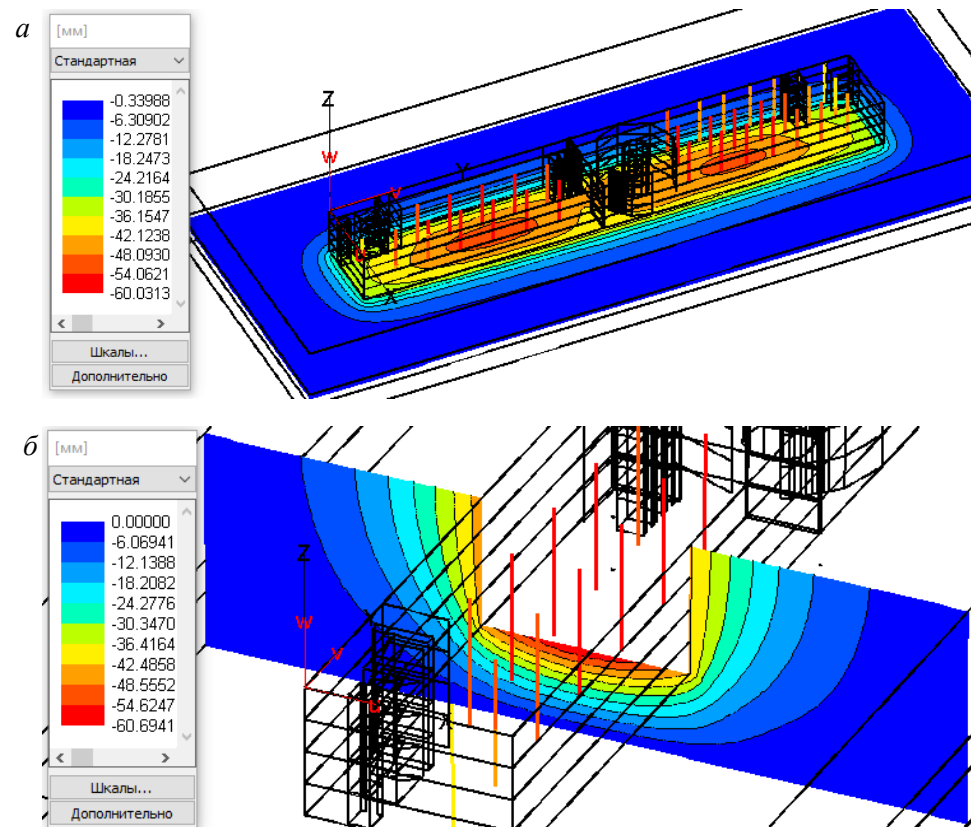


Рис. 5. Изополя вертикальных перемещений в расчетной схеме № 1:

a – в горизонтальном сечении на уровне подошвы МФП; *б* – в поперечном сечении в осях *ZX*

Fig. 5. Isofields of vertical displacement in design model 1:

a – horizontal section at the foundation slab; *b* – cross-section along *Z* and *X* axes

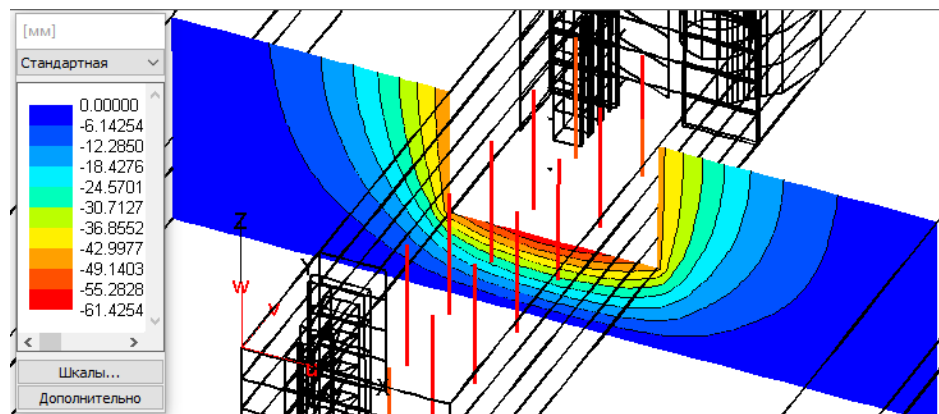


Рис. 6. Изополя вертикальных перемещений поперечного сечения основания в расчетной схеме № 2

Fig. 6. Isofields of vertical displacement of the foundation cross-section in design model 2

Выводы

Напряженно-деформированное состояние грунтового основания получено путем моделирования его как слоистой системы в расчетной модели «основание – фундамент – здание» методом конечных элементов в программном комплексе Ing+ MicroFe.

Как известно, в контурной зоне монолитной фундаментной плиты допускается образование упругопластических деформаций грунта при обеспечении устойчивости основания в целом.

Установлено, что как при линейных деформациях основания, так и при нелинейной работе грунта в основании по теории прочности Кулона – Мора вертикальные перемещения и относительная разность вертикальных перемещений основания плитного фундамента не превышают предельно допустимых значений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шашкин, К.Г.* Расчет напряженно-деформированного состояния основания фундаментов и здания с учетом их взаимодействия // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2001. № 4. С. 6. URL: <https://georec.narod.ru/mag/2001n4/19/19.htm> (дата обращения: 21.07.2026).
2. *Шулятьев, О.А.* Основания и фундаменты высотных зданий. Москва, 2016. 392 с. ISBN 978-5-4323-0163-5.
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 Всероссийской (Международной) конференции. В 5 книгах, Москва, 05–09 сентября 2005 г. Том 1. Москва : Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева, 2005. С. 149–166. EDN: SHURRP
4. *Лушников, В.В.* Использование мирового опыта при проектировании и строительстве фундаментов высотных зданий с учетом геологических условий Екатеринбурга // Академический вестник УралНИИПроект РААСН. 2009. № 1. С. 74–80. EDN: KVVVBP
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 // VI Международный симпозиум. Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений. Владивосток. 2016. С.133–134. EDN: QHVAKB
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. EDN: QCHBVR
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. 2000. № 3. URL: <http://georeconstruction.net/journals/03/20/20.pdf> (дата обращения: 21.07.2026).
11. *Кудрявцев, С.А., Слярова, 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. Ющубе, 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. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-118-132. EDN: DIFUTE

REFERENCES

1. 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)
2. Shulyat'ev, O.A. Foundations of High-Rise Buildings. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2014; (4): 202–244. (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 UralNIIProekt RAASN*. 2009; (1): 76–82. (In Russian)
5. 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)
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. Sistemnyi 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 Multistorey Brick Building. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (1): 118–132. (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 02.04.2026
Одобрена после рецензирования 23.04.2026
Принята к публикации 23.04.2026

Submitted for publication 02.04.2026
Approved after review 23.04.2026
Accepted for publication 23.04.2026