

УДК 624.131.7:624.048

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ОСЕДАНИИ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ**

**MODELING OF GEOMECHANICAL PROCESSES
WITH UNEVEN SUBSIDENCE FOUNDATIONS OF STRUCTURES**

Соколов Михаил Валерьевич,
аспирант, e-mail: ea-sokolov42@mail.ru

Sokolov Mikhail V., graduate student

Простов Сергей Михайлович,
доктор. техн. наук, профессор, e-mail: psm.kem@mail.ru

Prostov Sergey M., Dr. Sc., Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennyyaya, Kemerovo, 650000, Russia

Аннотация. Представлены результаты прогнозирования развития неравномерных осадок зданий по данным компьютерного моделирования грунтовых оснований различного геологического строения с применением программного комплекса «Аlterra». Рассмотрены случаи нагружения однородного и неоднородного слоистого массива двумя штампами при различном соотношении нагрузок на них. Установлены закономерности развития неравномерных вертикальных перемещений и изменений напряженно-деформированного состояния грунтового основания. Произведено сопоставление полученных расчетных данных с результатами обследования и мониторинга реального объекта, расхождение расчетных и экспериментальных значений деформаций составило 17%.

Annotation. The study presents the results of forecasting the development of non-uniform settlement of building foundations based on the computer modeling of soil bases with different geological structure with the use of Alterra software. The cases of loading uniform and nonuniform layered massif with two stamps at various ratios of load on them are reviewed. The regularities of irregular vertical movements and changes in the stress-strain state of the soil foundation have been established. The calculated data were compared with the results of the survey and monitoring of the real object, the difference between calculated and experimental values of the strain was 17%.

Ключевые слова: неравномерные осадки, фундамент, грунт, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние

Keywords: non-uniform settlement, foundation, soil foundations, computer modeling, stress-strain state

Проблема предотвращения неравномерных вертикальных перемещений (осадок) фундаментов весьма актуальна в настоящее время как в строительной, так и в горнодобывающей отраслях. Причинами возникновения неравномерных осадок являются: недостаточная точность расчетов при проектировании фундаментов крупных зданий и сооружений с применением типовых конструкций [1, 2]; особенности геологического строения оснований (вид, состояние и залегание грунтов) [3], климатические условия [4] и техногенный фактор («перегруз» здания, замачивание грунтов основания, отсутствие планового капитального ремонта) [5]. Для предотвращения неравномерных осадок производится мониторинг вертикальных перемещений, в большинстве случаев охватывающий период в 5 и более лет. Поэтому актуальной проблемой современного строительства является возможность прогнозирования деформационных процес-

сов в грунтовых основаниях на основе их численного моделирования [6] при различных техногенных воздействиях [7], что обеспечит сокращение сроков мониторинга. Решение поставленной задачи достижимо при применении современных программных комплексов для геомеханических расчетов [8, 9]. Геомеханические компьютерные модели оснований, реализованные методом конечных элементов, позволяют рассмотреть систему «фундамент-грунт» на разных стадиях строительства и эксплуатации сооружения [10, 11], подробно изучить процессы вертикальных перемещений во времени и формирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива [12].

Проведенные исследования по компьютерному прогнозированию неравномерных осадок заключались в поэтапном изучении грунтовых массивов различного строения и применении полученных данных на реальном объекте. Моделирование не-

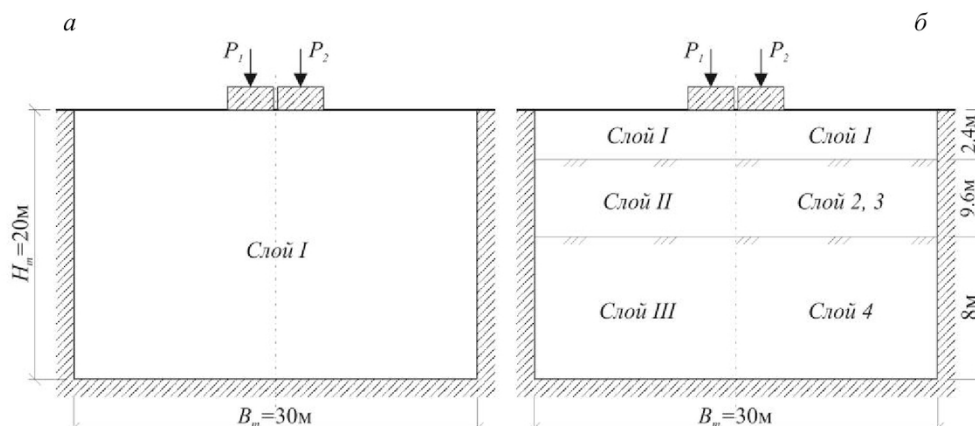


Рис. 1. Расчетная модель нагружения однородного (а) и неоднородного (б) массива

Таблица 1. Физико-механические свойства грунтов основания

Неоднородное основание						Реальный объект					
Наименование слоя	Физико-механические свойства					Наименование слоя	Физико-механические свойства				
	φ , град.	C , кПа	E , МПа	ρ , кг/м ³	ν , д.е.		φ , град.	C , кПа	E , МПа	ρ , кг/м ³	ν , д.е.
Слой I	18	5	5	1920	0,39	Слой 1	18	10	5	1950	0,36
Слой II	18	20	14	1920	0,29	Слой 2	19	27,5	15,4	1910	0,28
Слой III	18	15	8	1850	0,29	Слой 3	17	14	11,4	1930	0,30
						Слой 4	18	14,3	7,4	1850	0,28

равномерных осадок производилась с применением программного комплекса для геотехнических расчетов «Alterra», предоставленного в бесплатное некоммерческое пользование компанией ООО «ИнжПроектСтрой».

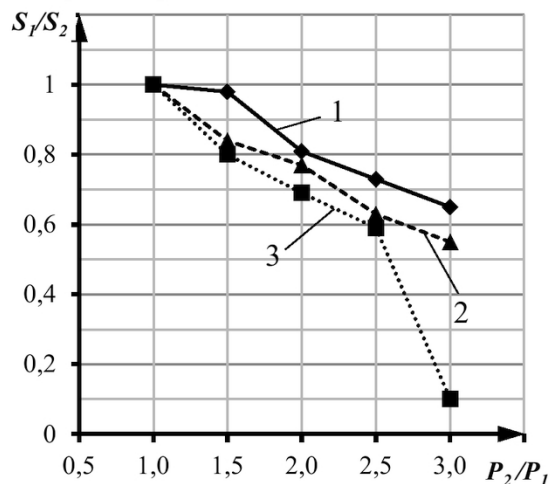


Рис. 2. Зависимости отношения вертикальных смещений (осадок) под штампами S_1/S_2 от отношения нагрузок на штампы P_2/P_1 при P_1 , равном:
1 – $P_1 = 40$ кН; 2 – $P_1 = 60$ кН; 3 – $P_1 = 80$ кН

Целью моделирования являлось установление взаимосвязей между осадками и факторами, влияющими на их возникновение; изучение напряженно-деформированного состояния грунтового основания однородного и неоднородного строения при неравномерной вертикальной нагрузке; разработка

рекомендаций по закреплению оснований для предотвращения неравномерных осадок. Основные методические положения построения расчетных моделей изложены в работах авторов [13-15]. При анализе были учтены результаты моделирования для различных условий, представленные в работах [15-21], где отмечены характерные особенности изменения состояния массива.

На первичном этапе исследований была рассмотрена модель нагружения двумя близко расположенными штампами однородного грунтового массива со следующими механическими параметрами: модуль деформации $E = 5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,36$; угол внутреннего трения $\varphi = 18^\circ$; сцепление $C = 5$ кПа, плотность $\rho = 1750$ кг/м³ (рис. 1а). Параметры штампов: модуль деформации $E_f = 2000$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu_f = 0,15$, плотность $\rho_f = 2500$ кг/м³, ширина $b_f = 1$ м; высота $h_f = 0,5$ м. Неравномерность нагружения основания достигалась заданием различных отношений нагрузок на штампы P_2/P_1 аналогично подходу, изложенному в работе [20]. С целью оценки влияния структурных неоднородностей основания была сформирована оптимизированная в соответствии с принципами, изложенными в [21], база моделей при $P_1 = 60$ кН, отношениях $P_2/P_1 = 1,0; 1,5; 2,0$ и трехслойном строении основания (рис. 1б), сложенного грунтами с различными физико-механическими свойствами (табл. 1) соответствующими свойствам и строению реального основания объекта, который рассмотрен ниже.

В результате расчетов установлена близкая к

линейной зависимости отношения вертикальных смещений (осадок) S_1/S_2 под соответствующими штампами от отношения нагрузок P_2/P_1 (рис. 2). Нарушение линейной зависимости при $P_1 = 80 \text{ кН}$ и $P_2/P_1 = 3,0$ обусловлено превышением предела прочности грунта и развитием значительных пластических деформаций.

Вертикальные напряжения под штампами σ_{z1} и σ_{z2} монотонно уменьшаются с увеличением глубины модели z , при этом их значения многократно выше под штампом № 2 (рис. 3а). При анализе горизонтальных напряжений σ_{x1} и σ_{x2} установлено, что при отношении $P_2/P_1 = 1$ происходит уменьшение напряжений по глубине, однако при $P_2/P_1 = 1,5 \dots 3$ отмечено образование зоны растягивающих напряжений с глубины $z = 3 \text{ м}$, причем концентрация напряжений и ширина этой зоны зависят от нагрузки P_1 и отношения P_2/P_1 . При высоких значениях P_2/P_1 под более нагруженным штампом образуются зона максимальных сжимающих напряжений на интервале $z = 3 \text{ м}$ (рис. 3б).

Детальный анализ показал, что влияние близко установленных штампов при наличии одного, более нагруженного, на напряженное состояние массива заключается в следующем:

- повышение абсолютных значений напряжений σ_{z1} и σ_{z2} без изменения характера их распределения с увеличением отношений P_2/P_1 ;
- зависимость пиковых значений σ_x в зонах растягивающих напряжений под обоими штампами от отношения P_2/P_1 ;
- образование зоны концентрации сжимающих горизонтальных напряжений σ_x под менее нагруженным штампом с увеличением нагрузки и отношения P_2/P_1 .

Зоны растягивающих горизонтальных напряжений, наиболее опасных с точки зрения нарушения устойчивости основания, распределены по глубине модели на интервале $z = 3 - 8 \text{ м}$. Для количественной оценки формирующейся зоны опорного давления введем следующие интегральные характеристики:

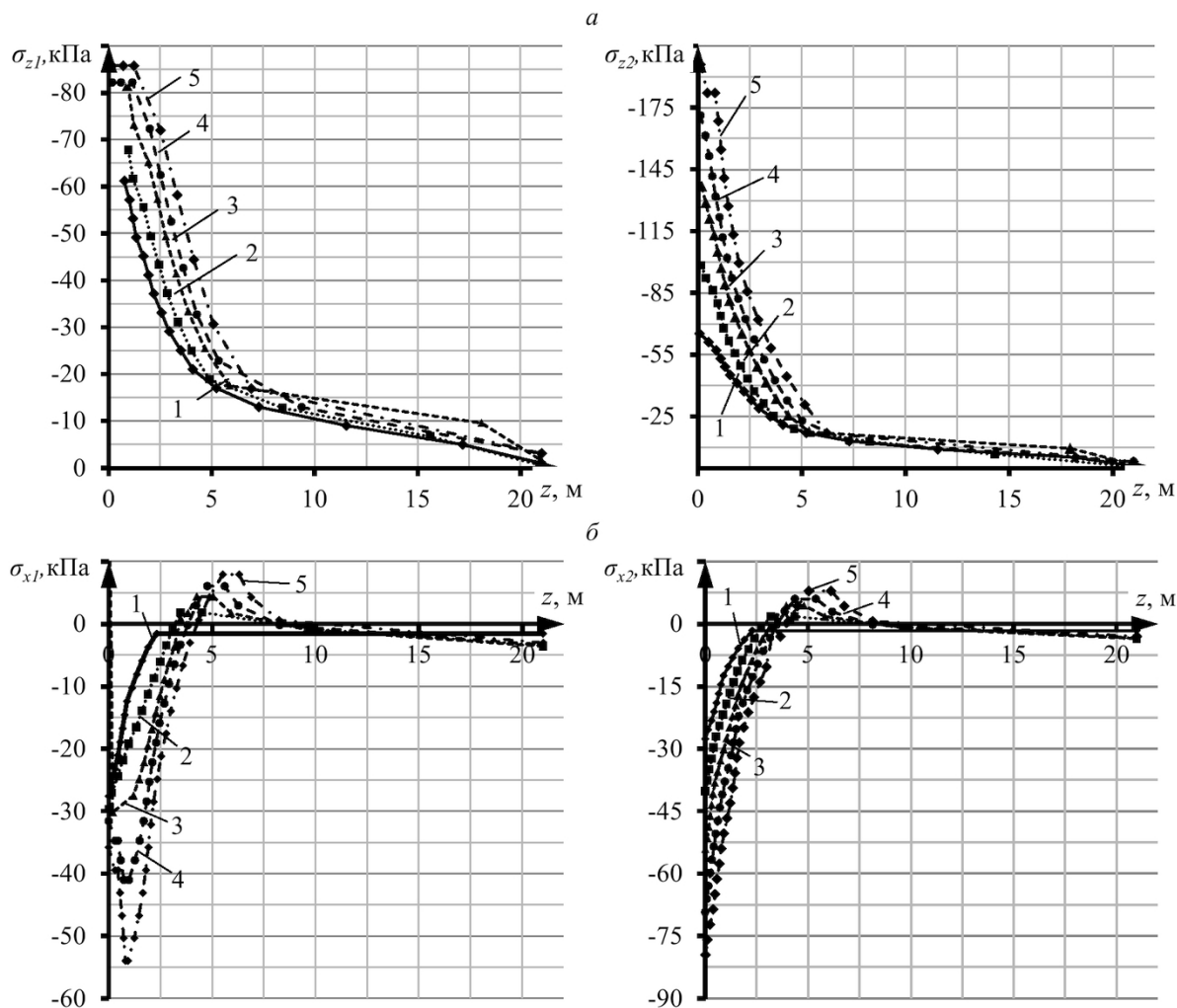


Рис. 3. Зависимость вертикальных σ_z (а) и горизонтальных σ_x (б) напряжений под штампами от глубины массива z при нагрузках $P_1 = 60 \text{ кН}$ и отношениях нагрузок на штампы P_2/P_1 , равных:

1 – $P_2/P_1 = 1$; 2 – $P_2/P_1 = 1,5$; 3 – $P_2/P_1 = 2$; 4 – $P_2/P_1 = 2,5$; 5 – $P_2/P_1 = 3$

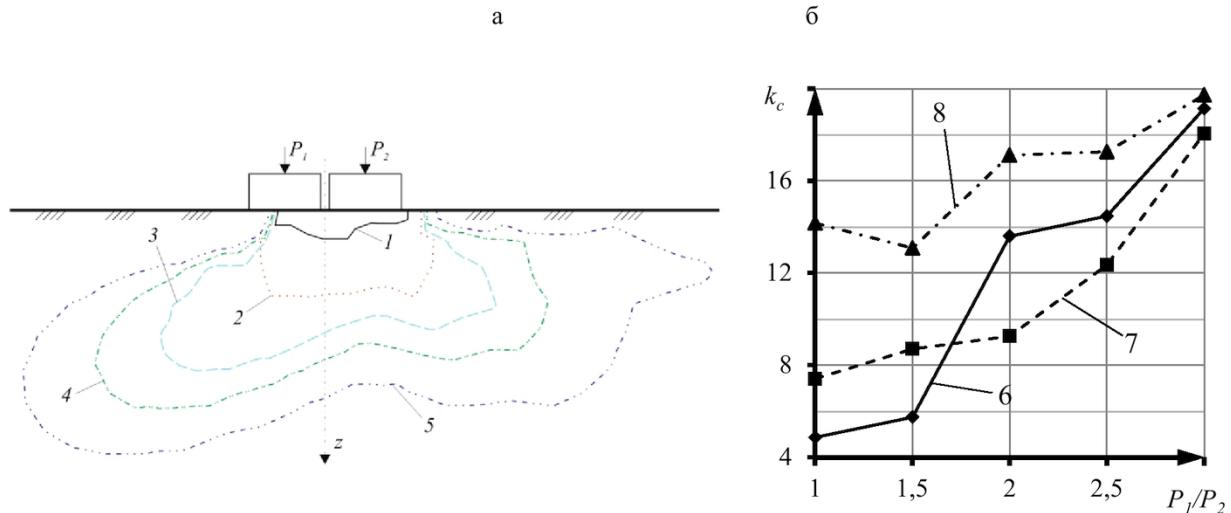


Рис. 4. Форма образования зон концентрации растягивающих напряжений (а) и зависимость коэффициента концентрации k_c от отношения нагрузок на штампы P_2/P_1 (б) и величины P_1 :
 1 – $P_2/P_1 = 1$; 2 – $P_2/P_1 = 1,5$; 3 – $P_2/P_1 = 2$; 4 – $P_2/P_1 = 2,5$; 5 – $P_2/P_1 = 3$;
 6 – $P_1 = 40$ кН; 7 – $P_1 = 60$ кН; 8 – $P_1 = 80$ кН

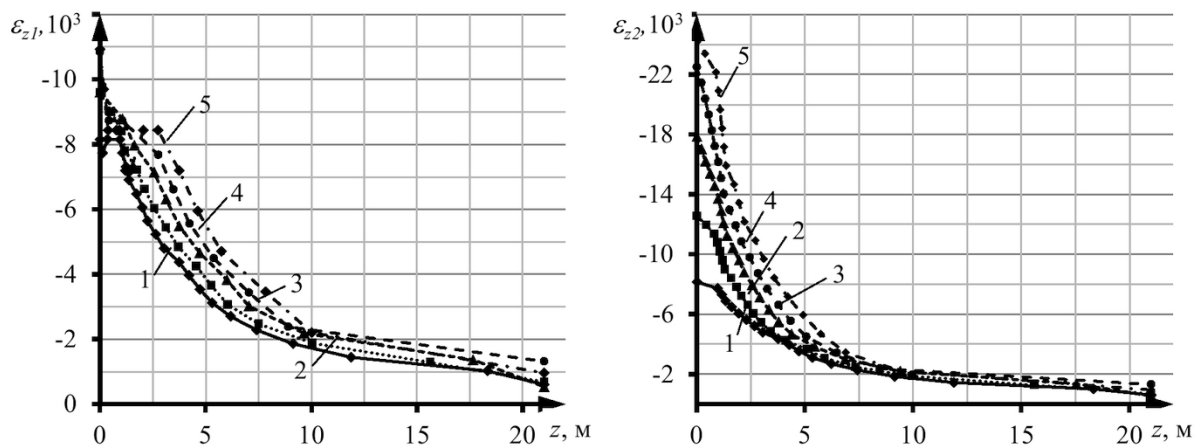


Рис. 5. Зависимости вертикальных деформаций ε_{z1} и ε_{z2} массива от глубины z массива при нагрузках $P_1 = 80$ кН и отношениях нагрузок на штампы P_2/P_1 равных:
 1 – $P_2/P_1 = 1$; 2 – $P_2/P_1 = 1,5$; 3 – $P_2/P_1 = 2$; 4 – $P_2/P_1 = 2,5$; 5 – $P_2/P_1 = 3$

- расстояние до точки максимальных напряжений;
- коэффициент концентрации k_c :

$$k_c = \frac{\sigma_{xi,max}}{\sigma_{xi,lost}},$$

где $\sigma_{xi,max}$ – пиковые максимальные напряжения в зоне концентрации напряжений, кПа; $\sigma_{xi,lost}$ – условные напряжения в нетронутой части массива, кПа.

Характер развития зоны максимальных растягивающих напряжений и зависимость коэффициента k_c от отношения P_2/P_1 приведены на рис. 4.

Характер развития вертикальных деформаций ε_z в значительной мере повторяет характер графиков $\sigma_z(z)$, приведенных на рис. 3а: происходит

уменьшение деформаций ε_{z1} и ε_{z2} по глубине модели z монотонно, без образования аномальных зон деформаций. В диапазоне $z = 0,5 \dots 2,0$ м отмечено хаотичное изменение ε_{z1} , как следствие влияния близко стоящих штампов (рис. 5).

Значительно более сложный характер зафиксирован в развитии горизонтальных деформаций ε_x . Из приведенных зависимостей $\varepsilon_{x1}(z)$ и $\varepsilon_{x2}(z)$ следует, что при нагружении происходит поперечное смещение грунта в сторону от осей симметрии штампов в двух противоположных направлениях (рис. 6).

При анализе зависимостей $\varepsilon_{x1}(z)$ и $\varepsilon_{x2}(z)$ при разных отношениях P_2/P_1 выявлена зона максимальных горизонтальных деформаций, расположенная в диапазоне $z = 0,5 \dots 10$ м. Под влиянием более

нагруженного штампа, глубина расположения максимальных значений ε_x увеличивается, а их величина монотонно возрастает. С увеличением отноше-

ния P_2/P_1 асимметрия распределения горизонтальных деформаций становится более выраженной (рис. 7).

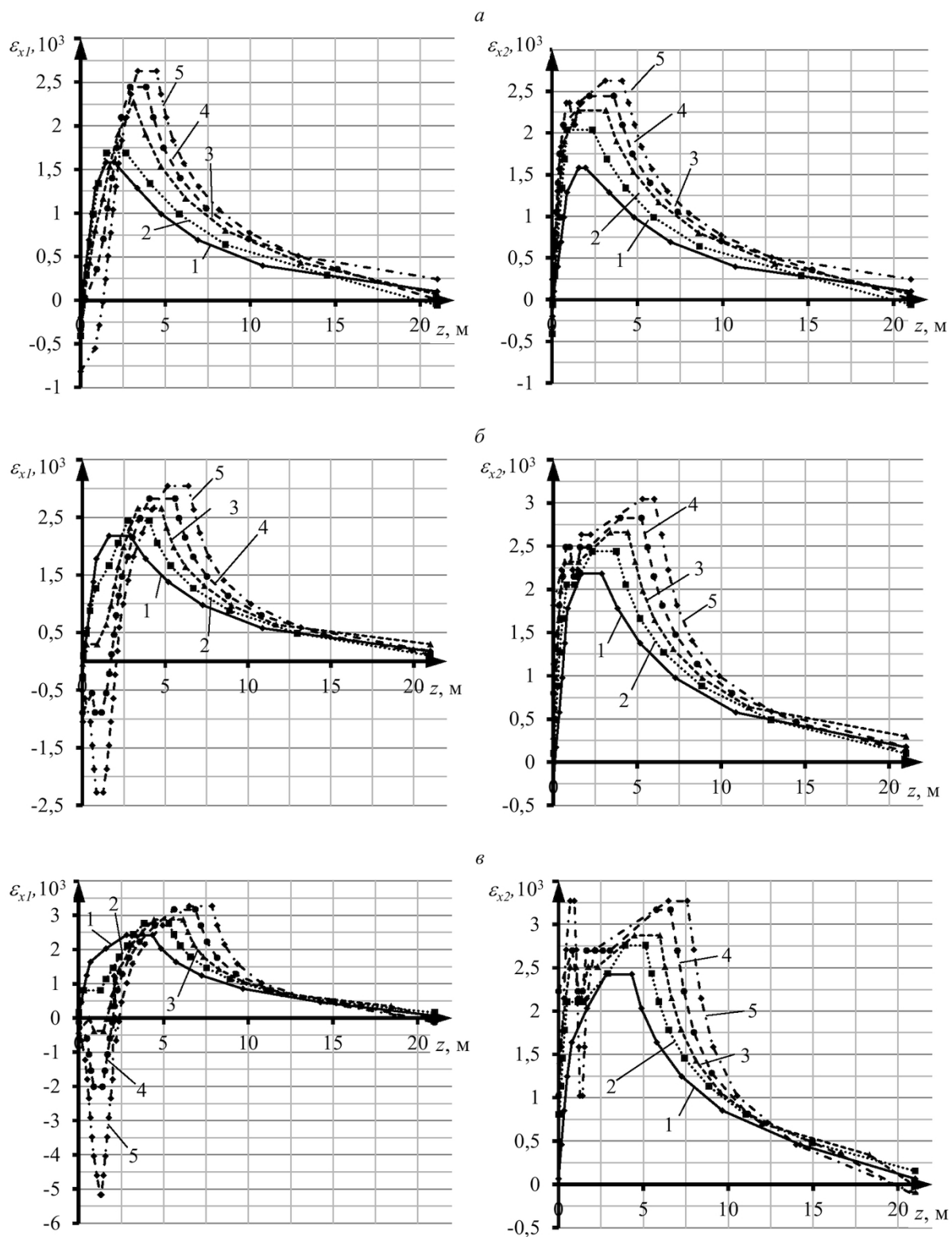


Рис. 6. Зависимости горизонтальных упругих деформаций массива ε_{x1} и ε_{x2} от глубины массива z при нагрузках $P_1 = 40$ кН (а), $P_1 = 60$ кН (б), $P_1 = 80$ кН (в) и отношениях нагрузок на штамп P_2/P_1 равных:
1 – $P_2/P_1 = 1$; 2 – $P_2/P_1 = 1,5$; 3 – $P_2/P_1 = 2$; 4 – $P_2/P_1 = 2,5$; 5 – $P_2/P_1 = 3$

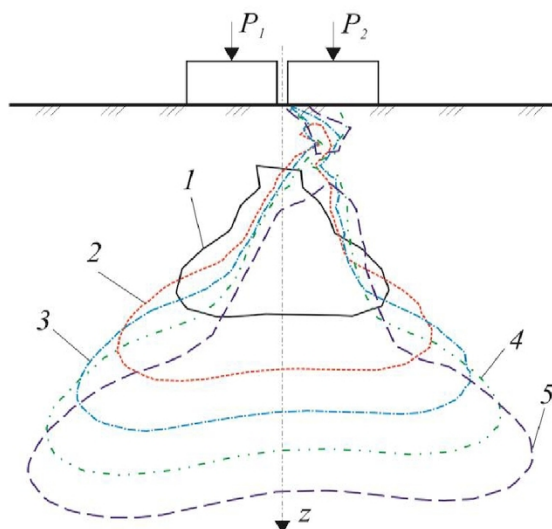
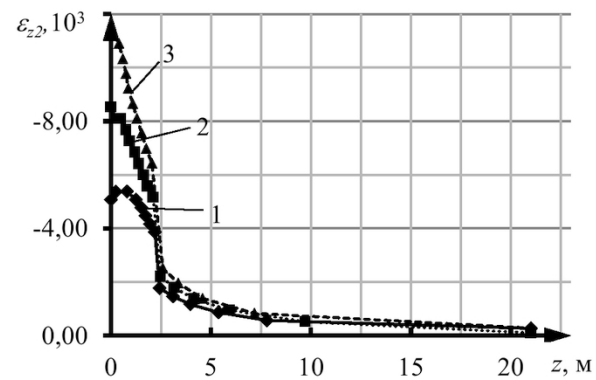
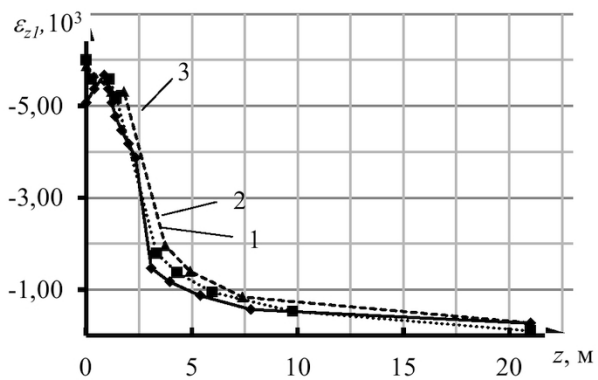
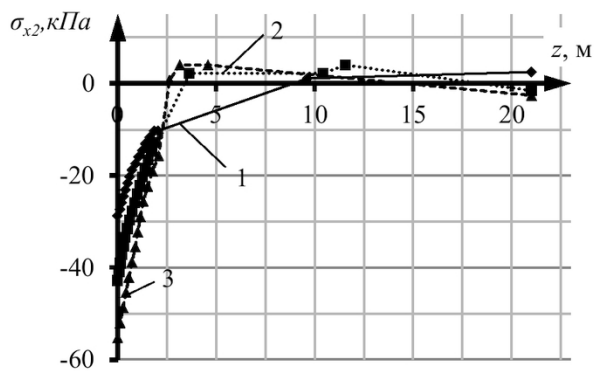
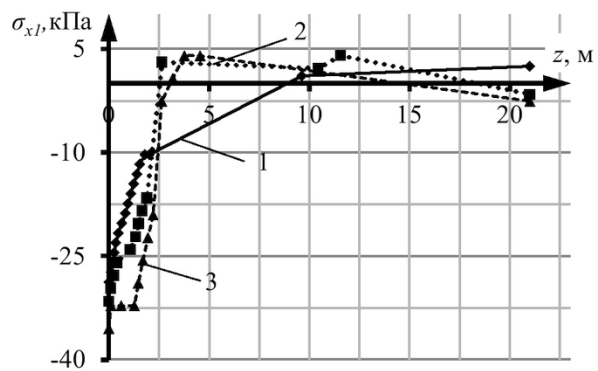
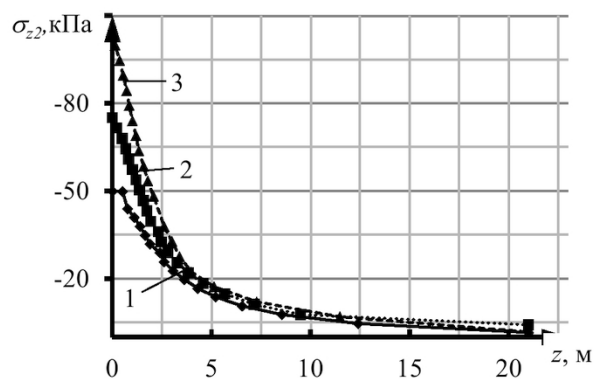
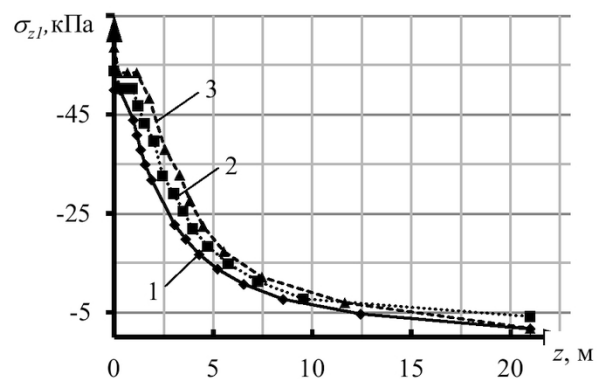


Рис. 7. Распределение зон максимальных горизонтальных деформаций при P_2/P_1 равном:
 1 – $P_2/P_1 = 1$; 2 – $P_2/P_1 = 1,5$; 3 – $P_2/P_1 = 2$; 4 – $P_2/P_1 = 2,5$; 5 – $P_2/P_1 = 3$



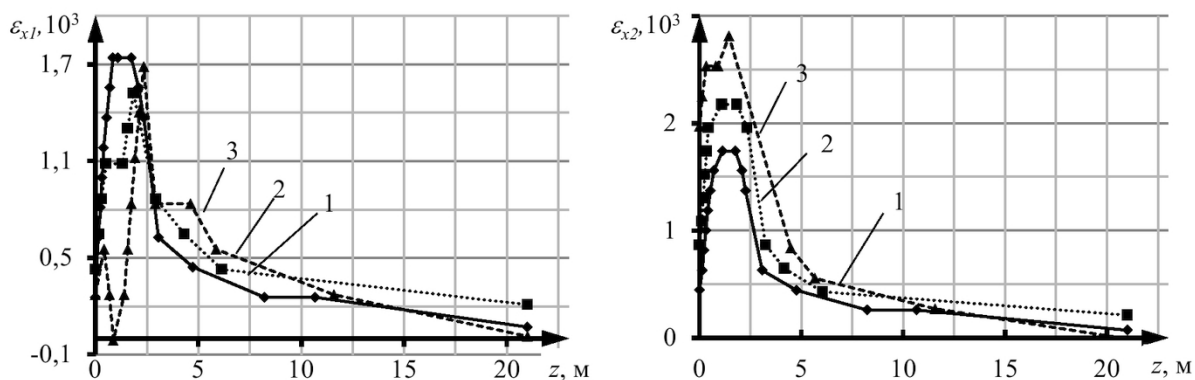


Рис. 8. Зависимости вертикальных σ_z и горизонтальных σ_x напряжений, вертикальных ε_z и горизонтальных ε_x деформаций под штампами от глубины массива z при нагрузке $P_1 = 60 \text{ кН}$ и отношениях нагрузок на штампы P_2/P_1 равных: 1 – $P_2/P_1 = 1$; 2 – $P_2/P_1 = 1,5$; 3 – $P_2/P_1 = 2$

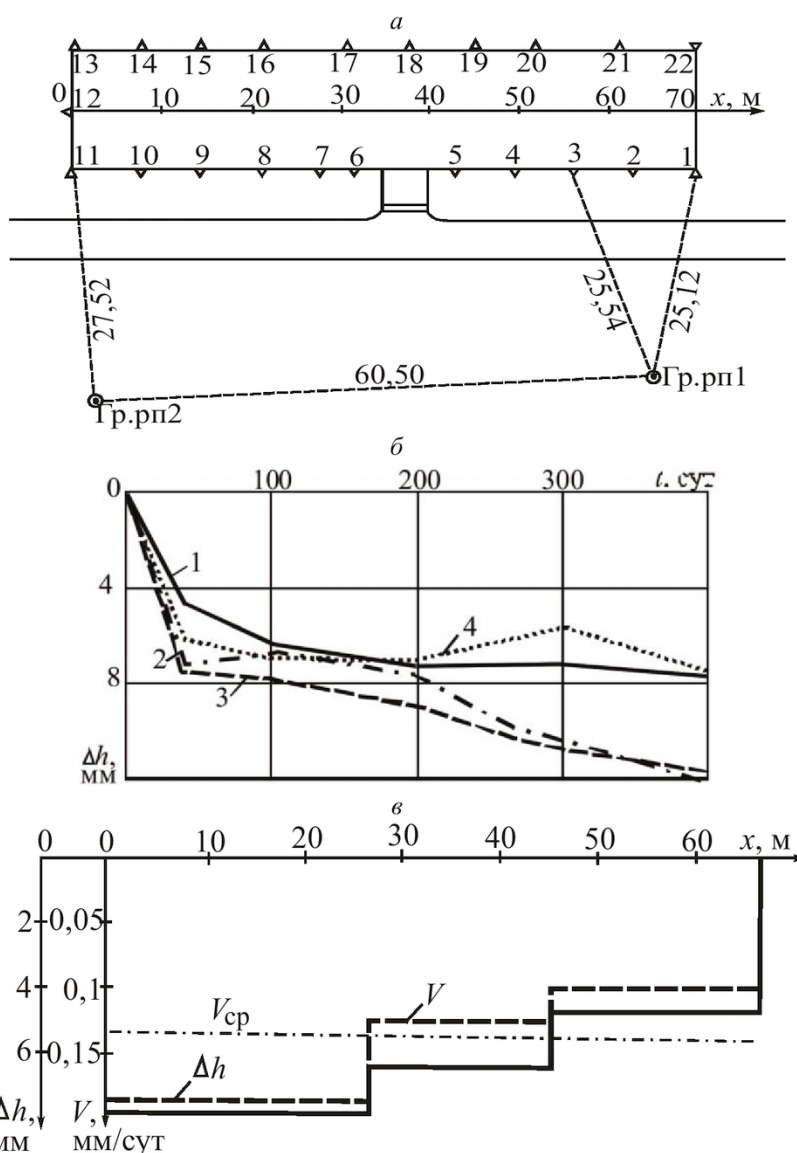


Рис. 9. Схема объекта (а); графики изменения во времени вертикальных деформаций Δh (б); графики изменения средних значений деформации Δh и скоростей V деформаций основания по продольной оси x сооружения (в): 1 – репер № 2 ($x = 62 \text{ м}$); 2 – № 5 (43 м); 3 – № 11 (0 м); 4 – № 17 (31 м); Δ – контурные реперы; $\odot$ – опорные грунтовые реперы; Ox – продольная ось

Основные результаты анализа баз данных результатов моделирования неравномерно нагруженного неоднородного основания (см. схему на рис. 1б) представлены на рис. 8.

Особенность напряженно-деформированного состояния слоистого грунтового основания под штампами состоит в том, что максимальные горизонтальные деформации локализуются на границе первого слабого слоя ($z = 2,4\text{м}$), этой отметке соответствует изгиб графиков вертикальных деформаций ε_z и появление растягивающих горизонтальных напряжений σ_x .

Влияние неоднородного строения грунтового основания на распределение $\varepsilon_x(z)$ выражается в концентрации деформаций в границах слабого (верхнего) слоя и последующем их монотонном уменьшении без образования характерных изгибов. Изменение характера распределения $\varepsilon_{xI}(z)$ и снижение растягивающих деформаций ε_{xI} в границах первого слоя является следствием влияния соседнего штампа.

С целью проверки адекватности исследуемой модели было проведено сопоставление расчетных данных с результатами производственных экспериментальных исследований на объекте ООО "НООЦЕНТР" (г. Кемерово, пос. Суховский). Экспериментальный участок представлял собой пятиэтажное здание, находившееся в аварийном состоянии ввиду недопустимых деформаций конструкции и образования трещин.

Для инструментальных наблюдений на внешних стенах на уровне цокольного этажа объекта были установлены 23 контурных репера (деформационные марки) и 2 опорных грунтовых репера на глубину 8 м (рис. 9а). Мониторинг за изменениями отметок проводился в течение 400 суток (рис. 9б).

Среднее значение скорости осадок за период наблюдений составило $V_{cp} = 0,132\text{ мм/сут.}$ Неравномерность осадок вдоль продольной оси x сооружения на начальной стадии наблюдений достигала 60 %: наибольшие деформации основания наблюдались на интервале $x = 0 - 25\text{ м}$, наименьшие – на интервале $x = 43 - 70\text{ м}$ (рис. 9в). При про-

гнозировании деформаций объекта было смоделировано основание здания вдоль продольной оси. С конструктивной точки зрения здание сборного типа с выполненными из кирпича несущими и самонесущими стенами и балочным железобетонным перекрытием. Стены подвала выполнены из фундаментных блоков, имеющие большое количество трещин и сколов. Наличие трещин на фасаде здания, подвальной части и в балках перекрытия свидетельствует о том, что был допущен перегруз здания, замачивание грунтов основания. Таким образом, при моделировании объекта учитывались как инженерно-геологические условия, так и возможное превышение нагрузки на фундамент здания и техногенное воздействие.

Фундамент объекта имитировался 23-я нагруженными штампами (рис. 10). Для этого при формировании модели подвальной части были предусмотрены швы (поз. 2, на рис. 10) шириной 0,05 м, имеющие пониженные деформационные и прочностные свойства. Швы моделируют присутствующие трещины и изломы фундаментных блоков подвальной части.

В результате моделирования были получены прогнозируемые значения вертикальных смещений вдоль оси здания при особых инженерно-геологических условиях: превышении заданной нагрузки и локальном снижении физико-механических свойств грунтов основания (рис. 11).

При сопоставлении расчетных и измеренных значений деформаций по интервалам получено расхождение в диапазоне 5 – 25%, при среднем значении 17% (таблица 2).

Основные результаты проведенных исследований состоят в следующем:

- для однородного массива под разнонагруженными штампами установлено монотонное уменьшение с глубиной вертикальных напряжений и деформаций, формирование зон максимальных горизонтальных деформаций, при этом получена близкая к линейной зависимость отношения оседаний от отношения нагрузок;

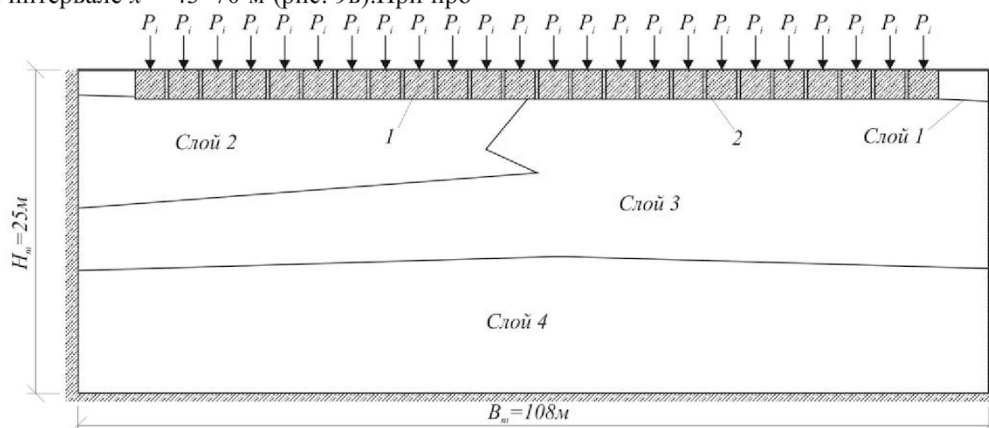


Рис. 10. Расчетная модель реального объекта:
1 – подвальная часть здания; 2 – шов-трещина

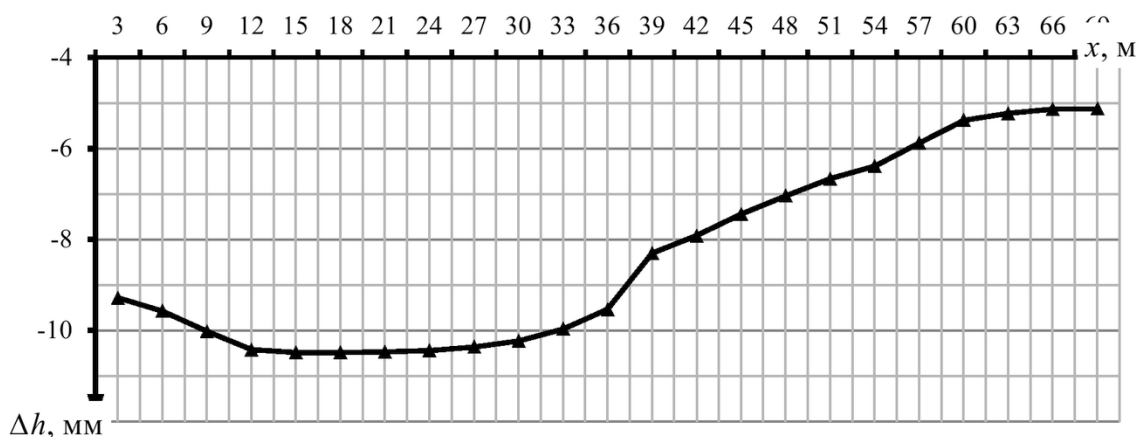


Рис. 11. График изменения прогнозируемых средних значений деформации Δh основания по продольной оси x сооружения

Таблица 2. Сопоставление расчетных и замеренных значений деформаций

Интервал, м	Расчетное значение, мм	Измеренное значение, мм	Расхождение, %
0 - 10	9,2	9,7	5
10 - 20	10,2	9,5	7
20 - 30	10,1	7,8	23
30 - 40	9,8	7,4	25
40 - 50	7,2	5,5	24
50 - 60	6,1	5,5	10
60 - 71	5,5	6,8	24
Среднее значение:			17

- в неоднородном слоистом массиве максимум горизонтальных деформаций и зона растягивающих напряжений располагаются в границах первого ослабленного слоя.

Проведенные научные исследования демонстрируют, что с применением компьютерного мо-

делирования возможно с достаточной точностью прогнозировать развитие неравномерных осадок зданий и сооружений, при этом значительно снижаются необходимые объемы маркшейдерских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ухов, С. Б. Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. для вузов [Текст] / С. Б. Ухов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 566 с.
2. Мангушев, Р. А. Основания и фундаменты: учебник для бакалавров строительства / Р. А. Мангушев, В. Д. Карлов, И. И. Сахаров, А. И. Осокин. – М.: Изд-во АСВ; СПб: СПбГАСУ, 2011. – 394 с.
3. Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю. Влияние неоднородности грунтов на их механические свойства // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2013. – № 6. – С.223-231.
4. Озган Э., Серин С., Эртюрк С., Вурал И. Влияние циклов замораживания и оттаивания на консолидационную осадку грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 5. – С. 247-253.
5. Кушнер, С. Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений / Запорожье: Изд-во ООО «ИПО Запорожье», 2008. – 496 с.
6. Ермакова И. А., Бахаева С. П., Дягилева А. В. Численное моделирование геомеханического состояния отвала на водонасыщенном основании // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 4. – С. 11–12.
7. Безволев, С. Г. Общая методика расчета напряженно-деформированного состояния массива грунта с упрочняющими или ослабляющими элементами // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008. – № 3. – С. 77-86.

8. Протосеня А. Г., Карасев М. А. Разработка численной модели прогноза деформаций грунтового массива при строительстве полуглубленного сооружения в программном комплексе ABAQUS // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 2. – С. 53-59.
9. Пономарев А. Б., Сычкина Е.Н. Прогноз осадки свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах (на примере Пермского региона) // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 3
10. Берлинов М. Б., Ягупов Б. А. Примеры расчета оснований и фундаментов. – М., 2011.
11. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.
12. Курленя, М. В. Техногенные геомеханические поля напряжений / М. В. Курленя, В. М. Серяков, А. А. Еременко. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
13. Покатилов А. В., Простов С. М., Иванов С. А. Компьютерное моделирование геомеханических процессов при электрохимическом закреплении грунтовых оснований сооружений // Вестн. КузГТУ. – 2013. – № 4. – с. 61-65.
14. Простов, С.М. Анализ напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований на основе интегральных критериев / С.М. Простов, М.В. Соколов // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 6. – С.52-61.
15. Sergei M. Prostop, Mikhail V. Sokolov and Andrey V. Pokatilov. The Influence Of Injecting Strengthening For Uniform Subgrade Soils Of Strip Foundations On Their Stress-Strain State // International Journal of Applied Engineering Research. – Volume 10. Number 25. 2015. pp. 45297-45306. <http://www.ripublication.com/Volume/ijaerv10n24.htm>.
16. Chung W, Experimental and numerical study of soil-reinforcement effects on the low-strain stiffness and bearing capacity of shallow foundations // Geotech. Geol. Eng. – 2007. – № 25. – 265-281.
17. Пономарев А. Б., Калошина С. В. Оценка влияния возводимых плитных фундаментов на осадку зданий в условиях плотной застройки // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2013. – № 5. – С. 194-199.
18. Лучкин М. А., Улицкий В. М. Исследование свойств глинистых грунтов для геомеханического моделирования оснований // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006. – № 6. – С. 197-200.
19. Де-Луан Фэн, Ин-Гуан Фан. Теоретическое и экспериментальное исследование разномасштабных механических свойств грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 4. – С. 189-197.
20. Пшеничкика В. А., Политов С. И., Чирков А. А. Экспериментально-теоретическое обоснование предельной нагрузки с заданным уровнем риска при моделировании работы системы «основание - фундамент - надземная часть строения» // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 6. – С. 311-316.
21. Зимин В.М., Бондарь Л.Я. Оптимизация исходных данных для расчета оснований и фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 1. – С. 23-26.

REFERENCES

1. Ukhov, S. B. Mechanics of soil, bases and foundation: studies for higher education institutions. The 2nd prod., reslave and additional. Moscow: The higher school, 2002. 566 p.
2. Mangushev, R. A. Bases and foundation: the textbook for bachelors of construction. R. A. Mangushev, V. D. Karlov, I. I. Sakharov, A. I. Osokin. Moscow: ABS publishing house; SPB: SPBGASU, 2011. 394 p.
3. Z. G. Ter-Martirosyan, A. Yu. Mirnyi. Effect of Nonhomogeneity of Soils on their Mechanical Properties. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Volume 50. Issue 6. January 2014. pp. 223-231.
4. E. Özgün, S. Serin, S. Ertürk, I. Vural. Effects of Freezing and Thawing on the Consolidation Settlement of Soils. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Volume 52. Issue 5. November 2015. pp. 247-253.
5. Kouchner, S. G. Calculation of deformations of foundations of buildings and constructions. Zaporizhia: LLC IPO Zaporozhye publishing house. 2008. 496 p.
6. Ermakova I. A., Bakhayeva S. P., Dyagilev A. V. Numerical modeling of a geomechanical condition of a dump on the water-saturated basis. [Numerical modeling of geomechanical condition of the blade on the basis of water-saturated]. Vestnik of Kuz. state tech. univ. 2014. No. 4. pp. 11-12.
7. S. G. Bezvolev. General procedure for analysis of the stress-strain state of a soil mass with strengthening or weakening elements. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Volume 45. Issue 3. May 2008. pp. 77-86.
8. A. G. Protosenya, M. A. Karasev. Development of Numerical Model for Deformation Prediction of Soil Mass During Construction of a Moderately Deep Structure in the ABAQUS Software Package. Soil Mechanics and Foundation Engineering. Volume 51. Issue 2. May 2014. pp. 53-59.

9. A. B. Ponomarev, E. N. Sychkina. Settlement Prediction of Foundations on Argillite-Like Soils (as Exemplified by the Perm' Region). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Volume 51. Issue 3. July 2014. pp. 111-116.
10. Berlinov M. B., Yagupov B. A. Examples of calculation of the bases and bases. Moscow. 2011.
11. Gorbunov-Posadov M. I., Malikov T. A., Culms V. I. Calculation of designs on the elastic basis. Moscow: Stroyizdat. 1984. 679 p.
12. Kurlenya, M. V. Technogenic geomechanical fields of tension. M. V. Kurlenya, V. M. Seryakov, A. A. Eremenko. Novosibirsk: Science. 2005. 264 p.
13. Pokatilov A. V., Prostov S. M., Ivanov S. A. Computer modeling of geomechanical processes at electrochemical fixing of the soil bases of constructions. [Computer modeling of geomechanical processes in the electrochemical induration of soil bases of constructions]. *Vestnik of Kuz. state tec. univ.* 2013. No. 4. pp. 61-65.
14. Prostov, S. M., Sokolov M. V. The analysis of the intense deformed condition of the strengthened soil bases on the basis of integrated criteria. [Analysis of stress-strain state of soil bases fixed on the basis of integral criteria]. *Vestnik of Kuz. state tec. univ.* 2015. No. 6. pp. 52-61.
15. Sergei M. Prostov, Mikhail V. Sokolov and Andrey V. Pokatilov. The Influence Of Injecting Strengthening For Uniform Subgrade Soils Of Strip Foundations On Their Stress-Strain State. *International Journal of Applied Engineering Research*. Volume 10. Number 25. 2015. pp. 45297-45306. <http://www.ripublication.com/Volume/ijaerv10n24.htm>.
16. Chung W. Experimental and numerical study of soil-reinforcement effects on the low-strain stiffness and bearing capacity of shallow foundations. *Geotech. Geol. Eng.* 2007. N25. pp. 265-281.
17. A. B. Ponomarev, S. V. Kaloshina. Influence of Slab Foundations Constructed in Dense Urban Settings on Settlement of Existing Buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Volume 50. Issue 5. November 2013. pp. 194-199.
18. V. M. Ulitskii, M. A. Luchkin. Investigation of properties of clayey soils for geotechnical modeling of foundation beds. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Volume 43. Issue 6. November 2006. pp. 197-200.
19. De-luan Feng, Ying-guang. Fang Theoretical and Experimental Study on Multi-Scale Mechanical Properties of Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Volume 52. Issue 4. September 2015. pp. 189-197.
20. V. A. Pshenichkina, S. I. Politov, A. A. Chirkov. Experimental and Theoretical Rationale for Maximum Loading with a Specified Degree of Risk When Simulating the Operation of a "Bed-Foundation-Superstructure" System. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Volume 52. Issue 6. January 2016. pp. 311-316.
21. V. M. Zimin, L. Ya. Bondar. Optimization of Initial Data for Analysis of Beds and Foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Volume 52. Issue 1. March 2015. pp. 23-26.

Поступило в редакцию 7.01.2017
Received 7.01.2017