УДК 624.15 DOI: 10.22227/1997–0935.2018.3.282-292

ОПЫТ УСТРОЙСТВА ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЮГА ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, Д.В. Волосюк[1], А.Н. Шуваев, Г.И. Рыбак
Тюменский индустриальный университет (ТИУ), 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38;
[1] «ГЕОФОНД+», 625001, г.Тюмень, ул. Ямская, д. 87а, оф. 416

Предмет исследования: фундаменты, обладающие свойствами активного регулирования взаимодействия с основанием, для жилых домов повышенной этажности в г. Тюмени.
Цели: оценка опыта использования опрессовки грунтового основания комбинированных фундаментов, внедрения ленточно-оболочечных фундаментов при строительстве зданий повышенной этажности (до 25 этажей или до 75 м) в условиях сильносжимаемых грунтовых оснований.
Материалы и методы: данные геотехнического мониторинга технического состояния жилых домов повышенной этажности в процессе их возведения и эксплуатации.
Результаты: результаты мониторинга 17-этажного жилого дома и трех 22-этажных жилых домов подтверждают высокую эффективность ленточно-оболочечных фундаментов, которая заключается в снижении осадки по отношению к плитным фундаментам, а также уменьшении стоимости и сроков строительства. Внедрение комбинированных ленточных свайных фундаментов с возможностью регулирования напряженно-деформированного состояния основания путем его опрессовки подтвердило эффективность применения разработанных решений, заключающихся в обеспечении эксплуатационной надежности объектов строительства, а также снижении материалоемкости и стоимости по отношению к традиционным плитно-свайным фундаментам.
Выводы: учитывая полученные результаты и общее активное развитие геотехники и геотехнических технологий, внедрение в практику фундаментов, обладающих свойством активного регулирования их взаимодействия с грунтовым основанием, позволяет значительно сократить затраты на возведение для зданий и сооружений повышенной этажности, особенно в условиях сильносжимаемых грунтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунтовое основание, напряженно-деформированное состояние, фундамент, опрессовка, здание повышенной этажности, технология строительства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пронозин Я.А., Степанов М.А., Волосюк Д.В., Шуваев А.Н., Рыбак Г.И. Опыт устройства фундаментов зданий повышенной этажности в условиях юга Тюменской области // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 3 (114). С. 282–292.

EXPERIENCE OF CONSTRUCTION OF HIGH-RISE BUILDING FOUNDATIONS IN THE CONDITIONS OF THE SOUTH OF TYUMEN REGION

Ya.A. Pronozin, M.A. Stepanov, D.V. Volosyuk[1], A.N. Shuvaev, G.I. Rybak
Industrial University of Tyumen (IUT), 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation;
[1] "GEOFOND+", 416 office, 87a Yamskaya st., Tyumen, 625001, Russian Federation

Subject: foundatons of high-rise buildings in Tyumen which possess the properties of active regulation of their interaction with the soil bed.
Research objectives: assessment of the experience of using soil bed pressing for combined footings, and application of strip-shell footings for construction of high-rise buildings (up to 25 floors or 75 m high) in the presence of highly compressible soil.
Materials and methods: geotechnical monitoring data of the technical condition of residential high-rise buildings during the construction process and in operation.
Results: the results of monitoring 17-storey residential building and three 22-storey residential buildings prove that the strip-shell foundation is highly efficient. Its efficiency consists in decrease of settlements as compared to slab foundations, and also reduction of cost and construction duration. Practical applications of combined strip-pile foundations with the possibility of regulation of stress-strain behavior of soil bed by its pressing confirmed the efficiency of the developed design solutions. This efficiency consists in assurance of operational reliability of objects of construction, and also decrease of material consumption and the cost as compared to traditional pile-slab foundations.
Conclusions: taking into account the obtained results and a general progress in geotechnical science and technologies, practical application of foundations which possess the properties of active regulation of their interaction with the soil bed allows us to decrease the cost associated with their construction for high-rise buildings, especially in the presence of highly compressible soil beds.

 © Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, Д.В. Волосюк, А.Н. Шуваев, Г.И. Рыбак

KEY WORDS: soil bed, stress-strain behavior, foundation, pressing, high-rise building, construction technology

FOR CITATION: Pronozin Ya.A., Stepanov M.A., Volosyuk D.V., Shuvaev A.N., Rybak G.I. Opyt ustroystva fundamentov zdaniy povyshennoy etazhnosti v usloviyakh yuga Tyumenskoy oblasti [Experience of construction of high-rise building foundations in the conditions of the south of Tyumen region]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 3 (114), pp. 282–292.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени ресурсный потенциал России на 90 % сконцентрирован в труднодоступных суровых климатических регионах Сибири и Дальнего Востока. Так, Западно-Сибирский регион остается «энергетическим сердцем» России, поскольку до 40 % валового дохода страны составляет деятельность нефтегазодобывающего комплекса только Тюменской области.

Тенденция развития данных регионов на ближайшие 50–100 лет, согласно долгосрочным прогнозам, положительная. Наряду с освоением недр планируется развитие городской, промышленной и транспортной инфраструктур. При этом современная градостроительная политика большинства крупных городов в области возведения зданий средней и повышенной этажности, различных социально-административных учреждений вынуждена выделять ранее незастроенные участки, расположенные в неблагоприятных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях. Промышленное строительство, активно развивающееся в нефте- и газоперерабатывающем секторах, также требует создания соответствующей социальной инфраструктуры. Обозначенные объекты зачастую характеризуются достаточно высокими нагрузками, передаваемыми на грунтовое основание, а также удаленностью от крупных развитых промышленных центров (баз стройиндустрии). Данные особенности приводят к значительному удорожанию и усложнению процесса строительства в целом.

Значительный вклад в ресурсо- и энергопотребление строительства вносит фундаментостроение как одно из наиболее сложных и недостаточно изученных направлений. В различных секторах строительства расход железобетона на фундаменты в среднем составляет 10…15 % от общего расхода на объект. Данный показатель может достигать половины общих затрат при возведении зданий на сильносжимаемых основаниях. При этом не уменьшается число отказов отдельных строительных элементов и объектов в целом, причинами которых зачастую является недостаточный уровень квалификации проектировщиков в области геотехники и фундментостоения. Таким образом, снижение ресурсоемкости при обеспечении эксплуатационной надежности с одновременным повышением эффективности геотехнических объектов является важной актуальной проблемой.

В сфере геотехнического строительства в настоящее время все интенсивнее распространяется тенденция к использованию систем с регулируемыми свойствами, в которых инженер — не пассивный участник процесса проектирования при рассчитанном напряженно-деформированном состоянии системы «грунтовое основание—фундамент—здание», он может активно участвовать в оптимизации процесса взаимодействия элементов данной системы. Так, преобразование свойств грунта основания разными методами, учет статической и конструктивной работы надземной части зданий и сооружений с использованием современных вычислительных средств позволяет в значительной степени регулировать их взаимодействие, тем самым существенно повышая строительные и экономические характеристики процесса [1–4].

Одним из направлений решения отмечаемой проблемы является совершенствование области фундаментостроения за счет разработки новых эффективных конструктивных форм, применения прогрессивных материалов и технологий, внедрения в практику строительства фундаментов, создающих возможность регулировать их взаимодействие с основанием, к которым можно отнести комбинированные ленточные свайные фундаменты с опрессовкой грунта, ленточно-оболочечные фундаменты, ленточно-мембранные фундаменты. Под регулированием в настоящей работе понимается возможность влияния на формирование напряженно-деформированного состояния грунтового основания, улучшающего его работу под нагрузкой.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Сложные инженерно-геологические условия занимают особое место в проблемах строительства в условиях Сибири и Дальнего Востока. Так, большая часть территории севера Западной Сибири заторфована, а значительная часть юга этого региона сложена слабыми водонасыщенными пылевато-глинистыми грунтами. Мощность слабых водонасыщенных грунтов с модулем деформации около 5 МПа составляет, как правило, от 8 до 15 м и более. Зачастую расчетное сопротивление R грунтов активной зоны основания не превышает 0,1 МПа.

При этом слабые слои пылевато-глинистых грунтов могут с большой частотой чередоваться с достаточно прочными, например песчаными, слоями или подстилать прочное основание на определенной глубине.

Наличие таких грунтов в основании многоэтажных зданий (до 25 этажей или до 75 м), возведение которых сегодня получило наибольшее распространение на юге Тюменской области, вызывает ряд трудностей как проектного, так и производственного характера. А в сложившейся практике проектирования в большинстве случаев основным критерием применимости того или иного вида фундаментов является осадка и ее неравномерность в плане[1].

Для соблюдения нормативных требований для зданий повышенной этажности на сильносжимаемых основаниях зачастую применяются комбинированные свайно-плитные фундаменты (КСПФ) [5–9], в том числе и на основе составных забивных свай длиной до 16 м и более, а также свай, выполненных по буровым технологиям. Использование таких свай, несмотря на их высокую стоимость, обусловлено необходимостью передачи нагрузки на более плотные и прочные грунты. Под сильносжимаемым основанием в данной работе подразумевается напластование грунтов, средневзвешенный модуль деформации по глубине сжимаемой толщи которых не превышает 10 МПа.

При этом задачу обеспечения требований норм при строительстве многоэтажных зданий на сильносжимаемых основаниях с использованием традиционных технологий и существующей номенклатуры свай заводской готовности можно решить искусственным «наведенным» изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) грунта в процессе строительства [1, 10–12]. Искусственное изменение НДС основания [4, 13–17] позволяет подготовить грунт к восприятию нагрузки с минимальными деформациями и активно регулировать взаимодействие системы «основание—фундамент—здание». Это дает возможность существенно снизить осадку здания, повысить надежность строительства и сократить затраты на выполнение работ нулевого цикла.

Одним из эффективных способов выполнения комбинированных фундаментов, позволяющих создавать «наведенное» НДС в грунтовом массиве при строительстве, является использование комбинированного ленточного свайного фундамента с опрессовкой основания (КЛСФ) (рис. 1). КЛСФ состоит из плит переменной жесткости *1*, ограниченных перекрестно расположенными ростверками *2*, объединяющими несущие сваи *3*. В процессе нагнетания в минеральное основание *4* через перфорированные инъекторы *5* цементного раствора (опрессовка) происходит включение в работу железобетонных оболочек *6* и основания фундамента *7*. При этом оболочка натягивается, а основание испытывает гидростатическое давление, за счет чего происходит преднапряжение грунтового массива. Эластичная герметичная мембрана *8* закреплена по периметру к опалубке ростверков и позволяет контролировать распространение нагнетаемого раствора. Подъем оболочки в области минерального искусственного основания при опрессовке ограничен закреплением ее в ленточных ростверках КЛСФ, которые в вертикальной плоскости заанкерены сваями или загружены вышележащими этажами. После твердения нагнетаемого раствора образуется плита переменной жесткости.

Использование в пролетных частях КЛСФ пологих цилиндрических оболочек, обращенных выпуклостью вверх, обусловлено их конструктивными достоинствами: в процессе опрессовки они работают преимущественно на центральное растяжение и могут формировать равнонапряженное состояние по длине оболочки; а также технологическими и экономическими факторами: это невысокая сложность выполнения работ, существенно меньшее ко-

[1] СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*

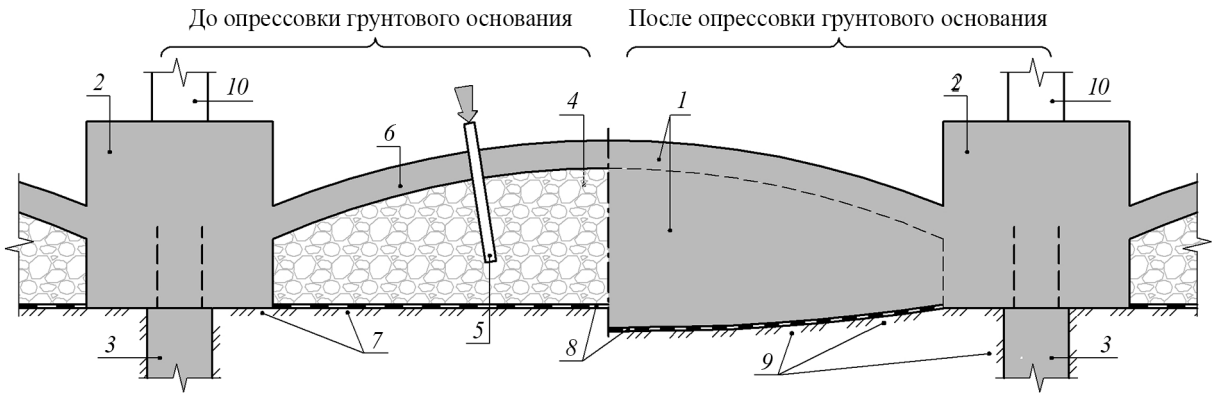


Рис. 1. Пролетная часть КЛСФ до и после опрессовки: *1* — плита переменной жесткости; *2* — ленточные ростверки; *3* — сваи; *4* — искусственное минеральное основание; *5* — инъекторы; *6* — оболочка; *7* — грунт естественного основания; *8* — герметичная эластичная мембрана; *9* — уплотненное основание; *10* — стены и колонны

личество бетона и арматуры и, как следствие, меньшая стоимость.

В процессе опрессовки основания происходит улучшение строительных свойств грунтов в пролетной части КЛСФ [16]. При этом происходит как увеличение прочностных и деформационных свойств грунта основания, так и формирование напряженно-деформированного состояния, которое может существенно отличаться от исходного [1, 4, 10, 11, 14]. В основании возникают избыточные остаточные напряжения [10], грунты уплотняются и упрочняются, при этом на начальной стадии эксплуатационной нагрузки грунтовое основание работает в соответствии с модулем разгрузки E_e. Также боковое давление, создающее дополнительное обжатие свай, за счет опрессовки грунта позволяет увеличить их несущую способность и, соответственно, уменьшить их количество или длину. Так, в работе [17] численно и аналитически выявлено повышение несущей способности свай на 5…20 % в слабых пылевато-глинистых грунтах, что позволяет в определенных случаях использовать преимущественно типовые односекционные сваи заводской готовности длиной до 12 м взамен технологически более сложных и дорогостоящих составных и буровых свай.

В случаях расположения значительной от уровня заложения фундаментов толщи грунтов со значением расчетного сопротивления R_0 = 200…350 кПа и модуля деформации E = 10…20 МПа или недостаточной мощности плотных грунтов несущего слоя, подстилаемых сильносжимаемыми пылевато-глинистыми грунтами с модулем деформации E = 5…10 МПа, эффективным становится применение ленточно-оболочечных фундаментов (ЛОФ), к свойствам которых можно отнести возможность активного регулирования взаимодействия с грунтовым основанием (рис. 2).

Элементы (конструкции) ЛОФ различаются по характеру работы и по жесткости. Так, продольные и поперечные ленточные части являются опорами для вертикальных несущих элементов, могут воспринимать случайные эксцентриситеты от нагрузки [5, 19–21]. Крайние ленты по наружному контуру фундамента дополнительно формируют необходимые консольные уширения. В пролетной части расположены гибкие элементы, которые объединяют поперечные ленточные части в сплошной в плане ЛОФ. Элементы пролетной части передают определенную проектом (заданную) часть полной нагрузки от сооружения на основание. В качестве гибкого элемента рационально применять оболочку, обращенную выпуклостью вверх, которая по всей длине работает преимущественно на растяжение. Криволинейная в пролетной части ЛОФ поверхность нагружения способствует созданию дополнительных горизонтальных напряжений в верхней зоне основания, что приводит к увеличению жесткости грунта [2, 22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ЛОФ были запроектированы и выполнены при возведении таких жилых домов города Тюмени, как ГП-8 в составе ЖК «Ямальский-2» (17-этажный двухсекционный монолитно-каркасный, габаритные размеры в осях фундаментов 45,11 × 14,51 м) и ГП-1…ГП-3 в составе ЖК «Акварель» (22-этажные монолитно-каркасные, габаритные размеры в осях фундаментов 25,75 × 26,0 м). План ЛОФ для ГП-8 представлен на рис. 3.

Выполненные на указанных объектах монолитные ЛОФ состояли из жесткой ленточной части, расположенной под вертикальными несущими элементами, и оболочечной части, сформированной в пролетах между участками нагружения. Толщина лент составила 1,2 м, оболочек 0,2 м. Оболочечная часть армирована однослойной сеткой (класс А500С), для бетонирования принят тяжелый бетон класса В25, В30.

Согласно данным инженерно-геологических изысканий (табл.) на участке под ГП-8 плотные грунты залегают на глубину до 9,5 м, а ниже — на

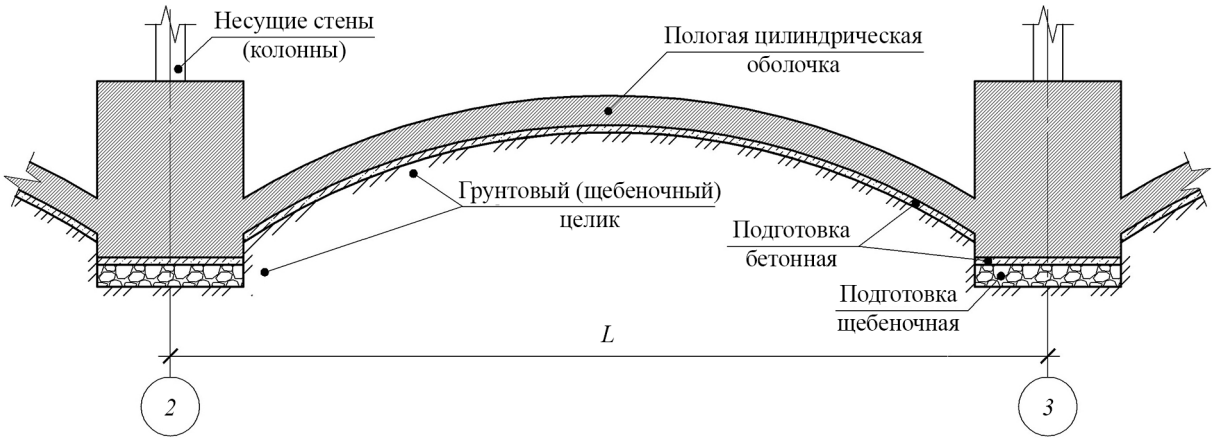


Рис. 2. Пролетная часть ЛОФ

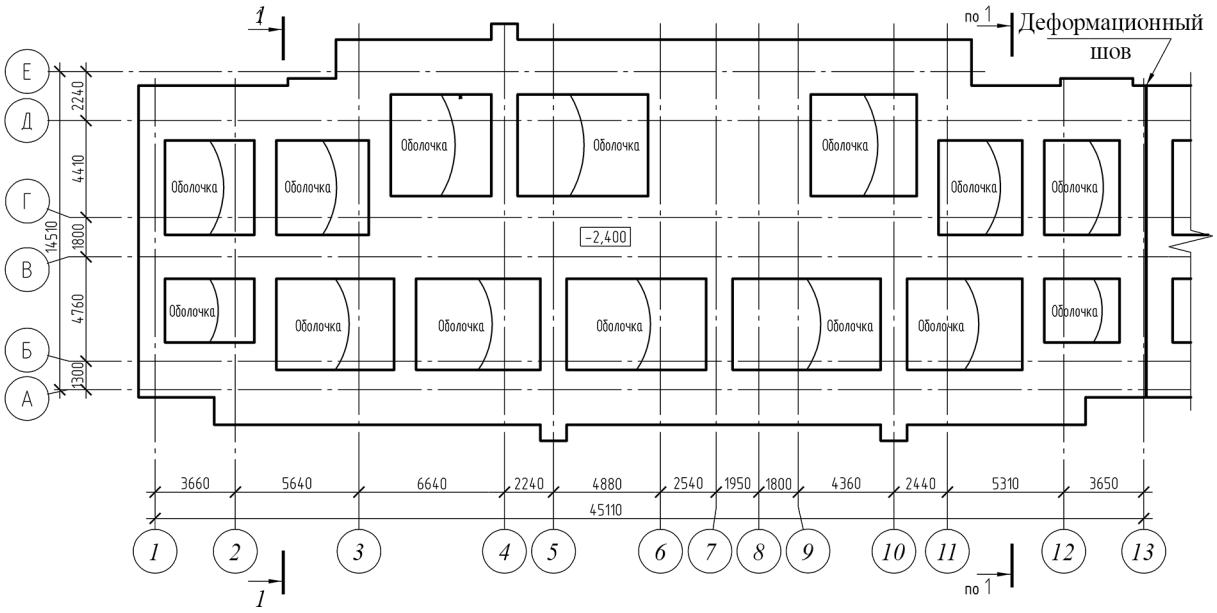


Рис. 3. План ЛОФ под первую секцию ГП-8 (ЖК «Ямальский-2»)

Физико-механические характеристики инженерно-геологических элементов под ГП-8

Описание грунта	Глубина H, м	Удельный вес γ_I, кН/м^3	Угол φ_{II}, град	Прочность c_{II}, кПа	Модуль Юнга E, МПа
Суглинок (тяжелый, твердый)	0…4,0	20,5	19,38	26,3	20,56
Песок (мелкий, средней степени водонасыщения)	4,0…4,5	19,0	34,68	0,0	27,03
Супесь (пластичная)	4,5…6,7	19,3	23,6	12,8	15,2
Песок (мелкий, насыщенный водой)	6,7…9,5	19,3	33,99	0,0	33,32
Суглинок (текучепластичный, ожелезненный)	9,5…15,0	17,8	15,0	23,0	5,0
Суглинок (тугопластичный, опесчаненный)	15,0…30,0	17,7	14,67	34,0	7,58

глубину более 30 м, распространены слабые пылевато-глинистые грунты.

Устройство ЛОФ на всех объектах осуществлялось поточным способом и включало в себя такие технологические процессы, как земляные, подготовительные, арматурные, опалубочные и бетонные работы.

Комбинированные ленточные свайные фундаменты (КЛСФ) были запроектированы и выполнены при возведении 22-этажных монолитно-каркасных жилых домов в составе ЖК «Соседи» города Тюмени. Согласно разработанному проекту, ленточные ростверки жестко соединены с забивными железобетонными сваями, расположенными в шахматном порядке с шагом 3d. Под периметральными ростверками выполнены сваи длиной 10 м (92 шт.), а под центральными ростверками — сваи длиной 12 м (128 шт.). В пролетных частях КЛСФ по щебеночным подушкам выполнены железобетонные цилиндрические оболочки (t = 150 мм) с однослойным армированием, после опрессовки вместе с искусственным щебеночным основанием трансформирующиеся в плиты переменной жесткости.

Укрупненная технологическая последовательность устройства КЛСФ включает два последовательных этапа. На *первом этапе* погружались сваи, были выполнены ростверки и надфундаментные монолитные конструкции подвального этажа для формирования совместно с фундаментом и плитой перекрытия подвала жесткой коробчатой конструкции. Состав технологических процессов первого этапа включал земляные и свайные работы, арматурные, опалубочные и бетонные работы, выполненных также поточным методом с технологической увязкой строительных процессов.

На *втором этапе* выполнялось регулирование НДС основания путем его опрессовки, которая заключается в однократном нагнетании в щебеночную подушку цементного раствора. Состав технологических процессов второго этапа включал в себя подготовительные работы: подготовка оборудования (инъекционные комплексы, смесители, насосы, манометры, тара для воды) и складирование компонентов растворной смеси (цемент, бентонитовый глинопорошок, жидкое стекло), а также работы по нагнетанию раствора через перфорированные инъекторы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью обеспечения безопасности строительства и эксплуатационной надежности объектов на всех этапах возведения выполнялся геотехнический мониторинг. Организация геомониторинга основывалась на необходимости осуществления визуально-инструментальных наблюдений за ЛОФ (КЛСФ) и конструкциями подвала, а также на выполнении нивелирования вертикальных перемещений марок. Внешние осадочные марки на всех зданиях устанавливались периметрально с торцов перекрытия подвала. Внутренние осадочные марки устанавливались внутри подвала на внутренних и внешних стенах.

Для дома ГП-8 (ЖК «Ямальский-2») наблюдения осуществлялись начиная с устройства стен подвала (середина ноября 2012 г). В середине декабря 2013 г., когда через фундамент на основание передавалась нагрузка, соответствующая среднему давлению 250 кПа, возведение дома ГП-8 было завершено. График развития средней осадки ЛОФ во времени приведен на рис. 4.

На конец сентября 2014 г. средняя осадка ЛОФ составила 47,3 мм, при этом максимальные деформации развились в зоне деформационного шва между секциями, а минимальные деформации — у торцовых наружных стен. Максимальная неравномерность осадки составила $\Delta s/L$ = 0,00035, что значительно меньше предельно допустимой нормами величины.

Разработанные решения позволили снизить материалоемкость и сметную стоимость устройства одного ЛОФ на 40…50 %, трудоемкость — на 35…45 % по отношению к свайно-плитному, примененному в качестве фундаментов на соседних ГП.

В начале октября 2014 г. было выполнено бетонирование фундамента ГП-1.1 на ЖК «Акварель». Степень завершенности строительства в декабре 2015 г. составляла около 90 % исходя из 100%-ной величины нормативной нагрузки, соответствующей $p_{ср}$ = 230 кПа. Согласно алгоритму расчета [2], разработанному авторами, значение расчетной конечной деформации (осадки) ЛОФ для рассматриваемых объектов находится в пределах 125…140 мм, тогда как, согласно СП 22.13330.2011, допустимо значение 150 мм.

При 90%-ной нормативной нагрузке средняя осадка составила 71,4 мм, а максимальная неравномерность осадки составляет $\Delta s/L$ = 0,00063. Размещение периметральных осадочных марок на ГП-1.1 приведено на графике развития осадки во времени, представленном на рис. 5.

Учитывая результаты мониторинга, особенности напластования грунтов в основании на данной площадке следует прогнозировать величину конечной осадки в пределах 11…13 см, что с точностью до 10…15 % соответствует расчетным данным. Разработанные решения позволили снизить материалоемкость и сметную стоимость устройства одного ЛОФ на 35…45 %, трудоемкость — на 30…40 % по отношению к свайно-плитному фундаменту на основе забивных свай, предлагаемому сторонними проектными организациями.

Рассмотрим результаты внедрения комбинированных ленточных свайных фундаментов с опрессовкой основания на примере данных геотехнического мониторинга ГП-1.2. ЖК «Соседи». В геоинформационной системе GS Surfer 10 были построены изолинии вертикальных перемещений марок (рис. 6), соответствующих конечному этапу нагружения (строительства здания). Для наглядности изолинии осадок совмещены с планом подвала.

В настоящее время жилые дома, возведенные на комбинированных ленточных свайных фундаментах с опрессовкой основания, находятся в экс-

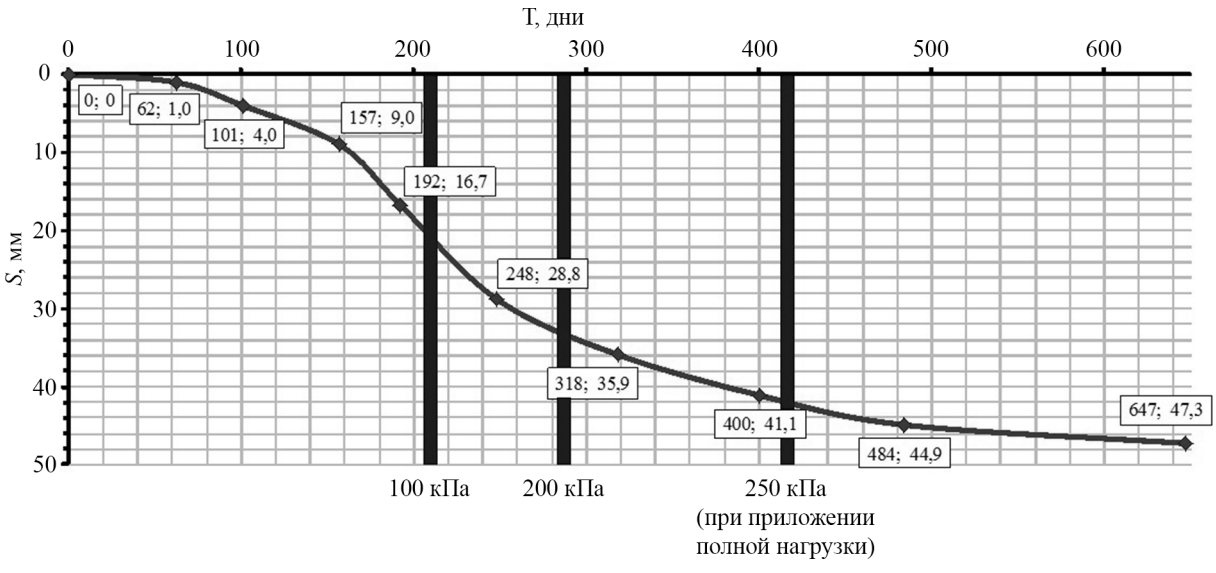


Рис. 4. График развития общей средней осадки ЛОФ во времени (ГП-8, ЖК «Ямальский-2»)

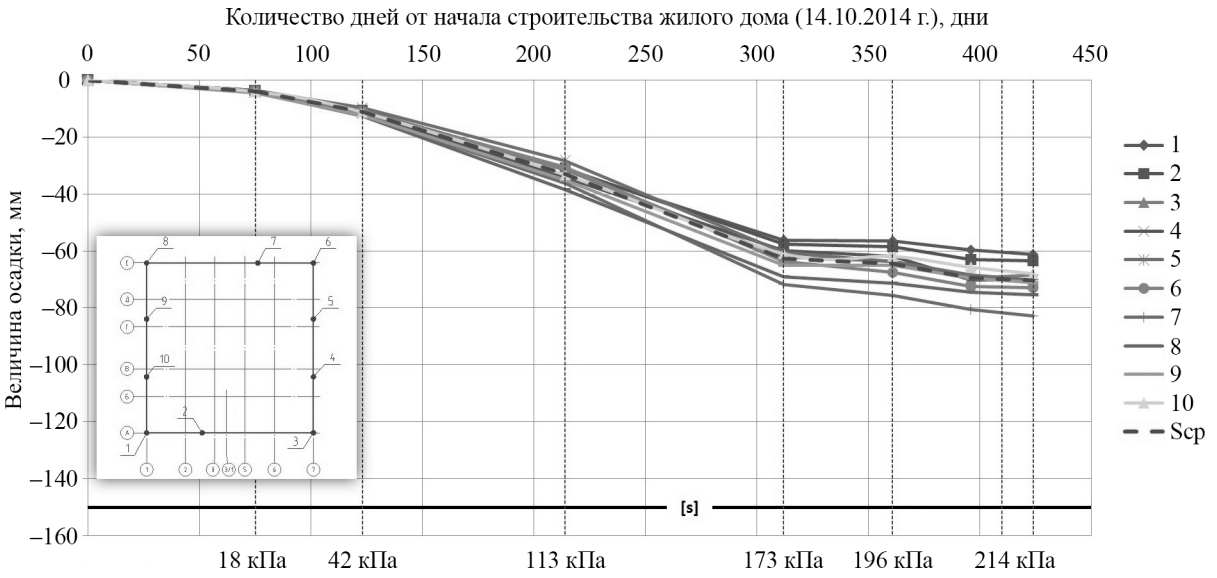


Рис. 5. График развития осадки ГП-1.1 во времени

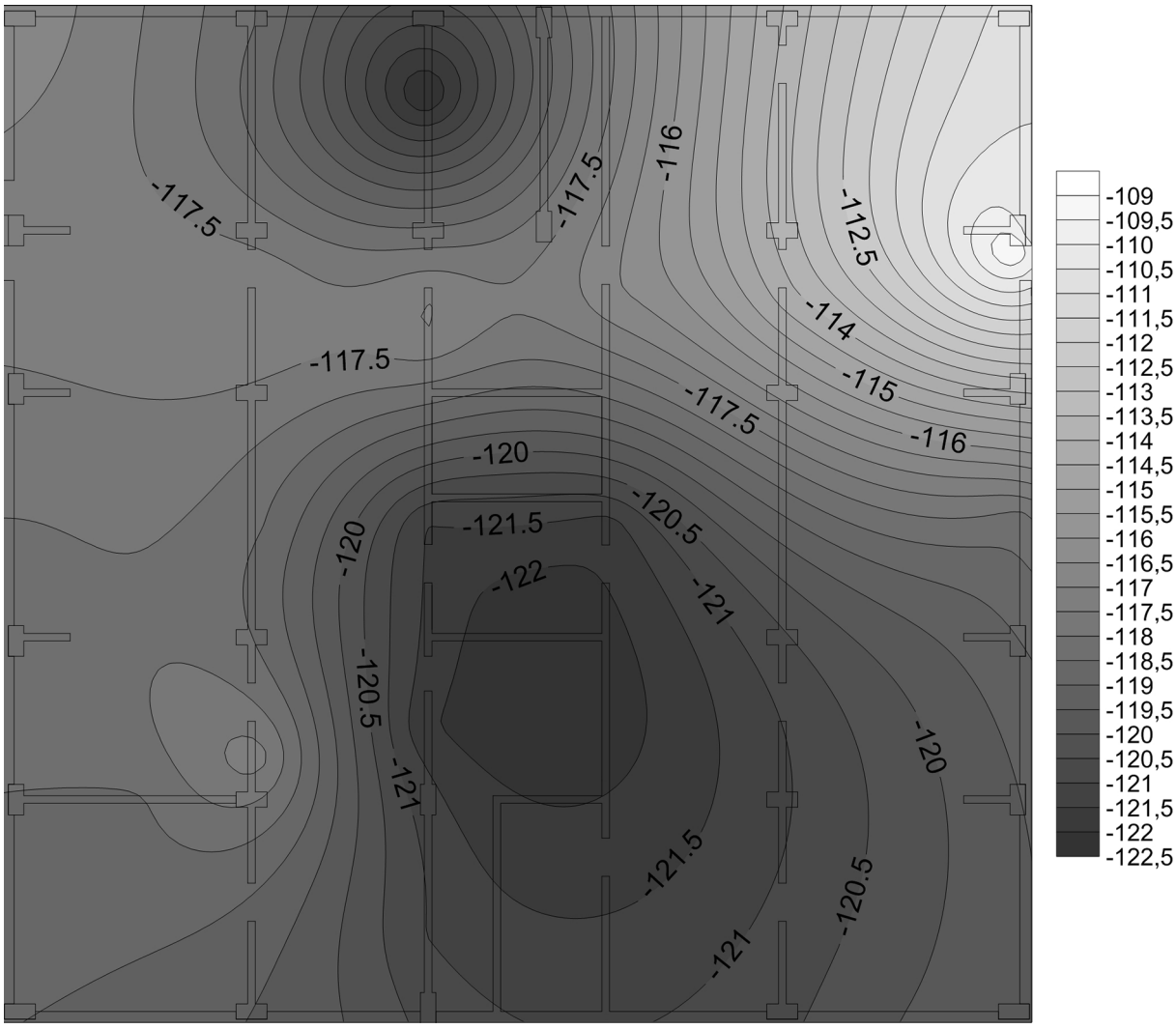


Рис. 6. Изолинии осадок КЛСФ жилого дома ГП-1.2 на конечном этапе строительства (количество дней от начала строительства 497 сут; нагрузка на основание 90 %; среднее давление на основание 275 кПа; средняя осадка 113 мм)

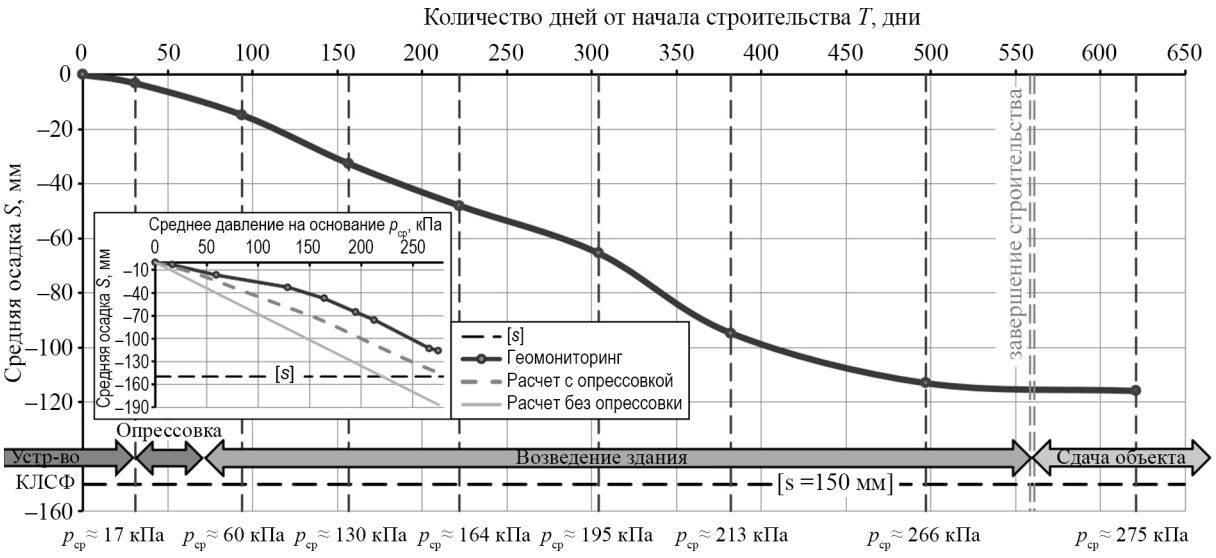


Рис. 7. График развития средней осадки во времени ГП-1.2 по данным геомониторинга

плуатации. Использование опрессовки грунтового основания позволяет на 20 % и более уменьшать конечную осадку [18], тем самым существенно расширяя область применения комбинированных фундаментов с использованием свай заводской готовности для многоэтажных зданий, на сильносжимаемых грунтовых основаниях.

Выполнение геомониторинга в процессе строительства и эксплуатации позволяет обеспечивать контроль за безопасностью и эксплуатационную надежностью конструкций здания на всех этапах существования объектов. В процессе строительства максимальная осадка зафиксирована в центральной зоне фундамента — в месте расположения ядра жесткости (лифтовых шахт), минимальная — по внешним стенам. Включение КЛСФ в совместную работу со стенами подвала и его перекрытием позволило создать жесткую коробчатую структуру, способствующую перераспределению внутренних усилий и выравниванию деформации всего сооружения в целом [3].

На начало декабря 2015 г. строительство зданий завершено, среднее давление на основание 275 кПа. Деформации оснований обоих домов развивались равномерно и в настоящее время стабилизировались, средняя осадка, согласно данным геомониторинга, составила 11,8 см (рис. 7), максимальная относительная разность осадок значительно меньше предельной и составляет 0,00075.

Согласно расчетным данным, подтвержденным результатами геотехнического мониторинга, опрессовка основания позволила снизить среднюю осадку КЛСФ на 20…25 %. Разработанные технические решения позволили снизить материалоемкость и сметную стоимость устройства одного КЛСФ на 30…40 %, трудоемкость — на 40 % по отношению к свайно-плитному фундаменту на основе составных железобетонных свай, предложенных заказчику ранее сторонней организацией.

ВЫВОДЫ

При значительной от поверхности мощности достаточно слабых пылевато-глинистых грунтов, характерных для четвертичных отложений, а также их переслаивании с плотными грунтами для зданий средней и повышенной этажности предпочтительным решением могут являться ЛОФ, обеспечивающие активное регулирование НДС системы «фундамент—основание». При большой мощности слабых грунтов эффективным решением является использование КЛСФ с возможностью регулирования НДС основания, выполняемого за счет опрессовки основания. Полученные результаты геотехнического мониторинга подтверждают высокую эффективность их применения.

С учетом полученных результатов и общего активного развития геотехники дальнейшее внедрение в практику фундаментов, геотехнологий и способов организации работ, позволяющих активно регулировать их взаимодействие с основанием, позволяет значительно сократить материальные и трудовые затраты на их возведение для зданий повышенной этажности, особенно в условиях сильносжимаемых грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А.* Новые способы геотехнического проектирования и строительства. М. : Изд-во АСВ, 2015. 217 с.

2. *Пронозин Я.А.* Взаимодействие ленточно-оболочечных фундаментов с сильносжимаемым грунтовым основанием: дис. … д-ра техн. наук. Тюмень, 2016. 368 с.

3. *Пронозин Я.А., Степанов М.А., Волосюк Д.В.* Регулирование напряженно-деформированного состояния основания комбинированных ленточно-свайных фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 3. С. 16–20.

4. *Брандль Х.* Предварительное нагружение свай для уменьшения неравномерных осадок здания // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2005. № 9. С. 118–131.

5. *Готман Н.З.* Расчет свайно-плитных фундаментов из забивных свай с учетом образования карстового провала : дис. … д-ра техн. наук. М., 2004. 348 с.

6. *Hanish Y., Kattsenbah R., Konig G.* Kombinierte Pfal-Plattengründung. Ernst & Zon, 2002.

7. *Poulos H.G.* Piled-raft foundations — design and applications // Geotechnique. 2001. Vol. 50. No. 2. Pp. 95–113.

8. *El-Mossallamy Y.* Economic Design of Piled Raft Foundations for high-rise buildings and bridge foundations // International Conference on Geotechnical Engineering, Beirut, May 19–22, 2004. Beirut, 2004.

9. *Luts B., Morauf D., Shefler Y.* Kombinierte Pfal-Plattengründungen — Modellferzuhe und Berechnungen // FGeoBAU. 2010. No. 1. Pp. 107–115.

10. *Тер-Мартиросян З.Г.* Напряженно-деформированное состояние анизотропного водонасыщенного основания // Вестник МГСУ. 2006. № 1. С. 28–37.

11. *Рубцов О.И.* Преобразование слабых оснований по технологии роторного уплотнения грунтов : автореф. дис. … канд. техн. наук. М., 2014. 25 с.

12. *Шулятьев О.А.* Фундаменты высотных зданий // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 4. С. 203–245.

13. *Степанов М.А.* Влияние опрессовки грунтового основания на формирование НДС основания ленточных свайных фундаментов, объединенных плитами переменной жесткости // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. Режим доступа: http://www.science-education.ru/119-15185.

14. *Тер-Мартиросян З.Г., Абдул Малек А.С.М.* Напряженно-деформированное состояние преобразованного основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 6. С. 8–11.

15. *Чунюк Д.Ю., Ярных В.Ф.* Изменение напряженно-деформированного состояние массива грунта основания при учете поэтапности возведения зданий и неравномерности загружения фундаментов как фактор геотехнического риска в строительстве // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 4 (35). Ст. 9. Режим доступа: http://www.vestnik.vgasu.ru.

16. *Пронозин Я.А., Степанов М.А., Волосюк Д.В.* Оценка физико-механических свойств зон предварительно опрессованного грунта основания комбинированных ленточных свайных фундаментов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2015. № 2. С. 64–73.

17. *Ter-Martirosyan Z.G., Pronozin Ya.A., Stepanov M.A.* Feasibility of pile-shell foundations with prestressed soil beds // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2012. С. 1–5.

18. *Степанов М.А.* Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием : дис. … канд. техн. наук. Тюмень, 2015. 189 с.

19. *Богомолов А.Н., Ушаков А.Н., Богомолова О.А.* О распределении напряжений в основании наклонного абсолютно жесткого штампа при учете трения по контакту «штамп—грунт» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2014. № 4. С. 7–12.

20. *Kiselev N., Pronozin Y., Stepanov M. et al.* Theoretical and experimental substantiation for applicability of a damping layer in a foundation slab placed on soil bed // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 73: XV International Conference «Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016». 01017.

21. *Пронозин Я.А., Епифанцева Л.Р., Степанов М.А., Чикишев В.М.* Геотехнический мониторинг строительства жилого дома на ленточно-оболочечных фундаментах в городе Тюмени // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 59–66.

22. *Abdel-Rahman M.* Geotechnical behavior of shell foundations: philosophy doctor thesis. Concordia University, Montreal, Canada, 1996.

Поступила в редакцию 2 октября 2017 г.
Принята в доработанном виде 18 декабря 2017 г.
Одобрена для публикации 29 февраля 2018 г.

Об авторах: **Пронозин Яков Александрович** — доктор технических наук, доцент, проректор по научной деятельности, **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38, pronozinja@tyuiu.ru;

Степанов Максим Андреевич — кандидат технических наук, доцент кафедры геотехники, **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38, maxim_stepanov@inbox.ru;

Волосюк Денис Викторович — инженер, **ООО «ГЕОФОНД+»**, 625001, г. Тюмень, ул. Ямская, д. 87а, оф. 416, volosyuk_dv@mail.ru;

Шуваев Анатолий Николаевич — доктор технических наук, профессор, научный сотрудник кафедры геотехники, **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38, anshuvaev46@mail.ru;

Рыбак Геннадий Игоревич — аспирант кафедры геотехники, **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**, 625000, г.Тюмень, ул. Володарского, д. 38, gennadii.rybak@yandex.ru.

REFERENCES

1. Petrukhin V.P., Shulyat'ev O.A., Mozgacheva O.A. *Novye sposoby geotekhnicheskogo proektirovaniya i stroitel'stv*a [New ways of geotechnical design and construction]. Moscow, ASV Publ., 2015. 217 p. (In Russian)

2. Pronozin Ya.A. *Vzaimodeystvie lentochno-obolochechnykh fundamentov s sil'noszhimaemym gruntovym osnovaniem: diss. ... dokt. tekhn. nauk* [Interaction of band-shell foundations with a highly compressible ground base: thesis of doctor of technical sciences]. Tyumen', 2016. 368 p. (In Russian)

3. Pronozin Ya.A., Stepanov M.A., Volosyuk D.V. Regulirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovaniya kombinirovannykh lentochno-svaynykh fundamentov [Regulation of the stress-strain state of the base of combined belt-pile foundations]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 2016, no. 3, pp. 16–20. (In Russian)

4. Brandl' Kh. Predvaritel'noe nagruzhenie svay dlya umen'sheniya neravnomernykh osadok zdaniya [Preloading piles to reduce the uneven building sludge]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Reconstruction of Cities and Geotechnical Construction]. 2005, no. 9, pp. 118–131. (In Russian)

5. Gotman N.Z. *Raschet svayno-plitnykh fundamentov iz zabivnykh svay s uchetom obrazovaniya karstovogo provala: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Calculation of pile-plate foundations from driven piles taking into account the formation of a karst fault: thesis of doctor of technical sciences]. Moscow, 2004. 348 p. (In Russian)

6. Hanish Y., Kattsenbah R., Konig G. *Kombinierte Pfal-Plattengründung* [Combined pile-plate foundation]. Ernst & Zon, 2002. (In German)

7. Poulos H.G. Piled-raft foundations — design and applications. *Geotechnique*. 2001, vol. 50, no. 2, pp. 95–113.

8. El-Mossallamy Y. Economic design of piled raft foundations for high-rise buildings and bridge foundations. *International Conference on Geotechnical Engineering, Beirut, May 19–22, 2004*. Beirut, 2004.

9. Luts B., Morauf D., Shefler Y. Kombinierte Pfal-Plattengründungen — Modellverzuche und Berechnungen [Combined pile-plate foundations. Model experiments and calculations]. *FGeoBAU*. 2010, no. 1, pp. 107–115. (In German)

10. Ter-Martirosyan Z.G. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie anizotropnogo vodonasyshchennogo osnovaniya [Stress-strain state of an anisotropic water-saturated base]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2006, no. 1, pp. 28–37. (In Russian)

11. Rubtsov O.I. *Preobrazovanie slabykh osnovaniy po tekhnologii rotornogo uplotneniya gruntov : avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Transformation of weak bases using rotary soil compaction technology : author's abstract of thesis of candidate of technical sciences.]. Moscow, 2014. 25 p. (In Russian)

12. Shulyat'ev O.A. Fundamenty vysotnykh zdaniy [Foundations of high-rise buildings]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [PNRPU Construction and Architecture Bulletin]. 2014, no. 4, pp. 203—245. (In Russian)

13. Stepanov M.A. Vliyanie opressovki gruntovogo osnovaniya na formirovanie NDS osnovaniya lentochnykh svaynykh fundamentov, ob"edinennykh plitami peremennoy zhestkosti [Influence of ground base pressing on the formation of the VAT of the base of band pile foundations, united by plates of variable rigidity]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2014, no. 5. Available at: http://www.science-education.ru/119-15185. (In Russian)

14. Ter-Martirosyan Z.G., Abdul Malek A.S.M. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie preobrazovannogo osnovaniya [Stress-strain state of the transformed base]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 2007, no. 6, pp. 8–11. (In Russian)

15. Chunyuk D.Yu., Yarnykh V.F. Izmenenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyanie massiva grunta osnovaniya pri uchete poetapnosti vozveleniya

zdaniy i neravnomernosti zagruzheniya fundamentov kak faktor geotekhnicheskogo riska v stroitel'stve [Change in the stress-strain state of the ground massif with the account of the phased development of buildings and uneven load of foundations as a factor of geotechnical risk in constructio]. *Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya* [Internet-Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Polythematic]. 2014, Issue 4 (35), paper. 9. Available at: http://www.vestnik.vgasu.ru. (In Russian)

16. Pronozin Ya.A., Stepanov M.A., Volosyuk D.V. Otsenka fiziko-mekhanicheskikh svoystv zon predvaritel'no opressovannogo grunta osnovaniya kombinirovannykh lentochnykh svaynykh fundamentov [Evaluation of physical and mechanical properties of the zones of pre-pressed ground of the base of combined belt pile foundations].*Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [PNRPU Construction and Architecture Bulletin]. 2015, no. 2, pp. 64–73. (In Russian)

17. Ter-Martirosyan Z.G., Pronozin Ya.A., Stepanov M.A. Feasibility of pile-shell foundations with prestressed soil beds. *Soil Mechanics and Foundation Engineering.* 2012. Pp. 1–5.

18. Stepanov M.A. *Vzaimodeystvie kombinirovannykh lentochnykh svaynykh fundamentov s predvaritel'no opressovannym gruntovym osnovaniem: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Interaction of combined tape pile foundations with a pre-pressurized ground base: thesis of candidate of technical sciences]. Tyumen', 2015. 189 p. (In Russian)

19. Bogomolov A.N., Ushakov A.N., Bogomolova O.A. O raspredelenii napryazheniy v osnovanii naklonnogo absolyutno zhestkogo shtampa pri uchete treniya po kontaktu «shtamp—grunt» [On the distribution of stresses in the base of an inclined absolutely rigid die when friction is taken into account on the "stamp—ground" contact]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 2014, no. 4, pp. 7–12. (In Russian)

20. Kiselev N., Pronozin Y., Stepanov M. et al. Theoretical and experimental substantiation for applicability of a damping layer in a foundation slab placed on soil bed. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 73: XV International Conference "Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016". 01017.

21. Pronozin Ya.A., Epifantseva L.R., Stepanov M.A., Chikishev V.M. Geotekhnicheskiy monitoring stroitel'stva zhilogo doma na lentochno-obolochechnykh fundamentakh v gorode Tyumeni [Geotechnical monitoring of the construction of a residential house on band-shell foundations in the city of Tyumen]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2017, no. 10, pp. 59–66. (In Russian)

22. Abdel-Rahman M. *Geotechnical behavior of shell foundations: philosophy doctor thesis*. Concordia University, Montreal, Canada, 1996.

Received October 2, 2017.
Adopted in final form on December 18, 2017.
Approved for publication on February 29, 2018.

About the authors: **Pronozin Yakov Aleksandrovich** — Doctor of Technical Science, Associate Professor, Vice-Rector for Research, **Industrial University of Tyumen (IUT)**, 38 Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation; pronozinja@tyuiu.ru;

Stepanov Maksim Andreevich — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Geotechnics, **Industrial University of Tyumen (IUT)**, 38 Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation; maxim_stepanov@inbox.ru;

Volosyuk Denis Viktorovich — engineer, **OOO «GEOFOND+»**, 416 office, 7a, Yamskaya str., Tyumen, 625001, Russian Federation; volosyuk_dv@mail.ru;

Shuvaev Anatoliy Nikolaevich — Doctor of Technical Science, Professor, Research Scientist, **Industrial University of Tyumen (IUT)**, 38 Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation; anshuvaev46@mail.ru;

Rybak Gennadiy Igorevich — Postgraduate Student, Department of Geotechnics, **Industrial University of Tyumen (IUT)**, 38 Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russian Federation; gennadii.rybak@yandex.ru.