УДК 624.156.8

© А. Н. Гайдо, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: gaidoan@mail.ru

© В. З. Величкин, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого)
E-mail: V.Velichkin2011@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-132-143

© A. N. Gaido, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: gaidoan@mail.ru

© V. Z. Velichkin, Dr. Sci. Tech., Professor
(Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University)
E-mail: V.Velichkin2011@yandex.ru

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СВАЙ

TO THE ISSUE OF SUBSTANTIATING THE RATIONAL FIELDS OF COMBINED PILES` APPLICATION

Проанализированы пути обеспечения качества работ при устройстве свайных фундаментов в неоднородных напластованиях тиксотропных, водонасыщенных грунтов. Предложены комбинированные свайные элементы, содержащие продольные проходные каналы, заглушенные в нижнем торце цементной заглушкой. Для повышения их несущей способности или компенсации неравномерных деформаций конструкций фундаментов через такие каналы в сваях выполняют цементацию грунта под их острием до необходимого уровня заглубления в опорный слой грунта. Таким образом создают комбинированную сваю, в верхней части представляющую собой заводской или буронабивной элемент, а в части ниже ее острия — грунтоцементную сваю. Представлена технология создания указанной сваи при различных технологических режимах. Выполнено сравнение сваи по технико-экономическим показателям с традиционным решением в виде дублирующих свай. Предложены этапы контроля качества работ, выполняемых по новой технологии.

Ключевые слова: фундамент, комбинированная свая, струйная цементация, свая-инъектор.

The article analyzes the ways of ensuring the quality of works at construction of pile foundations in heterogeneous layers of thixotropic water-saturated soils. The authors propose using combined pile elements that contain longitudinal passage channels, muffled at the bottom end by a cement plug. To increase the pile bearing capacity or compensate for uneven deformations of foundation structures, the soil is cemented through channels in piles, under their tip to the necessary level of deepening in the support layer of soil. Thus, a combined pile is constructed, in the upper part of which it presents a factory made or bored element, and below its tip it is a soil-cement pile. The authors present the technology of constructing this pile at different technological modes. Comparison analysis of this pile is made on the engineering-economic indicators with the traditional solution as a back up pile. Stages of the work quality control that are implemented according to the new technology are offered.

Keywords: foundation, combined pile, jet grouting, pile-injector.

На основании анализа практического опыта работ установлены следующие основные ситуации, возникающие при производстве работ в сложных инженерно-геологических условиях, для которых необходима корректировка проектного решения в виде дополнительного заглубления свайных элементов для достижения плотных слоев грунта (рис. 1) [1–3]:

- в ходе инженерно-геологических изысканий было некорректно определено положение кровли несущего слоя грунта. Таким образом, в про-

ект закладывают отметки пяты свай, не достигающих требуемого уровня. При этом необходимо обеспечить заглубление элементов в такой грунт для достижения необходимых значений несущей способности (рис. 1, а, в);

- на рис. 1, б приведен геологический разрез, в пределах которого находится плотный слой грунта, обладающий значительным сопротивлением, не позволяющим погрузить через него элементы для достижения проектного уровня. В результате сваи устраивают на разных отмет-

ках их острия (пяты), что при эксплуатации здания приводит к неравномерным деформациям конструкций его фундаментов;

- погруженные или изготовленные сваи в ходе дальнейших работ за счет развития процессов вытеснения грунта получают вертикальные перемещения подъема, называемые выпором, значение которых может достигать до 30–40 см. В результате под острием элементов образуются характерные полости, незаполненные грунтом, которые при испытании свай статической вда-

вливающей нагрузкой не позволяют объективно оценить их несущую способность [2, 4].

Для всех представленных выше технологических схем при невозможности погрузить дублирующие элементы ниже фактического положения в слоях плотных пород меняют технологические режимы, преимущественно с разбуhrиванием плотной породы шнеками или с применением технологии устройства буровых свай в обсадных трубах большого диаметра.

Рис. 1. Схематичные инженерно-геологические разрезы с положением свайных элементов, требующие их дополнительного заглубления в кровлю плотных пород: а — при некорректном определении положении кровли несущего слоя грунта или ее неоднородном положении; б — при наличии нескольких прослоев плотных пород в пределах геологического разреза; в — при недостаточной глубине погружения элементов; з — в условиях подъема — выпора элементов из грунта при их «массовом» погружении; 1 — слои верхней толщи грунтов; 2 — свайные элементы; 2* — свайные элементы, получившие подъем из грунта; 3 — проектная отметка погружения свай; 4 — слои плотных грунтов; 5 — уровень «остановки» или разрушения элементов в прослоях плотных грунтов; 6 — пространство, не заполненное грунтом, под пятой свай

Таблица 1

Обзор конструктивно-технологических решений устройства свай

№ п/п	Авторы, источники	Описание способа достижения технического результата	Принятые технологические решение погружения (изготовления) свай
1	Аббасов П. А. (1980) [5]	Модульные ударостойкие сваи со стаканными стыками, последовательно соединяемые при погружении	Погружение свай заводского изготовления
2	Харисов И. З., Бабич Д. С. и др. (2011), патент 2486315. Юшубе С. В., Полищук А. И. (1999), патент 2150550	Опирающие сплошной заводской элемент в предварительно изготовленные грунтоцементные столбы или буронабивные элементы	То же, изготовление буронабивных свай
3	Крутов В. И. и др. (2014), патент 2601630	То же при погружении элементов в скважины с уширенным основанием, заполненные щебнем	Погружение свай заводского изготовления, устройство грунтовых свай
4	Коробейников В. А. и др. (2015), патент 2602524	То же при устройстве буровых элементов с предварительным заполнением нижней их части щебнем	Изготовление буронабивных и грунтовых свай
5	Шулятьев О. А. (2018) [6]	Устройство свай с продольным каналом. Через него выполняют цементацию боковой и опорной поверхности свай	Изготовление буронабивных свай глубокого заложения
6	Ганичев И. А. (1969) [7]. Буланкин Н. Ф. (2006), патент 2332540. Федоров В. С. (2011). Гордев М. Н. и др. (1982), авторское свидетельство 1052625. Берман В. И. (1986), авторское свидетельство 1359411	Забивка и изготовление свай-инъекторов с центральным проходным каналом с подачей закрепляющего раствора под пяту или по боковой поверхности свай	Для любого типа свай
7	Сапожников А. И. (2000), патент 2188906	То же при использовании трубок, закрепленных по боковой поверхности элемента, применяемых для подмыва при их погружении	Погружение свай заводского изготовления
8	Пестряков В. А., Хорычев А. А. (2009), патент 2386751	Погружение заводской сваи с продольным каналом, через который выполняют прокол грунта. Образованная полость заполняется бетоном	То же
9	Веселов А. В. и др. (2013), патент 2535556	То же с последующим втрамбовыванием в забой бетонной смеси из продольного канала в теле свай	То же
10	Юшубе С. В., Нуйкин С. С. и др. (2003), патент 2003113846	Буронабивные сваи с увеличением их сопротивления за счет создания уширений по разрядно-импульсной технологии	Изготовление буронабивных свай
11	Берман В. И., Цесарский А. А. (1985) [8]	Погружение заводского элемента с последующим формированием на его оголовке буронабивного элемента в обсадной трубе	Комбинация двух режимов: забивка и устройство буронабивной сваи
12	Вершинин В. П., Сотников С. Н. и др. [9]	Устройство уширенной пяты свай по традиционным технологиям (создание полостей взрывами, применение инвентарных механических уширителей)	Изготовление буронабивных и грунтовых свай

В качестве альтернативного решения на практике при погружении свай заводского изготовления выполняют их наращивание дополнительным элементом соответствующей длины и допогружают до требуемого заглубления в плотные породы. Но такой опыт часто является безрезультатным, так как погруженная свая «прихватывается» в грунте за счет ее трения по боковой поверхности. Это требует приложить к ней дополнительное ударное «воздействие срыва» в массиве грунта, которое может привести к разрушению ее оголовка. Кроме того, для выполнения таких работ требуются дополнительные затраты на усиление основания между сваями в виде подсыпки щебнем ходовых путей машин выше уровня оголовков погруженных свай.

Представленные решения приводят к дополнительным затратам и приостановке работ до 6 мес. — на проведение инженерно-геологических изысканий, корректировки проекта и согласование стоимости указанных работ.

Авторы видят перспективы поиска решения поставленной проблемы в применении комбинированных технологий, при которых без погружения дублирующих или допогружения уже выполненных свай возможно обеспечить их заглубление в кровли плотных пород. Для этого предлагается исследовать конструктивно-технологические параметры комбинированных элементов и свай-инъекторов.

В табл. 1 представлены результаты поиска документированных источников в указанном направлении.

Среди известных способов, приведенных в табл. 1, следует отметить технологическое решение, описанное в работе В. И. Бермана и А. А. Цесарского (1985), разработанное на основании опытного погружения и испытания комбинированных свай нового типа [8].

Были применена следующая технологическая последовательность работ (рис. 2):

Рис. 2. Технология устройства комбинированных свай: а — бурение скважины; б — установка обсадной трубы; в — забивка сваи в трубу до уровня ее торца; г — добивка сваи до уровня нижнего торца трубы; д — установка арматурного каркаса, бетонирование и извлечение обсадной трубы; е — формирование оголовка сваи; I, II — соответственно устойчивые и неустойчивые грунты; III — несущий слой грунта; 1 — буровой снаряд; 2 — обсадная труба; 3 — забивная свая; 4 — подбоек-добойник; 5 — арматурный каркас; 6 — глубинный вибратор; 7 — буронабивной элемент комбинированной сваи; УГВ — уровень грунтовых вод

- бурение лидерной скважины с обсаживанием ее стальными трубами (рис. 2, а, б);
- в погруженную таким образом трубу забивали сваю заводского изготовления до уровня ее верхнего торца (рис. 2, в). Затем сваю допогружали до уровня нижнего торца трубы (рис. 2, г);
- погружали арматурный каркас в трубу и бетонировали ее до уровня верхнего торца трубы с уплотнением бетонной смеси (рис. 2, д);
- последовательно с бетонированием извлекали обсадную трубу с формированием оголовка на устье скважины (рис. 2, е).

Таким образом, в грунте получали комбинированный элемент, в верхней его части состоящий из буронабивной, а в нижней — из заводской сваи.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что несущая способность такой сваи в песчаном грунте была выше, чем у забивной, для вдавливающих нагрузок — на 48 %, для горизонтальных — на 62 %. Расчет экономической эффективности комбинированных свай, определенной по результатам опытного проектирования, показал, что применение таких свай

позволяет при указанных условиях снизить первоначальную сметную стоимость фундаментов на 35–40 %.

Другая группа технологических решений относится к применению так называемых свай-инъекторов, выполненных в виде заводского или бурового элемента с центральным сквозным каналом, через который после их погружения (изготовления) производят инъектирование грунта в виде различных растворов под их торцом. Схема устройства свай-инъекторов представлена на рис. 3, а.

Особенностью свай-инъектора заводского изготовления является то, что по продольной оси ее ствола устанавливается стальная труба. После забивки на требуемую глубину через эту трубу можно закрепить грунт вокруг нижнего торца сваи любым из известных методов. В результате вокруг их нижнего торца образуется опорный массив грунта, который выполняет ту же задачу, что и уширенная пятка [7].

При устройстве буронабивных свай-инъекторов выполняют бурение скважины, ее армирование с одновременной установкой

Рис. 3. Технологические решения устройства свай-инъекторов (а) и комбинированного элемента в виде сваи заводского изготовления, погруженной в предварительно закрепленный массив грунта (б): 1 — инъекторная трубка диаметром 37–50 мм; 2, 3 — соответственно свая заводского изготовления и буровая со сквозными проходными каналами; 4 — закрепленный массив грунта; 5 — буровой инструмент с монитором; 6 — свая заводского изготовления сплошного сечения; 7 — несущий слой грунта; I — бурение до кровли несущего слоя инструментом с инъектором на нижнем торце; II — извлечение инструмента с одновременной подачей под давлением и перемешиванием грунта с цементным раствором; III, IV — погружение сваи заводского изготовления с заделкой в грунтоцементный массив

армокаркаса с закрепленной в нем инъекторной трубкой, бетонирование по всей высоте скважины, нагнетание раствора под нижний торец свай. Давление нагнетания укрепляющего раствора — до 0,25 МПа. Давление при силикатизации — до 0,3 МПа, при цементации — до 0,5 МПа [7, 9].

В развитие указанного на рис. 3, б решения представлена технологическая схема погружения заводского элемента в предварительно закрепленный методом струйной цементации массив грунта, состоящая из следующих этапов:

- геодезическая разметка положения свай, проходка до кровли несущего слоя буровым инструментом с монитором на нижнем торце;
- извлечение инструмента с одновременной подачей через сопло в мониторе цементного раствора под давлением;
- погружение сваи заводского изготовления до ее заделки в выполненный таким образом грунтоцементный массив.

При этом создают в грунте комбинированную сваю: в верхней ее части, в зоне действия максимальных изгибающих моментов, состоящую из заводского элемента, а в нижней — из грунтоцементного массива.

С учетом вышесказанного авторами была выполнена качественная оценка характеристик

таких способов изготовления свай, представленная в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать следующие выводы: практически ни одно из представленных технологических решений не позволяет решить поставленную задачу в виде дополнительного заглубления свай без дополнительных затрат на погружение дублирующих элементов.

Поэтому авторами статьи предложена новая технология создания комбинированных свай за счет погружения готовых или изготовления буронабивных элементов со сквозным проходным каналом, через который при необходимости будут выполнять погружение бурового инструмента для выполнения грунтоцементного массива, который будет заделан в тело основной сваи. Этапы такой технологии представлены на рис. 4, 5.

С учетом рис. 4 работы при погружении сваи заводского изготовления необходимо выполнять в следующей последовательности:

1. Наведение копра (установки вдавливания) на место устройства сваи (рис. 4, а).
2. Погружение сваи до проектной отметки. Копер переезжает на следующий участок работ. При необходимости выполняют испытания свай по различным методикам (рис. 4, б).

Таблица 2

Качественная оценка технологических решений устройства свай с возможностью изменения их конструктивных параметров

№ п/п	Наименование способа	Возможность применения без погружения (изготовления) дублирующих элементов	Предельная глубина устройства дополнительных элементов ниже торцов существующих свай, м
1	Создание комбинированных элементов, состоящих в верхнем интервале погружения — из буронабивного элемента, а в нижнем — из элемента заводского изготовления	Нет	16
2	То же, состоящих в верхнем интервале из элемента заводского изготовления, а в нижнем — из буронабивной сваи	Нет	15
3	То же с погружением сваи заводского изготовления в массив закрепленного цементацией грунта	Нет	5–15
4	Сваи-инъекторы	Нет	0,9–1,2
5	Сваи модульные заводского изготовления, состоящие из секций длиной до 1,5–2 м	Да	5–12

Рис. 4. Этапы проведения работ по новой технологии устройства комбинированных свай с элементами заводского изготовления: а — наведение копра на место погружения сваи; б — погружение сваи; в — выполнение проходки буровым инструментом через проходной канал в свае; г — устройство грунтоцементного массива по струйной технологии ниже торца погруженной сваи; д — извлечение бурового инструмента через канал в свае. Отм. 1, отм. 2 — соответственно отметка погружения острия сваи и пяты грунтоцементного массива; 1 — копер; 2 — свая; 3 — буровая установка; 4 — буровой инструмент с монитором; 5 — проходной канал в свае; 6 — грунтоцементный массив

Рис. 5. Этапы проведения работ по новой технологии для буронабивных свай: а — наведение буровой установки на место устройства сваи; б — устройство бетонного ствола сваи; в — погружение краном армокаркаса с формообразователем проходного канала в свае; г — выполнение проходки буровым инструментом с монитором через проходной канал; д — устройство грунтоцементного массива по струйной технологии ниже торца изготовленной сваи; е — извлечение бурового инструмента. Отм. 1, отм. 2 — соответственно отметка изготовления острия сваи и пяты грунтоцементного массива; 1 — буровая установка; 2 — скважина, заполненная бетонной смесью; 3 — арматурный каркас с закрепленной в нем трубкой для формирования проходного канала; 4 — буровая установка для устройства струйной цементации грунта; 5 — грунтоцементный массив

3. Наводка буровой установки на оголовок погруженной сваи. Буровую трубу с монитором погружают через продольный канал в свае с разбуриванием пробки-заглушки на нижнем ее торце (рис. 4, в).

4. Погружение монитора до необходимой отметки; при его извлечении — подача цементного раствора под давлением. Таким образом закрепляют грунтовый элемент в интервале от устья проходки до нижнего торца (рис. 4, г). По завершении работ извлекают буровую трубу из тела сваи и замоноличивают (тампонируют) проходной канал.

При устройстве буронабивных свай по указанной технологии работы необходимо выполнять в следующей последовательности:

1. Размещение буровой установки над центром сваи (рис. 5, а).

2. Бурение до проектной отметки с заполнением бетонной смесью ствола скважины.

3. Погружение арматурного каркаса с закрепленной в нем центральной герметичной трубкой — формообразователем канала в скважину (рис. 5, б).

4. Наводка буровой установки на оголовок погруженной сваи. Буровую трубу погружают через продольный канал сваи с разбуриванием пробки на нижнем ее торце (рис. 5, г).

5. Погружение бурового монитора до проектной отметки, при его извлечении — подача цементного раствора под давлением. Таким образом цементируют и закрепляют грунтовый элемент до уровня торца буронабивной сваи (рис. 5, д). По завершении работ извлекают буровую трубу из тела сваи и замоноличивают (тампонируют) проходной канал в ней.

Для выполнения цементации грунтов в зависимости от их характеристик в пределах геологического разреза следует принять следующий расход материалов [10–12]:

- цемент на 1 пог. м сваи — 600–650 кг;
- раствор — 120–250 л/с;
- давление подачи раствора для режима *jet-2* и *jet-3* — 40–60 атм./4–6 МПа.

Цементацию в таких условиях традиционно выполняют буровыми установками со следующими параметрами:

- мощность — 125 кВт при 2200 об./мин;
- крутящий момент — 0,9 кН · м;
- масса — 19 т.

С учетом изложенной технологической последовательности в грунте выполняют комбинированный элемент, в верхней его части состоящий из заводского или буронабивного элемента с центральным проходным каналом, а в нижней — из грунтоцементного массива. Причем цементацию выполняют после погружения или изготовления сваи, в зависимости от требования проекта по усилению конструкций фундамента.

Для обоснования такого решения авторами была выполнена технико-экономическая оценка его параметров. Для разных способов сравнивались два варианта выполнения работ:

1. Традиционное решение, при котором выполняется погружение дополнительных свай-дублей с их заглублением ниже уровня ранее погруженных элементов.

2. Предлагаемое новое решение.

Расчеты выполнялись для погружения (изготовления) элементов основного свайного поля длиной 20 м и дублирующих — длиной 25 м. Соответственно сторона сечения квадратной сваи заводского изготовления 400×400 мм, а диаметр буронабивных свай 600 мм. Полученные результаты расчетов представлены в табл. 3.

На основании значений, представленных в табл. 3, авторами установлено, что при устройстве фундаментов из элементов заводского изготовления при длине цементации под острием сваи свыше $0,5-0,6L_{св}$ применение предлагаемого способа становится неэффективно по критерию дополнительных затрат.

Соответственно, для буронабивных элементов применение способа неэффективно при длине цементации свыше $0,9L_{св}$.

График изменения указанных технико-экономических показателей представлен на рис. 6.

Данные, приведенные в табл. 3 и на рис. 6, свидетельствуют об эффективности применения предлагаемых решений в виде цементации грунта под острием свай, которую выполняют через проходные каналы в их стволах.

Выполненный анализ предлагаемых технологических параметров показывает, что поставленная задача — обеспечение регулируемых параметров свайного фундамента при необходимости заглубления уже погруженных элементов в более плотные породы без погружения дублирующих

Таблица 3

Расчет затрат на усиление свайного фундамента по традиционному и предлагаемому решениям

Наименование технологии	Суммарная длина элементов основного свайного поля ($L_{св}$) / то же дополнительных элементов (свай-дублей или цементации грунта L_d), пог. м	Процент элементов, подлежащих дублированию или цементации, %	Стоимость работ, млн руб.	Экономия при использовании предлагаемого решения, млн руб./пог. м
Погружение свай заводского изготовления, сторона сечения 400×400 мм				
Дублирование	2000/2000	80	11 126	1,25
Цементация	2000/400	80	8625	
Изготовление буронабивных свай вытеснения диаметром 600 мм				
Дублирование	2000/2000	80	17 200	2,72
Цементация	2000/400	80	11 768	
То же с извлечением грунта				
Дублирование	2000/2000	80	17 715	2,85
Цементация	2000/400	80	12 026	

свай — будет решена при обеспечении равнопрочности участков комбинированных элементов. В таких условиях особую важность приобретают вопросы контроля параметров грунтоцементных масс — прочности и сплошности [1, 13, 14].

В таких условиях согласно рекомендациям актуальных нормативных документов в составе пооперационного контроля качества необходимо применять следующие мероприятия:

а) после погружения или изготовления основных элементов свайного поля:

- испытание свай статической вдавливающей нагрузкой для уточнения значений их несущей способности и ее соотношения с проектными значениями. Такой анализ следует проводить совместно с рассмотрением исполнительной документации в виде специализированных журналов работ, показателей бортовых ЭВМ копров или буровых установок [4, 15, 16]. Это позволит выявить участки свайных фундаментов с заниженными показателями их несущей способности;

- статическое зондирование грунтов для выявленных участков для уточнения положения кровли несущего слоя грунтов и установления значений интервала глубин, в пределах которых будет выполнена цементация массива грунта;

б) по завершении работ по выполнению грунтоцементных массивов следует выполнить повторные статические испытания комбинированных

свай для определения их несущей способности и их сравнительного анализа с первоначальными результатами. При необходимости — выполнить бурение разведочных скважин для отбора образцов кернов для дальнейшего определения прочности свай и визуальной оценки сплошности. Следует отметить, что в последнее время накоплен достаточный опыт работ по контролю параметров струйной цементации грунтов в условиях неоднородных напластований грунтов, характерных для Санкт-Петербурга [10, 11]. Анализ таких работ позволяет заключить, что при контроле известных технологических параметров цементации (скорости извлечения и частоты вращения монитора, режима нагнетания раствора) можно прогнозировать прочностные параметры закрепленного массива грунта.

Выводы

На основании изучения опыта работ выявлены основные ситуации, требующие выполнять корректировку параметров свайных фундаментов в виде заглубления острия элементов в плотные слои грунтов.

Традиционно для решения таких задач погружают дублирующие элементы большей, чем по проекту, длины, что приводит к увеличению затрат по устройству свайного основания более чем на 40–60 %.

Для сокращения дополнительных затрат на основании анализа литературных источников

Рис. 6. Графические зависимости изменения эффективности применения способа комбинированных элементов в зависимости от конструктивных параметров свай: ΔC — показатель экономии затрат от применения нового способа; $L_{св}$, L_d — полная длина свай в составе основного фундамента и дополнительного грунтоцементного элемента; $N_{св}$, N_d — количество свай основного фундамента и их дополнительных элементов; 1–3 — графические зависимости при $N_{св}/N_d = 1,00-1,25-2,00$; 4–6 — зависимости при использовании буронабивных свай при $N_{св}/N_d = 1,00-1,25-2,00$

с учетом современных возможностей технологий предложено новое техническое решение. Применяются свайные элементы, выполненные по типовым сериям (рекомендуемое поперечное сечение квадратной сваи 400×400 мм). Причем вдоль продольной оси сваи в заводских условиях устраивают продольный канал из полимерной трубы. Нижний торец сваи в пределах такой трубы зачеканивают цементным раствором.

В условиях строительных площадок сваи погружают по традиционным технологиям. При необходимости понижения отметки заглубления сваи на основании дополнительных инженерно-геологических изысканий через продольные каналы в сваях выполняют бурение грунта в интервале от торца погруженных свай до кровли несущего слоя, а при извлечении бурового инструмента выполняют струйную цементацию его массива. Таким образом под их торцом создают элемент в виде грунтоцементной сваи.

Такое решение позволяет повысить сопротивление сваи по боковой и лобовой поверхности, а также снизить разность осадки свайного фундамента, что позволяет исключить аварийные ситуации в процессе эксплуатации здания.

По указанной технологии можно устраивать и комбинированные элементы, верхнюю секцию которых выполняют из буронабивных элементов.

Авторами на основании разработанной математической модели показано, что предлагаемое технологическое решение позволяет более чем на 30–40 % сократить дополнительные затраты по сравнению с традиционным решением.

Получены предельные значения соотношения глубины погружения свай и цементации грунта, свыше которых применение указанной технологии становится неэффективно. По сравнению с известными решениями предлагаемая технология позволяет сократить трудозатраты на 30 % и является более универсальным решением по

критерию изменения длины грунтоцементного элемента, выполняемого под торцом ранее изготовленной сваи.

Технологические схемы, представленные в статье, разработаны при участии магистранта кафедры ТСП СПбГАСУ К. В. Савельева. Авторы благодарят начальника управления нулевых работ ООО «Вертикаль» Я. В. Иванова за консультации, позволившие определить возможность практической реализации предлагаемых в статье новых технологий.

Библиографический список

1. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. М.: АСВ, 2017. 168 с.
2. Гайдо А. Н., Левинтов Г. В. Анализ результатов определения несущей способности грунтов, полученных при их статических испытаниях сваями с выпором // Геотехника. 2013. № 3. С. 4–15.
3. Никифорова Н. С. Обеспечение сохранности зданий в зоне влияния подземного строительства. М.: НИУ МГСУ, 2016. 152 с.
4. Пономарев А. Б., Безгодов М. А. Сопоставление результатов натурных испытаний свай с результатами статического зондирования в слабых водонасыщенных глинистых грунтах с учетом фактора времени // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 2 (43). С. 79–85.
5. Аббасов П. А. Механизированная безотходная технология возведения свайных фундаментов. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1988. 222 с.
6. Шулятьев О. А. Основания и фундаменты высотных зданий. М.: АСВ, 2018. 392 с.
7. Ганичев И. А. Устройство искусственных оснований и фундаментов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1981. 543 с.
8. Берман В. И., Цесарский А. А. Об эффективности применения комбинированных свай // Технология и оборудование для специальных строительных работ: сб. тр. ВНИИГС. Л., 1985. С. 74–81.
9. Сотников С. Н., Симагин В. Г., Вершинин В. П. Проектирование и возведение фундаментов вблизи существующих сооружений (Опыт строительства в условиях Северо-Запада СССР) / под ред. С. Н. Сотникова. М.: Стройиздат, 1986. 96 с.
10. Малинин А. Г. Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 226 с.
11. Ланько С. В. Влияние технологии струйной цементации на механические свойства окружающего массива грунта // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 3 (32). С. 159–163.

12. Разводовский Д. Е., Чепурнова А. А. Оценка влияния усиления фундаментов зданий по технологии струйной цементации на их осадку // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 64–72.

13. Осокин А. И., Денисова О. О., Шахтарина Т. Н. Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 16–24.

14. Пономарев А. Б., Захаров А. В., Сазонова С. А., Калошина С. В., Безгодов М. А., Шенкман Р. И., Золотозубов Д. Г. Геотехнический мониторинг жилого дома // Жилищное строительство. 2015. № 9. С. 41–45.

15. Гайдо А. Н. Информационное моделирование здания (BIM) с учетом технологических параметров при производстве работ нулевого цикла // Жилищное строительство. 2019. № 4. С. 47–55.

16. Гайдо А. Н., Левинтов Г. В. Анализ результатов определения несущей способности грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 117–124.

References

1. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlement of buildings and structures in the zone of influence of underground construction]. Moscow, ASV Publ., 2017, 168 p.
2. Gaydo A. N., Levintov G. V. *Analiz rezul'tatov opredeleniya nesushchey sposobnosti gruntov, poluchennykh pri ikh staticheskikh ispytaniyakh svayami s vyporom* [Analysis of the results of determining of the bearing capacity of soils obtained during the first static tests by piles with soil heaving]. *Geotekhnika – Geoengineering*, 2013, no. 3, pp. 4–15.
3. Nikiforova N. S. *Obespechenie sokhrannosti zdaniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Ensuring the safety of buildings in the zone of influence of underground construction]. Moscow, NIU MGSU Publ., 2016, 152 p.
4. Ponomarev A. B., Bezgodov M. A. *Sopostavlenie rezul'tatov naturnykh ispytaniy svay s rezul'tatami staticheskogo zondirovaniya v slabyykh vodonasyshchennykh glinistyykh gruntakh s uchetom faktora vremeni* [Comparison of the pile load test results with the results of the static cone penetration test in soft water-saturated clay-bearing soils taking into account the time factor]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Vestnik of Civil Engineers*, 2014, no. 2 (43), pp. 79–85.
5. Abbasov P. A. *Mekhanizirovannaya bezotkhodnaya tekhnologiya vozvedeniya svaynykh fundamentov* [Mechanized waste-free construction technology of pile foundations]. Vladivostok, Dal'nevostochnyy Un-t Publ., 1988, 222 p.

6. Shulyat'ev O. A. *Osnovaniya i fundamenty vysotnykh zdaniy* [Bases and foundations of high-rise buildings]. Moscow, ASV Publ., 2018, 392 p.
7. Ganichev I. A. *Ustroystvo iskusstvennykh osnovaniy i fundamentov* [Construction of artificial bases and foundations]. 3-rd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981, 543 p.
8. Berman V. I., Tsesarskiy A. A. *Ob ehffektivnosti primeneniya kombinirovannykh svay* [Concerning the effectiveness of using combined piles]. *Sb. tr. VNIIGS «Tekhnologiya i oborudovanie dlya spetsial'nykh stroitel'nykh rabot»* [Coll. of sci. works VNIIGS "Technology and equipment for special construction works"]. Leningrad, 1985, pp. 74–81.
9. Sotnikov S. N., Simagin V. G., Vershinin V. P. *Proektirovanie i vozvedenie fundamentov vblizi sushchestvuyushchikh sooruzheniy (Opyt stroitel'stva v usloviyakh Severo-Zapada SSSR)* [Design and construction of foundations near existing structures (construction experience in the North-West of the USSR)]. Ed. by Sotnikov S. N. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 96 p.
10. Malinin A. G. *Struynaya tsementatsiya gruntov* [Jet cementation of soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2010, 226 p.
11. Lan'ko S. V. *Vliyanie tekhnologii struynoy tsementatsii na mekhanicheskie svoystva okruzhayushchego massiva grunta* [The influence of jet grouting technology on the mechanical properties of the surrounding soil]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 3 (32), pp. 159–163.
12. Razvodovskiy D. E., Chepurnova A. A. *Otsenka vliyaniya usileniya fundamentov zdaniy po tekhnologii struynoy tsementatsii na ikh osadku* [Assessment of the impact of strengthening the foundations of buildings by jet cementation technology on the settlement]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2016, no. 10, pp. 64–72.
13. Osokin A. I., Denisova O. O., Shakhtarina T. N. *Tekhnologicheskoe obespechenie podzemnogo stroitel'stva v usloviyakh gorodskoy zastroyki* [Technological support of underground construction in urban development]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2014, no. 3, pp. 16–24.
14. Ponomarev A. B., et al. *Geotekhnicheskiiy monitoring zhilogo doma* [Geotechnical monitoring of a residential building]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2015, no. 9, pp. 41–45.
15. Gaydo A. N. *Informatsionnoe modelirovanie zdaniya (BIM) s uchetom tekhnologicheskikh parametrov pri proizvodstve rabot nulevogo tsikla* [Building Information Modeling (BIM) taking into account technological parameters in the production of zero-cycle works]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2019, no. 4, pp. 47–55.
16. Gaydo A. N., Levintov G. V. *Analiz rezul'tatov opredeleniya nesushchey sposobnosti gruntov* [Analysis of the results of determining the bearing capacity of soils]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 2 (37), pp. 117–124.