

УДК 624.138.1

О.А. МАКОВЕЦКИЙ¹, канд. техн. наук; С.С. ЗУЕВ², зам. ген. директора (s.zuev@inbox.ru),
М.А. ТИМОФЕЕВ², инженер, С.Ф. СЕЛЕТКОВ², инженер;
В.И. ТРАВУШ³, д-р техн. наук

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614019, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29)

² ОАО «Нью Граунд» (614081, Россия, Пермь, ул. Кронштадтская, 35)

³ Институт ГОРПРОЕКТ (105005, Россия, Москва, наб. Академика Туполева, 15)

Устройство системы вертикальных и горизонтальных геотехнических барьеров при строительстве высотных зданий на слабых грунтах

Приводится пример использования струйной цементации грунта для обеспечения геотехнической безопасности подземной части комплекса высотных зданий. Проведена оценка инженерно-геологических условий площадки строительства и обоснована необходимость применения системы вертикальных и горизонтальных геотехнических барьеров. Описаны принципы моделирования, конструирования и выполнения на строительной площадке жестких грунтобетонных элементов, результаты компьютерного моделирования в программе PLAXIS геотехнической ситуации. Анализ результатов компьютерного моделирования по различным сценариям показал обоснованность предлагаемого конструктивного решения.

Ключевые слова: струйная цементация, геотехнический барьер, компьютерное моделирование, подземное строительство, геотехническая безопасность.

O.A. MAKOVETSKY¹, Candidate of Sciences (Engineering); S.S. ZUEV², Deputy General Director (s.zuev@inbox.ru),

M.A. TIMOFEEV², Engineer, S.F. SELETKOV², Engineer; V.I. TRAVUSH³, Doctor of Sciences (Engineering)

¹ Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Avenue, 614019, Perm, Russian Federation)

² ОАО "New Ground" (35, Kronshtadskaya Street, 614081, Perm, Russian Federation)

³ Institute GORPROJECT (15, Akademika Tupoleva Emb., 105005, Moscow, Russian Federation)

Arrangement of System of Vertical and Horizontal Geotechnical Barriers when Constructing High-Rise Buildings on Weak Soils

An example of the use of jet grouting of soil for providing the geotechnical safety of the underground part of the high-rise buildings complex is presented. The assessment of engineering-geological conditions of the construction site is made; the need for using the system of vertical and horizontal geotechnical barriers is substantiated. Principles of simulation, designing and execution of rigid soil-concrete elements, results of the computer simulation of the geotechnical situation in program PLAXIS are described. The analysis of results of the computer simulation according to various scenarios shows the substantiation of the structural solution proposed.

Keywords: jet grouting, geotechnical barrier, computer simulation, underground construction, geotechnical safety.

Обоснование применения системы геотехнических барьеров. При строительстве комплексов уникальных высотных зданий основной задачей проектирования подземных частей является обеспечение геотехнической безопасности как самого здания, так и окружающей его существующей и перспективной застройки [1,2]. Для надежного решения этой задачи в случае расположения зданий на слабых грунтах предлагается система вертикальных и горизонтальных геотехнических барьеров, выделяющих подземное пространство рассматриваемого комплекса в замкнутую геотехническую систему с проектируемыми физико-механическими характеристиками. В этом случае минимизируется воздействие нового строительства на существующую геотехническую ситуацию [3]. В [4] показана оценка влияния такой системы на изменение гидрогеологической ситуации при строительстве комплекса высотных зданий в г. Уфе. В данной работе приводятся общие принципы устройства системы геотехнических барьеров и показывается пример выполнения системы при строительстве этого комплекса зданий.

Инженерно-геологические условия площадки строительства. В геоморфологическом отношении участок

приурочен к платообразной поверхности водораздела рек Белая и Уфа. Абсолютные отметки изменяются в пределах 189.5–193 м. Общий уклон рельефа на запад, в сторону долины р. Белая, расстояние до реки 1,2 км.

В геологическом строении участка до глубины 49 м принимают участие отложения четвертичного и пермского возраста.

Насыпной грунт (tQIV) представлен глинистым материалом с включением песка до 10% и песчано-гравийной смесью от черного до темно-коричневого цвета, маловлажный, слежавшийся. Образован в результате планировки территории в связи с ее обустройством, время отсыпки более 20 лет. Грунты завершили фазу самоуплотнения. Мощность насыпного грунта изменяется от 1 до 5,4 м.

Пермская система (P) Уфимский ярус (P1u*) Шешминский горизонт (P1ss):

– глина красновато-коричневая, желтовато-коричневая, аргиллитоподобная, с частыми прослоями песчаника серовато-коричневого, от мелкозернистого до тонкозернистого, различной степени выветрелости от крепких скальных разностей до состояния плотного песка. Мощность глины с прослоями от 1 до 25 м;

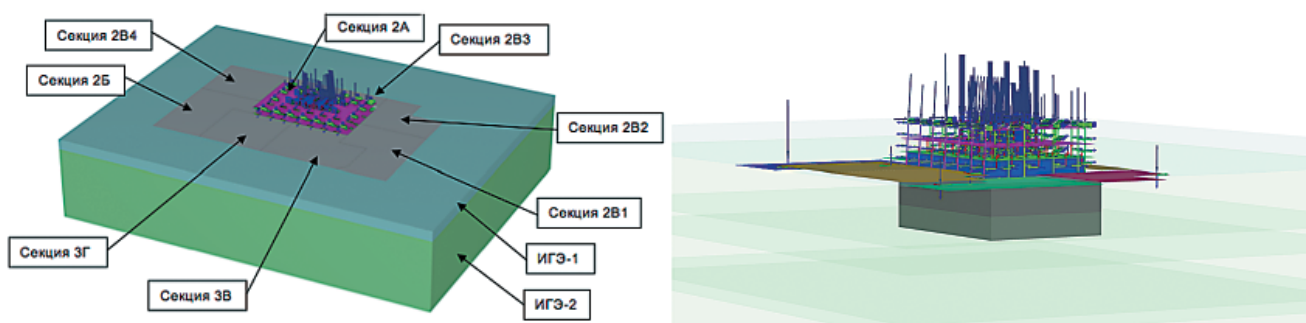


Рис. 1. Общий вид трехмерной конструктивной модели

– песчаник серовато-коричневый, зеленовато-серый, красновато-коричневый, в верхней части разреза мелкозернистый на глинистом цементе, с глубин 20–25 м до тонкозернистого, прослоями переходит в алевролит. Распространен в виде отдельных линз и прослоев мощностью от 1 до 7,1 м. Модуль общих деформаций грунтов в естественном состоянии, полученный по результатам штамповых испытаний, находится в диапазоне 30–35 МПа.

Объемно-планировочное и конструктивное решение комплекса зданий. Для оценки влияния геотехнической ситуации на механическую безопасность здания необходима оценка критических значений параметров безопасности основных несущих конструкций здания и степень их зависимости от характеристик основания. Эти параметры определяются конструктивным решением здания.

Жилищно-деловой комплекс состоит из делового центра и жилого здания: включает 18- и 42-этажные башни, объединенные 3–11-этажным стилобатом, и подземную парковку.

Конструктивная схема зданий каркасная в монолитном железобетонном исполнении. Фундаменты – монолитные железобетонные плиты толщиной 1000–2200 мм. Ядрами жесткости служат монолитные лестничные клетки и шахты лифтов. Пространственная жесткость здания обеспечивается совместной работой продольных и поперечных стен с дисками перекрытий. Секции разделены между собой деформационными осадочными швами.

Критическими параметрами проектирования подземной части являются: вертикальное перемещение (осадка) – 300 мм, крен высотной части – 0,002; относительная разность осадок фундаментной плиты – 0,003.

Проектирование и устройство системы геотехнических барьеров. Анализ инженерно-геологических условий площадки строительства показал, что основанием фундаментов служат неоднородные в плане и по глубине грунты уфимского яруса, представленные переслаиванием глин и песчаников разной степени выветрелости.

Проведенные предварительные расчеты высотного здания при проектном нагружении показали недопустимый крен здания 42-этажной башни при возведении фундамента на естественном грунте. Поэтому для обеспечения выполнения проектных параметров по осадкам и кренам фундаментов было предложено устройство в основании фундаментов разреженного горизонтального геотехнического барьера в виде «структурного геомассива» [5], слоя грунта, армированного жесткими грунтобетонными элементами, выполненными по технологии струйной цементации грунта. Для обеспечения эффективного модуля общих деформаций «структурного геомассива» 70 МПа было подобрано вертикальное армирование основания грунтобетонными элементами диаметром 1100 мм. Диаметр элементов определен грунтовыми условиями площадки и технологическими параметрами процесса цементации грунта. Требуемый эффективный модуль деформации основания здания обеспечивается расстановкой армирующих элементов в плане.

«Структурный геомассив» представим в виде идеальной сплошной среды, деформации которой линейны относительно внешних сил, если только внутренние напряжения не превышают предельных значений. Вместе с тем в сплошном теле равномерно рассеяны по объему неоднородности (грунтобетонные армирующие элементы) и расстояние между ними много больше их собственного размера. Эти неоднородности ответственны за необратимые деформации: на них концентрируются напряжения и происходит их релаксация во времени. Предлагаемая механическая модель «структурного геомассива» позволяет рассматривать классические задачи по определению напряжений и деформаций, возникающих под воздействием внешних сил, но не ограничиваться отысканием равновесных параметров, поскольку после приложения нагрузки в массиве продолжают необратимые деформации и релаксация напряжений на неоднородностях.

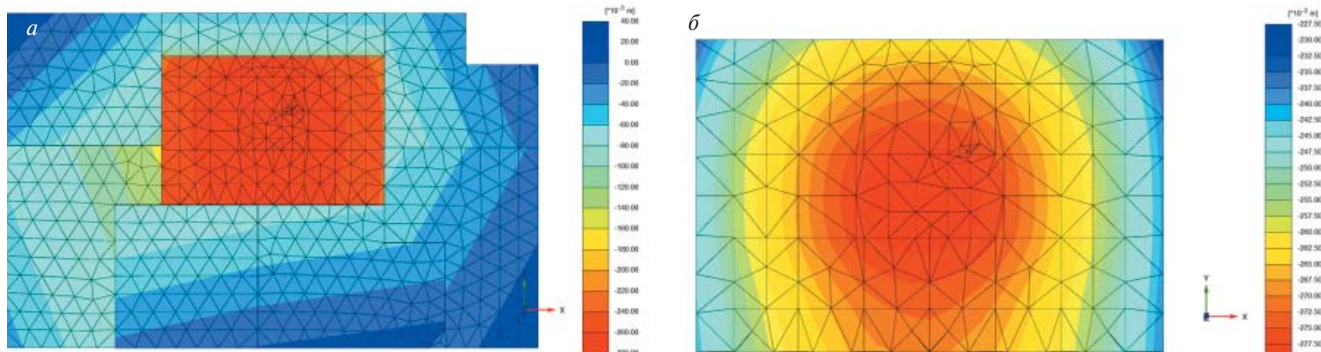


Рис. 2. Изополя вертикальных деформаций (осадок) всего комплекса зданий (а) и высотной секции (б)

Таблица 1

Параметры	Значения	
	На естествен. основании	«Геомассив»
Максимальный крен высотной секции комплекса	0,00259	0,0015
Максимальное значение относительной разности осадок фундамента ($\Delta s/L$)	0,00319	0,00113
Средняя осадка фундамента ((s))	357 мм	255 мм

В этом случае для описания поведения «структурного геомассива» можно использовать модели линейной теории упругости и модель ползучести. Для описания поведения искусственно улучшенного основания был использован подход, основанный на принципе гомогенизации гетерогенных структурно-неоднородных материалов, позволяющий учесть неоднородность композитов. «Структурный геомассив» рассматриваем как двумерную периодическую среду – волокнистый однонаправленный композит, представляющий собой периодическую систему параллельных цилиндрических волокон, погруженных в однородную матрицу. В «структурном геомассиве» грунтобетонные армирующие элементы имеют форму кругового цилиндра и ориентированы в одном направлении. Принимаем грунтобетонный армирующий элемент ($E_1=300$ МПа; $G_1=200$ МПа); грунт ($E_2=10$ МПа; $G_2=4$ МПа); коэффициент армирования 0,25 (расстояние в осях между армирующими элементами 2 м). Выделяем в нем ячейку периодичности – представительный объем с характерным размером неоднородности, в пределах которого свойства можно усреднить. Масштаб представительного объема должен быть значительно больше характерного размера неоднородности и мал по сравнению с характерным размером тела. При этих условиях гетерогенный материал можно идеализировать, рассматривая его как эквивалентный гомогенному материалу с усредненными на представительном объеме свойствами.

Экспериментальным подтверждением предлагаемого теоретического подхода являются результаты геодезических наблюдений за осадками высотных зданий, построенных на основании «структурного геомассива», хорошо согласующимися с результатами инженерных расчетов, выполненных с учетом эффективных деформационных характеристик основания.

После выполнения «структурного геомассива» был выполнен полевой контроль как отдельных составляющих элементов, так и всего геомассива в целом. Выполненные армирующие элементы имеют диаметр 1,1–1,2 м; прочность грунтобетона на сжатие $R_c=2-3$ МПа; модуль общих деформаций $E_{\sigma} = 300-350$ МПа.

Проведенные статические штамповые испытания (методика испытаний приведена в [6]) показали, что фактический эффективный модуль деформации «структурного геомассива» в интервале давлений 0,6–0,8 МПа находится в диапазоне 102–115 МПа и превышает требуемый, что позволяет значительно уменьшить осадки и крен фундамента.

Моделирование поведения горизонтального геотехнического барьера

Для оценки поведения системы «здание–фундамент–основание» было выполнено компьютерное моделирование в программном комплексе PLAXIS 3D (рис. 1).

Расчет выполнялся на три комбинации нагрузок: первая – собственный вес конструкций, полезная нагрузка, снеговая нагрузка; вторая – средняя составляющая ветровой

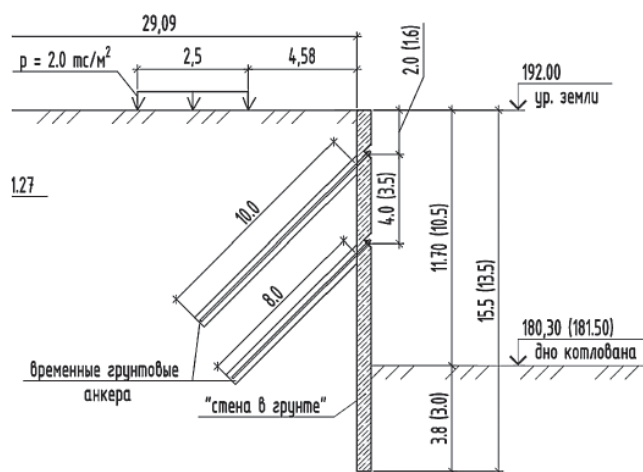


Рис. 3. Расчетная схема вертикального геотехнического барьера

нагрузки; третья – пульсационная составляющая ветровой нагрузки.

Необходимые значения параметров проектирования были достигнуты при глубине «структурного геомассива» – 15 м (с отм. 179,7 до отм. 164,7) и эффективном модуле общих деформаций – 70 МПа (рис. 2, табл. 1).

Проектирование и устройство вертикального геотехнического барьера. Подземная часть комплекса, включающая в себя автомобильную парковку, имеет глубину 9–11,7 м от поверхности грунта. Для обеспечения ее нормальной эксплуатации и минимизации влияния на прилегающую территорию и окружающую застройку по периметру подземной части был спроектирован и выполнен вертикальный геотехнический барьер. В конструкцию геотехнического барьера входят вертикальные ограждающие элементы (экран) и грунтовые анкеры, фиксирующие его положение в пространстве (рис. 3).

Основными параметрами проектирования барьера являются: для внутреннего пространства – обеспечение коэффициента устойчивости вертикальных поверхностей подземной части не ниже 1,2, горизонтальное перемещение не более 50 мм; для внешнего пространства – дополнительная осадка зданий окружающей застройки не более 30 мм, относительная разность осадок не более 0,001.

Конструкция экрана вертикального геотехнического барьера была принята в виде монолитной железобетонной панели, выполняемой по технологии «стена в грунте» и в виде стенки из двух рядов секущих жестких грунтобетонных элементов, выполненных по технологии струйной цементации грунта.

Требуемая конструктивная прочность и жесткость экрана обеспечиваются технологическими возможностями изготовления грунтобетона и устройством вертикального армирования. Конструктивное проектирование геотехнического барьера, выполненного из грунтоцементных элементов, сводится к расчету прочности и оценке надежности конструкции. Расчет на прочность, в свою очередь, включает в себя восприятие максимального изгибающего момента, по которому вычисляются напряжения, возникающие в грунтоцементном элементе.

При решении задачи о напряженно-деформированном состоянии геотехнического барьера полагаем, что грунтобетон не сопротивляется растяжению. В этом случае основным параметром конструирования экрана является период его вертикального армирования и сечение армирующей

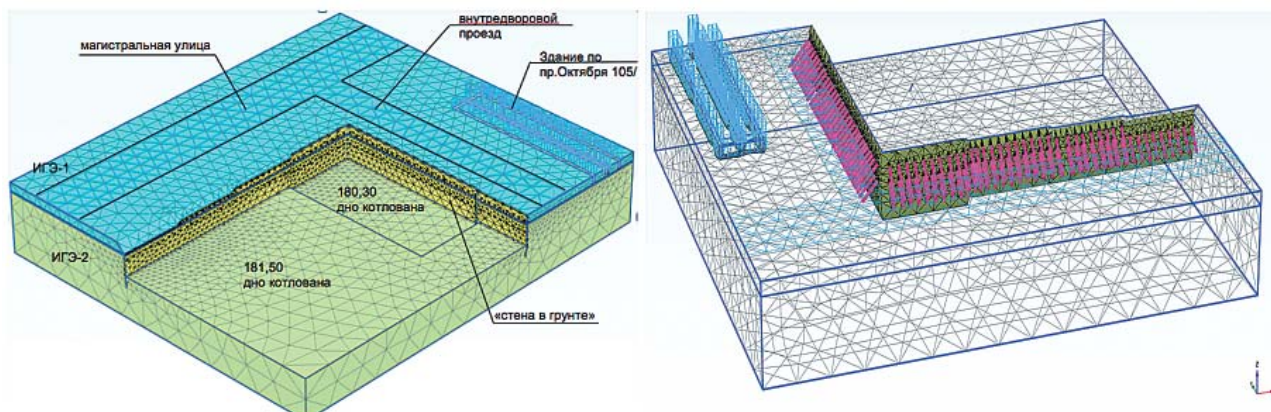


Рис. 4. Расчетная схема вертикального геотехнического барьера

конструкции. В качестве армирующей конструкции могут быть использованы: жесткие элементы – толстостенная труба, прокатный профиль; стандартные арматурные стержни, собранные в жесткий пакет, и комбинация этих элементов.

Для выполнения экрана были использованы грунтобетонные элементы, выполняемые по технологии Jet-1. Диаметр элемента 600 мм; расстояние в осях между элементами 450 мм; прочность грунтобетона при сжатии 3–3,5 МПа; модуль общих деформаций $E=400$ МПа. Оголовки элементов объединены для организации совместной работы железобетонной балкой. Общая ширина экрана из двух рядов элементов составила 900 мм, что обеспечило требуемую жесткость вертикального геотехнического барьера. Для восприятия изгибающих усилий экран армирован стальной трубой НКТ 89×9 с периодом армирования 450 мм. Воспринимаемый изгибающий момент экрана при этом составляет 49 тм.

Для реализации принятой расчетной схемы вертикального геотехнического барьера были разработаны грунтобетонные анкера оригинальной конструкции, выполняемые по технологии струйной цементации грунта. Экспериментальные зависимости, полученные в ходе опытных испытаний анкеров осевой выдергивающей нагрузкой, позволили выявить основные закономерности его работы. Для разработанной конструкции грунтобетонного стержневого анкера разработана методика определения его несущей способности по грунту и осевых перемещений. Эти зависимости были получены на основании анализа опытных данных по испытаниям анкеров осевой выдергивающей нагрузкой, которые показали, что при нагружении анкеров возникает эффект увеличения касательных напряжений по его боковой поверхности. В этом случае для реализации максимальной несущей способности анкера требуется его «взведение», предварительное натяжение на величину 60–65% от расчетной несущей способности по грунту.

В реализуемом проекте были применены анкера с якорной частью, выполненной по технологии Jet-1, диаметром 500 мм, с длиной 8–10 м. Тяга анкера представляет собой

оригинальную конструкцию, спроектированную таким образом, чтобы максимально реализовать передачу осевого усилия с металла на грунтобетон.

Проектная несущая способность такого анкера по грунту составляет 56 т. Пробные испытания грунтовых анкеров показали, что фактическая несущая способность анкеров составляет 65,6–75,4 т; приемочные испытания 100% анкеров показали, что проектная несущая способность анкеров реализуется при осевом перемещении 11–14 мм.

Моделирование работы вертикального геотехнического барьера. В ходе компьютерного моделирования рассматривалась вся последовательность устройства и эксплуатации подземной части, в ходе которой определялись конструктивные требования к геотехническому барьеру, оценивалось влияние на окружающую застройку, рассматривались нештатные геотехнические ситуации с выходом из строя одного анкера из группы. Моделирование выполнялось с использованием программного комплекса PLAXIS 3D, в объемной постановке задачи (рис. 4) с анализом отличий от результатов моделирования аналогичных конструкций в плоской постановке задачи [7, 8].

В результате моделирования были получены величины горизонтальных перемещений экрана барьера и возникающие при этом в нем внутренние усилия, вертикальные перемещения грунтового основания за пределами барьера, усилия в анкерных конструкциях. Некоторые результаты приведены на рис. 5 и в табл. 2.

Анализ применения системы вертикального и горизонтального геотехнических барьеров. В ходе выполнения проекта системы геотехнических барьеров были реализованы испытания, контролирующие качество выполнения и работоспособность ее отдельных компонентов.

Работоспособность системы в целом подтверждается проведением геотехнического мониторинга в период строительства и эксплуатации здания. В настоящее время система геотехнических барьеров полностью выполнена и производится строительство надземных частей комплекса.

На основании имеющихся на настоящем этапе данных мониторинга можно сделать следующие выводы:

- при экскавации подземной части подтверждена работоспособность системы вертикальных барьеров: обеспечена устойчивость бортов котлованов, дополнительные вертикальные перемещения зданий окружающей застройки находятся в допустимых пределах (0,4–0,6 см);
- при строительстве здания переменной этажности подтверждена эффективность применения разреженного

Таблица 2

Параметры	Значения
Максимальные горизонтальные перемещения	4,25 см
Дополнительные вертикальные перемещения грунтового основания	$S_{max} = 0,92\text{см}$, $\Delta s/L=0,00095$
Максимальный изгибающий момент в ограждении геотехнического барьера	43,6 тс*м
Максимальное усилие в грунтовых анкерах с учетом выхода из строя одного анкера	43,4 тс

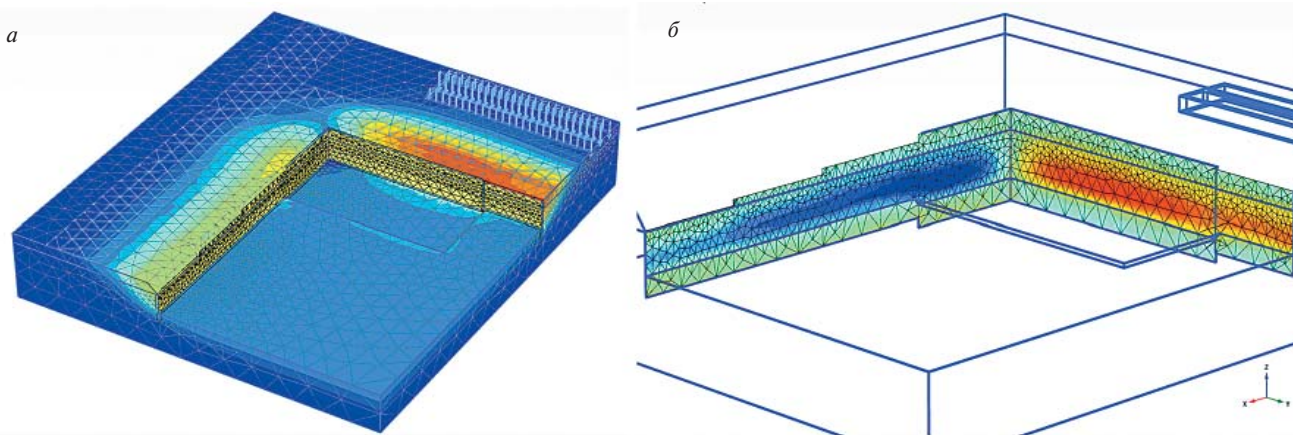


Рис. 5. Изополя общих деформаций вертикального геотехнического барьера (а) и изгибающих моментов в ограждающей конструкции (б)

горизонтального геотехнического барьера – «структурный геомассив»: крен высотной секции (0,0015), абсолютные осадки (9,5–14,5 см) и относительные разности осадок (0,0015–0,0024) фундаментов по сечениям пятна застройки находятся в допустимых пределах;

– изменение гидрогеологической ситуации минимальное, возникновение некоторого барражного эффекта не привело к подтоплению подземных частей существующей застройки и не вызвало развития в них дополнительных осадок.

В целом предлагаемый теоретический подход к моделированию и конструированию системы вертикальных и горизонтальных геотехнических барьеров, выполняемых с применением технологии струйной цементации грунта, можно считать экспериментально подтвержденным и позволяющим эффективно устраивать фундаменты высотных зданий в сложных инженерно-геологических условиях.

Список литературы

- Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Прогноз деформаций зданий вблизи котлованов в условиях плотной городской застройки г. Москвы // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2004. № 4. С. 17–21.
- Мангушев Р.А., Ошурков Н.В., Гутовский В.Э. Влияние трехуровневого подземного пространства на жилые здания окружающей застройки // *Жилищное строительство*. 2010. № 5. С. 23–27.
- Ильичев В.А., Готман Ю.А., Назаров В.П. Расчетное обоснование использования JET-grouting для снижения осадок существующего здания от строительства подземного многофункционального комплекса // *Вестник гражданских инженеров*. 2009. № 2 (19). С. 95–97.
- Зуев С.С., Тимофеев М.А., Селетков С.Ф., Маковецкий О.А. Анализ изменения гидрогеологической ситуации при устройстве геотехнического барьера комплекса «Смарт-Парк-Уфа» // *Жилищное строительство*. 2015. № 9. С. 16–21.
- Маковецкий О.А., Зуев С.С., Хусаинов И.И. Применение струйной цементации для устройства подземных частей комплексов // *Жилищное строительство*. 2013. № 9. С. 10–14.
- Маковецкий О.А., Зуев С.С. Обеспечение эксплуатационной надежности подземной части комплексов жилых зданий // *Жилищное строительство*. 2012. № 9. С. 38–41.
- Ильичев В.А., Готман Ю.А. Расчет грунтоцементного массива для снижения перемещений методом оптимального проектирования // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2011. № 4. С. 24–31.
- Пономарев А.Б. Геотехническое моделирование влияния глубокого котлована при реконструкции зданий // *Жилищное строительство*. 2014. № 9. С. 38–44.

References

- Ilyichev V.A., Kononov P. A., Nikiforova N. S. The forecast of deformations of buildings near ditches in the conditions of dense urban development of Moscow. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 2004. No. 4, pp. 17–21. (In Russian).
- Mangushev R. A., Oshurkov N. V., Gutovsky V. E. Influence of three-level underground space on residential buildings surrounding застройки. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2010. No. 5, pp. 23–27. (In Russian).
- Ilyichev V.A., Gotman Yu.A., Nazarov V.P. Settlement justification of use of JET-grouting for decrease a deposit of the existing building from construction underground multipurpose комплекса. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2009. No. 2 (19), pp. 95–97. (In Russian).
- Zuev S.S., Timofeev M.A., Seletkov S.F., Makovetsky O.A. The analysis of change of a hydrogeological situation at the device of a geotechnical barrier of the Smart Park Ufa complex. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 9, pp. 16–17. (In Russian).
- Makovetsky O.A., Zuev S.S., Khusainov I.I. Application of jet cementation for the device of underground parts of complexes. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013. No. 9, pp. 10–14. (In Russian).
- Makovetsky O.A., Zuev S.S. Ensuring operational reliability of underground part of complexes of residential buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 9, pp. 38–41. (In Russian).
- Ilyichev V.A., Gotman Yu.A. Calculation of the grouttsementnyy massif for decrease in movements by method of optimum design. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 2011. No. 4, pp. 24–31. (In Russian).
- Ponomarev A.B. Geotechnical modeling of influence of a deep ditch at reconstruction зданий. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 9 pp. 38–44. (In Russian).