

УДК 692.1:004.9

doi: 10.33622/0869-7019.2023.04.04-08

# Численный анализ влияния строительства на окружающую застройку

**Валентина Матвеевна ТУСНИНА**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, tusnina@mgsu.ru

**Алексей Андреевич ЕМЕЛЬЯНОВ**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, stcofengineering@mail.ru

**Денис Андреевич ЕМЕЛЬЯНОВ**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, stcofengineering@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

<sup>2</sup> Научно-технический центр инжиниринга, 129226 Москва, просп. Мира, 131

**Аннотация.** Сегодня в практику проектирования и строительства прочно вошли численные методы расчетов, обосновывающие проектные решения зданий и сооружений, в том числе на стадии предпроектных инженерных изысканий. С помощью компьютерного моделирования рассмотрены вопросы оценки напряженно-деформированного состояния оснований, подземных и наземных конструкций на любом этапе проектирования и строительства. Для анализа влияния строительства на окружающую застройку был использован вычислительный комплекс PLAXIS, позволяющий моделировать как плоские, так и трехмерные задачи взаимодействия сооружений с грунтовым массивом. Грунт моделировался с применением упругопластической модели Мора-Кулона, основные расчетные параметры для которой принимались по результатам инженерно-геологических изысканий для проектируемого объекта и зданий окружающей застройки. Начальные напряжения от собственного веса грунтового массива определялись с помощью процедуры гравитационного нагружения. По результатам проведенных расчетов получена картина напряженно-деформированного состояния грунтового массива на всех этапах строительства, определены максимальные перемещения фундаментов рассматриваемого здания и расчетная зона влияния.

**Ключевые слова:** численный расчет, окружающая застройка, конечно-элементная модель, вычислительный комплекс PLAXIS, напряженно-деформированное состояние грунтового массива, расчетная зона влияния

**Для цитирования:** Туснина В. М., Емельянов А. А., Емельянов Д. А. Численный анализ влияния строительства на окружающую застройку // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 4. С. 4–8.

doi: 10.33622/0869-7019.2023.04.04-08

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF CONSTRUCTION ON THE SURROUNDING DEVELOPMENT

**Valentina M. TUSNINA**<sup>1</sup>, tusnina@mgsu.ru

**Alexey A. EMEL'YANOV**<sup>2</sup>, stcofengineering@mail.ru

**Denis A. EMEL'YANOV**<sup>2</sup>, stcofengineering@mail.ru

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

<sup>2</sup> Scientific and Technical Center of Engineering, prospekt Mira, 131, Moscow 115419, Russian Federation

**Abstract.** Today numerical calculation methods have firmly entered the practice of design and construction, substantiating design solutions for buildings and structures, including at the stage of pre-design engineering surveys. With the help of computer simulation, the issues of assessing the stress-strain state of foundations, underground and above-ground structures at any stage of design and construction are considered. To analyze the impact of construction on the surrounding buildings, the PLAXIS computer complex was used, which makes it possible to simulate both flat and three-dimensional problems of the interaction of structures with a soil mass. The soil was modeled using the Mohr-Coulomb elastoplastic model, the main design parameters for which were taken based on the results of engineering and geological surveys for the projected object and buildings of the surrounding development. The initial stresses from the own weight of the soil mass were determined using the gravity loading procedure. Based on the results of the calculations, a picture of the stress-strain state of the soil mass was obtained at all stages of construction, the maximum displacements of the foundations of the existing building and the calculated zone of influence were determined.

**Keywords:** numerical calculation, surrounding development, finite element model, PLAXIS computing complex, stress-strain state of soil mass, calculated zone of influence

**For citation:** Tushina V. M., Emelyanov A. A., Emelyanov D. A. Numerical Analysis of the Impact of Construction on the Surrounding Development. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 4, pp. 4–8. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.04.04-08

### Введение

Предпроектные изыскания включают в себя не только обследование строительных конструкций и инженерных систем здания, но и геологические, геофизические, геодезические и экологические исследования строительной площадки. Кроме того, при строительстве в условиях существующей застройки требуются дополнительные специальные исследования по оценке влияния нового строительства на окружающие здания, сооружения и коммуникации.

В соответствии с требованиями норм<sup>1,2</sup> определяют общие габариты так называемой зоны влияния и участков интенсивных перемещений, а также дополнительные деформации эксплуатируемых зданий и инженерных коммуникаций. Такую оценку выполняют на основании расчетного и экспертно-аналитического подхода, сопоставляя результаты расчетов с данными мониторинга и опыта производства геотехнических работ в аналогичных грунтовых условиях.

Для корректной оценки влияния строительства на окружающую застройку, особенно имеющую историческую ценность<sup>3</sup>, расчеты должны выполняться с использованием компьютерного моделирования, позволяющего получить полную и достоверную информацию при проведении инженерно-геологических изысканий.

Эффективность метода численного анализа при решении геотехнических задач, возникающих при проектировании и строительстве зданий и сооружений различного назначения, подтверждена многочисленными работами исследователей в этой области [1–5].

По результатам численных расчетов [1] установлена значительная концентрация увеличения скоростей длительных осадок исторической застройки Санкт-Петербурга у зданий, расположенных рядом с набережными рек и каналов, а также в зонах влияния транспортных подземных узлов городского метрополитена. Полученные результаты численного анализа длительности скорости осадок этих исторических зданий рекомендованы авторами данных исследований для совершенствования численных реологических моделей работы основания в инженерно-геологических условиях города. Хорошую сходимость результатов численного расчета и натурных испытаний показали исследования напряженно-деформированного состояния грунта в

свайном фундаменте с использованием вычислительного комплекса PLAXIS в работе [2].

В статье [3] приведены результаты сравнительного моделирования влияния разработки котлована на окружающую застройку с использованием программных комплексов PLAXIS 2D и PLAXIS 3D. Установлено, что при одинаковом характере дополнительных осадков существующего здания значения дополнительной относительной разности осадков различаются в пределах 30 %. Для предварительных расчетов деформаций оснований зданий, имеющих сложную конфигурацию в плане, была использована программа PLAXIS 2D в целях сокращения времени расчета.

Результаты исследований работы искусственного основания с устройством высокоуплотненных грунтовых подушек, подстилаемых слабыми водонасыщенными лёссовыми грунтами, изложенные в работе [4], подтвердили возможность применения численных методов расчета, показав хорошую сходимость расчетных и опытных значений осадков.

В статье [5] приведен анализ конечно-элементного моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния оснований фундаментов с применением шагово-итерационных процедур в геометрически и физически нелинейных осесимметричных задачах уплотнения грунта. Установлено, что на сходимость результатов численного и натурального экспериментов по выявлению зон деформации и уплотнения грунта значительно влияет не только корректность расчетной схемы действительной работы грунта в массиве при устройстве фундаментов, но и параметр расчетной модели, описывающий зависимость модуля деформации от пористости грунта и скорости передачи на него давления. При этом физико-механические свойства грунта и геометрические размеры фундаментов на точность моделирования существенно не влияют.

Сегодня для оценки напряженно-деформированного состояния основания, подземных и наземных конструкций зданий успешно применяются такие вычислительные комплексы, как PLAXIS, ANSYS, FEM models, SOFISTIK и др., в основу которых положен метод конечных элементов (МКЭ) [6]. Для повышения надежности решения геотехнических задач, как утверждают авторы исследования [7], в программных комплексах, реализующих МКЭ, должен быть встроен инструмент вероятностного анализа. Важность статистического анализа и вероятностного расчета в исследованиях напряженно-деформированного состояния и несущей способности оснований и фундаментов отмечена в работах [8–10].

Цель работы — изучение влияния нового строительства на окружающую застройку с помощью

<sup>1</sup> СП 361.1325800.2017 «Здания и сооружения. Защитные мероприятия в зоне влияния строительства подземных объектов».

<sup>2</sup> Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации».

<sup>3</sup> Федеральный закон от 25 июня 2002 г. № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».

программного комплекса при проведении предпроектных инженерных изысканий.

### Материалы и методы исследования

С целью изучения влияния строительства на окружающую застройку объекта культурного наследия «Усадьба Царицыно» компанией ООО «Научно-технический центр инжиниринга» в рамках инженерных изысканий были проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) основания зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния от прокладки инженерных коммуникаций. Предварительная зона влияния, определенная по данным СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83\* Основания зданий и сооружений», включавшая в себя инженерные коммуникации и само здание, составила 5,5–18 м.

Конечно-элементное моделирование НДС грунтового массива исследуемой территории выполнялось с использованием программного комплекса PLAXIS ver.8.5 [11]. Данная программа позволяет моделировать весь процесс нагружения массива грунта, начиная с исходного природного напряженного состояния под действием собственного веса и дальнейшее его изменение, обусловленное последовательными этапами строительства объекта.

Грунт моделировался с использованием упруго-пластической модели Мора-Кулона, основные расчетные параметры для которой принимались по результатам инженерно-геологических изысканий для проектируемого объекта и зданий окружающей застройки — удельный вес грунта, модуль деформации, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, сцепление и угол дилатансии.

Численный расчет состоял из пяти этапов, отражающих историю нагружения массива грунта в процессе строительства:

- составление расчетной схемы с назначением всех расчетных параметров и свойств элементов (рис. 1);
- генерирование начальных напряжений от собственного веса грунта и генерирование давления воды в порах грунта и на внешних границах исследуемой области;
- определение напряжений в грунтовом массиве от окружающей застройки;
- разработка траншеи до проектной отметки с учетом конструкции ее ограждения;
- воздействие на массив грунта нагрузки от веса проектируемого сооружения.

В сетке конечных элементов, созданной на основании геометрической модели, присутствуют три типа компонентов — треугольные элементы, узлы и точки напряжений. В данном расчете рассматривались 15-узловые элементы (рис. 2).

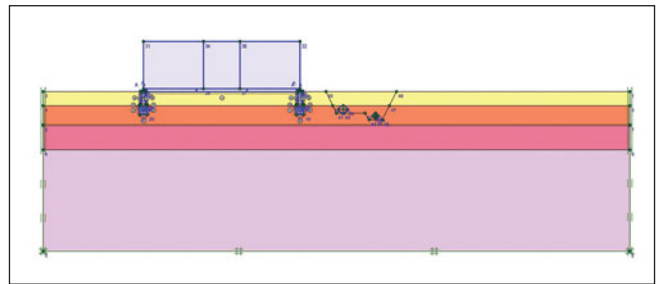


Рис. 1. Расчетная модель

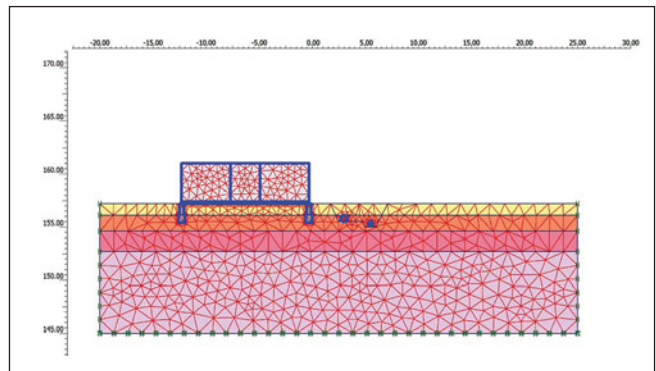


Рис. 2. Сетка конечных элементов

Для конечно-элементного моделирования использовались следующие специальные типы элементов:

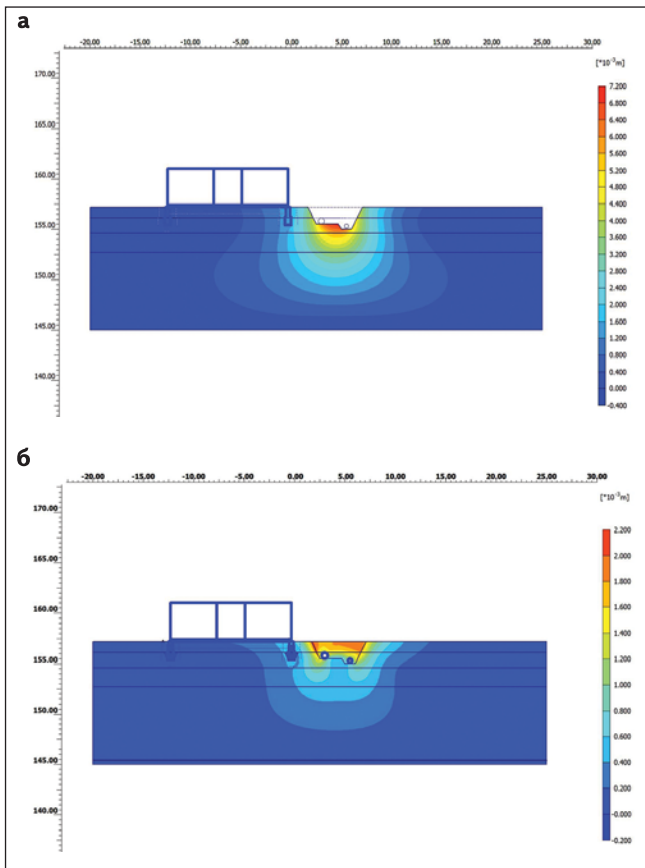
- интерфейсные элементы для расчетов, связанных с взаимодействием грунта и сооружения;
- балочные элементы для моделирования конструкций сооружений с учетом их жесткости при изгибе, нормальной жесткости и изгибающего момента;
- анкерные элементы для моделирования анкеров и распорок.

Перед проведением расчета определялись начальные напряжения от собственного веса грунтового массива с помощью процедуры гравитационного нагружения. Данная процедура используется при негоризонтальном расположении слоев грунта в расчетной модели. После определения начальных напряжений, полученные перемещения обнулялись, что позволило избежать влияния эффекта «гравитационного нагружения» на перемещения, полученные в ходе последующего расчета.

Расчеты выполнялись по второму предельному состоянию, т. е. по расчетным значениям характеристик грунтов с доверительной вероятностью 0,85 согласно СП 22.13330.

В расчете были приняты следующие граничные условия:

- боковые границы расчетной области свободно перемещаются по вертикальной оси  $Y$  и неподвижны относительно оси  $X$ ;



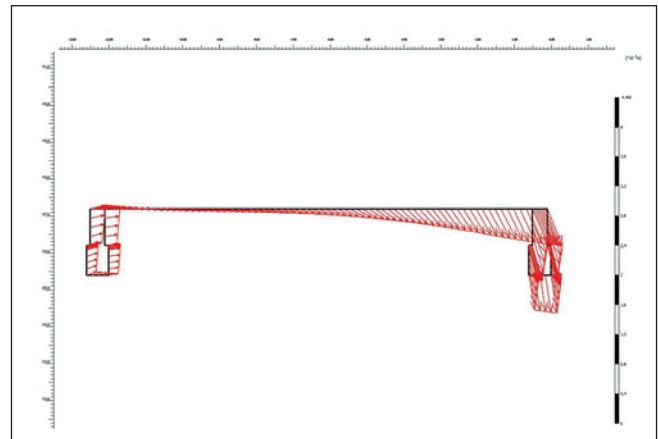
**Рис. 3.** Изополя полных перемещений на этапе разработки траншеи в естественных откосах (а) и на последнем этапе строительства и обратной засыпки (б)

- нижняя граница закреплена по осям  $X$  и  $Y$ ;
- верхняя граница — свободная.

Нижняя граница расчетной области принималась равной величине сжимаемой толщи грунта.

### Результаты исследования

По результатам проведенных расчетов получены изополя полных перемещений на этапе разработки траншеи в естественных откосах и на последнем эта-



**Рис. 4.** Эюра суммарных максимальных полных перемещений существующего здания на последнем этапе строительства

пе строительства проектируемых сетей и обратной засыпки (рис. 3). Максимальные полные перемещения фундаментов существующего здания на последнем этапе строительства не превысили 1 мм (рис. 4), из чего можно заключить, что здание в расчетную зону влияния не попадает. При этом расчетная зона влияния составила 1,9 м.

### Вывод

По данным натурных инженерно-геодезических наблюдений за деформациями здания в ходе геотехнического мониторинга, осуществленного компанией ООО «Научно-технический центр инжиниринга» в первый год эксплуатации объекта, установлено, что максимальные дополнительные деформации находились в пределах допустимых норм и соответствовали результатам численных расчетов. Это подтверждает тот факт, что для оценки влияния строительства на окружающую застройку расчеты должны выполняться с использованием компьютерного моделирования, позволяющего получить полную и достоверную информацию при проведении инженерно-геологических изысканий.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васенин В. А. Обобщение наблюдений за осадками исторической застройки Санкт-Петербурга за последние 130 лет для определения параметров реологических моделей грунтовой среды // Численные методы расчетов в практической геотехнике : сб. статей. Санкт-Петербург, 2012. С. 359–365.
2. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Сидоров В. В. Анализ статического испытания свай большого диаметра и длины с помощью МКЭ. Там же. С. 52–57.
3. Пономарев А. Б., Калошина С. В., Безгодов М. А. Сравнение программных комплексов PLAXIS 2D и PLAXIS 3D при моделировании влияния разработки котлована на существующую застройку. Там же. С. 58–62.
4. Усманов Р. А. Применение численных методов для расчета осадки фундаментов на искусственных основаниях. Там же. С. 172–176.
5. Зоценко Н. Л., Винников Ю. Л. Современная практика моделирования взаимодействия фундаментов с уплотненными основаниями при их возведении и последующей работе. Там же. С. 164–171.
6. Фадеев А. Б., Прегер А. Л. Решение геотехнических задач методом конечных элементов. Томск : изд-во Томского ун-та, 1994. Ч. 1. 193 с. Ч. 2. 136 с.
7. Винников Ю. Л., Харченко М. А., Марченко В. И.

Численный расчет армированного основания в вероятностной постановке // Численные методы расчетов в практической геотехнике : сб. статей. Санкт-Петербург, 2012. С. 86–92.

8. Roberts L. Reliability-based design of shallow foundations based on elastic settlement [Расчет фундаментов мелкого заложения на упругом основании] // Proc. of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2007). Shanghai, 2007. Pp. 471–483.
9. Kisse A. A consistent failure model for probabilistic analysis of shallow foundations [Модель последовательных отказов для вероятностного анализа фунда-

ментов мелкого заложения] // Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011). Munich, 2011. Pp. 385–392.

10. Pereira C. Shallow foundation design through probabilistic and deterministic methods [Расчет фундамента мелкого заложения вероятностным и детерминированным методами]. Ibid. Pp. 199–207.
11. PLAXIS 2D v.8. *Finite elements code for soil and rock analysis* [Код конечных элементов для анализа почвы и горных пород] / Eds R. B. J. Brinkgreve, W. Broere Abingdon. Balkema, 2002.

#### REFERENCES

1. Vasenin V. A. Generalization of observations of precipitation of the historical buildings of St. Petersburg over the past 130 years to determine the parameters of rheological models of the soil environment. *Chislennyye metody raschetov v prakticheskoy geotekhnike. Sbornik statey* [Numerical methods of calculations in practical geotechnics. Collection of articles]. St. Petersburg, 2012, pp. 359–365. (In Russ.).
2. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sidorov V. V. Analysis of static testing of piles of large diameter and length using FEM. *Ibid*, pp. 52–57. (In Russ.).
3. Ponomarev A. B., Kaloshina S. V., Bezgodov M. A. Comparison of PLAXIS 2D and PLAXIS 3D software packages in modeling the impact of excavation on existing buildings. *Ibid*, pp. 58–62. (In Russ.).
4. Usmanov R. A. Application of numerical methods for calculating the settlement of foundations on artificial foundations. *Ibid*, pp. 172–176. (In Russ.).
5. Zotsenko N. L., Vinnikov Yu. L. Modern practice of modeling the interaction of foundations with compacted foundations during their construction and subsequent work. *Ibid*, pp. 164–171. (In Russ.).
6. Fadeyev A. B. *Resheniye geotekhnicheskikh zadach metodom konechnykh elementov* [Solving geotechnical problems by the finite element method]. Tomsk, Tomskiy un-t Publ., 1994. Part 1. 193 p. Part 2. 136 p. (In Russ.).
7. Vinnikov Yu. L., Kharchenko M. A., Marchenko V. I. Numerical calculation of a reinforced base in a probabilistic formulation. *Chislennyye metody raschetov v prakticheskoy geotekhnike. Sbornik statey* [Numerical methods of calculations in practical geotechnics. Collection of articles]. St. Petersburg, 2012, pp. 86–92. (In Russ.).
8. Roberts L. Reliability-based design of shallow foundations based on elastic settlement. *Proc. of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2007)*. Shanghai, 2007, pp. 471–483.
9. Kisse A. A consistent failure model for probabilistic analysis of shallow foundations. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2011)*. Munich, 2011, pp. 385–392.
10. Pereira C. Shallow foundation design through probabilistic and deterministic methods. *Ibid*, pp. 199–207.
11. PLAXIS 2D v.8. *Finite elements code for soil and rock analysis* [Код конечных элементов для анализа почвы и горных пород]. Eds R. B. J. Brinkgreve, W. Broere Abingdon. Balkema, 2002. ■

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

НАПОМИНАЕМ, ЧТО ОФОРМИТЬ ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ  
**«ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»**  
 МОЖНО НАЧИНАЯ С ЛЮБОГО МЕСЯЦА В ЛЮБОМ ОТДЕЛЕНИИ СВЯЗИ  
 ИЛИ В РЕДАКЦИИ, А ТАКЖЕ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ ЖУРНАЛА.

ПОДПИСНЫЕ ИНДЕКСЫ ЖУРНАЛА В КАТАЛОГАХ:

• УРАЛ-ПРЕСС – **70695** • ПОЧТА РОССИИ – **ПП983** •

ПОДПИСКА НА НАШ ЖУРНАЛ, ВХОДЯЩИЙ В ЧИСЛО ВЕДУЩИХ  
 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕМАТИКЕ, –  
 ЭТО ВАШ ВКЛАД В РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ.