УДК 624.131.7:624.048

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНЪЕКЦИОННОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО НЕУСТОЙЧИВОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЯ

GEOMECHANICAL JUSTIFICATION OF THE INJECTION SOIL GROUTING PARAMETERS FOR NONHOMOGENEOUS UNSTABLE FOUNDATION SOILS

Соколов Михаил Валерьевич,
аспирант, e-mail: ea-sokolov42@mail.ru
Sokolov Mikhail V., postgraduate
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, Vesennyaya st., Kemerovo, 650000, Russia

Анотация. *Представлены результаты инженерно-геологических изысканий и наблюдения за неравномерными оседаниями административно-бытового здания. Дан прогноз развития осадок фундаментов на основе компьютерного моделирования естественного и искусственного грунтовых оснований неоднородного строения. Представлены основные закономерности пространственных изменений напряженно-деформированного состояния грунтового основания до и после его закрепления. Даны рекомендации по расположению, геометрическим и прочностным параметрам дополнительных зон инъекционного закрепления вдоль фасада здания.*

Abstract. *The article presents the results of the geotechnical survey and observation of the uneven subsidence of the administrative building. The forecast is given for the development of foundations subsidence on the basis of computer modeling of natural and artificial foundation soils of nonhomogeneous structure. The main features of spatial changes in the stress-strain state of the foundation soil are shown before and after grouting. Recommendations are given on location, geometry and strength parameters for additional areas of injection grouting along the facade of the building.*

Ключевые слова: *осадка, прогноз, напряжения, деформации, фундамент, грунтовое основание, закрепление грунтов, технологические параметры.*

Keywords: *subsidence, prediction, stress, strain, foundation, foundation soil, grouting, technological parameters.*

Одна из основных проблем зданий и сооружений, имеющих значительные размеры в плане, связана с неравномерными оседаниями отдельных его фундаментов. Причинами такого явления могут быть как инженерно-геологические условия (строение грунтового массива), так и техногенные, в виде перегруза частей здания, замачивания грунтов основания [1]. Прогнозирование возможных неравномерных оседаний конструкций при проектировании строительства позволит снизить уровень аварийности зданий и сооружений [2]. Для реконструируемых зданий, в частности при ведении работ по усилению оснований инъекционными методами [3, 4], геомеханическое прогнозирование станет способом повышения экономичности и технологически процесса, поскольку результаты прогноза дают возможность рационального выбора основных геометрических и прочностных параметров зон закрепления грунтов [5].

Описанная проблема характерна для горнотехнических сооружений надшахтных поверхностных комплексов, угольных разрезов. В значительной мере деформации грунтовых оснований сооружений непромышленного назначения проявляются на территориях, прилегающих к горнодобывающем предприятиям, в связи с подработкой, изменения гидрогеологического режима грунтов, сейсмическим воздействием взрывных работ, а также в городах и особенно мегаполисах с развитой системой подземных коммуникаций, метро и происходящими авариями коммунальных сетей.

В работе рассмотрено административно-бытовое здание в г. Кемерово, конструктивные решения и грунтовые условия данного объекта можно считать характерными для рассматриваемой проблемы. По данным инструментальных наблюдений за объектом здание имеет неравномерные оседания и находится в аварийном состоянии.

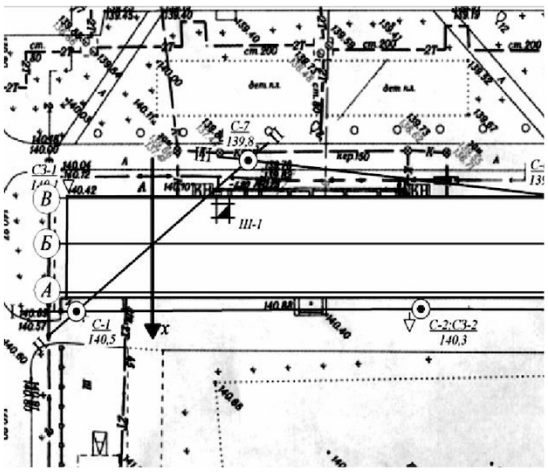

Рис. 1. Топографический план местности; А, Б, В – продольные оси здания

Территория объекта (рис. 1) характеризуется плотной застройкой городского типа, насыщена подземными водонесущими коммуникациями. Рельеф поверхности территории ровный, абсолютные отметки поверхности изменяются от 139,5 до 140,9 м, значительная часть территории покрыта асфальтобетоном. Естественный режим поверхностного стока атмосферных осадков нарушен, вследствие чего возможно водонасыщение грунтов основания, хотя по данным о гидрогеологических условиях и степени водонасыщенности грунтов территория рассматриваемой площадки не является подтопленной.

Исследуемый объект представляет собой комплекс из двух объединенных зданий (корпусов), расположенных в городе Кемерово. Здание, имеющее размеры в плане 68,0×13,0 м, относится к типовой серии, имеет 3 этажа. Стены здания выполнены из армированного кирпича толщиной до 610 мм. Стены опираются на фундаменты ленточного типа с глубиной заложения до –3,320 м, состоящие из фундаментальных блоков ФСБ 9.5.6-т и плит ФЛ 28.8-3.

Инженерно-геологические изыскания на данной площадке проведены на глубину до 12,2 м, они выявили наличие специфических грунтов в виде просадочных суглинков и насыпных грунтов. Вблизи поверхности земли были обнаружены современные техногенные отложения, распространенные на всей площадке и представляющие собой насыпной грунт, в верхней части которого просматривается асфальтобетон, далее – смесь суглинка с включением щебня, гальки и обломков кирпича мощностью 1,1–1,8 м. Под техногенными отложениями залегают верхнечетвертичные современные суглинки, покровные бурые и серовато-бурые, легкие, пылеватые, лессовидные, в кровле макропористые, просадочные и непросадочные, от твердой до мягкопластичной консистенции. Затем располагаются верхнечетвертичные аллювиальные суглинки бурые, от полутвердой до твердой консистенции, легкие и тяжелые, гравелистые. По степени морозного пучения все типы грунтов в зоне промерзания согласно [6] относятся к группе практически непучинистых или слабопучинистых грунтов, однако при замачивании суглинки перейдут в разряд сильнопучинистых и чрезмернопучинистых.

Вышеперечисленные литолого-генетические разновидности грунтов разделены на четыре инженерно-геологических элемента (ИГЭ) по строительным и физико-механическим свойствам (табл. 1) и представлены на инженерно-геологическом разрезе (рис. 2). Элемент ИГЭ-1 представлен первой разновидностью грунтов. Верхнечетвертичные современные суглинки разделены на ИГЭ-4а, куда относятся просадочные, мгновенно размокаемые грунты, с мощностью 1,6–6,0 м и на ИГЭ-4в с непросадочными грунтами мощностью 2,4–6,1 м. При нарушении стока атмосферных вод и утечках из водонесущих коммуникаций происходит увлажнение суглинков в основании фундаментов, потеря

Таблица 1. Физико-механические свойства ИГЭ

№ ИГЭ	Природная влажность W, д.е.	Влажность на границе текучести W_L, д.е.	Влажность на уровне раскатывания W_P, д.е.	Число пластичности I_P, д.е.	Показатель текучести I_L, д.е.	Плотность частиц грунта ρ_s, г/см^3	Плотность грунта ρ, г/см^3	Плотность сухого грунта ρ_d, г/см^3	Коэффициент пористости e, д.е.	Коэффициент водонасыщения S_r, д.е.	Модуль деформации E, МПа	Угол внутреннего трения φ, град.	Сцепление C, кПа
4а	0,28	0,32	0,22	0,1	0,62	2,7	1,61	1,35	1,00	0,75	9,5	17	25
4в	0,26	0,31	0,21	0,1	0,56	2,7	1,88	1,49	0,81	0,87	11,9	12	27,3
5	0,33	0,33	0,21	0,1	0,02	2,7	1,81	1,50	0,79	0,7	24,1	22	23

суглинками просадочных свойств и ухудшение их физико-механических характеристик. К ИГЭ-5 отнесены верхнечетвертичные аллювиальные суглинки, вскрытая мощность которых 2 м.

Геомеханический прогноз оседаний основан на численном моделировании грунтового основания здания с учетом работы системы «фундамент-грунт» на базе программного комплекса для геотехнических расчетов «Alterra» российского разработчика ООО «ИнжПроектСтрой», реализующего основные принципы данной концепции [7–9].

При моделировании рассматривались наиболее аварийно опасные участки в продольном и поперечном сечениях с привязкой к основным осям здания. Схемы базовых моделей приведены на рис. 3. Базовые модели включают в себя в продольном направлении ленточный железобетонный фундамент, имеющий с шагом 1,5 м шов деформации для возможности развития неравномерных оседаний. Каждый сегмент фундамента нагружен равномерно распределенной силой q. В поперечном сечении объект имеет три отдельно стоящих ленточных фундамента условной длины 1 м, нагруженных эквивалентной сосредоточенной силой P. Фундаменты имеют при основании (подошве) размеры 2,4 м и 3,0 м, глубину заложения –3,32 м. Об-

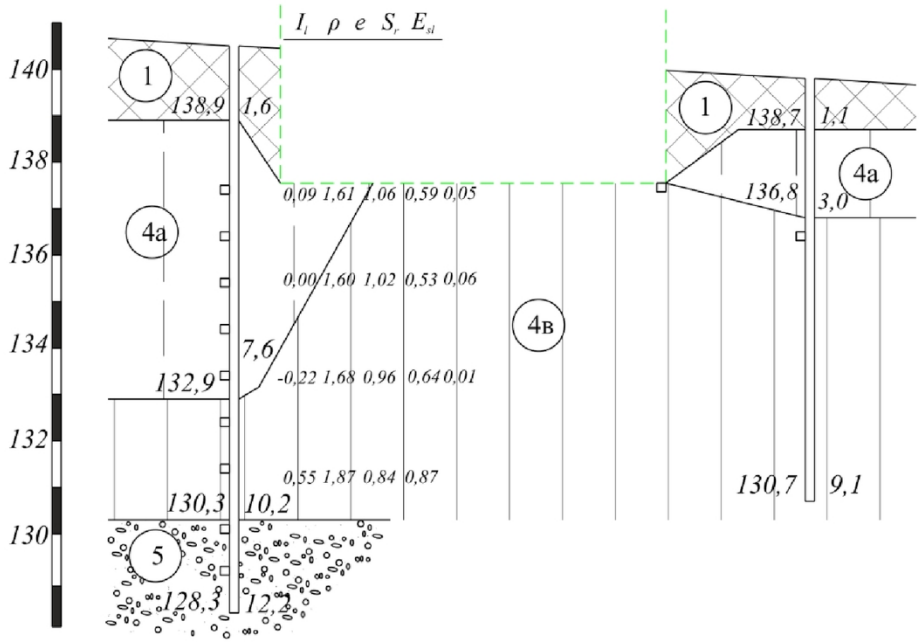

Рис. 2. Инженерно-геологический разрез:
1, 4а, 4в, 5 – основные инженерно-геологические элементы

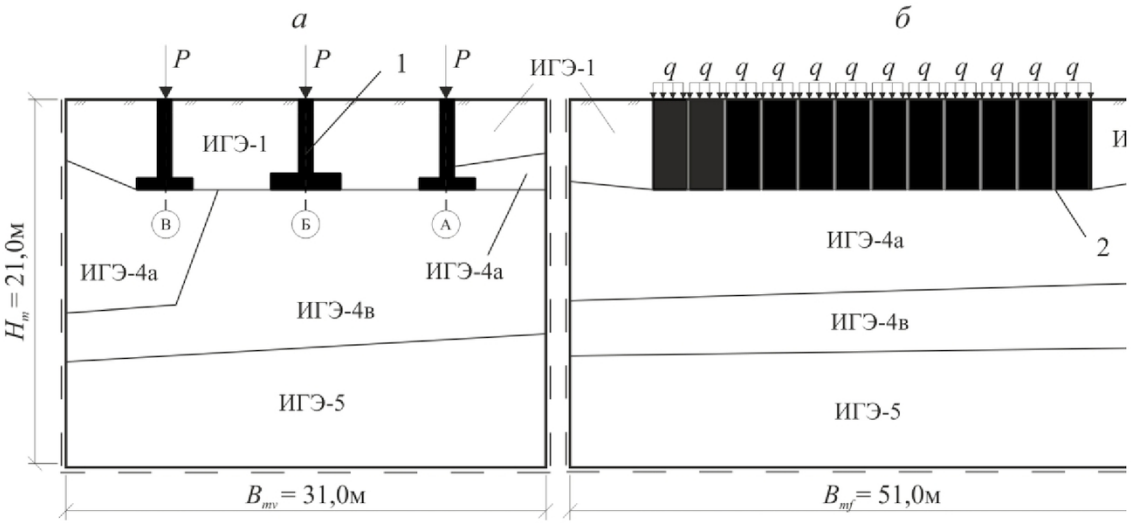

Рис 3. Схема базовых моделей в поперечном (а) и продольном (б) профилях здания:
1 – фундамент; 2 – шов деформации

Таблица 2. Физико-механические свойства элементов модели

№ п/п	Наименование элемента модели	Плотность материала (грунта) ρ, кг/м^3	Модуль деформации E, МПа	Коэффициент Пуассона υ, д.е.	Угол внутреннего трения φ, град.	Сцепление C, кПа
1	Железобетонный фундамент	2500	20000	0,15	–	–
2	Шов деформции	2500	500	0,20	–	–
3	Слой, эквивалентный ИГЭ-1	1900	15	0,30	18	10,0
4	Слой, эквивалентный ИГЭ-4а	1610	9,5	0,36	17	25,0
5	Слой, эквивалентный ИГЭ-4в	1880	11,9	0,36	12	27,5
6	Слой, эквивалентный ИГЭ-5	1810	24,1	0,36	22	23,0

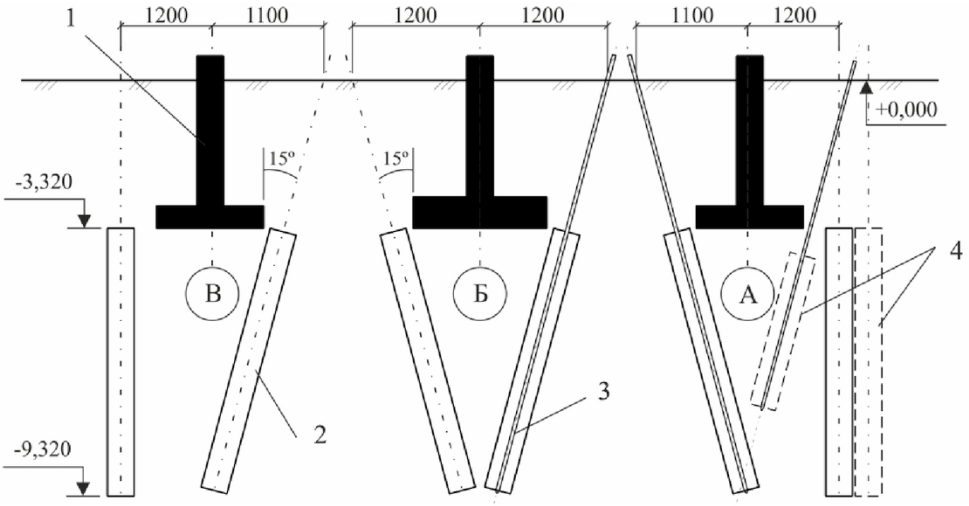

Рис. 4. Схема закрепления грунтов основания в поперечном сечении:
1 – фундамент; 2 – зона закрепления; 3 – инъектор; 4 – дополнительные инъекторы

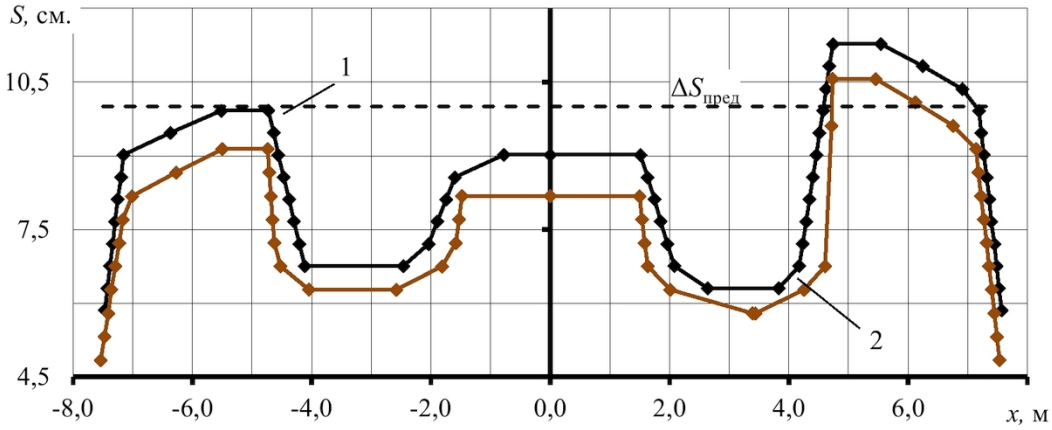

Рис. 5. Зависимости распределения вертикальных оседаний S вдоль поперечной оси x:
1 – в естественном массиве; 2 – в искусственном массиве; $\Delta S_{пред}$ – предельное допустимое оседание, по СП [15]

щая протяженность фундамента вдоль здания составляет 32,1 м. Основные механические параметры фундаментов и эквивалентные физико-механические свойства ИГЭ приведены в табл. 2. Грунтовые условия модели назначались в соответствии с геологическим разрезом (рис. 2) в обоих направлениях и отражали особенности слоистого неоднородного основания [10]. Отличительной геологической особенностью здания стало характерный переход между ИГЭ-4а и ИГЭ-4в непосредственно

под зданием в осях *Б* и *В*. Граничные условия и модели деформация элементов принимались аналогично работам [11–13].

Численная еомеханическая модель искусственного основания реализует совместно разработанную с инженерами ООО «НооЦентр» схему закрепления (рис. 4). Расположение инъекторов при данной схеме основано на методике [14] и учитывает ряд рекомендаций, изложенных в работах [12, 13]. Принятая схема закрепления обеспечивает снижение экономических затрат и согласуется с технологией производства ремонтно-восстановительных работ.

Первый этап анализа, направленный на оценку оседаний земной поверхности *S* и степени их неравномерности, показал, что в продольном направлении здание имеет незначительную степень развития неравномерных оседаний, которая на всем интервале находится в допустимых пределах [15]. Однако, вследствие особенности геологического строения основания сооружения, в поперечном сечении неравномерные оседания *S* развиты значительно больше и требуют упрочнения грунтового

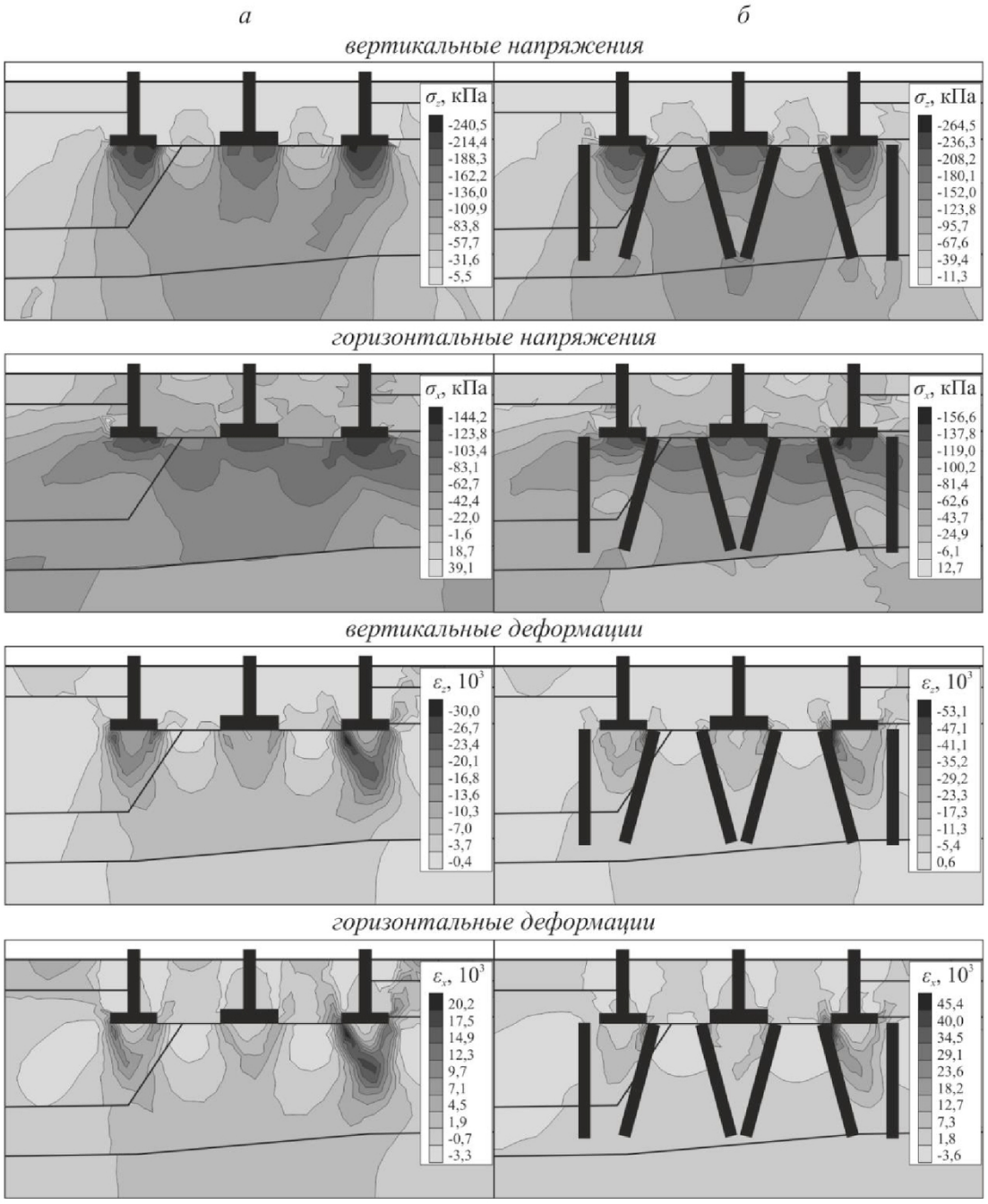

Рис. 6. Поля изолиний вертикальных σ_z, горизонтальных σ_x напряжений и деформаций ε_z, ε_x в естественном (а) и закрепленном (б) грунтовом массиве

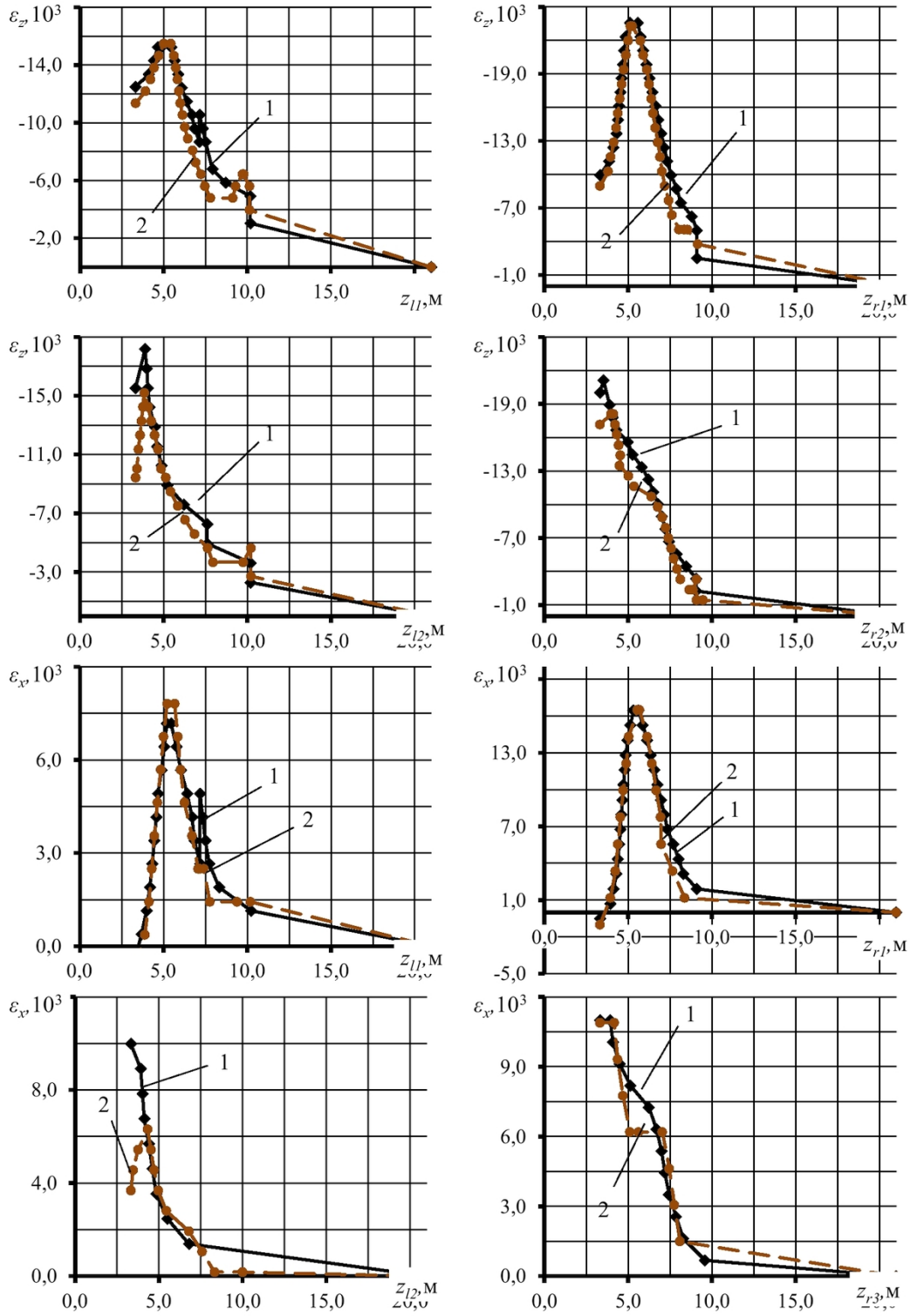

Рис. 7. Зависимости деформаций ε_z и ε_x от глубины модели под левым фундаментом В (а) вдоль осей z_{li} и под правым фундаментом А (б) вдоль осей z_{ri} в массиве:
1 – естественном; 2 – закрепленном

массива. Результаты расчета вертикальных оседаний представлены на рис. 5.

В связи с низкими прочностными и деформационными характеристиками грунтов элемента ИГЭ-4в южный фасад здания имеет значительные вертикальные оседания до S = 11,3 см, что превышает предельно допустимую величину $\Delta S_{пред}$ = 10 см [15], в поперечном направлении сильно выражены неравномерные оседания, что приводит к аварийному состоянию здания. При введении в расчет зон закрепления согласно схеме (см. рис. 4) значения S в среднем снижаются на 7 %. Однако, фундаменты южного фасада, оседания S

которых превышают предельные значения, требуют изменения технологических параметров закрепления и введения дополнительных зон укрепления на основании геомеханического анализа.

Результаты геомеханического моделирования в виде полей изолиний элементов напряженно-деформированного состояния представлены на рис. 6.

Распределение вертикальных напряжений σ_z происходит неравномерно, с преобладанием их средних значений в правой части грунтового массива. Максимумы напряжений σ_z зафиксирован под крайними фундаментами вдоль осей *А* и *В*, а на границе слое ИГЭ-4а и ИГЭ-4в отмечены незначительные изменения. Распределение горизонтальных напряжений σ_x происходит несимметрично, они преимущественно концентрируются под крайними фундаментами и направлены от оси здания. При введении зон закрепления в грунтовый массив напряжения σ_z имеют более симметричное распределение, а их часть перераспределяется в границах ИГЭ-5. В случае с напряжениями σ_x сохраняется асимметрия, при этом под фундаментом вдоль оси *В* напряжения снижаются, а вдоль оси *А* – повышаются. Таким образом, основной причиной оседаний южной части фундамента является развитие значительных горизонтальных напряжений.

Распределение деформаций происходит несимметрично, аналогично распределению напряжений. В естественном массиве деформации ε_z и ε_x концентрируются под фундаментом вдоль оси А. На границе слоев ИГЭ-4а и ИГЭ-4в отмечены разности деформаций. Наиболее характерные графики распределения деформаций ε_z и ε_x вдоль осей z_{li} и z_{ri} представлены на рис. 7.

Анализ приведенных зависимостей показал значительную эффективность закрепления на диапазонах z_{l1} = 6,0…9,0 м, z_{l2} = 7,0…10,0 м, однако вдоль осей z_{r1} и z_{r2} существенного снижения деформаций ε_z не отмечено. Характерной особенностью является отсутствие разности деформаций на границе слоев в диапазонах z_i = 3,0…9,5 м. Распределение горизонтальных деформаций ε_x имеет ряд существенных особенностей: вдоль оси z_{l1} отсутствует разность деформаций на границе слоев при z_{l1} = 7,1 м; вдоль оси z_{l2} происходит изменение характера распределения ε_x на интервале z_{l2} = 3,3…4,2 м. Анализ деформаций ε_x вдоль осей z_{r1} и z_{r2} не показал значительных изменений, за исключением снижения деформаций на интервале z_{r2} = 5,0…7,5 м.

Таким образом, проведенный геомеханический анализ показал, что принятая схема закрепления является эффективной для фундаментов вдоль осей *Б* и *В*, однако требует усиления в области фундаментов вдоль оси *А*. На основании полученных данных рекомендуется расположение дополнительной одной наклонной зоны закрепления глубиной до 7,5 м для снижения вертикальных деформаций, и одной – вертикальной со смещением 1,7 м для снижения поперечных деформаций ε_x. Расположение дополнительных инъекторов показано на рис. 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарев, А. Б. Прогноз осадки свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах (на примере Пермского региона) / А. Б. Пономарев, Е. Н. Сычкина // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014.– №3. – С.15–21.

2. Протосеня А. Г., Карасев М. А. Разработка численной модели прогноза деформаций грунтового массива при строительстве полузаглубленного сооружения в программном комплексе ABAQUS // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014.– №2.– С.14–19.

3. Ибрагимов, М. И. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов / М. И. Ибрагимов, В. В. Семкин. – Москва: Изд-во АСВ, 2012. – 256с.

4. Страданченко, С. Г. Исследование параметров химического и электрохимического закрепления грунтов / С. Г. Страданченко, П. Н. Должиков, А. А. Шубин. – Новочеркаск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – 198с.

5. Лобанова, Т. В. Геомеханическое обоснование эксплуатации охраняемых объектов на земной поверхности Казского месторождения // Современные тенденции развития техники и технологий. – 2016. – №4–4.– С.65–71.

6. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. – Москва: Стандартинформ, 2013. –24с.

7. Фадеев А.Б., Метод конечных элементов в геомеханике. – Москва: Недра, 1987. – 221с.

8. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. –679 с.

9. Безволев, С. Г. Общая методика расчета напряженно-деформированного состояния массива грунта с упрочняющими или ослабляющими элементами // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008.– №3.– С.16–24.

10. Тер-Мартиросян З. Г., Мирный А. Ю. Влияние неоднородности грунтов на их механические свойства // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2013.– №6.– С.2–7.

11. Sergei M. Prostov, Mikhail V. Sokolov. Simulation of stress-strain state of the rein-forced soil foundation for structures. Taishan Academic Forum - Project on Mine Disaster Prevention and Control, October 17–20, Qingdao, China. 2014. pp.350–355.

12. Простов, С. М. Анализ напряженно-деформированного состояния укрепляемых грунтовых оснований на основе интегральных критериев / С. М. Простов, М. В. Соколов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015.– №6.– С.52–61.

13. Sergei M. Prostov, Mikhail V. Sokolov and Andrey V. Pokatilov. The Influence Of In-jecting 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

14. Рекомендации по проектированию, расчету и устройству геотехногенных блоков и методам контроля качества их выполнения / Уральский промстройниипроек. – Свердловск: Рота принт, 1989.–108с.

15. СП 22.13330.2011. Основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01.-83* / Мин. России.– Москва: ОАО «ЦПП», 2011.–297с.

REFERENCES

1. Ponomarev, A. B. Prognoz osadki svaynykh fundamentov na argillitopodobnykh glinakh (na primere Permskogo regiona) / A. B. Ponomarev, E. N. Sychkina // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [The bases, foundations and soil mechanics]. 2014. №3. pp.15–21.

2. Protosenya A. G., Karasev M. A. Razrabotka chislennoy modeli prognoza deformatsiy gruntovogo massiva pri stroitel'stve poluzaglublennogo sooruzheniya v programmnom komplekse ABAQUS / Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [The bases, foundations and soil mechanics]. 2014. №2. pp.14–19.

3. Ibragimov, M. I. Zakreplenie gruntov in"ektsiey tsementnykh rastvorov / M. I. Ibragimov, V. V. Semkin. Moskva: Izd-vo ASV [Publishing house construction universities], 2012. 256 p.

4. Stradanchenko, S. G. Issledovanie parametrov khimicheskogo i elektrokhimicheskogo zakrepleniya gruntov / S. G. Stradanchenko, P. N. Dolzhikov, A. A. Shubin. Novocherkassk: YuRGTU (NPI), 2009. 198 p.

5. Lobanova, T. V. Geomekhanicheskoe obosnovanie ekspluatatsii okhranyaemykh ob"ektov na zemnoy poverkhnosti Kazskogo mestorozhdeniya / Sovremennye tendentsii razvitiya tekhniki i tekhnologiy [Modern trends in engineering and technology]. 2016. №4–4. pp.65–71.

6. GOST 25100-2011 Grunty. Klassifikatsiya.– Moskva: Standartinform [Standartinform], 2013.–24p.

7. Fadeev, A.B. Metod konechnykh elementov v geomekhanike. Moskva: Nedra, 1987. 221 p.

8. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. Raschet konstruktsiy na uprugom osnovanii. M.: Stroyizdat, 1984. 679 p.

9. Bezvolev, S. G. Obshchaya metodika rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva grunta s uprochnyayushchimi ili oslablyayushchimi elementami / Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [The bases, foundations and soil mechanics]. 2008. №3. pp.16–24.

10. Ter-Martirosyan Z. G., Mirnyy A. Yu. Vliyanie neodnorodnosti gruntov na ikh mekhanicheskie svoystva / Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [The bases, foundations and soil mechanics]. 2013. №6. pp.2–7.

11. Sergei M. Prostov, Mikhail V. Sokolov. Simulation of stress-strain state of the rein-forced soil foundation for structures. Taishan Academic Forum - Project on Mine Disaster Pre-vention and Control, October 17–20, Qingdao, China. 2014. pp.350–355.

12. Prostov, S. M. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ukreplyaemykh gruntovykh osnovaniy na osnove integral'nykh kriteriev / S. M. Prostov, M. V. Sokolov / Vestnik KuzGTU. 2015. №6. pp.52–61.

13. Sergei M. Prostov, Mikhail V. Sokolov and Andrey V. Pokatilov. The Influence Of In-jecting 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

14. Rekomendatsii po proektirovaniyu, raschetu i ustroystvu geotekhnogennykh blokov i metodam kontrolya kachestva ikh vypolneniya /Ural'skiy promstroyniiproek.– Sverdlovsk: Rota print, 1989.–108p.

15. SP 22.13330.2011. Osnovaniya i fundamenty. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01.-83* / Min. Rossii. Moskva: OAO «TsPP», 2011. 297 p.

Поступило в редакцию 28.03.1017
Received 28 March 2017