

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-4-5-13

УДК 624.131.7:624.048

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНЪЕКЦИОННОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ АВАРИЙНОГО ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЯ

GEOMECHANICAL JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS FOR INJECTION CONSOLIDATION OF HAZARDOUS GROUND FOUNDATION OF A BUILDING

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, ul. Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russia

Аннотация. Представлены результаты инженерно-геологических изысканий и инструментальных наблюдений за неравномерными оседаниями 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 фасадов здания.

Abstract. The results of engineering and geological surveys and instrumental monitoring of uneven subsidence of the building are presented. The forecast of the foundations subsidence development based on computer modeling of natural and artificial soil foundations bases of the inhomogeneous structure is given. The main regularities of spatial changes in the stress-strain state of the soil foundation before and after its consolidation are presented. Recommendations are given on the location, geometric and strength parameters of additional injection consolidation zones along the facades of the building.

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

Keywords: subsidence, forecast, stress, deformation, foundation, ground base, soil consolidation, technological parameters, hazardous condition.

В настоящее время актуальна проблема неравномерных оседаний зданий и сооружений, особенно возводимых в 90-ых годах, как в горнодобывающей, так и строительной отраслях промышленности. Анализ причин возникновения осадок показывает, что наиболее значительными из них являются: инженерно-геологическое строение грунтового массива, техногенные аварии, неправильная эксплуатация зданий [1]. В результате большинство зданий и сооружений со значительными размерами в плане требуют проведения обширного комплекса работ как по усилению грунтовых оснований, так и по контролю и наблюдению за оседанием сооружений. Использование современных систем для прогнозирования возможных неравномерных оседаний численными и математическими методами снизит уровень аварий-

ности зданий и сооружений, позволит проводить укрепительные мероприятия на ранней стадии развития осадок [2–5]. Геомеханический анализ и прогнозирование должны стать составной частью оптимизации параметров работ по усилению, повышению экономических показателей и совершенствования технологического процесса, поскольку результаты прогноза дают возможность рационального выбора основных геометрических и прочностных параметров зон закрепления грунтов инъекционными методами [6–7].

Наиболее частой причиной развития неравномерных оседаний в горнопромышленном секторе является техногенные аварии, связанные с замачиванием грунтов основания. Источниками воды могут быть как талые воды и осадки, попадающие в грунт вследствие нарушения отвода воды, так и

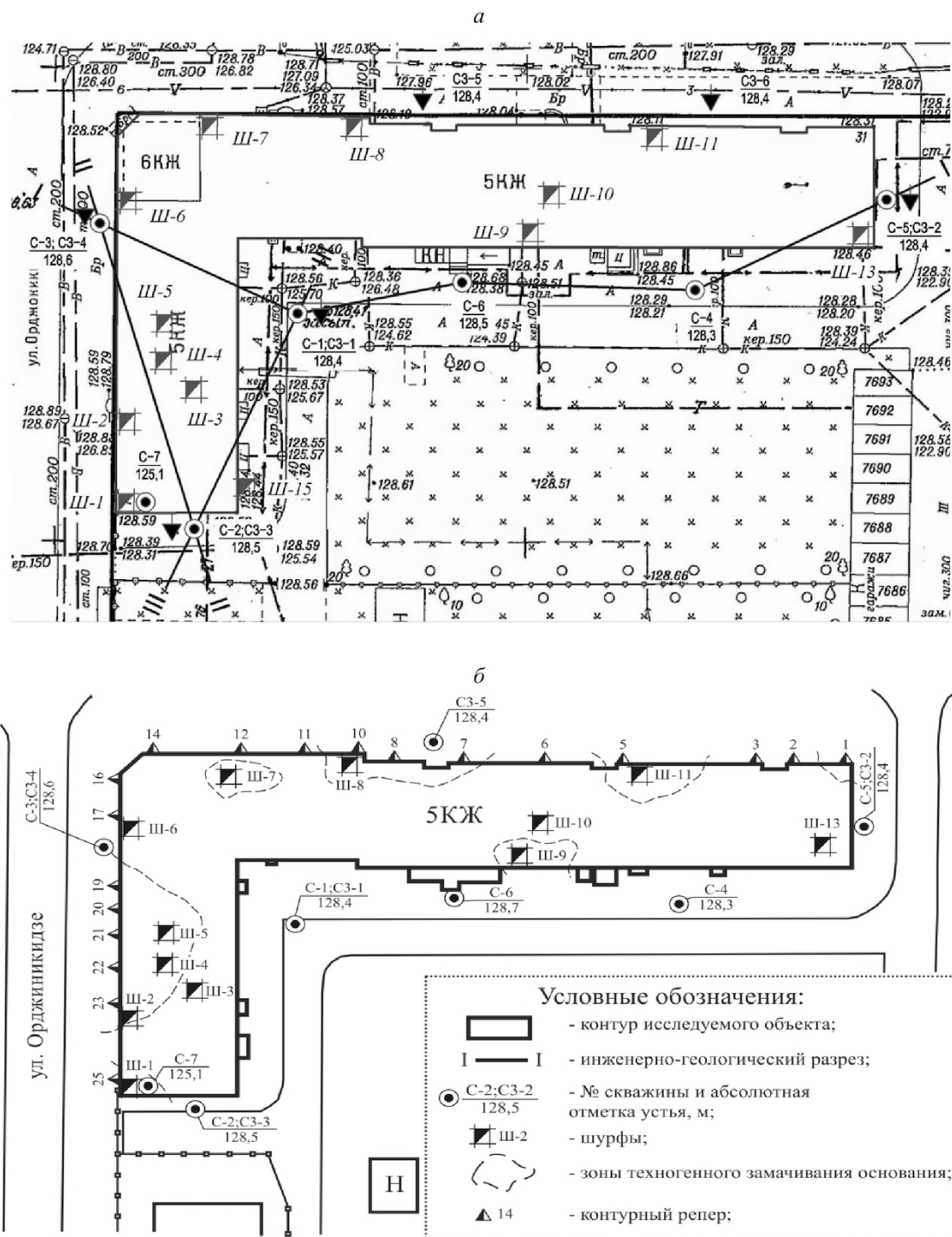


Рис. 1. План территории (а) и план-схема (б) исследуемого здания

аварии в системах трубопровода на различных сооружениях. Данная причина характерна и для гражданского строительства, например, для жилого здания в городе Кемерово, чьи геологические условия и наличие обширных областей обводненного грунта схожи с условиями открытой добычи полезных ископаемых. По данным визуальных и геодезических наблюдений объект имеет значительные неравномерные оседания и требует усиления грунтов основания.

Территория объекта (рис. 1) характеризуется плотной городской застройкой, насыщенной подземными водонесущими коммуникациями. Рельеф поверхности площадки, спланированный в период строительства, имеет абсолютные отметки поверхности от 128,3 до 128,6 м. На территории площадки отмечено нарушение естественного режима отвода талой и дождевой воды.

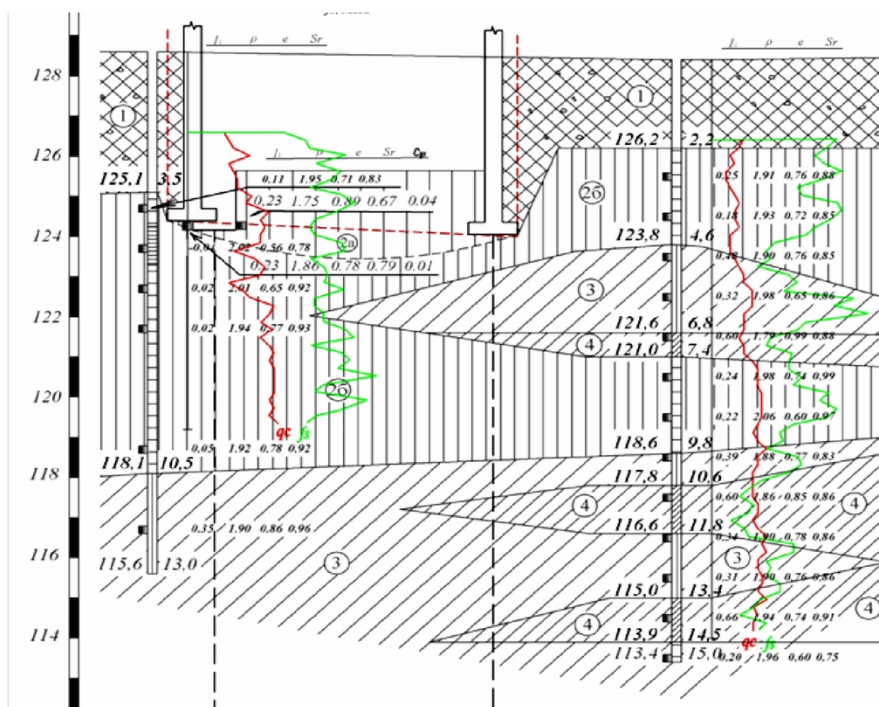


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез по линии I-I:
1–4 – инженерно-геологические элементы

Таблица 1. Сводная таблица механических свойств инженерно-геологических элементов

№ п/п	Наименование физико-механических свойств	Ед. измер.	Номер инженерно-геологического элемента				
			ИГЭ-1	ИГЭ-2а	ИГЭ-2б	ИГЭ-3	ИГЭ-4
1	Природная плотность ρ :	г/см ³	1,90	1,77	1,94	1,91	1,89
	– в естественном состоянии		–	1,87	1,79	1,88	–
2	Угол внутреннего трения φ :	град.	18	14	17	13	13
	– в естественном состоянии		–	10	12	12	–
3	Сцепление C :	кПа	10	23	30	17	15
	– в естественном состоянии		–	10	12	12	–
4	Модуль деформации E :	МПа	15,0	11,2	23,0	9,0	7,4
	– в естественном состоянии		–	5,6	16,7	8,1	–

а

б

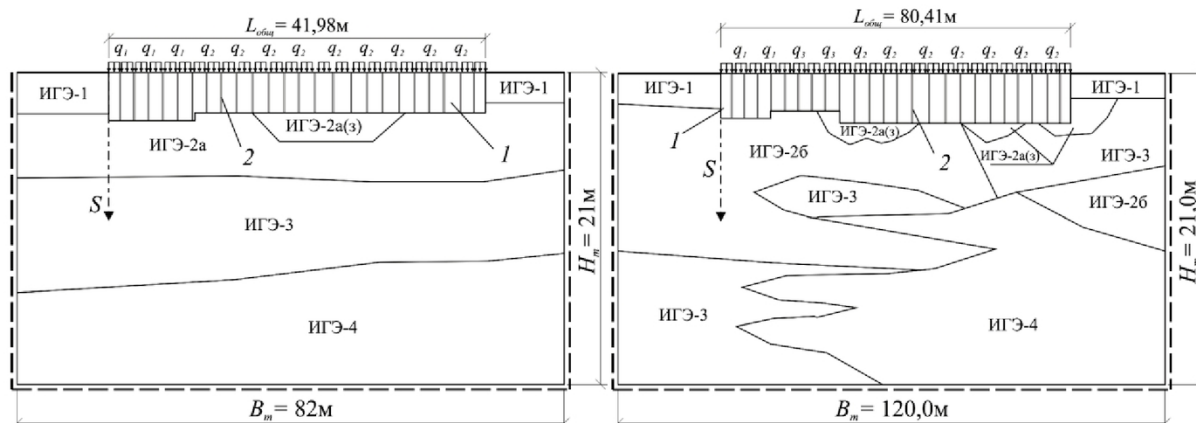


Рис. 3. Схема продольных базовых моделей вдоль западного (а) и северного (б) фасадов здания:

Здание представляет собой пятиэтажное кир-

пичное сооружение, имеющее в плане Г-образную форму с наличием эксплуатируемого подвала и холодного чердака. Максимальные размеры здания в плане 53,0×40,4 м. Фундаменты здания выполнены из бетонных и каменных (бутовых) материалов и относятся к ленточному типу.

Размеры фундамента в плане соответствуют типовым сериям строительных конструкций 90-ых годов [8]. Глубина заложения фундамента переменная и достигает 4,9 м.

Инженерно-геологические изыскания на территории проводились на глубину до 15,0 м. По данным инженерно-геологического разреза (рис. 2) отмечено сложное геологическое строение, включающее 4 основные разновидности грунтов. Геологической особенностью грунтового основания является наличие обводненного грунта и линз включений грунтов с низкими деформационными свойствами.

На основании анализа характера пространственной изменчивости показателей физико-механических свойств грунтов (табл. 1) выделено четыре основных инженерно-геологических элемента:

- ИГЭ-1 – насыпной грунт, представленный асфальтобетоном, фракционированным щебнем и смесью суглинка с дресвой, щебнем, мощностью до 3,5 м;

- ИГЭ 2а – пылеватый суглинок, твердой и полутвердой консистенции, просадочный, маловлажный, распространенный преимущественно в верхней части разреза, исключительно под зданием, мощностью до 0,8 м (от подошвы фундаментов), при замачивании резко ухудшает физические, прочностные и деформационные свойства;

- ИГЭ 2б – пылеватый суглинок, твердой и полутвердой консистенции, непросадочный, преимущественно водонасыщенный; распространенный под просадочным суглинком ИГЭ 2а, мощность до 7,0 м;

- ИГЭ 3 – пылеватый суглинок, тугопластичной консистенции, непросадочный, водонасыщенный; распространен повсеместно под просадочным суглинком ИГЭ 2а, мощность до 3,2 м;

- ИГЭ 4 – пылеватый суглинок, мягкопластичной консистенции, непросадочный, водонасыщенный; распространен в нижней части разреза, с глубины от 6,0 м, вскрытой мощностью до 6,0 м.

В результате исследований грунтовые воды вскрыты не были, однако в многолетней перспективе, при нарушении стока атмосферных вод и наличии утечек из водонесущих коммуникаций, возможен подъем грунтовых вод в основании фундаментов на глубину 4,0 м.

Сопоставление характеристик физико-механических свойств грунтов, залегающих в основании фундаментов обследуемого здания и грунтов, залегающих за пределами контура здания, показало, что они существенно различаются

между собой. Основное различие состоит в том, что грунты под фундаментами в большей части сохранили просадочные свойства, в то время как на прилегающей территории, оставаясь даже твердыми и полутвердыми, они утратили их, очевидно, за счет увлажнения по техногенным причинам.

Прогнозирование оседаний здания и геомеханического состояния грунтового основания с наиболее неблагоприятными геологическими условиями основано на численном методе конечных элементов [9–10], реализованного в программном комплексе для геотехнических расчетов «Alterra», предоставленное в некоммерческое пользование ООО «ИнжПроектСтрой».

Процесс моделирования включал оценку изменения вертикальных оседаний на основе продольных базовых моделей вдоль здания (рис. 3). В связи с Г-образной формой здания модель разделена относительно угла здания. Продольные модели включают фундамент ленточного типа общей длиной $L_{\text{общ}} = 41,98$ м и 80,41 м соответственно, с переменной глубиной заложения в диапазоне –45...–4,90 м, имеющего вдоль продольной оси модифицированные швы-трещины, согласно [11], с переменным шагом в диапазоне значений от 1,0 до 2,0 м в зависимости от участка длины фундамента постоянной высоты. Фундамент нагружен равномерно распределенной эквивалентной нагрузкой q , определенной путем решения обратной задачи согласно требованиям [12]. Сложное неоднородное строение грунтового массива задавалось согласно инженерно-геологическим разрезам, предоставленным организацией ООО «Нооцентр», с указанием областей обводненного грунта (рис. 1, б) по данным лабораторных испытаний грунтов, отобранных из шурфа. Параметры материалов и деформационные свойства элементов модели представлены в табл. 2.

Анализ пространственных изменений напряженно-деформированного состояния грунтового массива основан на поперечной базовой модели, представленной на рис. 4. Базовая модель включает три бетонных фундамента, с глубиной заложения 3,45 и 4,1 м, нагруженные сосредоточенными силами P . Между фундаментами расположен пол подвала толщиной 0,2 м. Высота подвала от поверхности земли составила 2,9 м. Строение грунтового массива аналогично продольным моделям и включает линзы-включения, согласно инженерно-геологическому разрезу (см. рис. 2). Параметры и физико-механические свойства элементов поперечной модели приведены в табл. 2. Во всех базовых моделях граничные условия, размеры, количество конечных элементов и прочие условия назначались согласно рекомендациям, приведенным в работах [13–15].

Численные модели искусственных грунтовых оснований основаны на совместно разработанной с инженерами ООО «Нооцентр» схеме закрепления (рис. 4, б). Расположение инъекторов при дан-

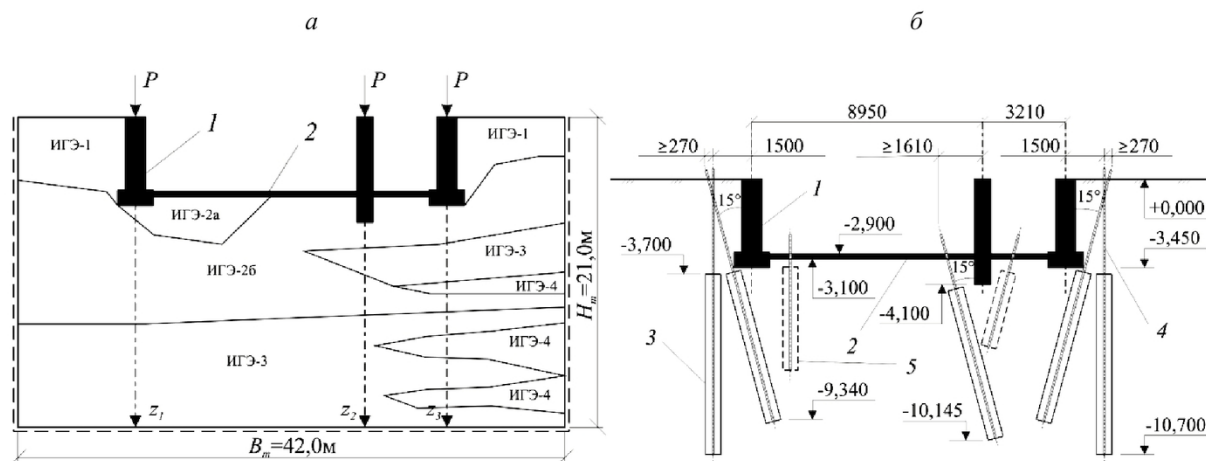


Рис. 4. Схема поперечной базовой модели (а) и схема закрепления грунтов основания (б): 1 – фундамент; 2 – пол подвала; 3 – зона закрепления; 4 – инъектор; 5 – дополнительные зоны закрепления

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 ν , д.е.	Угол внутреннего трения φ , град.	Сцепление C , кПа
1	Бетонный фундамент	2500	20000,0	0,15	–	–
2	Пол подвала	1800	2000,0	0,15	–	–
3	Слой, эквивалентный ИГЭ-1	1900	15,0	0,30	18	10
4	Слой, эквивалентный ИГЭ-2а	1770	11,2	0,36	14	23
5	Слой, эквивалентный ИГЭ-2б	1940	23,0	0,30	17	30
6	Слой, эквивалентный ИГЭ-3	1910	9,0	0,36	13	17
7	Слой, эквивалентный ИГЭ-4	1890	7,4	0,36	13	15
8	Слой, эквивалентный ИГЭ-2а(з)	1870	5,6	0,36	10	10
9	Зоны закрепления	1950	30,0	0,25	26	30

ной схеме принято согласно методике [16] и учитывает ряд полученных ранее рекомендаций для подобных объектов, изложенных в работах [14, 15]. Принятая схема закрепления обеспечивает снижение экономических затрат и согласуется с технологией производства ремонтно-восстановительных работ для данных конструктивных решений.

Первый этап геомеханического прогнозирования направлен на анализ расчетных вертикальных оседаний, представленных на рис. 5, и их сопоставления с данными натурных инструментальных замеров. Схема расположения реперов приведена на рис. 1, б. За начало отчета координаты вдоль оси здания принят северо-западный угол здания.

Анализ зависимостей фактических наблюдений до закрепления показал, что в областях техногенной аварии значения S превышают средние значения более чем 2,5 раза, а после закрепления – максимумы S сглаживаются, т.е. неравномерные осадки устраняются. Обращают на себя внимание резкие изменения на графиках $S(l)$ инструментальных замеров (график 1 на рис. 5). Расчетные графики 3 значительно более сглаженные, при этом отличия максимальных значений S на этих графиках не превышают 20 %. Прогнозируемые значения S после проведения закрепления сопоставимы с фактическими значениями и имеют среднее отклонение от натурных измерений не более 17,3 %.

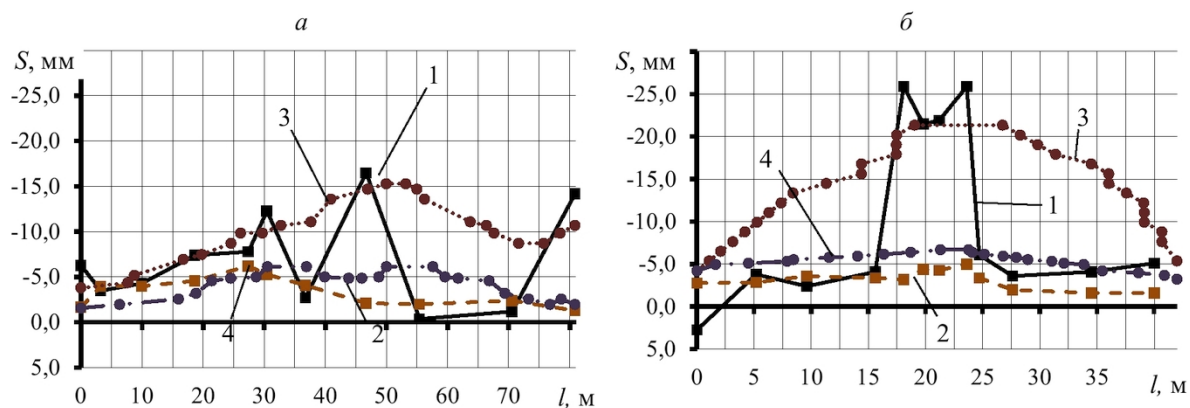


Рис. 5. Распределение вертикальных оседаний S вдоль продольных осей северного (а) и западного (б) фасадов здания: 1 – фактические значения до закрепления; 2 – фактические значения после закрепления; 3 – прогнозируемые до закрепления; 4 – прогнозируемые значения после закрепления

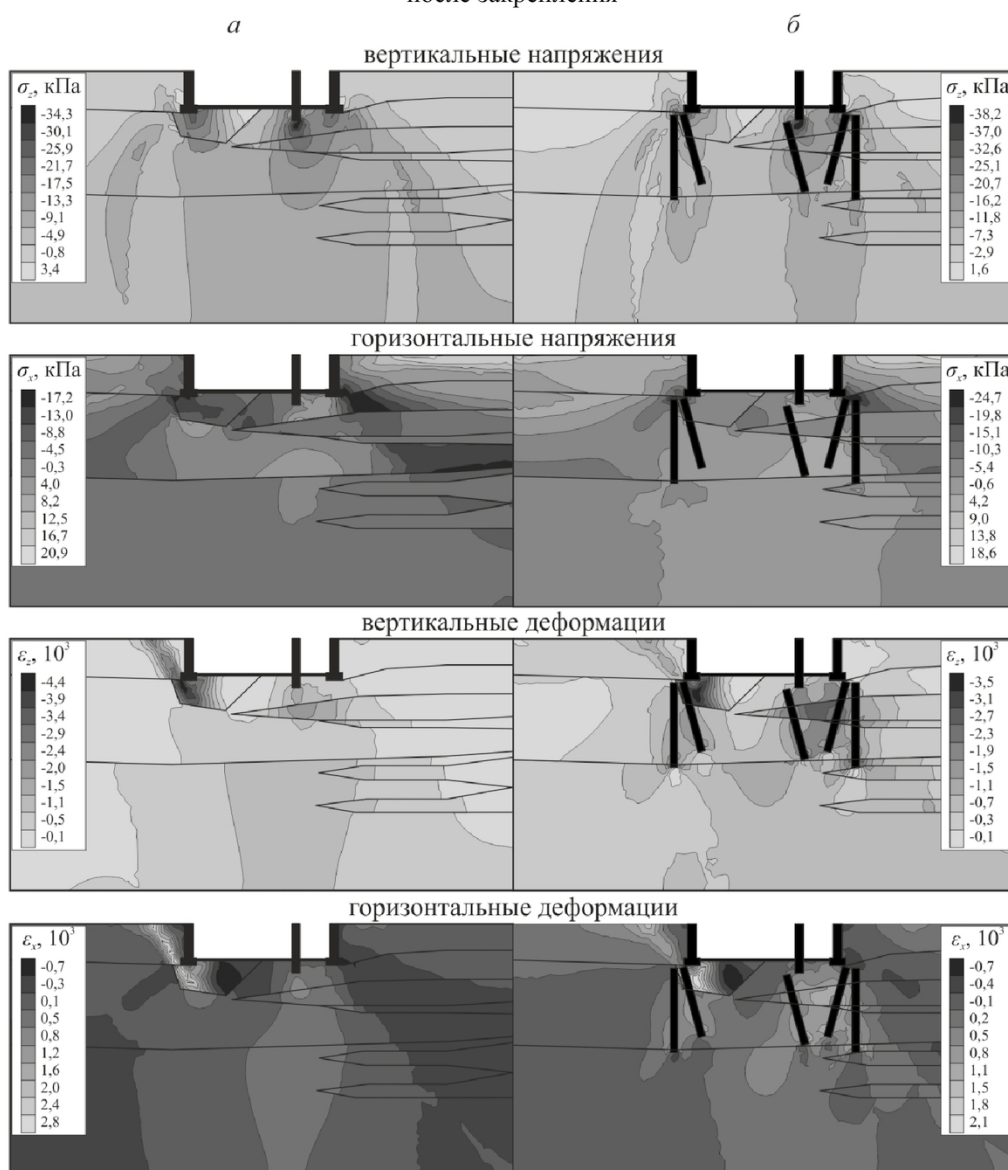


Рис. 6. Поля изолиний вертикальных σ_z , горизонтальных σ_x напряжений и деформаций ε_z , ε_x в естественном (а) и искусственном (б) грунтовом массиве

Второй этап анализа направлен на оценку пространственных изменений напряженно-

деформированного состояния грунтового массива в области с наиболее сложной геологической

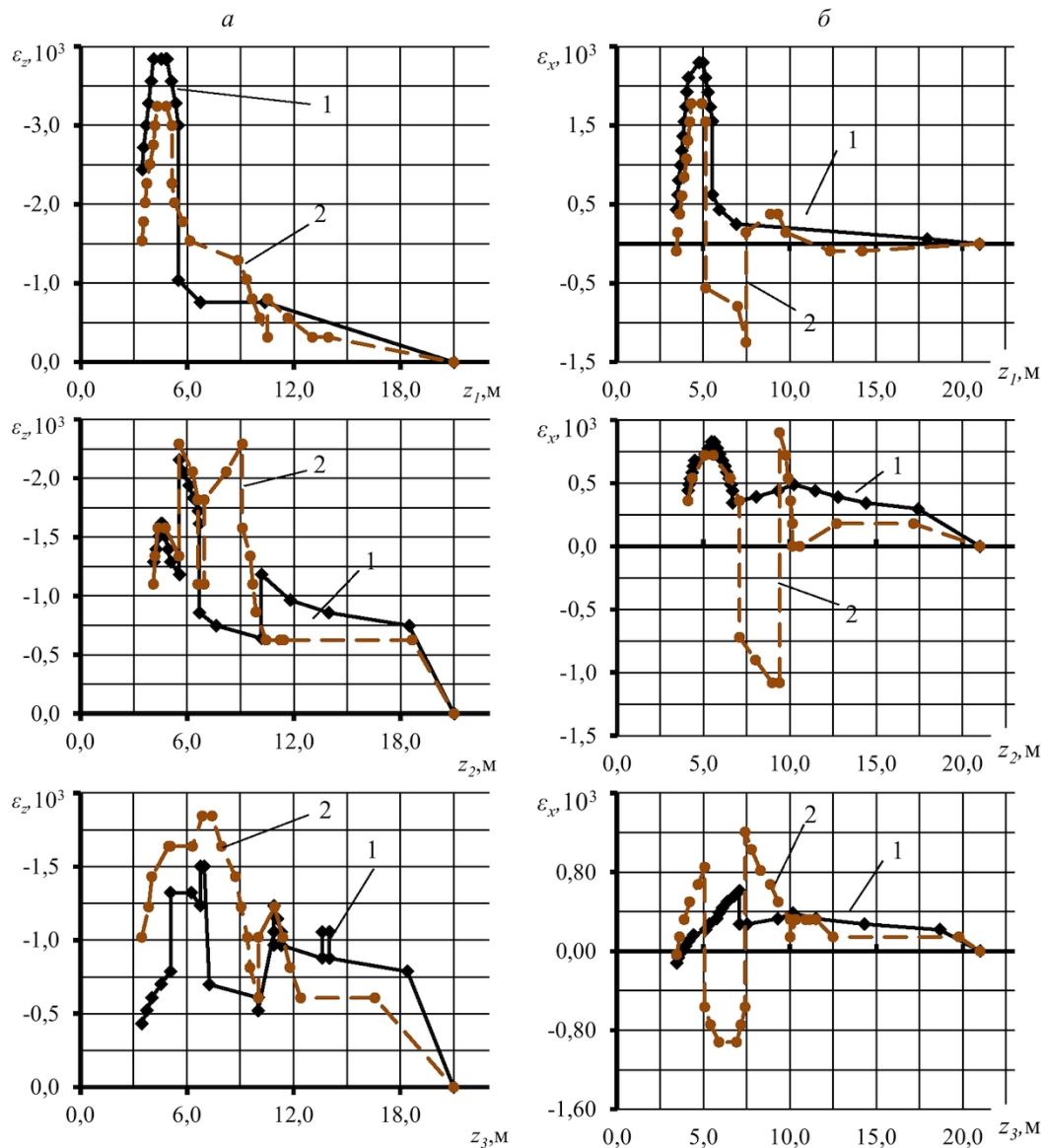


Рис. 7. Зависимости вертикальных (а) и горизонтальных (б) деформаций от глубины модели z по осям z_1, z_2, z_3 :

1 – в естественном массиве; 2 – в искусственном массиве

структурой на основе результатов расчета в виде полей изолиний напряжений и деформаций, представленных на рис. 6.

Согласно полученным результатам распределение напряжений σ_z до закрепления происходит несимметрично, более нагруженной является преимущественно правая часть массива, с образованием области концентрации в обводненной части основания под левым фундаментом. В искусственном массиве асимметрия сохраняется, однако, напряжения распределяются по большей глубине, концентрируясь под основаниями зон закрепления. Значительно возрастают напряжения вдоль боковых граней наклонных зон закрепления. Горизонтальные напряжения σ_x распределяются несимметрично, преимущественно концентрируясь в ИГЭ-26 и обводненной части массива. При введении зон закрепления распределение напряжений σ_x происходит более равномерно,

включая в нагрузку все элементы массива, значительно снижаются напряжения в обводненной области массива.

Картина распределения деформаций имеет сходные очертания с изолиниями напряжений: поля изолиний деформаций несимметричны, преимущественно концентрируются в области обводненного грунта. При закреплении основания деформации $\varepsilon_z, \varepsilon_x$ перераспределяются, образуя области концентрации под правым фундаментом (ИГЭ-3) с сохранением деформаций в обводненной части. Частные случаи распределения деформаций $\varepsilon_z, \varepsilon_x$ по глубине модели вдоль осей z_1, z_2, z_3 представлены на рис. 7.

Распределение деформаций ε_z в массиве происходит неравномерно, с образованием разностей деформаций на границах слоев массива и зон закрепления. В условии естественного массива деформации ε_z имеют максимум значений на интер-

вале $z_1 = 3,45 \dots 5,60$ м вследствие значительных деформаций в пределах обводненной части грунта, в том числе пластических по критерию сдвига Мора-Кулона. При введении в данной области массива зоны закрепления деформации уменьшаются. В пределах зоны закрепления на интервале $z_1 = 6,0 \dots 11,5$ м отмечено возрастание деформаций ε_z как следствие изгиба наклонной зоны закрепления. Вдоль оси z_2 также отмечены деформации наклонной зоны на интервале $z_2 = 6,0 \dots 11,5$ м, однако, на интервале $z_2 = 11,5 \dots 20,0$ м отмечено снижение деформаций ε_z , тогда как при искусственном основании зона влияния от срединного фундамента уменьшается. Деформаций ε_z вдоль оси z_3 снижаются на интервале $z_3 = 12,3 \dots 20,0$ м и значительно возрастают на интервале $z_3 = 3,5 \dots 11,0$ м.

Таким образом, анализ вертикальных деформаций показал, что введение в расчет зон закрепления в ряде случаев уменьшает зону влияния нагрузки, при этом наклонные зоны подвержены большему изгибающему эффекту, чем вертикальные.

Горизонтальные деформации ε_x имеют более простую форму распределения с меньшей разностью величины деформаций на границах слоев при их концентрации преимущественно в приповерхностных слоях. При рассмотрении искусственного массива горизонтальные деформации

имеют аналогичные особенности: поперечные деформации в пределах зон закрепления значительно выше деформаций неукрепленного массива ε_x ; вдоль оси z_1 деформации ε_x в зоне обводненного грунта снижаются с введением зон закрепления; вдоль оси z_3 отмечено возрастание положительных деформаций ε_x до и после зоны закрепления.

В результате произведенного исследования подтверждена эффективность и информативность геомеханического прогноза как вертикальных оседаний, так и пространственных изменений напряженно-деформированного состояния отдельных сечений объекта. Применение численного метода прогнозирования значительно снижает стоимость маркшейдерских работ и позволяет заблаговременно предотвращать аварийные ситуации. Повышение точности прогноза достижимо с применением высокоточных программных комплексов и введению поправок в расчетные модели. На основе геомеханических данных возможно усовершенствование технологии и схем закрепления. В данном случае рекомендовано использование дополнительных зон закрепления в границах обводненного слоя грунта для повышения его деформационных свойств и предотвращения развития горизонтальных деформаций. Расположение и геометрические параметры дополнительных зон закрепления показаны на рис. 4, б.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ибрагимов, М. Н. Опыт стабилизации осадок реконструируемого здания. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2010. – №6. – С.22–24.
2. Зерцалов, М. Г. Использование информационных систем для геомеханического мониторинга в подземных сооружениях / М. Г. Зерцалов, А. Д. Потапов, Ф. В. Манько. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008. – №6. – С.2–5.
3. 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.
4. Строкова, Л. А. Численное моделирование оседаний поверхности при проходке метрополитена. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2009. – №3. – С.29–31.
5. Протосеня, А. Г. Разработка численной модели прогноза деформаций грунтового массива при строительстве полуглубленного сооружения в программном комплексе ABAQUS / А. Г. Протосеня, М. А. Карасев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – №2. – С.14–19.
6. Ибрагимов, М. И. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов / М. И. Ибрагимов, В. В. Семкин. – Москва: Изд-во АСВ, 2012. – 256с.
7. Страданченко, С. Г. Исследование параметров химического и электрохимического закрепления грунтов / С. Г. Страданченко, П. Н. Должиков, А. А. Шубин. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – 198с.
8. Серия 1.820.9-1 Выпуск 1. Фундаменты железобетонные столбчатые. Рабочие чертежи. – Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1982. – 262с.
9. Фадеев А.Б., Метод конечных элементов в геомеханике. – Москва: Недра, 1987. – 221с.
10. Горбунов-Посадов, М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – Москва: Стройиздат, 1984. – 679 с.
11. Mikhail Sokolov, Sergey Prostop. *Modeling of Geomechanical Processes Case of Uneven Settling of Foundations Constructions*. Proceedings of the 8th Russian-Chinese Symposium "Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety". Advances in Engineering Research. September (2016). Volume 92. pp.206–212.
12. СП 22.13330.2011. Основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01.-83* / Мин. России. – Москва: ОАО «ЦПП», 2011. – 297с.

13. 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.
14. Sergei M. Prostop, 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.
15. Sergei M. Prostop, 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.
16. Рекомендации по проектированию, расчету и устройству геотехногенных блоков и методам контроля качества их выполнения / Уральского протстроинипроекта.– Свердловск: РотаПритн, 1989.– 108с.

REFERENCES

- 1 Ibragimov, M. N. Opyt stabilizatsii osadok rekonstruiruemogo zdaniya.– Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [The bases, foundations and soil mechanics].– 2010.– №6.– pp.22–24.
- 2 Zertsalov, M. G. Ispol'zovanie informatsionnykh sistem dlya geomekhanicheskogo monitoringa v podzemnykh sooruzheniy / M. G. Zertsalov, A. D. Potapov, F. V. Man'ko.– Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [The bases, foundations and soil mechanics].– 2008.– №6.– pp.2–5.
- 3 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.
- 4 Stokova, L. A. Chislennoe modelirovanie osedaniy poverkhnosti pri prokhodke metropolitena.– Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [The bases, foundations and soil mechanics].– 2009.– №3.– pp.29–31.
- 5 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.
- 6 Ibragimov, M. I. Zakreplenie gruntov in"ektsiey tsementnykh rastvorov / M. I. Ibragimov, V. V. Semkin. Moskva: Izd-vo ASV [Publishing house construction universities], 2012. p.256.
- 7 Stradanchenko, S. G. Issledovanie parametrov khimicheskogo i elektrokhimicheskogo zakrepleniya gruntov / S. G. Stradanchenko, P. N. Dolzhikov, A. A. Shubin. Novocherkassk: YuRGU (NPI), 2009. p.198.
- 8 Seriya 1.820.9-1 Vypusk 1. Fundamenty zhelezobetonnye stolbchatye. Rabochie chertezhi. Moskva: TsITP Gosstroya SSSR, 1982. p.262.
- 9 Fadeev, A.B. Metod konechnykh elementov v geomekhanike. Moskva: Nedra, 1987. p.221.
- 10 Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. Raschet konstruksiy na uprugom osnovanii. M.: Stroyizdat, 1984. p.679.
- 11 Mikhail Sokolov, Sergey Prostop. *Modeling of Geomechanical Processes Case of Uneven Settling of Foundations Constructions*. Proceedings of the 8th Russian-Chinese Symposium "Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety". Advances in Engineering Research. September (2016). Volume 92. pp.206–212.
- 12 SP 22.13330.2011. Osnovaniya i fundamenty. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01.-83* / Min. Rossii. Moskva: OAO «TsPP», 2011. p.297.
- 13 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.
- 14 Sergei M. Prostop, Mikhail V. Sokolov. Simulation of stress-strain state of the reinforced soil foundation for structures. Taishan Academic Forum - Project on Mine Disaster Prevention and Control, October 17–20, Qingdao, China. 2014. pp.350–355.
- 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.
- 16 Rekomendatsii po proektirovaniyu, raschetu i ustroystvu geotekhnogennykh blokov i metodam kontrolya kachestva ikh vypolneniya /Ural'skiy promstroyniiproek.– Sverdlovsk: Rota print, 1989.– p.108.

Поступило в редакцию 28 марта 2017
Received 28 March 2017