

DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.06

УДК 624.131.7

**А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
РЕГУЛИРУЕМОГО ФУНДАМЕНТА И ГРУНТОВОГО  
ОСНОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ  
ANSYS WORKBENCH**

Современное состояние жилого фонда в России характеризуется огромным количеством аварийных и требующих капитального ремонта зданий. В связи с этим необходимо применять и разрабатывать эффективные и экономически выгодные методы сохранения и восстановления эксплуатационной надежности строительных объектов. Строительной науке известны различные методики и технологии защиты зданий от неравномерных деформаций и устранения их последствий, но наиболее эффективным и широко внедряемым в практику в различных странах является подъем и выравнивание зданий при помощи плоских домкратов. В настоящее время для прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкций и оснований фундаментов широко применяются численные методы, реализованные в различных программных комплексах. Цель работы – смоделировать в программном комплексе ANSYS Workbench напряженно-деформированное состояние взаимодействия регулируемого фундамента с грунтовым основанием и цокольно-подвальной стеной здания при выравнивании крена. Расчеты выполнялись в два этапа: 1) моделирование и определение напряжений и деформаций в конструкции при равномерной нагрузке на балку; 2) моделирование и определение напряжений и деформаций в конструкции при подъеме краевой части балки домкратом, с учетом равномерного нагружения сверху на балку и реакции опоры. Большое внимание уделено численному моделированию осадки фундамента и верификации полученных значений. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с тестами, подтверждая численные методы, реализованные в ANSYS Workbench. В ходе дальнейших исследований авторами планируется моделирование работы грунтового основания в программном комплексе ANSYS Workbench с учетом неупругого поведения грунта при нагружении посредством использования модели Drucker-Prager или создания новых моделей, апробированных экспериментальным путем.

**Ключевые слова:** регулируемый фундамент, ANSYS, ANSYS Workbench, напряженно-деформированное состояние, численные методы, метод конечных элементов, осадка, крен, деформации, грунтовое основание.

**A.B. Ponomarev, E.N. Sychkina**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **THE RESULTS OF MODELING STRESS-STRAIN STATE OF THE ADJUSTABLE FOUNDATION AND SOIL BASE IN THE SOFTWARE PACKAGE ANSYS WORKBENCH**

The current state of housing in Russia is characterized by a huge number of emergency and requiring major overhaul buildings. In this connection it is necessary to apply and to develop efficient and economical methods conservation and restoration the operational reliability of constructions. Various methods and technologies of protection buildings from the non-uniform deformation and elimination of their consequences are known in building science, but the rise and leveling buildings using flat jacks is the most effective and widely put into practice in the various countries of the contemporary world. Currently numerical methods implemented in various software systems are widely used to predict the stress-strain state of the structures and foundation bases. The purpose of work is modeling in the software package ANSYS Workbench stress-strain state of interaction adjustable foundation with base and basement walls, when aligning lurch. Calculations were carried out in 2 stages: 1) modeling and determination of stresses and strains in the structure under uniform load on the beam; 2) modelling and identification of stress and strain in the structure when lifting jack edge of the beam considering uniform loading on top of the beam and support reaction. Much attention is given to the numerical simulation of foundation settlement and verification of the obtained values. The results of numerical modeling are in good agreement with the tests, confirming the numerical methods implemented in ANSYS Workbench. In further studies, authors will plan the modeling of foundation base in the program complex ANSYS Workbench taking into account the inelastic soil behavior under load by using the model Drucker-Prager or creating new models tested experimentally.

**Keywords:** adjustable foundation, ANSYS, ANSYS Workbench, stress-strain state, numerical methods, finite element method, settlement, heeling, deformation, soil base.

### **Введение**

Развитие науки и компьютерных технологий позволяет в настоящее время использовать различные методы и модели для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтовых оснований фундаментов зданий и сооружений. Деформации грунтового основания связаны с внешней нагрузкой на него, вызывающей изменение плотности грунта, и проявляются в виде осадки земной поверхности.

Малоизученным фактором, имеющим значение при выравнивании зданий домкратами, является изменение НДС грунтового основания зданий и сооружений с регулируемые фундаментами, а также самого фундамента. Учет данных особенностей позволит усовершенствовать и автоматизировать системы с плоскими домкратами для подъема и выравнивания зданий и значительно сократить затраты на

устранение крена зданий и сооружений. На основании изложенного изучение НДС грунтового основания и регулируемых фундаментов зданий и сооружений при их защите от неравномерных деформаций является актуальной задачей.

Целью данной работы являлось моделирование в программном комплексе ANSYS Workbench напряженно-деформированного состояния взаимодействия регулируемого фундамента с грунтовым основанием и цокольно-подвальной стеной здания при выравнивании крена.

Для достижения цели авторами были поставлены следующие задачи:

- 1) изучить литературу по вопросу взаимодействия регулируемого фундамента с грунтовым основанием и со стеной здания;
- 2) установить параметры моделируемого фундамента и создать геометрию в программном комплексе ANSYS Workbench, определить свойства материалов;
- 3) задать граничные условия и создать конечно-элементную модель;
- 4) выполнить расчет и сравнить расчетные данные с результатами натуральных экспериментов, сформулировать выводы по работе.

## **1. Обзор существующих исследований по данной проблеме**

Современное состояние жилого фонда в России характеризуется огромным количеством аварийных и требующих капитального ремонта зданий. В связи с этим необходимо применять и разрабатывать эффективные и экономически выгодные методы сохранения и восстановления эксплуатационной надежности строительных объектов, в том числе защиты и устранения сверхнормативных неравномерных деформаций.

Строительной науке известны различные методики и технологии защиты зданий от неравномерных деформаций и устранения их последствий, но наиболее эффективным и широко внедряемым в практику в различных странах является подъем и выравнивание зданий при помощи плоских домкратов. Среди отечественных исследователей данной проблемы можно отметить М.В. Зотова [1–3], М.Г. Скибина [4], которые изучали НДС как фундамента, так и грунтового основания под регулируемым фундаментом. Комплекс натуральных экспериментов

сопровождался моделированием процессов в программных комплексах Plaxis [4]. Среди зарубежных исследователей данной проблемы можно отметить Н. Brylla [5], Niemiec Tomasz, Gromysz Krzysztof [6, 7].

В настоящее время для прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкций и оснований фундаментов широко применяются численные методы, реализованные в различных программных комплексах [8–10]. Поэтому авторами было принято решение о моделировании НДС в программном комплексе ANSYS Workbench.

## 2. Исходные данные для создания модели в ANSYS Workbench и построение расчетной модели

В данной работе выполнено моделирование НДС регулируемого фундамента, схема которого была предложена М.Г. Скибиным [4]. Полученная в результате построения геометрия регулируемого фундамента на грунтовом основании приведена на рис. 1.

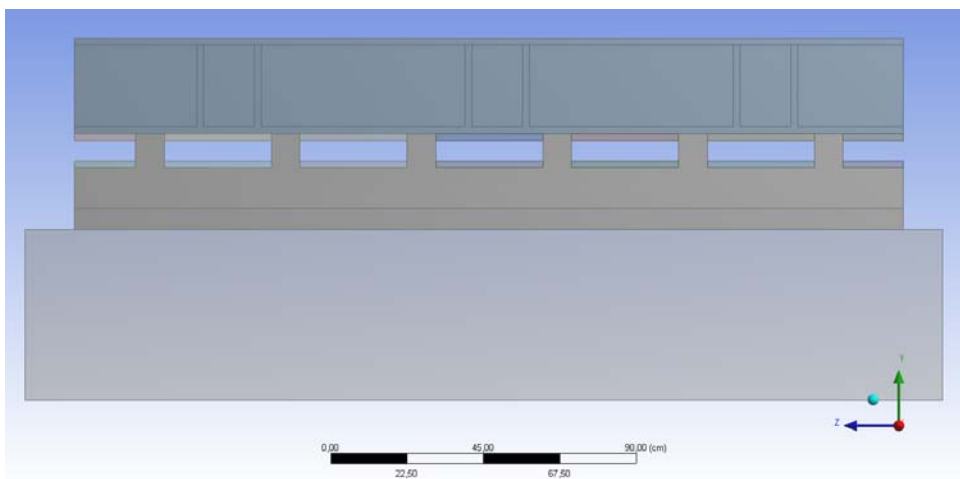


Рис. 1. Геометрия регулируемого фундамента

В конструкции модели предусмотрены опорные элементы, в проемах между которыми размещены домкраты для трансформации нагрузки из равномерно-распределенной в дискретную при выравнивании крена фундамента. Основанием фундамента служит песчаный грунт.

Задача решалась в программном комплексе ANSYS Workbench при помощи Static Structural Analysis Systems. В работе принята система координат Cartesian. В качестве единиц измерения выбраны сантиметры.

Для моделирования приняты следующие параметры регулируемого фундамента:

- ширина фундаментной ленты 300 мм, длина фундамента – 2440 мм, толщина – 60 мм;
- материал модели – фанера марки ФСФ и ФСБ;
- шаг сосредоточенных сил – 400 мм.

Создание материала выполнялось с использованием функции меню Engineering Data. Задавались три материала – сталь (балка), фундамент и грунт. Модели используемых материалов принимались линейно-упругими. Дополнительно к деформационным характеристикам (модуль упругости, коэффициент Пуассона) материалов задавалась их плотность.

Модель фундамента опирается на песок среднезернистый, в воздушно-сухом состоянии. Характеристики песка приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики модели грунтового основания

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Габаритные размеры, $a \times b \times h$ , мм	3000×3000×2200
2	Удельный вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	16,5
3	Модуль деформации $E_0$ , МПа	20,75
4	Коэффициент Пуассона $\mu_0$	0,3
5	Угол внутреннего трения, $\varphi$	41,5
6	Удельное сцепление $c$ , кПа	0,1

Характеристики заданного материала фундамента приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики модели регулируемого фундамента

№ п/п	Основные параметры	Модель регулируемого фундамента
1	Габаритные размеры, $a \times b \times h$ , мм	2440×300×120
2	Удельный вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	6
3	Модуль деформации $E$ , МПа	6000
4	Коэффициент Пуассона $\mu$	0,065

Для построения конечно-элементной (КЭ) модели был выбран Hex Dominant Method, функция Mechanical, Relevance 100. Крупность КЭ-сетки – Medium.

Все контакты в модели, за исключением контакта «фундамент – грунт», были заданы Frictionless. Контакт между фундаментом и грунтом основания был задан при помощи функции Rough.

Схема приложенных нагрузок представлена на рис. 2. В модели было векторно задано ускорение свободного падения Standard Earth Gravity, Fixed Support – зафиксирована от перемещений нижняя поверхность грунта основания, Pressure – переданное на верхнюю поверхность балки (100 кПа), Pressure – от одного из крайних домкратов, при выравнивании крена фундамента (110 кПа), Force – сила реакции опоры (2669 Н). Боковые поверхности грунта заданы как Frictionless Support (см. рис. 2).

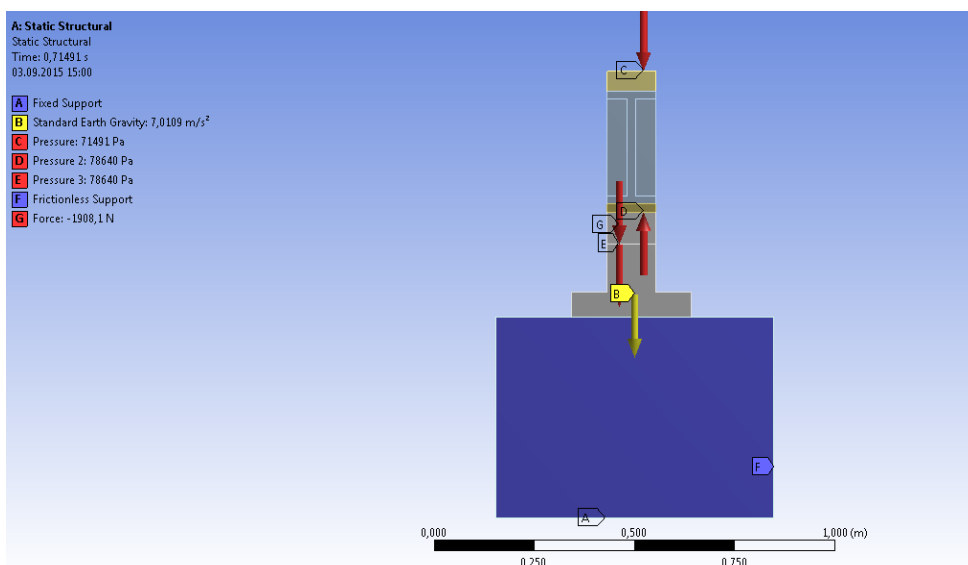


Рис. 2. Схема приложенных нагрузок и сил при поднятии балки домкратом

Расчеты выполнялись в два этапа:

- 1) моделирование и определение напряжений и деформаций в конструкции при равномерной нагрузке на балку;
- 2) моделирование и определение напряжений и деформаций в конструкции при подъеме краевой части балки домкратом, с учетом равномерного нагружения сверху на балку и реакции опоры (см. рис. 2).

В результате расчета были определены общие деформации модели (Total Deformation). Общие деформации модели (осадка) были сопоставлены с результатами натурных испытаний М.Г. Скибина [4].

### 3. Результаты моделирования НДС при равномерной нагрузке на фундамент

Графически результаты расчета общих деформаций представлены на рис. 3, 4.

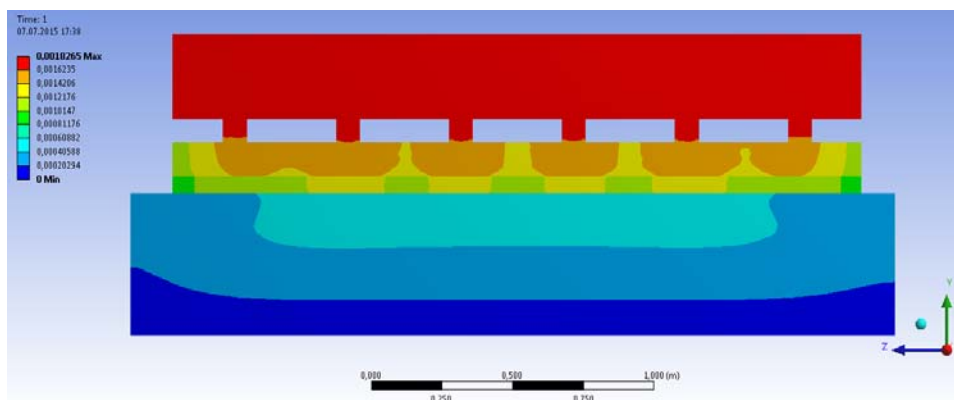


Рис.3. Общие деформации (вид в осях YZ)

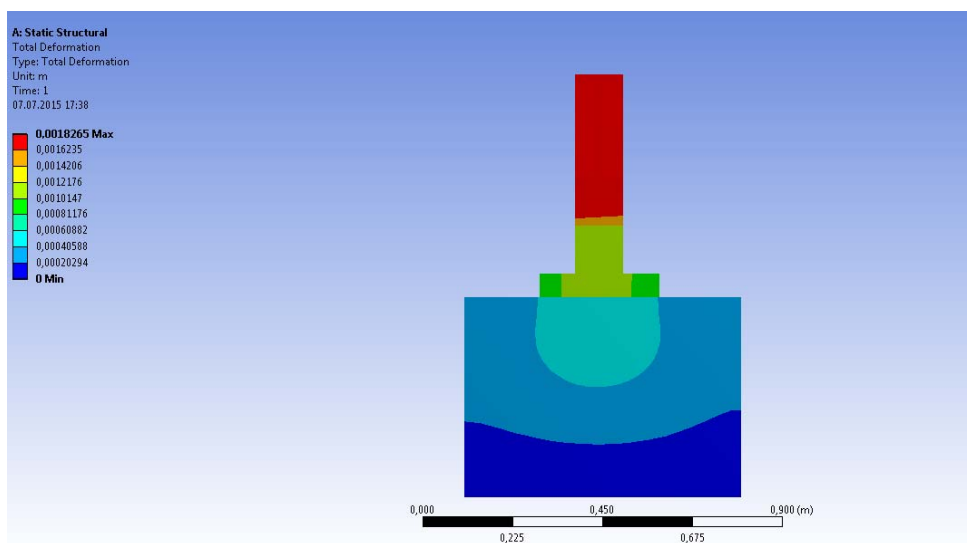


Рис. 4. Общие деформации (вид в осях XY)

Максимальные деформации модели фундамента составили 1,83 мм и зафиксированы вблизи области приложения нагрузки – балка и центральная часть фундаментной ленты. Минимальные деформации составили 0 мм и отмечены в нижней части рассматриваемого грунтового ос-

нования. В целом наблюдается снижение значений общих деформаций при удалении от области нагружения.

#### 4. Результаты моделирования НДС при подъеме фундамента домкратом

Графически результаты расчета общих деформаций представлены на рис. 5, 6.

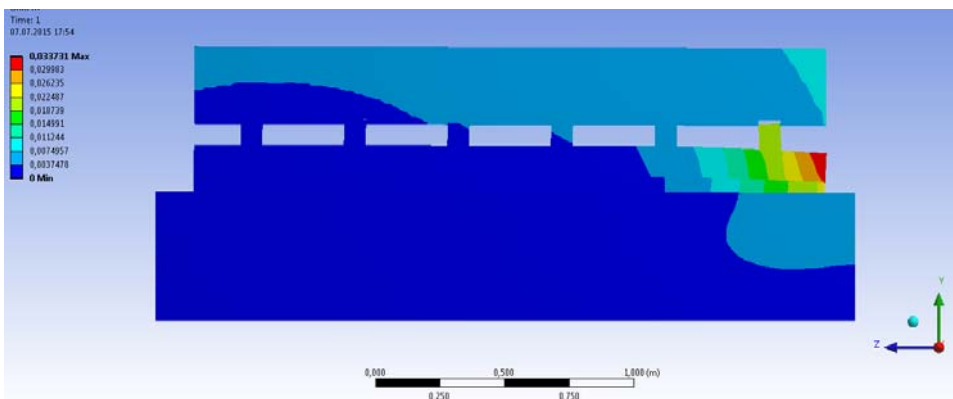


Рис. 5. Общие деформации при подъеме домкратом (вид в осях YZ)

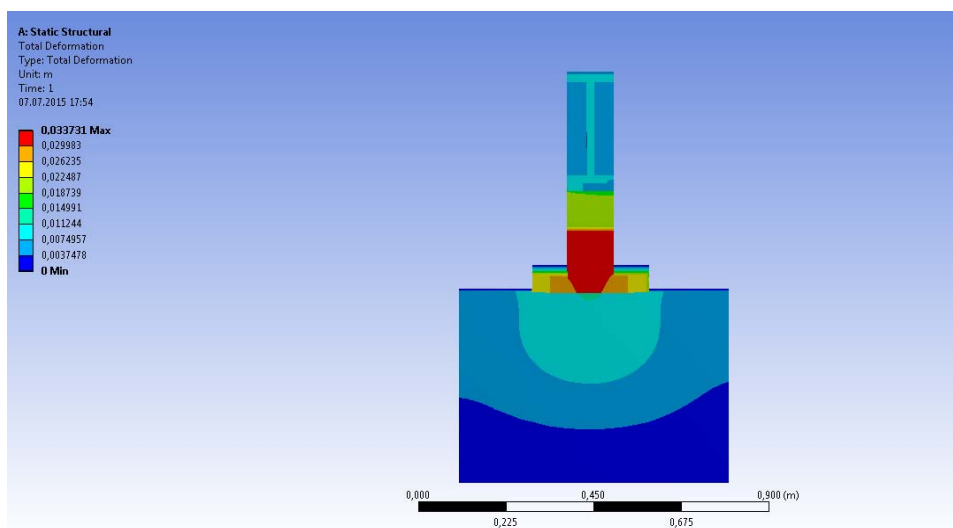


Рис. 6. Общие деформации при подъеме домкратом (вид в осях XY)

Максимальные деформации составили 3,37 см и зафиксированы в краевой части фундаментной ленты, под домкратом, поднимающим



балку. Минимальные деформации составили 0 мм и отмечены на удалении от места поднятия балки домкратом.

Таким образом, максимальные напряжения и деформации при равномерной нагрузке на фундамент сосредоточены в области нагружения (балка) и, если говорить о грунтовом основании, под подошвой фундамента. В случае подъема балки домкратом максимальные напряжения и деформации в конструкции и в грунте основания сосредоточены в области, смежной с домкратом, поднимающим балку.

## 5. Анализ и верификация полученных результатов

Полученные в данной работе результаты согласуются с положениями механики грунтов о работе грунтового основания под фундаментами зданий и сооружений, а также результатами, представленными в работе М.Г. Скибина [4]. В табл. 3 представлен сравнительный анализ результатов определения общих деформаций, полученных М.Г. Скибиным [4] при натуральных испытаниях модели фундамента, и результатов, полученных при расчете с использованием программного комплекса ANSYS Workbench.

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения осадки модели

№ п/п	Нагрузка на модель, кН	Экспериментальная осадка модели, мм [4]	Расчетная осадка модели, мм
1	73,2	2,96	1,83
2	146,4	6,39	3,51
3	183,0	8,42	4,35
4	219,6	10,43	5,19

Из табл. 3 видно, что результаты моделирования оказались достаточно близкими к результатам натуральных экспериментов. При расчете в ANSYS Workbench грунт был задан как упругий материал, и на начальном этапе нагружения различие между экспериментальными и расчетными осадками составило около 38 %. С увеличением нагрузки это различие возрастало, и на последнем этапе нагружения различие между расчетной и экспериментальной осадкой составило 50 %. Это можно объяснить тем, что грунт не является абсолютно упругим телом и показывает упругие деформации только на начальной фазе нагружения. Различие между расчетными и экспериментальными значениями

осадок возрастало с увеличением нагрузки на модель фундамента, так как с возрастанием нагрузки в грунте возникают остаточные деформации неупругого характера.

При дальнейших исследованиях возможности моделирования работы грунтового основания в программном комплексе ANSYS Workbench необходимо учесть неупругое поведение грунта при нагружении посредством использования модели Drucker-Prager или создания новых моделей, апробированных экспериментальным путем.

### **Выводы**

Автором выполнено моделирование в программном комплексе ANSYS Workbench взаимодействия регулируемого фундамента с грунтовым основанием и со стеной здания (балка) при равномерной нагрузке на фундамент и в случае подъема краевой части фундамента домкратом. Для этого были установлены параметры моделируемого фундамента, создана геометрия, определены свойства материалов, граничные условия и конечно-элементная модель, а также выполнен расчет напряжений и деформаций, возникающих в конструкции и грунтовом основании.

Максимальные напряжения и деформации при равномерной нагрузке на фундамент сосредоточены в области нагружения (балка) и, если говорить о грунтовом основании, под подошвой фундамента. В случае выравнивания крена фундамента домкратом максимальные напряжения и деформации в конструкции и в грунте основания сосредоточены в области, смежной с домкратом, поднимающим балку.

Полученные в данной работе результаты осадки модели согласуются с положениями механики грунтов о работе грунтового основания под фундаментами зданий и сооружений, а также результатами, представленными в работе Г.М. Скибина. При расчете в ANSYS Workbench грунт был задан как упругий материал и на начальном этапе нагружения различие между экспериментальными и расчетными осадками составило около 38 %. С увеличением нагрузки это различие возрастало и на последнем этапе нагружения различие между расчетной и экспериментальной осадкой составило 50 %. Это можно объяснить тем, что грунт не является абсолютно упругим телом и показывает упругие деформации только на начальной фазе нагружения. Различие между расчетными и экспериментальными значениями оса-

док возрастало с увеличением нагрузки на модель фундамента, так как с возрастанием нагрузки в грунте возникают остаточные деформации неупругого характера.

При дальнейших исследованиях возможности моделирования работы грунтового основания в программном комплексе ANSYS Workbench необходимо учесть неупругое поведение грунта при нагружении посредством использования модели Drucker-Prager или создания новых моделей, апробированных экспериментальным путем.

### Библиографический список

1. Зотов В.Д. Об особенностях расчета и конструирования регулируемых фундаментов // *Georgian engineering news*. – 2002. – № 1. – С. 66–71.
2. Зотов М.В. Регулируемые фундаменты мелкого заложения зданий и сооружений: учеб. пособие – Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. техн. ун-т, 2009. – 98 с.
3. Зотов В.Д. Устранение сверхнормативных кренов 162-квартирного крупнопанельного девятиэтажного жилого дома в г. Белово // *Стройинформ*. – 2001. – № 6. – С. 28–32.
4. Скибин М.Г. Взаимодействие регулируемых фундаментов с грунтовым основанием зданий при подъеме и выравнивании домкратами: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2014. – 214 с.
5. Brylla H., Niemiec T., Zotov V. Bericht uber die Horizontierung lines Hochhauses in Kotowice // *DMW Mazksceidewesen* 111. – 2004. – № 1. – P. 10–15.
6. Niemiec Tomasz, Gromysz Krzysztof. Metody prastowania budynkow przechylonych // *Budownictwo gornicze i tunelowe*. – 1995. – № 3.
7. Tomasz N., Zotov W. Piepwsza w Polsce zektyfikacja wysokiego budynku mieszkalnego z uzycien silownikow hudraulicznych // *Ochrona srodowiska na terenach gornicznych u progu integracji unia europejska. Konferencija naukowo-techniczna*. – Szczyrk, 2002. – P. 161–173.
8. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. Ansys в руках инженера: прак. руководство. – М.: УРСС, 2003. – 272 с.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
10. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide. ANSYS Release 11. – ANSYS Inc., 2008.

## References

1. Zotov V.D. Ob osobennostiakh rascheta i konstruirovaniia reguliruemyykh fundamentov [About features of calculation and design of adjustable foundations]. *Georgian engineering news*, 2002, no. 1, pp. 66-71.
2. Zotov M.V. Reguliruemye fundamenty melkogo zalozheniia zdanii i sooruzhenii [Adjustable shallow foundations of buildings and structures]. Novocherkassk: Iuzhno-Rossiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009. 98 p.
3. Zotov V.D. Ustranenie sverkhnormativnykh krenov 162-kvartirnogo krupnopanel'nogo deviatietazhnogo zhilogo doma v g. Belovo [Eliminating excess heeling 162-apartment large-panel nine-storey residential building in Belovo]. *Stroiinform*, 2001, no. 6, pp. 28-32.
4. Skibin M.G. Vzaimodeistvie reguliruemyykh fundamentov s gruntovym osnovaniem zdanii pri pod"eme i vyravnivanii domkratami [The adjustable interaction of foundations with soil bases of buildings when lifting and aligning jacks]. Novocherkassk, 2014. 214 p.
5. Brylla H., Niemiec T., Zotov V. Bericht uber die Horizontierung lines Hochhauses in Katowice. *DMW Mazsceidewesen 111*, 2004, no. 1, pp. 10-15.
6. Tomasz N., Krzysztof G. Metody prastowania budynkow przechylonych. *Budownictwo gornicze i tunelowe*, 1995, no. 3.
7. Tomasz N., Zotov W. Piepwsza w Polsce zektyfikacja wysokiego budynku mieszkalnego z uzycien silownikow hydraulicznych. *Ochrona srodowiska na terenach gornicznych u progu integracji unia europejska. Konferencija naukowo-techniczna*. Szczyrk, 2002, pp. 161-173.
8. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. Ansys v rukakh inzhenera [Ansys in engineer's hands]. Moscow: URSS, 2003. 272 p.
9. Fadeev A.B. Metod konechnykh elementov v geomekhanike [Finite element method in geomechanics]. Moscow: Nedra, 1987. 221 p.
10. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide. ANSYS Release 11. ANSYS Inc., 2008.

Получено 17.09.2015

### **Об авторах**

**Пономарев Андрей Будимирович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное производство и геотехника» Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: spstf@pstu.ru).

**Сычкина Евгения Николаевна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: aspirant123@mail.ru).

### **About the authors**

**Andrei B. Ponomarev** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: spstf@pstu.ru).

**Evgeniia N. Sychkina** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: aspirant123@mail.ru).