УДК 624.154.1:624.131.439.4 DOI: 10.22227/1997–0935.2018.5.587-598

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ФУНДАМЕНТОВ НА ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТАХ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МНОГОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ДОМА В РОСТОВЕ-НА-ДОНУ

Д.М. Стешенко, Я. Козубаль[1], Р.Н. Головань[2], М.А. Абдураимова, А.А. Зеленко, А.А. Ревегук

Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ), 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1;
[1]Вроцлавский технологический университет, Польша, г. Вроцлав, ул. Выбрежье Выспьянскего, 50-370, д. 27;
[2]«ДОН Гидроспецфундаментстрой», 344018, г. Ростов-на-Дону, ул. Козлова, д. 65В

Предмет исследования: технологические параметры и расчетные схемы устройства комбинированного свайно-плитного фундамента (КСПФ). Произведена оценка влияния уплотнения грунтов основания грунтовыми сваями в формировании напряженно-деформированного состояния системы «плита — свая — грунтовое основание».
Цель: с целью снижения стоимости и сроков возведения фундаментов, разработки эффективных методик проектирования проведена оценка внедрения комплексной технологии устройства КСПФ при строительстве здания повышенной этажности в условиях распространения просадочных грунтов.
Материалы и методы: данные полевых и лабораторных исследований для определения физико-механических свойств грунтов в основании (влажность, удельный и объемный вес, влажность на границах раскатывания и текучести), зернового (гранулометрического) и микроагрегатного состава, характеристик набухания и усадки, характеристик прочности и деформируемости (одноплоскостной срез, консолидированно-дренированные испытания), характеристик просадочности, коэффициента фильтрации; испытания грунтов статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками; компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния основания программным комплексом Plaxis 2D.
Результаты: результатом полевых и лабораторных экспериментов стало внедрение комплексной технологии устройства свайно-плитного фундамента на просадочных грунтах в условиях плотной городской застройки.
Выводы: предложенная методика проектирования комбинированного свайно-плитного фундамента позволила улучшить строительные свойства грунтов, значительно повысить несущую способность свайной части, уменьшить глубину заложения свай и эффективно вовлечь в работу грунты основания пролетной части фундамента. Данная методика дает значительный экономический эффект и сокращает сроки строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комбинированный свайно-плитный фундамент, просадочные грунты, силы отрицательного трения, уплотнение грунтов, грунтовые сваи, буронабивные сваи, несущая способность, модуль деформации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Стешенко Д.М., Козубаль Я., Головань Р.Н., Абдураимова М.А., Зеленко А.А., Ревегук А.А. Применение комплексной технологии устройства фундаментов на просадочных грунтах при строительстве многоэтажного жилого дома в Ростове-на-Дону // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 5 (116). С. 587–598. DOI: www.dx.doi.org/10.22227/1997–0935.2018.5.587-598

USE OF INTEGRATED TECHNOLOGY OF FOUNDATION INSTALLATION ON COLLAPSIBLE SOILS IN CONSTRUCTION OF HIGH-RISE BUILDING IN ROSTOV-ON-DON

D.M. Steshenko, Ja. Kozubal[1], R.N. Golovan[2], M.A. Abduraimova, A.A. Zelenko, A.A. Reveguk

North Caucasus Federal University (NCFU), 1 Pushkina st., Stavropol, 355009, Russian Federation
[1]Wroclaw University of Technology, 50-370, 27 Wybrzeże Wyspiańskiego st., Wrocław, Poland
[2]«DON Gidrospetsfundamentstroy», 65V Kozlova st., Rostov-on-Don, 344018, Russian Federation

Subject: at the present time, the active interaction of various elements of combined piled-raft foundation (CPRF), erected in the conditions of distribution of collapsible soils, has not been sufficiently studied. The subject of the study is technological parameters and design schemes of the combined piled-raft foundation installation. We evaluate the effect of soil compaction of the foundation with ground piles on the formation of stress-strain state of the system (slab–pile–ground base).

© Д.М. Стешенко, Я. Козубаль, Р.Н. Головань, М.А. Абдураимова, А.А. Зеленко, А.А. Ревегук

Research objectives: to reduce the cost and timing of construction of foundations, develop effective design techniques, an assessment was made of the implementation of integrated CPRF technology in the construction of a high-rise building in the conditions of distribution of collapsible soils.
Materials and methods: field and laboratory data for determination of physical and mechanical properties of ground soils (humidity, specific and volume weight, humidity at the borderline of rolling and fluidity), grain (granulometric) and micro aggregate composition, swelling and shrinkage characteristics, strength and deformability characteristics (single-plane section, consolidated drained tests), characteristics of subsidence, filtration coefficient; soil testing with static indentation and pull-out loads; computer simulation of stress-strain state of the foundation with the software package Plaxis 2D.
Results: field and laboratory experiments resulted in the implementation of integrated technology of construction of the piled-raft foundation on collapsible soil in the conditions of dense urban development.
Conclusions: the proposed design method of the piled-raft foundation has allowed us to improve construction properties of soil, considerably increase the pile bearing capacity, reduce depth of piling and effectively include the ground-soil of a longitudinal part of the foundation into work. This method gives considerable economic effect and reduces the construction duration.

KEY WORDS: the combined piled-raft foundation, collapsible soils, forces of negative friction, consolidation of soils, soil piles, bored piles, the bearing capacity, modulus of deformation

FOR CITATION: Steshenko D.M., Kozubal Ja., Golovan R.N., Abduraimova M.A., Zelenko A.A., Reveguk A.A. Primenenie kompleksnoy tekhnologii ustroystva fundamentov na prosadochnykh gruntakh pri stroitel'stve mnogoetazhnogo zhilogo doma v Rostove-na-Donu [Use of integrated technology of foundation installation on collapsible soils in construction of high-rise building in Rostov-on-Don]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 5 (116), pp. 587–598. DOI: www.dx.doi.org/10.22227/1997–0935.2018.5.587-598

ВВЕДЕНИЕ

Проблема проектирования оснований и фундаментов на просадочных грунтах большой мощности — одна из наиболее важных инженерных задач современного строительства. Многочисленные деформации зданий и сооружений, возведенных на просадочных лессах, побуждают разрабатывать и внедрять новые эффективные технологии подготовки оснований и устройства фундаментов, учитывающие инженерно-геологическую специфику Юга России.

Описанный опыт применения комплексной технологии устройства фундаментов на просадочных лессовых грунтах является наглядным примером решения сложной инженерной задачи эффективными и безопасными для окружающей застройки методами.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На территории Северного Кавказа практически повсеместно распространены лессовые просадочные грунты, занимающие 75…80 % площади региона. Одним из наиболее эффективных методов устранения просадочных свойств является уплотнение толщи грунтовыми сваями. В практике строительства известно множество методов устройства грунтовых свай [1–4]. В работах [5–7] описаны технологии, позволяющие с минимальными затратами и сроками выполнить уплотнение основания грунтовыми сваями без вибрационных, шумовых и ударных нагрузок, что особенно важно в условиях плотной городской застройки.

В современных условиях строительства при росте этажности и размеров зданий существенно увеличены нагрузки на основание. При этом необходимо не только предусматривать устранение просадочности грунтов с улучшением физико-механических свойств, но и разрабатывать надежную и безопасную конструктивную схему фундамента. Данными преимуществами обладает комбинированный свайно-плитный фундамент (КСПФ), описанный в работах [8–12].

В своих исследованиях [9] В.В. Бобанов и В.А. Шашкин определили основные условия, при которых свайный фундамент с низким плитным ростверком становится свайно-плитным. Результаты проведенного численного эксперимента показали, что проявление эффекта свайно-плитного фундамента достигается при расстоянии между сваями 10...16d. При расстоянии, равном или менее 8d, несущая способность свайно-плитного фундамента такая же, как у свайного, а при расстоянии, равном или превышающем 24d, — приближается к несущей способности плиты.

З.Г. Тер-Мартиросян [12] рассмотрел взаимодействие крупномасштабной модели комбинированного свайно-оболочечного фундамента с глинистым грунтовым основанием в полевых условиях. В работе представлены показатели влияния предварительного напряжения грунта на изменение напряженно-деформированного состояния после опрессовки подоболочечного пространства и увеличения внешней нагрузки, по результатам исследования, сделаны выводы, о возможности повышения нагрузки, воспринимаемой основанием комбинированного фундамента, при предварительном напряжении грунтового основания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью разработки эффективных конструктивных решений по устройству КСПФ на просадочных грунтах авторами в лабораторных и полевых условиях был проведен ряд экспериментов с применением буронабивных железобетонных свай БНС-1 и грунтовых свай.

В качестве основной технологии устройства БНС-1 принята технология непрерывно-перемещаемого полого шнека (НПШ), основанная на бурении грунтов колонной полых шнеков, с последующим заполнением скважины бетоном при подъеме шнека через внутреннюю полость колонны и установку каркаса вибропогружателем. Буронабивные железобетонные сваи с диаметром ствола 500 мм выполнены из бетона класса В20, марки W6, F50 на сульфатостойком цементе в соответствии с ГОСТ 22266-94[1].

Для устранения просадки и повышения несущей способности грунтов в основании фундаментов предусмотрено устройство грунтовых свай шнековым способом, сутью которого является формирование грунтовой сваи за счет непрерывной подачи в пробуренную скважину рабочего материала из местного грунта и уплотнения его в забое при помощи обратно вращающихся нагруженных шнеков.

[1] ГОСТ 22266-94. Цементы сульфатостойкие. Технические условия.

В лабораторных условиях определены следующие характеристики грунтов: физические характеристики (влажность, удельный и объемный вес, влажность на границах раскатывания и текучести); зерновой (гранулометрический) и микроагрегатный состав; набухание и усадка; прочность и деформируемость; просадочность; коэффициент фильтрации.

Поэтапно исследовалось напряженно-деформированное состояние грунтов статическими вдавливающими и выдергивающими нагружениями, при этом изучалось влияние изменения физико-механических свойств грунтов на несущую способность КСПФ.

На основе инженерно-геологических изысканий о строении грунта разработана модель напряженно-деформированного состояния основания с помощью программного обеспечения Plaxis 2D. Использование численных экспериментов дает наглядное понимание характера работы всех элементов КСПФ (плита — сваи — грунт).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок строительства 19-этажного жилого дома находится в центральной части г. Ростова-на-Дону на пересечении улиц Семашко и Варфоломеева (рис. 1).

По данным инженерно-геологических изысканий (ООО «РМП «ГеоПЭН», 2011), в геологическом

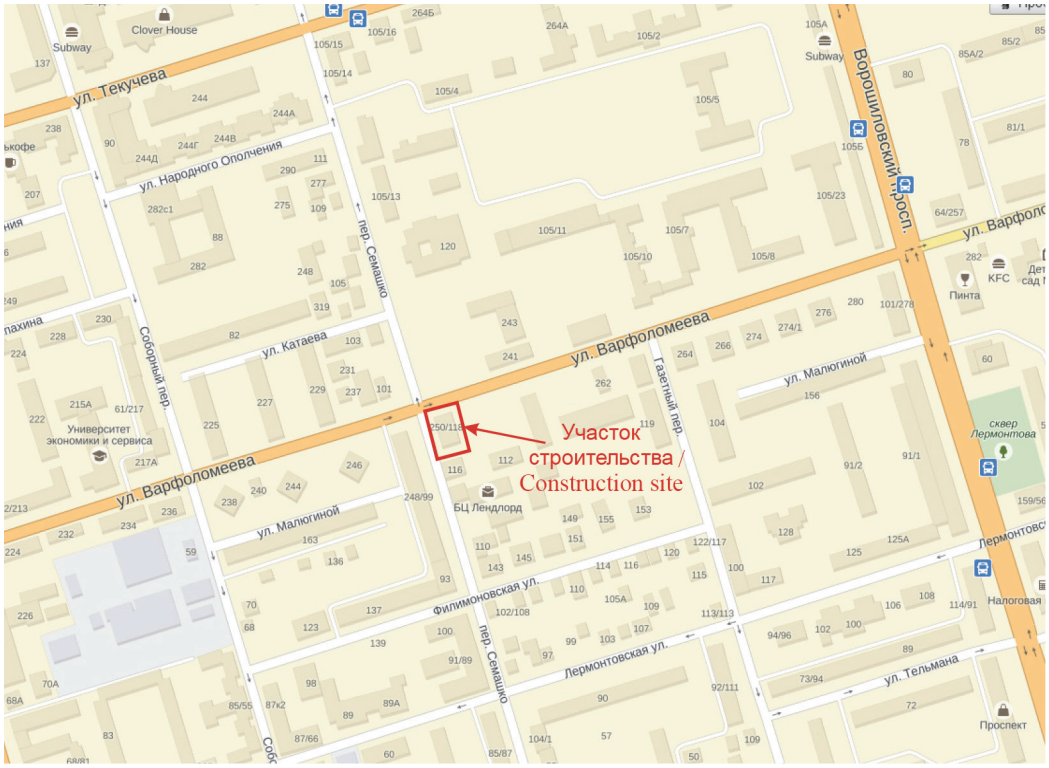


Рис. 1. Обзорная схема расположения участка строительства

Fig. 1. Overview scheme of construction site location

разрезе до разведанной глубины 40,0 м выделено пять инженерно-геологических элементов, имеющих постоянную мощность слоя и глубину залегания (рис. 2). Нормативные и расчетные характеристики грунтов приведены в табл. 1.

Суглинки ИГЭ-1 и ИГЭ-2 обладают просадочными свойствами и залегают до глубины 22,5 м (абс. отм. 39,0). Расчетная просадка грунтов под действием собственного веса при замачивании изменяется от 28,82 до 59,99 см. Площадка строительства относится ко II типу грунтовых условий по просадочности.

Грунтовые воды по состоянию на март 2007 г. вскрыты на глубине 33,5...36,4 м (абс. отм. 25,1...28,1 м). В 2013 г. для уточнения гидрогеологических условий площадки были выполнены контрольные изыскания, определившие значительный уровень подъема грунтовых вод — до глубины 30,5 м (абс. отм. 31,0 м).

За период с 2007 по 2013 гг. район города интенсивно застраивался высотными зданиями на свайных фундаментах. В результате снижения фильтрационных свойств грунтов, был создан барражный эффект — подъем уровня грунтовых вод перед преградой по потоку и снижением за ней, вследствие перекрытия фильтрационного потока подземных вод, что и привело к подъему уровня грунтовых вод и к формированию постоянного водоносного горизонта на глубине 30,5 м.

В зависимости от гидрогеологических характеристик перекрытого водоносного горизонта и от габаритов строящихся сооружений подпор может изменяться от нескольких сантиметров до метров и может привести к дальнейшему подъему уровня грунтовых вод, деформации грунтового массива и к другим неблагоприятным последствиям.

В соответствии с СП 11-105-97[2] (ч. II, приложение «И») площадка относится к категории I-Б-2 — регулярно (ежегодно) подтапливаемые в результате систематических техногенных воздействий.

Развитие на площадке строительства неблагоприятных инженерно-геологических процессов определило выбор технологии подготовки основания и устройства фундаментов. Учитывая наличие ниже подошвы фундаментов просадочных грунтов мощностью 12 м с максимальным значением просадки под действием собственного веса 59,99 см, возможный подъем уровня грунтовых вод и, как следствие, развитие неравномерной просадки основания, значительную среднюю расчетную нагрузку под подошвой фундамента 400 кПа и необходимость минимизировать разность осадок 19-этажной части здания и примыкающей двухуровневой подземной парковки, были приняты следующие проектные решения:

1. Для отсечения грунтового массива в основании проектируемого здания от просадочной толщи грунтов, окружающих площадку строительства, исключения локального техногенного замачивания из окружающих водонесущих коммуникаций и ливневыми водами, уменьшения воздействия нагрузки на грунты в основании близлежащих зданий по периметру объекта был выполнен шпунтовый ряд из буронабивных свай с диаметром ствола 800 мм длиной 23 м с шагом 800 мм.

2. Выбрана комбинированная конструкция плитно-свайного фундамента, представляющая собой монолитную плиту толщиной 1000 мм, опирающуюся на буронабивные железобетонные сваи БНС-1 с диаметром ствола 500 мм, длиной 18 м. Этот вариант фундамента позволил эффективно перераспределить нагрузку от вышележащих конструкций между плитой и буронабивными сваями.

При выполнении буровых работ по устройству шпунтов были выявлены зоны с более высоким, чем у материалов изысканий, уровнем грунтовых вод. В связи с этим в качестве технологии устройства буронабивных свай БНС-1 была принята технология НПШ, основанная на бурении грунтов колонной полых шнеков, с последующим заполнением скважины бетоном при подъеме шнека через внутреннюю полость колонны и установку каркаса вибропогружателем.

Технология НПШ объединяет достоинства набивных и универсальность буронабивных свай, отличается формированием повышенной несущей способности свай, дает возможность выполнять работы в слабых и обводненных грунтах при отсутствии вибрационных, шумовых и ударных нагрузок.

3. В соответствии с п. 9.2 СП 24.13330-2011[3] при проектировании свайных фундаментов в грунтовых условиях II типа по просадочности, с возможной просадкой грунтов от собственного веса свыше 30 см следует предусматривать мероприятия по переводу грунтовых условий II типа в I тип, в том числе глубинным уплотнением грунтовыми сваями. Для устранения просадки и повышения несущей способности грунтов в основании фундаментов проектом было предусмотренно устройство грунтовых свай шнековым способом [6]. Технология устройства грунтовых свай шнековым способом является эффективным способом устранения просадочных свойств грунтов, применяется при закреплении слабых и водонасыщенных грунтов и была использована более чем на 350 объектах Юга России. Грунтовая свая формируется за счет непрерывной подачи в пробуренную скважину рабочего материала и уплотнения его в забое при помощи обратно вращающихся нагруженных шнеков (рис. 3). На этом этапе под нижним витком шнековой колонны

[2] СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства.

[3] СП 24.13330-2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85 (с Изменением № 1).

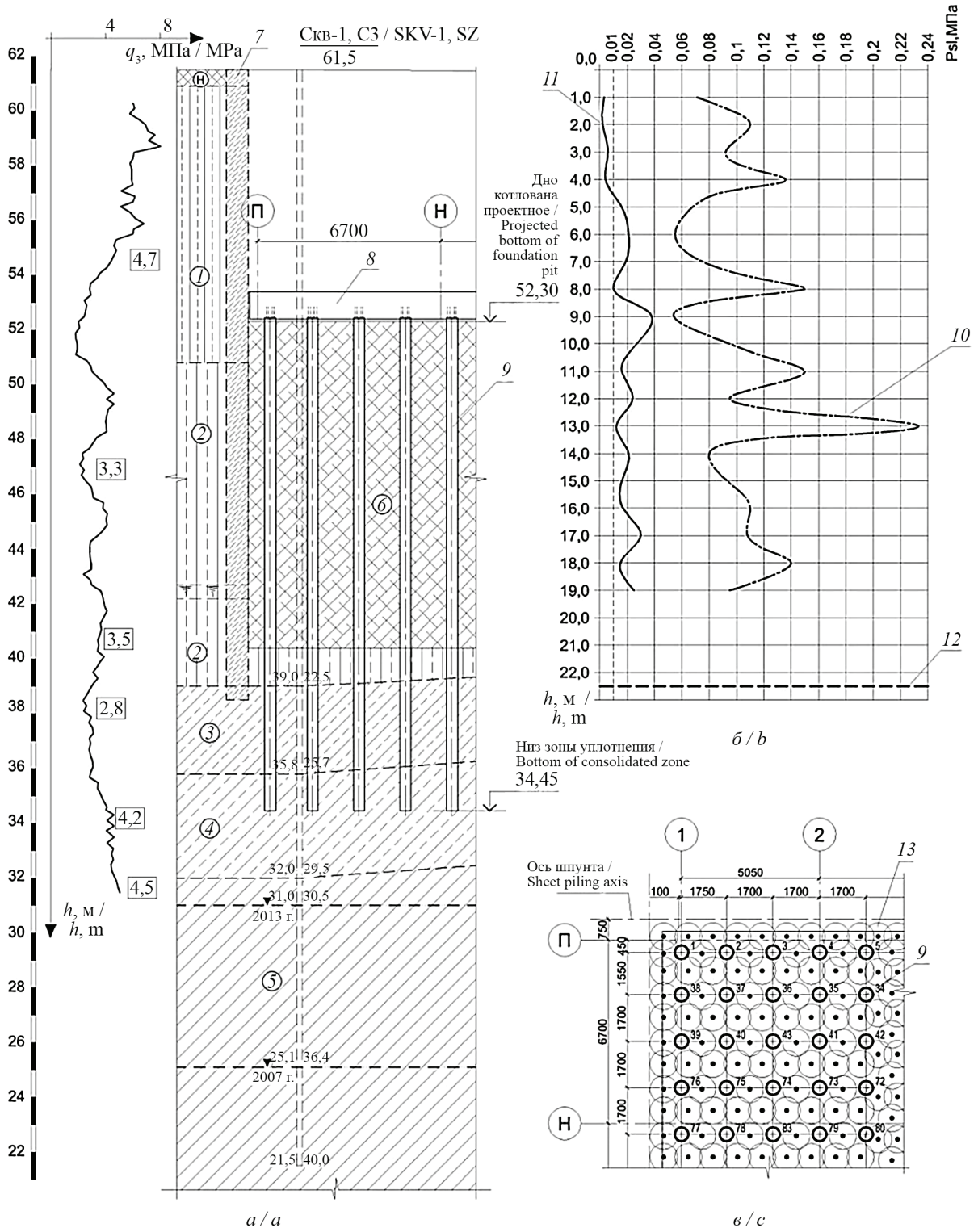


Рис. 2. Инженерно-геологические условия площадки строительства (*а*); график изменения с глубиной начального просадочного давления (*б*); фрагмент плана расположения грунтовых свай и свай БНС-1 *(в)*: Н — насыпной грунт; *1* — ИГЭ-1 суглинок тяжелый, пылеватый, твердый, при водонасыщении мягкопластичный, макропористый, просадочный; *2* — ИГЭ-2 суглинок тяжелый, пылеватый, твердый, при водонасыщении полутвердый, макропористый, просадочный; *3* — ИГЭ-3 суглинок тяжелый, пылеватый, полутвердый, непросадочный; *4* — ИГЭ-4 суглинок тяжелый, пылеватый, полутвердый, непросадочный; *5* — ИГЭ-5 суглинок тяжелый, пылеватый, полутвердый, непросадочный; *6* — ИГЭ-6 — массив грунта, уплотненный грунтовыми сваями; *7* — шпунтовое ограждение; *8* — фундаментная железобетонная плита; *9* — свая буронабивная железобетонная марки БНС-1; *10* — начальное просадочное давление; *11* — относительная просадочность; *12* — нижняя граница просадочной толщи; *13* — грунтовые сваи

Fig. 2. Engineering and geological conditions of the construction site (*a*); graph of the change of initial subsidence pressure with depth (*b*); fragment of the plan for location of ground piles and piles BNS-1 (*c*): N — made ground; *1* — EGE-1 loam heavy, silty, rigid, soft-plastic when water-saturated, macroporous, collapsible; *2* — EGE-2 loam heavy, silty, rigid, semi-rigid when water-saturated, macroporous, collapsible; *3* — EGE-3 loam heavy, silty, semi-rigid, non-collapsible; *4* — EGE-4 loam heavy, silty, semi-rigid, non-collapsible; *5* — EGE-5 loam heavy, silty, semi-rigid, non-collapsible; *6* — EGE-6 soil massif compacted with soil piles; *7* — sheet piling; *8* — reinforced concrete slab of foundation; *9* — bored, reinforced concrete pile BNS-1; *10* — initial subsidence pressure; *11* — relative subsidence; *12* — the lower boundary of subsidence layer; *13* — soil piles

Табл. 1. Характеристики грунтов

Table 1. Soil characteristics

Характеристика / Characterisitics	ИГЭ-1 / EGE-1	ИГЭ-2 / EGE-2	ИГЭ-3 / EGE-3	ИГЭ-4 / EGE-4	ИГЭ-5 / EGE-5	ИГЭ-6 / EGE-6
Плотность нормативная, кг/см^3 / Density normative, kg/cm^3	1,69	1,83	1,93	1,96	2,00	1,98
Плотность частиц, кг/см^3 / Density of particles, kg/cm^3	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69
Плотность в сухом состоянии, кг/см^3 / Density in dry condition, kg/cm^3	1,45	1,55	1,59	1,62	1,67	1,70
Коэффициент пористости / Porosity coefficient	0,86	0,74	0,69	0,66	0,61	0,58
Природная влажность / Natural humidity	16,8	18,3	21,6	21,2	20	16,6
Степень влажности / Humidity degree	0,53	0,67	0,84	0,86	0,88	0,76
Граница текучести, % / Fluidity borderline, %	34,2	34	35,5	36,9	33,5	34,3
Граница раскатывания, % / Rolling borderline, %	20,4	20,5	21,2	22,1	19,8	19,9
Показатель текучести / Fluidity factor	–0,26	–0,16	0,03	–0,06	0,01	–0,23
Угол φ_{II}, град. / Angle φ_{II}, degrees	17	20	19	21	22	22
Сцепление C_{II}, кПа / Cohesion C_{II}, kPa/	16	18	17	19	17	19
Соотношение E/E_{sat}, МПа / Ratio E/E_{sat}, MPa/	22,4/5,7	17,9/9,4	14,0	17,9	19,6	25
Глубина просадочной толщи, м / Depth of collapsible layer, m	22,5	22,5	—	—	—	—
Расчетная суммарная просадка от собственного веса, см / Calculated overall settlement from own weight, cm	59,99	59,99	—	—	—	—
Коэффициент относительной просадочности / Coefficient of relative subsidence	0,002…0,038	0,012…0,030	—	—	—	—
Начальное просадочное давление, кПа / Initial subsidence pressure, kPa	54…150	79…233	—	—	—	—

образуется «ядро» из напрессованного рабочего материала с кольцеобразной зоной уплотнения в окружающем грунте.

В условиях данной строительной площадки при уплотнении грунтовыми сваями преобразованный массив ИГЭ-6 утратил просадочные свойства, значительно повысились его физико-механические свойства.

Для определения несущей способности свай на опытной площадке, в соответствии с указаниями ГОСТ 5686-2012 и СП 24.13330-2011, были выполнены испытания грунтов статическими нагрузками на сваю (рис. 4, 5).

Испытания грунтов статическими вдавливающими нагрузками на сваю длиной 18,0 м проводились при природной влажности в массиве, уплотненном грунтовыми сваями. Нагружение свай производилось по следующей схеме: первые три ступени по 400 кН, последующие ступени по 200 кН. За время условной стабилизации принималась скорость приращения осадки, не превышающая 0,1 мм за последний час наблюдений (рис. 5).

Испытания грунтов статическими выдергивающими нагрузками на сваю длиной 11,0 м (мощность просадочной толщи ниже подошвы плиты) проводились при локальном замачивании в просадочных грунтах. Замачивание грунтов проводилось через шурфы-водосборники сечением 2 м^2 и глубиной 0,7 м, засыпанные щебнем. Для ускорения процесса замачивания около каждой сваи были пробурены по три дренажных скважины глубиной 11,0 м. Минимальный объем воды, необходимый для замачивания грунтов возле одной опытной сваи, составляет 12 м^3. Контрольное бурение скважин для контроля качества замачивания показало, что грунтами достигнута степень влажности 0,80...0,84 (рис. 5).

Результаты испытаний грунтов статической вдавливающей и выдергивающей нагрузками на буровую сваю приведены в табл. 2.

Согласно п. 9.11 СП 24.13330-2011, несущую способность свай F_d, в грунтовых условиях II типа по просадочности, работающих на сжимающую нагрузку, следует определять по результатам статических испытаний свай с локальным замачиванием как разность между несущей способностью свай длиной l на вдавливающую нагрузку и несущей способностью свай длиной h_{sl} на выдергивающую нагрузку, получаем

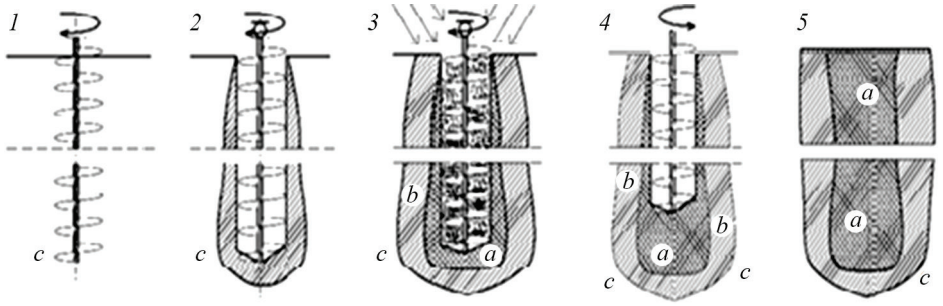


Рис. 3. Технологические этапы производства ГС: *1* — бурение; *2* — стадия первичной трамбовки; *3* — стадия вторичной трамбовки с дополнительным грунтом; *4* — подъем бурового наконечника; *5* — получение двухслойного ядра утрамбованного грунта (*a* — грунтовая свая, *b* — укрепленный лесс, *c* — слабонесущий лессовый грунт)

Fig. 3. Technological stages of soil piles production: *1* – drilling; *2* – the stage of primary ramming; *3* – stage of secondary ramming with additional soil; *4* – lifting of the drill bit; *5* – obtaining a two-layer core of compacted soil (*a* – soil pile, *b* – strengthened loess, *c* – weak loess soil)



Рис. 4. Испытания грунтов статическими вдавливающими нагрузками на сваю

Fig. 4. Testing of soils with static indentation forces applied to the pile

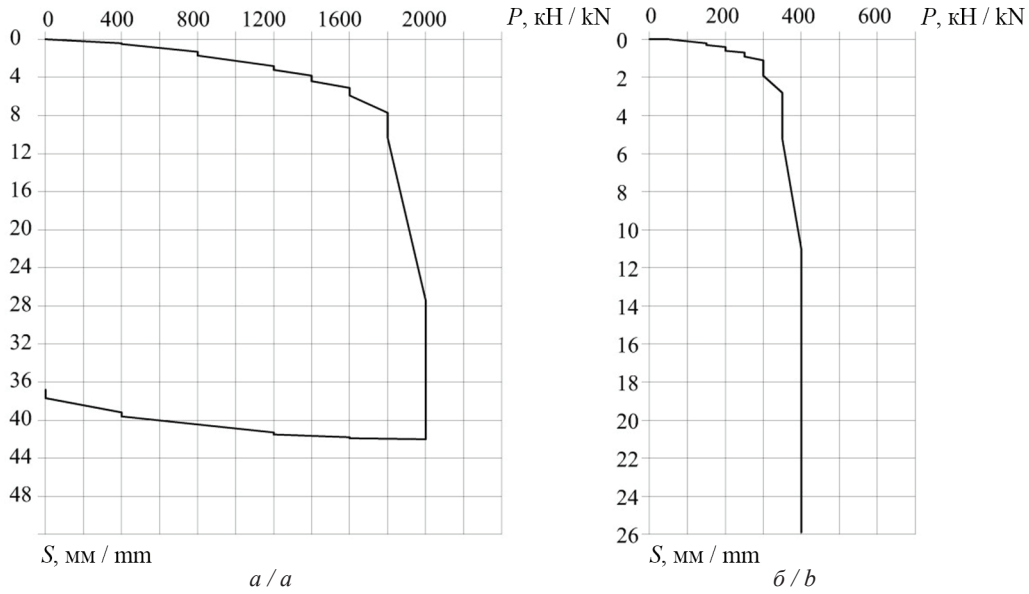


Рис. 5. Испытание свай статической вдавливающей и выдергивающей нагрузками. График зависимости осадки (*а*) и выхода (*б*) сваи *S* от нагрузки *P*

Fig. 5. Testing of piles with static indentation and pull-out loads. The graph of dependence of settlement (*a*) and pull-out displacement (*b*) of the pile *S* on the load *P*

$$F_d = F_{u,n} - F_{du,n} = 1800 \text{ кН} - 500 \text{ кН} = 1300 \text{ кН}. \quad (1)$$

Отрицательная сила трения P_n, согласно п. 9.10 СП 24.13330-2011 составит 500 кН, коэффициент работы сваи $\gamma_c = 0{,}8$ (при $s_{sl} > 2s_u$).

Расчетная нагрузка на сваю, выполненную в массиве, сложенном просадочными грунтами, составляет:

$$N \le (\gamma_0 F_d / \gamma_n \gamma_k) - \gamma_c P_n = \\ = (1{,}15 \cdot 1300 / 1{,}15 \cdot 1{,}2) - 0{,}8 \cdot 500 = \\ = 683 \text{ кН}. \quad (2)$$

Соответственно, расчетная нагрузка на сваю, выполненную в уплотненном массиве, составляет:

$$N \le (\gamma_0 F_d / \gamma_n \gamma_k) - \gamma_c P_n = \\ = (1{,}15 \cdot 1800 / 1{,}15 \cdot 1{,}2) = 1500 \text{ кН}. \quad (3)$$

Таким образом, комплексная технология подготовки основания с применением буронабивных железобетонных свай в уплотненном грунтовыми сваями массиве позволяет исключить отрицательную силу трения, увеличить значение расчетной нагрузки на сваю с 683 до 1500 кН, передать часть нагрузки на грунты под подошвой фундаментной плиты.

При несомненных преимуществах выбранного типа КСПФ в массиве, уплотненном грунтовыми сваями, существует ряд трудностей в определении расчетной схемы основания и совместном учете несущей способности грунтов под подошвой плиты и несущей способности свай.

Перераспределение нагрузки между несущими элементами КСПФ зависит от инженерно-геологических условий и конструктивной схемы фундаментов, однако роль несущей способности грунтов в основании плитной части недостаточно учитывается в расчетах [13].

Результаты проведенных экспериментов [10] показывают эффективную работу элементов КСПФ при расстоянии между сваями 10…16*d*, при шаге свай менее 8*d* несущая способность не отличается от свайного, а при шаге, равном или превышающем 24*d*, определяется несущей способностью плитного фундамента.

В соответствии с эпюрой распределения усилий в фундаментной плите и геометрическими параметрами принята конструктивная схема расположения свай БНС-1 с шагом 1500…1800 мм, общим количеством 344 (рис. 6). Таким образом, фактическая нагрузка, передаваемая на одну сваю, составляет 1162 кН. При расстоянии между сваями 1500…1800 мм (менее 5*d*) предложенная конструктивная схема не может считаться классическим КСПФ, грунт в основании и сваи работают как единый «условный фундамент», а несущая способность грунтов в расчетах фактически не учитывается и воспринимается как резерв общей несущей способности.

Приняв, в соответствии с СП 22.13330-2011[4] (приложение В, табл. В.4), минимальное значение расчетного сопротивления уплотненного суглинка 250 кПа, можно оценить резерв общей несущей способности.

[4] СП 22.13330-2011. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.

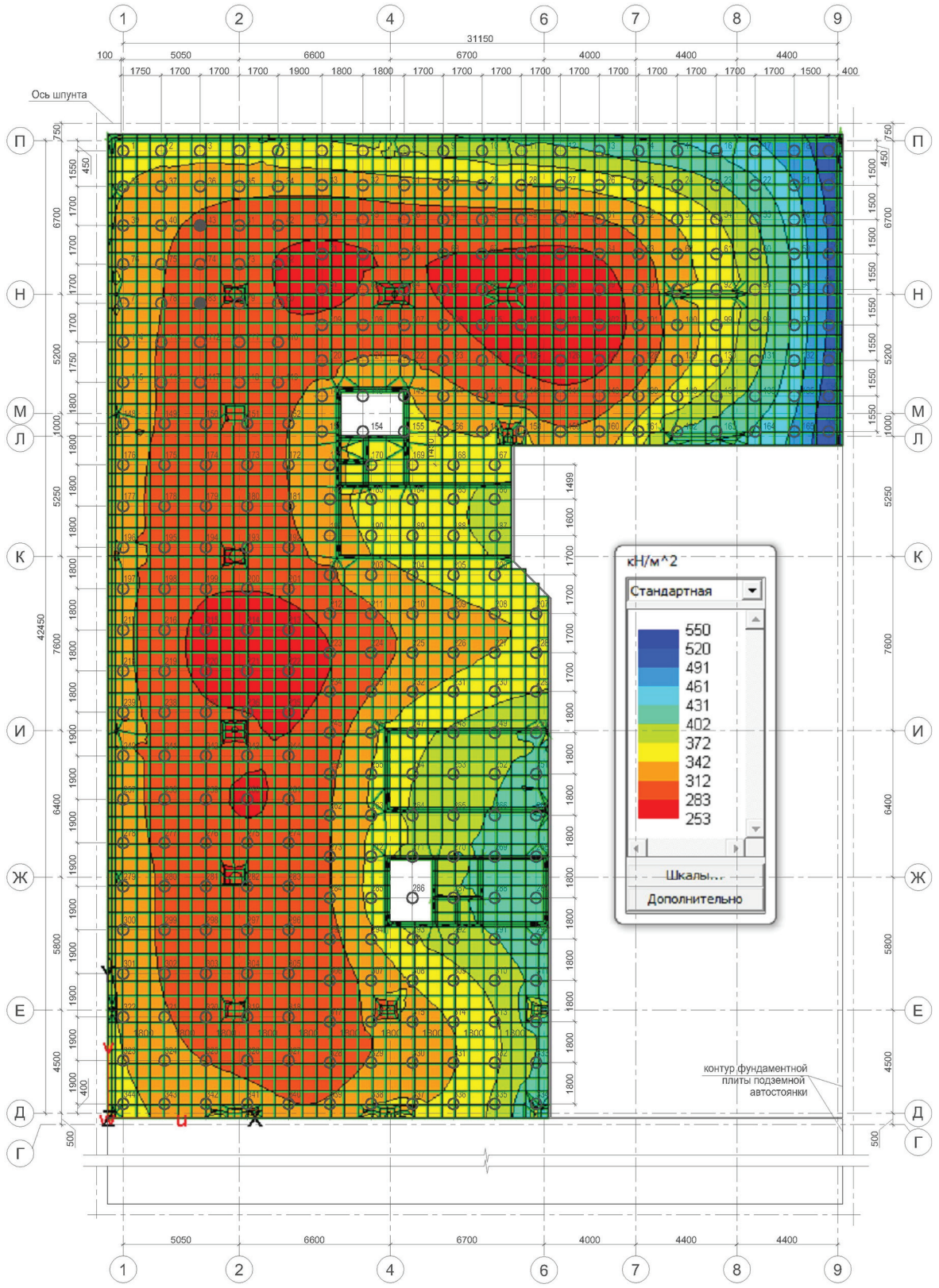


Рис. 6. План расположения свай БНС-1 в соответствии с эпюрой распределения усилий в фундаментной плите

Fig. 6. Layout plan of the BNS-1 piles according to the stress distribution diagram in the foundation plate

Средняя нагрузка по подошве фундаментной плиты 400 кПа, расчетное сопротивление грунтов основания 250 кПа, нагрузка, передаваемая на сваи, 150 кПа. Общее количество свай с учетом геометрических параметров и усилий в плите составит 110, соответственно, резерв общей несущей способности составляет 70 %. При количестве свай 110 расстояние между ними составит 6*d*, согласно п. 7.4.10 СП 50-102-2003[5], данную конструктивную схему следует принимать за КСПФ.

Рассмотрим случай устройства буронабивной сваи с учетом сил отрицательного трения, приняв значение расчетной нагрузки на сваю 683 кН, минимально необходимое количество свай БНС-1 — 585. Такое количество свай невозможно выполнить под плитой площадью 1000 м^2, не нарушая п. 8.13 СП 24.13330-2011, согласно которому расстояние в свету между стволами буровых свай должно быть не менее 1,0 м. Очевидно, что без устранения просадочных свойств массива грунтов, конструктив свайной части фундамента изменится в сторону увеличения диаметра и длины свай, значительно повысится стоимость и сложность строительно-монтажных работ.

ВЫВОДЫ

Анализ описанного опыта проектирования приводит к заключению, что применение КСПФ становится актуальным на основаниях, сложенных просадочными грунтами большой мощности, при этом вопрос остается изученным не полностью, требуется дальнейшее более детальное исследование работы всех элементов КСПФ (плита — сваи — грунт) на просадочных грунтах. Разработанный проект имеет значительный практический вклад в развитие данной технологии устройства фундамента, включающей следующие качественные показатели:

1. Применение комплексной технологии устройства фундаментов, включающей устройство буронабивных свай БНС-1 в уплотненном грунтовыми сваями массиве, позволило более чем в два раза повысить нагрузку, воспринимаемую свайной частью КСПФ;

2. Устранение просадочности грунтовыми сваями позволило улучшить строительные свойства грунтов в пролетной части, повысив роль плитной части в совместной работе элементов КСПФ;

3. В соответствии с п. 9.3 СП 24.13330-2011 нижние концы буронабивных свай (при $s_{sl,g} \leq s_u$) должны быть заглублены в глинистые грунты с показателями текучести $I_L \leq 0$. В связи с этим единственно возможным альтернативным вариантом проектного решения являются сваи стойки длиной 45…50 м, заглубленные в известняки. Примерная стоимость устройства свай-стоек составляет 100 млн руб., стоимость предложенной технологии — 40 млн руб., экономический эффект от внедрения комплексной технологии устройства фундаментов составил 60 млн руб. в ценах 2015 г.

[5] СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абелев Ю.М.* Изготовление грунтовых свай в лессовых грунтах // Строительная промышленность. 1936. № 4. С. *4*–8.

2. *Абелев Ю.М.* Основные результаты изучения особенностей строительных свойств лессовидных грунтов и методов их упрочнения // Строительство на лессовидных грунтах : по материалам Совещания по строительству на лессовидных грунтах (23–25 марта 1938 г.). М.-Харьков : Госстройиздат, 1936.

3. *Абелев Ю.М.* Основы проектирования и строительства на макропористых грунтах. М. : Стройвоенмориздат, 1948. 204 с.

4. *Абелев Ю.М.* Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1979. 271 с.

5. Пат. РФ № 2135691, МПК E02D5/34. Способ возведения буронабивной сваи / авт. и патентообл. Галай Б.Ф.; заяв. 98120297/03; опубл. 27.08.1999.

6. *Галай Б.Ф., Столяров В.Г.* Шнековый способ глубинного уплотнения грунтов и устройства буронабивных свай (В помощь проектировщику) // Промышленное и гражданское строительство. 2000. № 10. С. 23–24.

7. *Танов Е.И., Площадный В.Я.* Шнековый буровой инструмент : Справ. М. : Недра, 1985. 109 с.

8. *Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И. и др.* Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. М. : Стройиздат, 1985. 479 с. (Справочник проектировщика)

9. *Бабанов В.В., Шашкин В.А.* Расчетный анализ работы свайных фундаментов с низким и высоким ростверками с учетом нелинейной работы основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 2. С. 2–7.

10. *Малек Алла Саид Мухамед Абдул.* Напряженно-деформированное состояние преобразованного основания фундаментов : автореф. дис. … канд. техн. н. М., 2009. 23 с.

11. *Тер-Мартиросян З.Г., Малек Алла Саид Мухамед Абдул.* Напряженно-деформированное состо-

яние слоя грунта в процессе его уплотнения грунтовыми сваями и последующего нагружения его под воздействием внешней нагрузки // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 96–106.

12. *Тер-Мартиросян З.Г., Пронозин Я.А., Степанов М.А.* Обоснование использования свайно-оболочечных фундаментов с предварительно напряженным грунтовым основанием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2012. № 4. С. 2–5.

13. *Коновалов П.А., Коновалов В.П.* Основания и фундаменты реконструируемых зданий. 5-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во АСВ, 2011. 384 с.

14. *Лебедев В.И., Ильичев В.В., Шевцов К.П., Индюков А.Т.* Полевые методы инженерно-геологических изысканий. М. : Недра, 1988. 142 с.

15. *Ребрик Б.М.* Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Недра, 1979. 253 с.

Поступила в редакцию 12 марта 2017 г.
Принята в доработанном виде 1 февраля 2018 г.
Одобрена для публикации 1 апреля 2018 г.

Об авторах: **Стешенко Дмитрий Михайлович** — кандидат технических наук, доцент, директор Международного геотехнического центра, **Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ)**, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1; dmitristeshenko@mail.ru;

Козубаль Януш Виталиш — доктор-инженер, доцент, **Вроцлавский технологический университет**, 50-370, Польша, г. Вроцлав, ул. Выбрежье Выспьянского, д. 27, Janusz.Kozubal@pwr.edu.pl;

Головань Роман Николаевич — инженер, **ООО «ДОН Гидроспецфундаментстрой»**, 344018, г. Ростов-на-Дону, ул. Козлова, д. 65В, goroni161@mail.ru;

Абдураимова Мария Абдурашидовна — инженер Международного геотехнического центра, **Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ)**, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1, 333870@mail.ru;

Зеленко Александр Александрович — аспирант, кафедра строительства, **Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ)**, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1, alex_zelenko@bk.ru;

Ревегук Андрей Алексеевич — аспирант, кафедра строительства, **Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ)**, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1, a.reveguk@mail.ru.

REFERENSES

1. Abelev Yu.M. Izgotovleniye gruntovykh svay v lessovykh gruntakh [Making of ground piles in loess soils]. *Stroitel'naya promyshlennost'* [Building industry]. 1936, no. 4, pp. 4–8. (In Russian)

2. Abelev Yu.M. Osnovnyye rezul'taty izucheniya osobennostey stroitel'nykh svoystv lessovidnykh gruntov i metodov ikh uprochneniya [Main results of studying the features of the construction properties of loess-like soils and methods for their hardening]. *Stroitel'stvo na lessovidnykh gruntakh : po materialam soveshchaniya po stroitel'stvu na lessovidnykh gruntakh (23–25 marta 1938 g.)* [Construction on loesslike soils : on the materials of the meeting on construction on loess-like soils, March (23–25, 1938)]. Moscow-KHar'kov, Gosstroyizdat Publ., 1936. (In Russian)

3. Abelev Yu.M. *Osnovy proyektirovaniya i stroitel'stva na makroporistykh gruntakh* [Basics of design and construction on macroporous grounds]. Moscow, Stroyvoyenmorizdat Publ, 1948. 204 p. (In Russian)

4. Abelev Yu.M. *Osnovy proyektirovaniya i stroitel'stva na prosadochnykh makroporistykh gruntakh* [Fundamentals of design and construction on subsidence macroporous grounds]. 3rd ed., revised & enlarged. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. 271 p. (In Russian)

5. Galay B.F. Patent RU 2135691 IPC E02D5/34. *Sposob vozvedeniya buronabivnoy svai* [Method for the erection of a bored pile] ; claim 98120297/03; publ. 27.08.1999. (In Russian)

6. Galay B.F., Stolyarov V.G. Shnekovyy sposob glubinnogo uplotneniya gruntov i ustroystva buronabivnykh svay (V pomoshch' proyektirovshchiku) [Screw way of deep compaction of soils and device of bored piles (helping the designer)]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2000, no. 10, pp. 23–24. (In Russian)

7. Tanov E.I., Ploshchadnyy V.Ya. *Shnekovyy burovoy instrument: Sprav.* [Auger drilling tool: reference book]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 109 p. (In Russian)

8. Gorbunov-Posadov M.I., Il'ichev V.A., Krutov V.I. et al. *Osnovaniya, fundamenty i podzemnyye sooruzheniya* [Foundations, foundations and underground structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 479 p. (Spravochnik proyektirovshchika [Handbook of the designer]). (In Russian)

9. Babanov V.V., SHashkin V.A. Raschetnyy analiz raboty svaynykh fundamentov s nizkim i vysokim

rostverkami s uchetom nelineynoy raboty osnovaniya [Calculation analysis of the work of pile foundations with low and high grillage, taking into account the nonlinear work of the base]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engeneering]. 2012, no. 2, pp. 2–7. (In Russian)

10. Malek Alla Said Mukhamed Abdul. *Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye preobrazovannogo osnovaniya fundamentov : avtoref. dis. ... kand. tekhn. n.* [Stress-strain state of the transformed foundation foundation : the author's abstract dissertation candidate of technical sciences]. Moscow, 2009. 23 p. (In Russian)

11. Ter-Martirosyan Z.G., Malek Alla Said Mukhamed Abdul. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye sloya grunta v protsesse ego uplotneniya gruntovymi svayami i posleduyushchego nagruzheniya ego pod vozdeystviyem vneshnikh nagruzki [Stress-strain state of the soil layer in the process of its compaction by soil piles and subsequent loading under the influence of external loads]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2008, no. 2, pp. 96–106. (In Russian)

12. Ter-Martirosyan Z.G., Pronozin YA.A., Stepanov M.A. Obosnovaniye ispol'zovaniya svayno-obolochechnykh fundamentov s predvaritel'no napryazhennym gruntovym osnovaniyem [Substantiation of the use of pile-shell foundations with a prestressed ground base]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engeneering]. 2012, no. 4, pp. 2–5. (In Russian)

13. Konovalov P.A., Konovalov V.P. *Osnovaniya i fundamenty rekonstruiruyemykh zdaniy* [Foundations and bases of reconstructed buildings]. 5th ed., revised & enlarged. Moscow, Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Publ., 2011. 384 p. (In Russian)

14. Lebedev V.I., Il'ichev V.V., Shevtsov K.P., Indyukov A.T. *Polevyye metody inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy* [Field methods of engineering and geological surveys]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 142 p. (In Russian)

15. Rebrik B.M. *Bureniye skvazhin pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh* [Drilling wells in engineering and geological surveys]. 3rd ed., revised & enlarged. Moscow, Nedra Publ., 1979. 253 p. (In Russian)

Received March 12, 2017
Adopted in final form on February 10, 2017.
Approved for publication on April 1, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Steshenko Dmitriy Mihaylovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the International Geotechnical Center, **North Caucasus Federal University (NCFU)**, 1 Pushkina str., Stavropol,, 355009, Russian Federation, dmitristeshenko@mail.ru;

Kozubal Janusz Witalis — Doctor-Engineer, Associate Professor, **Wroclaw University of Technology**, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, Poland, Janusz.Kozubal@pwr.edu.pl;

Golovan' Roman Nikolaevich — Engineer, **OOO «DON Gidrospetsfundamentstroy»**, 65V Kozlova str., Rostov-na-Donu, 344018, Russian Federation, goroni161@mail.ru;

Abduraimova Mariya Abdurashidovna — Engineer, International Geotechnical Center, **North Caucasus Federal University (NCFU)**, 1 Pushkina str., Stavropol, 355009, Russian Federation 355004, 333870@mail.ru;

Zelenko Aleksandr Aleksandrovich — Post Graduate, Department of Construction, **North Caucasus Federal University (NCFU)**, 1 Pushkina str., Stavropol, 355009, Russian Federation, alex_zelenko@bk.ru;

Reveguk Andrey Alekseevich — Post Graduate, Department of Construction, **North Caucasus Federal University (NCFU)**, 1 Pushkina str., Stavropol, 355009, Russian Federation, a.reveguk@mail.ru.