

Савинов А.В., Фролов В.Э., Бровиков Ю.Н., Кожинский М.П. Экспериментальные исследования несущей способности свай Fundex после длительного «отдыха» в глинистых грунтах статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 13–29. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.02

Savinov A.V., Frolov V.E., Brovikov Y.N., Kozhinskiy M.P. Experimental tests of a bearing capacity of Fundex piles after the long “relaxation” in clay soils the dead pressing and pulling-out loads. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019. Vol. 10. No. 4. Pp. 13-29. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.02



**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 10, № 4, 2019
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2019.4.02

УДК 624.154.53

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ FUNDEX ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО «ОТДЫХА» В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ СТАТИЧЕСКИМИ ВДАВЛИВАЮЩИМИ И ВЫДЕРГИВАЮЩИМИ НАГРУЗКАМИ

А.В. Савинов¹, В.Э. Фролов², Ю.Н. Бровиков², М.П. Кожинский²

¹ООО НПП «ГЕОТЕХНИКА-СПИ», Саратов, Россия

²ЗАО «Геотехника-С», Саратов, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 29 июля 2019

Принята: 1 октября 2019

Опубликована: 10 января 2020

Ключевые слова:

свая Fundex, вытеснительная набивная свая, «отдых» сваи, несущая способность (предельное сопротивление) сваи F_d , методы полевых испытаний сваями.

АННОТАЦИЯ

Анализируются результаты экспериментальных исследований новых для г. Саратова свай Fundex.

Приведена классификация свай д.т.н., проф. Ф.К. Лапшина по характеру их совместной работы с грунтом основания. Отмечены изменения, внесенные в 2016 г. в СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», касающиеся расчета вытеснительных набивных бетонных свай.

Проведен краткий анализ истории создания таблиц СП 24.13330 по определению расчетных сопротивлений на боковой поверхности и под нижним концом свай. Показано, что данные величины не являются предельными сопротивлениями при исчерпании несущей способности грунта при «срыве», а приняты с некоторым запасом при достижении сваей «заранее заданной» осадки. Отмечено существование большого количества методов испытаний свай ступенчато-возрастающими нагрузками, отличающихся от методики ГОСТ 5686–2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» различными критериями оценки предельной несущей способности сваи.

В идентичных грунтовых условиях изготовлены две одинаковые сваи, и после продолжительного «отдыха» (3 месяца) без нагрузки выполнены испытания свай по ГОСТ 5686 статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками. Инженерно-геологические условия площадки и расстояние между сваями исключали их взаимное влияние при изготовлении и испытаниях.

Проведено сопоставление результатов натурных испытаний свай Fundex с расчетными значениями несущей способности вытеснительных свай, определенных по рекомендациям СП 24.13330. Отмечено существенное расхождение экспериментальных и расчетных величин при оценке несущей способности пяты сваи.

© Савинов Алексей Валентинович – доктор технических наук, доцент, e-mail: alexey_savinov@mail.ru.

Фролов Вадим Эдуардович – кандидат технических наук, директор, e-mail: recon52@mail.ru.

Бровиков Юрий Николаевич – технический директор, e-mail: recon52@mail.ru.

Кожинский Михаил Петрович – главный специалист, e-mail: recon52@mail.ru.

Alexey V. Savinov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: alexey_savinov@mail.ru.

Vadim E. Frolov – Ph.D. in Technical Sciences, Director, e-mail: recon52@mail.ru.

Yuriy N. Brovikov – Technical Director, e-mail: recon52@mail.ru.

Mikhail P. Kozhinskiy – Chief Specialist, e-mail: recon52@mail.ru.

Сделаны выводы о необходимости дополнительных экспериментальных исследований основания свай Fundex в широком диапазоне грунтовых условий лабораторными и полевыми методами с параллельными испытаниями статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками.

© ПНИПУ

EXPERIMENTAL TESTS OF A BEARING CAPACITY OF «FUNDEX» PILES AFTER THE LONG “RELAXATION” IN CLAY SOILS THE DEAD PRESSING AND PULLING-OUT LOADS

A.V. Savinov¹, V.E. Frolov², Y.N. Brovikov², M.P. Kozhinskiy²

¹Research and Design and Production Enterprise “GEOTEHNICA-SPI”, Limited Liability Company, Saratov, Russian Federation

²Closed joint-stock company, “GEOTEHNICA-S”, Saratov, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 29 July 2019
Accepted: 1 October 2019
Published: 10 January 2020

Keywords:

“Fundex” pile; cast in place (displacement) pile; pile relaxation; pile bearing capacity F_d ; limit shear strength of soil τ_i ; field test methods by piles.

ABSTRACT

In the article analyzes the results of experimental tests of new “Fundex” piles for The City of Saratov.

Classification of piles based on their interplay with the pile base has been devised by Doctor of Technical Science, Professor F.K. Lapshin. Changes introduced in 2016 into SP 24.13330.2011 “Pile foundations” concerning calculation of the displacing stuffed concrete piles.

The short analysis of history of creation of tables SP 24.13330 by determination of rated resistance on a lateral area and under the lower end of piles is carried out.

It is shown that these sizes are not the limit resistances at exhaustion of a carrying capacity of a soil at “failure”, and are accepted with some stock at achievement by a pile of “predetermined” settling.

There has been noted the existence of a large number of piles testing methods by means of incrementally increasing load different from methodology GOST 5686–2012 “Soils. Methods of field trials of piles” by various assessment criteria of the ultimate pile bearing capacity.

Two identical piles have been manufactured in identical soils and after a long (3 months) “relaxation” without load tests have been conducted under GOST 5686 with static indenting and pull out loads. Engineering-geological conditions of the platform and distance between piles excluded their interference at manufacture and tests. the dead pressing and pulling-out loads.

Comparison of results of field tests of “Fundex” piles to design values of a bearing capacity of the displacing piles determined by the recommendations of SP 24.13330 is carried out. The essential divergence of the experimental and estimated values at assessment of a bearing capacity of a heel of a pile is noted.

Conclusions are drawn on need of additional experimental research of the basis of “Fundex” piles for the wide range of soil conditions by laboratory and field methods with parallel tests static indenting and pull out loads.

© PNRPU

Особенностью устройства свайных фундаментов в Советском Союзе было повсеместное применение свай, погружаемых в грунт, в готовом виде (преимущественно забивных призматических). Именно для этого типа свай проведены многочисленные теоретические и экспериментальные научные исследования, наработана проектная и строительная практика, достаточно полно разработана технологическая, методическая и нормативная база. Сваи, выполненные непосредственно в грунте (буровые и буронабивные), применялись значительно реже, количество используемых технологий для их устройства было ограничено, а изученность особенностей их формирования в грунте и взаимодействия с грунтовым основанием оказалась существенно ниже.

В последние десятилетия практика отечественного фундаментостроения существенно расширилась за счет освоения и применения современных зарубежных свайных технологий [1–4]. В массовом количестве стало приобретаться оборудование ведущих геотехнических фирм, в первую очередь для изготовления свай непосредственно в грунте. В частности, в г. Саратове начали широко использоваться сваи, изготовленные с применением непрерывного проходного шнека (CFA), сваи «Дабл Ротари» (double rotary или сваи CFA, выполненные под защитой обсадной трубы), сваи Fundex.

Все многообразие применяемых технологий и конструкций свай оказалось не в полной мере охвачено действующими строительными нормами, что потребовало их серьезной корректировки.

В 1989 г. д.т.н., проф. Ф.К. Лапшиным предложена классификация свай по характеру их совместной работы с грунтом основания [5], представленная в табл. 1 (в редакции авторов статьи).

Таблица 1

Классификация свай по характеру совместной работы с основанием

Table 1

Classification of piles by the nature of collaboration with the basis

Работа основания при загрузке свай статическими нагрузками	Характеристика свай по способу погружения или устройства		
	1. Сваи, погруженные в грунт и изготовленные в грунте с полным вытеснением грунта в их объеме	2. Сваи, изготовленные с частичным вытеснением и частичным извлечением грунта в их объеме	3. Сваи, изготовленные с полным извлечением грунта в их объеме
1. С уплотнением грунта вокруг боковой поверхности	1.1. Погруженные в грунт или изготовленные в грунте выштамповыванием конические и пирамидальные сваи, включая сваи с вытрамбованной уширенной пятой	2.1. Погруженные в лидерные скважины конические и пирамидальные сваи	3.1. Буровые конические сваи
2. Без уплотнения грунта вокруг боковой поверхности	1.2. Погруженные в грунт или изготовленные в грунте выштамповыванием призматические и цилиндрические сваи	2.2. Погруженные в лидерные скважины призматические и цилиндрические сваи. Бутонабивные сваи, изготовленные в пробуренных скважинах с вытеснением грунта при бетонировании. Буровые сваи с вытрамбованной уширенной пятой	3.2. Буровые цилиндрические сваи, включая сваи с разбуренной уширенной пятой. Сваи-столбы

В соответствии с логикой таблицы работа свай под нагрузкой в идентичных грунтовых условиях зависит от конструктивных особенностей свай, методов ее погружения или устройства, а также характера ее взаимодействия с основанием при приложении статических нагрузок. Наиболее эффективными по удельной несущей способности являются сваи конической или пирамидальной формы, погружаемые в грунт или изготавливаемые в грунте с полным его вытеснением в объеме сваи (п. 1.1), наименее эффективными – буровые цилиндрические сваи, изготавливаемые с полным извлечением грунта (п. 3.2).

Все призматические и цилиндрические сваи, погруженные в грунт или изготовленные в грунте с полным вытеснением грунта в их объеме (п. 1.2), должны обладать достаточно близкой удельной несущей способностью.

С этим утверждением, очевидно, согласились и разработчики актуализированных строительных норм, отнеся сваи Fundex к вытеснительным.

ГОСТ Р 57358–2016 / EN 12699:2000 также классифицирует их как вытеснительные (displacement pile) сваи, погружаемые в грунт (или выполняемые в грунте) без его извлечения (п. 3.1).

В соответствии с блок-схемой и рис. А.5 прил. А ГОСТ Р 57358–2016 сваи Fundex также относятся к вытеснительным набивным сваям (cast in place (displacement) pile), устраиваемым путем погружения железобетонной оболочки, а также с помощью оставляемой или инвентарной обсадной трубы с закрытым концом с заполнением их полости неармированным или армированным бетоном (п. 3.3).

СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» (в ред. Изменения № 1) относит сваи Fundex: по способу устройства – к вытеснительным, устраиваемым путем погружения (забивкой, вдавливанием или завинчиванием) инвентарных труб, нижний конец которых закрыт оставляемым в грунте башмаком (наконечником) или бетонной пробкой, с последующим извлечением этих труб по мере заполнения скважин бетонной смесью (п. 6.4, а): по способу заглубления в грунт – к набивным бетонным сваям, устраиваемым в грунте путем укладки бетонной смеси в скважины, образованные в результате принудительного вытеснения – отжатия грунта (п. 6.1, в).

Таким образом, предельное сопротивление грунта основания набивных свай, устраиваемых без выемки грунта (вытеснительных), должно определяться аналогично несущей способности привычных забивных или вдавливаемых свай.

Однако в разделе 7.2 СП 24.13330.2011 эта очевидная логика нарушается. В п. 7.2.2, где даны рекомендации по определению несущей способности висячих забивных и вдавливаемых всех видов и железобетонных свай-оболочек (забивных свай трения), погружаемых без выемки грунта, работающих на вдавливающую нагрузку, вытеснительные набивные сваи отсутствуют. Определение их несущей способности отнесено почему-то к разделу «Висячие набивные, буровые и сваи-оболочки, погружаемые с выемкой грунта и заполняемые бетоном (сваи трения)» (п. 7.2.6), хотя расчетные сопротивления грунта под нижним концом сваи R и на боковой поверхности ствола f_l рекомендуется определять по таблицам для забивных и вдавливаемых свай. В табл. 7.6 этого раздела, где приводятся коэффициенты условий работы грунта на боковой поверхности сваи, зависящие от способа образования скважины и условий бетонирования, эта неточность устранена и в п. 1 указаны «Набивные, а также сваи, устраиваемые с вытеснением грунта по 6.4, а при погружении инвентарной трубы с теряемым наконечником или бетонной пробкой».

Следует отметить, что на сегодняшний день терминология в отношении такого типа свай не окончательно устоялась и за рубежом. В работах ученых США чаще всего используется термин Drilled displacement piles (DDP), близкий к термину «буронабивная вытеснительная свая», или Full displacement piles (FDP) – «свая полного вытеснения», а в Европе – Screw piles, или «винтовая свая» [4].

Для рассматриваемых нами свай изменения, внесенные Приказом Минстроя РФ от 03.12.2016 № 885/пр в СП 24.13330.2011, не ограничились терминологией, а оказались более существенными. В табл. 7.6 СП 24.13330.2011, в частности, были увеличены коэффициенты условий работы грунта на боковой поверхности сваи $\gamma_{R,f}$. Вместо $\gamma_{R,f} = 0,8$ для песков, супесей и суглинков для этих грунтов принят $\gamma_{R,f} = 1,0$, а вместо $\gamma_{R,f} = 0,7$ для глин принят $\gamma_{R,f} = 0,9$. Коэффициент надежности по сопротивлению грунта под нижним концом сваи не изменился – $\gamma_{R,R} = 1,0$.

Таким образом, несущая способность висячих свай Fundex, определенная по рекомендациям СП 24.13330.2011, должна быть очень близка к несущей способности забивных свай. Однако выполненные авторами статьи статические испытания в грунтовых условиях г. Саратова не подтвердили столь высокую несущую способность свай Fundex [6].

В ряде публикаций отмечалось, что фактическая несущая способность свай Fundex значительно превышает величину, определенную расчетом по таблицам. Однако следует обращать внимание на время появления статей, так как чаще всего имеется в виду более ранняя редакция СП 24.13330, в которой сваи этого типа относились к буровым и их расчетная несущая способность действительно сильно занижалась.

В 2015 г. ЗАО «Геотехника-С» получило подряд на устройство свайного фундамента под пятисекционный 25-этажный дом жилого комплекса «Царицынский» в г. Саратове. По технологии Fundex установкой ИНС Fundex F2800 с поверхности дна котлована глубиной около 2,0 м необходимо было изготовить 310 свай диаметром 375 мм, длиной 9,0 м с теряемым винтовым наконечником DPOS-4E (наибольший диаметр спирали – 465 мм).

Инженерно-геологические условия площадки представлены мощной толщей глинистых отложений со следующими характеристиками (глубины залегания слоев указаны от поверхности дна котлована):

- слой ИГЭ-2 – глина зеленовато-серая твердая, с 3 м – полутвердая, с 4,5 м – темно-серая, твердая с вкраплениями черной, опесчаненная;
- слой ИГЭ-3 – глина зеленовато-черная до черной, твердая, плотная, алевритистая.

Подземные воды вскрыты на глубинах от 2,2 до 3,0 м и локализованы в диапазоне глубин от 2,2 до 5,0 м.

Инженерно-геологический разрез площадки со схемой расположения свай в месте проведения эксперимента показан на рис. 1.

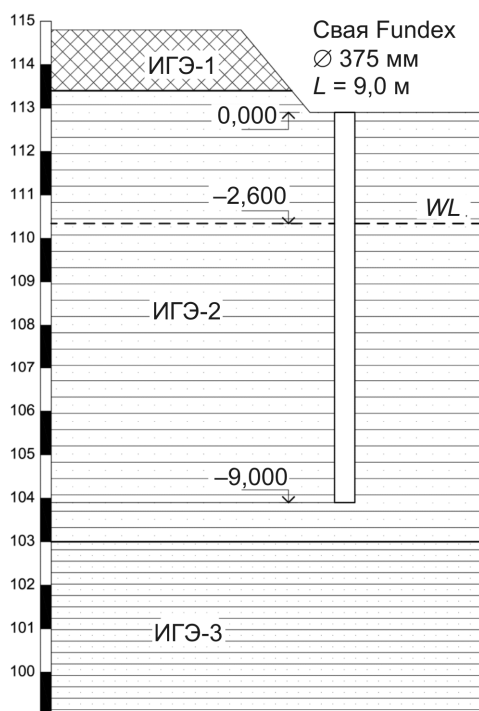


Рис. 1. Обобщенный инженерно-геологический разрез строительной площадки в месте проведения эксперимента

Fig. 1. The generalized engineering-geological section of the building site in the venue of an experiment

Перед началом массового устройства свай для уточнения несущей способности в декабре 2014 г. по инициативе ЗАО «Геотехника-С» с отметки дна котлована изготовлены две одинаковые сваи на блок-секции «В» (№ 132 и б/н). Расстояние между сваями принято 2,48 м, что практически исключало взаимное влияние свай при изготовлении и испытаниях, но позволяло считать их грунтовое основание идентичным. Другие сваи на момент проведения исследований в пределах экспериментального участка отсутствовали (рис. 2).

В марте 2015 г. после продолжительного (3 мес.) «отдыха» свай без нагрузки, гарантирующего завершение в основном процессов уплотнения, консолидации, восстановления водно-коллоидных связей, снижения порового давления до начального уровня и пр. в около-свайном массиве, выполнены испытания по ГОСТ 5686–2012. Одна из свай была испытана на вдавливание (№ 132), другая (б/н) – на выдергивание.

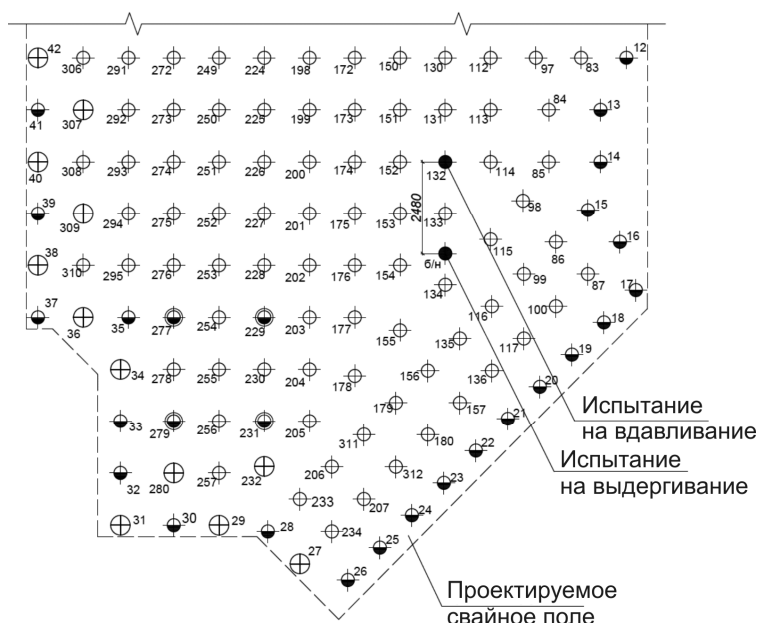


Рис. 2. Схема расположения экспериментальных свай
Fig. 2. Layout of the experimental piles

Результаты статических испытаний представлены на рис. 3.

При обработке результатов испытаний учитывались два значения несущей способности основания: по требованиям ГОСТ 5686–2012 на последней ступени нагружения с условной стабилизацией осадки (далее – при стабилизации) и при исчерпании несущей способности сваи или при ее «срыве» (далее – при срыве). В обоих случаях перемещения превышали значения сдвиговой осадки S_c для забивных свай.

Максимальное усилие «срыва» при испытаниях по ГОСТ 5686–2012 со стандартной величиной ступеней нагружения, неавтоматизированной системой приложения нагрузок и снятия показаний с индикаторов и т.д. зарегистрировать очень сложно. Фиксируемые на практике значения нагрузки при срыве – это в лучшем случае установившееся значение сопротивления основания после некоторого его пика (максимума) [7]. Вместе с тем результаты лабораторных испытаний грунтов в ряде случаев имеют аналогичные погрешности. Поэтому, например, сопоставление значений предельного сопротивления консолидированного грунта сдвигу τ_d при различных величинах нормального напряжения в плоскости сдвига σ со средними значениями удельного сопротивления основания сваи по боковой поверхности при испытаниях на выдергивание может дать дополнительную ценную информацию об особенностях работы уплотненного грунта у ствола сваи.

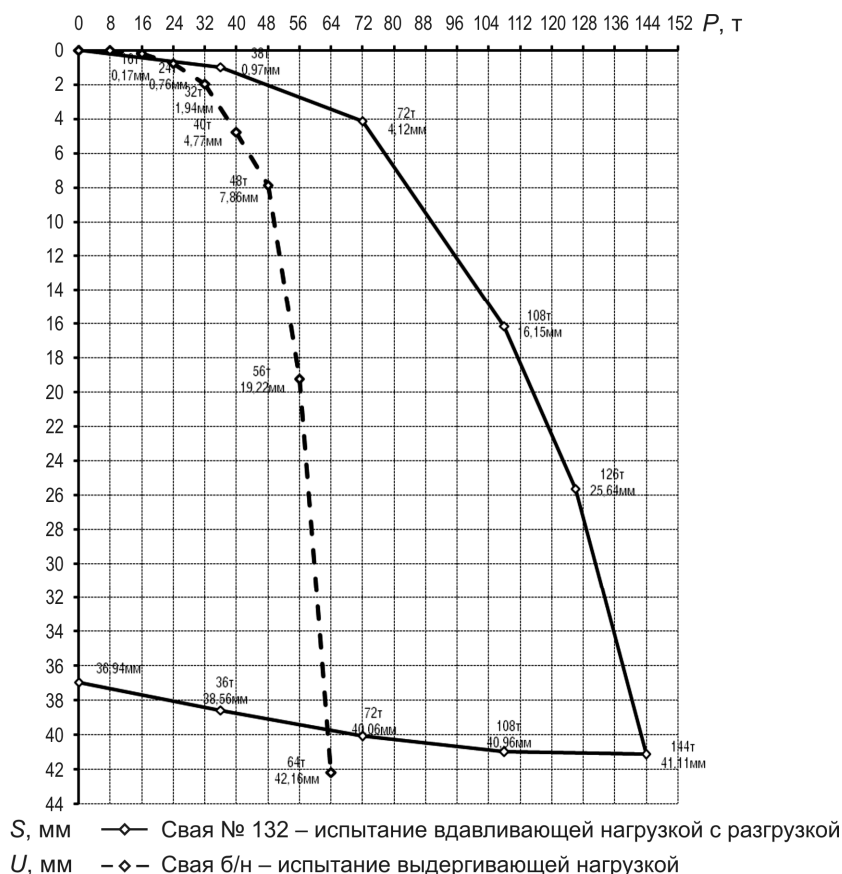


Рис. 3. Графики зависимости осадки S , мм, и перемещения U , мм, сваи от нагрузки P , т
Fig. 3. Graphs of dependence of settling S , mm, and movement U , mm, of a pile from loading P , t

Результаты выполненных испытаний

Несущая способность по грунту F_d по результатам испытания сваи № 132 на вдавливание:

$F_d = 126,0 \text{ т} = 1236,06 \text{ кН}$ при осадке $S = 25,6 \text{ мм}$ – при стабилизации;

$F_d = 144,0 \text{ т} = 1412,64 \text{ кН}$ при осадке $S = 41,1 \text{ мм}$ – при срыве.

Несущая способность боковой поверхности сваи F_{du} по результатам испытаний на выдергивание сваи (б/н):

$F_{du} = 56,0 \text{ т} = 549,36 \text{ кН}$ при перемещении $U = 19,2 \text{ мм}$ – при стабилизации;

$F_{du} = 64,0 \text{ т} = 627,84 \text{ кН}$ при перемещении $U = 42,2 \text{ мм}$ – при срыве.

Среднее удельное сопротивление грунта основания по боковой поверхности сваи (б/н) при площади боковой поверхности сваи $10,6 \text{ м}^2$:

$f = 549,36 / 10,6 = 51,83 \text{ кПа}$ – при стабилизации;

$f = 627,84 / 10,6 = 59,23 \text{ кПа}$ – при срыве.

При анализе результатов испытаний на выдергивание собственный вес сваи не учитывался, так как он составляет всего $2,39 \text{ т} = 23,4 \text{ кН}$, или от 3,73 до 4,26 % от усилия при испытаниях на выдергивание.

Несущая способность нижнего конца (пяты) сваи:

$F_{db} = F_d - F_{du} = 126,0 - 56,0 = 70,0 \text{ т} = 686,7 \text{ кН}$ – при стабилизации;

$F_{db} = F_d - F_{du} = 144,0 - 64,0 = 80,0 \text{ т} = 784,8 \text{ кН}$ – при срыве.

Удельное сопротивление грунта под нижним концом сваи при площади поперечного сечения башмака $0,17 \text{ м}^2$:

$R = 70,0 \cdot 9,81 / 0,17 = 4039,41 \text{ кПа}$ – при стабилизации;

$R = 80,0 \cdot 9,81 / 0,17 = 4616,47 \text{ кПа}$ – при срыве.

Необходимость использования при анализе результатов испытаний двух значений несущей способности основания (по требованиям ГОСТ 5686–2012 и при срыве) связана, кроме того, с несколькими принципиальными моментами, которые необходимо учитывать при сравнениях экспериментальных результатов с данными, представленными в табл. 7.2, 7.3 СП 24.13330.2011.

В соответствии с п. 7.1.1 СП 24.13330.2011 при действии вертикальных нагрузок: *Расчет свайных фундаментов и их оснований должен быть выполнен в соответствии с ГОСТ 27751 по предельным состояниям:*

первой группы:

а) по прочности материала свай и свайных ростверков;

б) по несущей способности (предельному сопротивлению) грунта основания свай;

...

второй группы:

а) по осадкам оснований свай и свайных фундаментов от вертикальных нагрузок (см. подраздел 7.4);

Тот же нормативный документ определяет, что «несущая способность свай (bearing resistance of a single pile) – это предельное сопротивление основания одиночной сваи по условию ограничения развития в нем деформаций сдвига в соответствии с заранее заданным условием».

Таким образом, значения расчетных сопротивлений на боковой поверхности и под нижним концом свай, определяемые в соответствии с СП 24.13330.2011, не являются предельными сопротивлениями при исчерпании несущей способности грунта (при срыве), а приняты с некоторым запасом при достижении сваей «заранее заданной» осадки.

Под «заранее заданной» осадкой подразумевается, очевидно, величина осадки S , регламентированная п. 7.3.5 СП 24.13330.2011:

$$S = \xi S_{u,mt},$$

где $S_{u,mt}$ – предельное значение средней осадки фундамента проектируемого здания или сооружения, устанавливаемое по прил. Г СП 22.13330–2016 «Основания зданий и сооружений»; ξ – коэффициент перехода от предельного значения средней осадки фундамента здания или сооружения $S_{u,mt}$ к осадке свай, полученной при статических испытаниях с условной стабилизацией (затуханием) осадки.

При принимаемой обычно величине коэффициента $\xi = 0,2$ и значениях предельной максимальной средней осадки основания фундаментов объектов нового строительства из табл. Г.1 СП 22.13330.2016 для производственных и гражданских зданий «заранее заданная» осадка S составит от 20 до 40 мм.

При этом фиксированная осадка при проведении испытаний свай по ГОСТу заранее не может быть задана, так как определяющим условием является выполнение условного критерия стабилизации, а осадка получается по факту. Максимальная осадка испытываемой сваи при проведении испытания грунтов статическими вдавливающими нагрузками ограничивается 40 мм. При наиболее часто проводимых контрольных (приемочных) испытаниях свай эксперимент прекращается при достижении нагрузки в $1,5F_d$ независимо от осадки. Поэтому все результаты определений расчетных сопротивлений свай в настоящее время получаются при разных осадках в диапазоне от 5 до 40 мм, а до «срыва» свая при испытаниях доводится далеко не всегда.

Испытания свай статическими выдергивающими нагрузками производятся достаточно редко, и фактический диапазон перемещений U ограничивается максимальным значением в 25 мм.

Следует иметь в виду, что существует большое количество методов испытаний свай ступенчато-возрастающими нагрузками, отличающихся от методики ГОСТа различными критериями оценки предельной несущей способности свай. Описание части методов испытаний и сравнительный анализ указанных критериев приведен, например, в работах [8, 9]. В работе [9] показано, что даже при интерпретации одного и того же графика испытаний «нагрузка – осадка» из-за разных критериев оценки возникают расхождения в определении предельной нагрузки на сваю до 25 %. В области уточнения расчетных и экспериментальных методов оценки несущей способности свай продолжает активно работать, в частности, В.Н. Fellenius: в январе 2019 г. вышла его «красная книга» (Red Book) [10], где обобщается большинство ранее выполненных исследований по данной тематике.

Кроме того, несущая способность свай сильно зависит от продолжительности ее «отдыха». Экспериментально установлено [11], что увеличение несущей способности забивных свай, погруженных в супеси, практически заканчивается спустя 8 сут, в суглинках – через 15–20 сут, а в глинах этот процесс может продолжаться до 45 сут и более. При этом в мягкопластичных глинистых грунтах несущая способность свай длиной 6–12 м при времени «отдыха» в 45 сут оказывается в 2,5 раза выше первоначальной и в 1,4–1,5 раза выше той, которая была при рекомендуемом «отдыхе» по ГОСТу. Сходные закономерности характерны и для вдавливаемых свай при несколько меньших сроках «отдыха» [12–14].

Вместе с тем совсем не очевидно, что представленные в табл. 7.2 и 7.3 СП 24.13330.2011 значения расчетных сопротивлений были получены при условиях, обозначенных в п. 7.3.5. Известно, что при подготовке норм за основу были приняты таблицы, составленные проф. А.А. Лугой в 1960-е гг. [15] и впервые включенные в СНиП II-17-77 «Свайные фундаменты». Базой для составления таблиц послужили натурные испытания свай, выполненные под его руководством в конце Великой Отечественной войны и сразу после ее окончания при восстановлении разрушенных мостов и транспортных сооружений. При ознакомлении с публикацией [15], посвященной непосредственно этой проблеме, остается много вопросов относительно методики проведения испытаний, критериев оценки предельной несущей способности свай, методов разделения работы нижнего конца и боковой поверхности, алгоритма обработки результатов.

Несмотря на то что эти таблицы в дальнейшем неоднократно корректировались при актуализации норм, на их составление, несомненно, повлияли исходные специфические грунтовые условия, большие нагрузки и длины свай, специальные требования при проектировании инженерных сооружений и др. Достоверно известно, например, что при составлении своих таблиц А.А. Луга вычислял расчетные сопротивления на боковой поверхности свай («сопротивление сил трения») при глубинах расположения слоя грунта менее 6 м по параболической зависимости

$$f_i = f_0 [1 - (h_0 - h_i)^2 / h_0^2],$$

где f_i – сопротивление сил трения на произвольной глубине h_i , f_0 – то же, на глубине $h_0 = 6$ м [15]. Это могло объясняться как наличием похожих эмпирических зависимостей, полученных при обработке полевых испытаний свай, так и недостатком необходимого экспериментального материала из-за отсутствия коротких свай в фундаментах мостов и путепроводов.

Вероятно, определенное снижение сопротивления грунта в верхней части ствола забивных свай обусловлено спецификой их погружения (выпор грунта на поверхность, колебания сваи при забивке из-за плохой центровки и т.д.) [11].

Впрочем, выполнение указаний прим. 2 к табл. 7.2 СП 24.13330.2011 относительно того, что средние глубины расположения слоя грунта при планировке территории срезкой, подсыпкой, намывом до 3 м следует принимать от уровня природного рельефа, при реальной глубине большинства котлованов в этом диапазоне глубин устраняет самый проблемный участок параболы от 0 до 3 м из расчетов и снижает расхождение экспериментальных и табличных расчетных сопротивлений.

При проведении многочисленных испытаний стальных и железобетонных свай, погружаемых в грунт вдавливанием, подобное значительное снижение расчетного сопротивления по их боковой поверхности авторами не зарегистрировано [12–14].

Более подробно свою методику составления таблиц нормативных сопротивлений грунтов под нижним концом и на боковой поверхности свай для слабых грунтов г. Ленинграда описывают Б.И. Далматов и Ф.К. Лапшин [16]. Основой для составления таблиц в диапазоне глубин от 1 до 15 м при показателе текучести $I_L = 0,6 \dots 1,1$, позднее также частично вошедших в нормативные документы, послужил метод разделения полученных при испытаниях свай статической вдавливающей нагрузкой графиков «осадка – нагрузка», предложенный Ф.К. Лапшиным в 1965 г. и прошедший широкую проверку в различных грунтовых условиях. Однако следует иметь в виду, что методика Ф.К. Лапшина изначально предполагала наличие графиков «осадка – нагрузка» минимум до осадки 8 см и при обработке использовались результаты испытаний 250 свай, завершенных при осадках в 8–12 см. В работе [16] неоднократно подчеркивается, что «при определении f^H и R^H по данным испытания сваи целесообразно предельное сопротивление ее считать достигнутым при осадке, равной 4 см, которая больше сдвиговой осадки для всех грунтов», и «поэтому ... за предельную нагрузку можно принять ее сопротивление при осадке 4 см, что вносит определенность в вопрос о назначении величины нормативного сопротивления и исключает субъективность» [16, с. 35].

Вычисление значений расчетных сопротивлений на боковой поверхности свай при составлении таблиц производилось Ф.К. Лапшиным по приведенной нами выше параболической зависимости [15].

Метод Ф.К. Лапшина, в частности, применялся при обработке результатов испытаний более 70 свай в Красноярском ПромстройНИИпроекте, где его достоверность подтверждалась специальными экспериментами с тензометрическими сваями, а также испытаниями свай с откопанным стволом и освобожденным острием, опытами на действие выдергивающей нагрузки [17]. Итогом проделанной работы послужило создание региональных таблиц для определения расчетных сопротивлений свай в грунтовых условиях Восточной Сибири [17].

После изменения требований ГОСТ 5686 к критериям определения несущей способности свай максимальные осадки при испытаниях ограничились 4 см, поэтому, к сожалению, пользоваться методикой Ф.К. Лапшина при обработке современных графиков «осадка – нагрузка» невозможно. Кроме того, предельные значения осадки свай при срыве в большинстве случаев, в том числе в грунтовых условиях г. Саратова, не превышают тех же 4 см.

Определим несущую способность (предельное сопротивление) боковой поверхности сваи F_{du} , принимая значения расчетных сопротивлений глинистых грунтов f_i при $I_L \leq 0,2$ по табл. 7.3 СП 24.13330.2011 при коэффициенте условий работы сваи в грунте $\gamma_c = 1,0$

и коэффициенте условий работы грунта на боковой поверхности сваи $\gamma_{c,f} = 1,0$. Для упрощения анализа назначаем глубину котлована и толщину слоев грунта ровно 2,0 м. Средние глубины расположения слоев считаем в двух вариантах: от отметки дна котлована и от природного рельефа.

Несущая способность боковой поверхности сваи при глубине расположения слоев от отметки дна котлована составит:

$$F_{du} = 1,178 \cdot (2 \cdot (35,0 + 48,0 + 56,0 + 60,0) + 62,75) = 542,47 \text{ кН.}$$

Среднее значение удельного расчетного сопротивления грунта основания по боковой поверхности сваи:

$$f = 542,47 / 10,60 = 51,18 \text{ кПа.}$$

Несущая способность боковой поверхности сваи при глубине расположения слоев от отметки природного рельефа составит:

$$F_{du} = 1,178 \cdot (2 \cdot (48,0 + 56,0 + 60,0 + 63,5) + 65,7) = 613,38 \text{ кН.}$$

Среднее значение удельного расчетного сопротивления грунта основания по боковой поверхности сваи:

$$f = 613,38 / 10,60 = 57,88 \text{ кПа.}$$

Сопоставим в табличной форме значения несущей способности боковой поверхности и среднего удельного расчетного сопротивления грунта основания по боковой поверхности, полученные по данным расчетов и результатам натурных испытаний сваи.

Следует отметить, что глины на данной площадке в пределах ствола сваи содержат прослойки супесей и песка, включения алеврита и песчаника. При устройстве сваи происходит активная «переработка» (перемещение, перемешивание) грунта, и при определении числа пластичности лабораторными методами на образцах, отобранных вблизи сваи, получаются значения I_p , характерные для суглинков. Поэтому коэффициент условий работы боковой поверхности сваи $\gamma_{R,f}$ в данном случае допустимо принимать равным 1,0. При числе пластичности I_p исходного грунта коэффициент условий работы $\gamma_{R,f}$ должен приниматься для глин равным 0,9. Приведем в табл. 2 расчетные параметры при двух значениях указанного коэффициента.

Таблица 2

Результаты определений несущей способности грунта на боковой поверхности сваи экспериментальным и расчетным методами при коэффициенте надежности по грунту $\gamma_{c,g} = 1,0$

Table 2

Results of determination the bearing capacity of soil on the side surface of the pile by experimental and computational methods at a reliability coefficient on a soil $\gamma_{c,g} = 1,0$

Сравниваемые параметры	Значения несущей способности боковой поверхности F_{du} и среднего удельного расчетного сопротивления грунта основания f по боковой поверхности сваи при $I_L \leq 0,2$			
	расчет по СП при глубине расположения слоев		испытания по ГОСТу с отметки дна котлована	
	от отметки дна котлована	от природного рельефа	при стабилизации	при срыве
F_{du} , кН	542,47 / 488,22*	613,38 / 552,04*	549,36	627,84
f , кПа	51,18 / 46,06*	57,88 / 52,09*	51,83	59,23

* При значении коэффициента условий работы для глин $\gamma_{R,f} = 0,9$.

Результаты сравнения полученных расчетных и экспериментальных величин показывают очень хорошую сходимость при коэффициенте надежности по грунту $\gamma_{c,g}$, принимаемом равным 1,0. Причем создается впечатление, что величины, вычисленные по таблицам СП 24.13330.2011 при глубине расположения слоев от отметки дна котлована, близки к аналогичным параметрам, полученным по испытаниям по ГОСТу с условной стабилизацией осадки на последней ступени нагружения, а вычисленные при глубине расположения слоев от природного рельефа – к полученным экспериментально при исчерпании несущей способности сваи.

Очевидно, что это случайное совпадение, связанное в первую очередь, как отмечалось выше, с ростом расчетных параметров из-за устранения из рассмотрения участка глубин до 2,0 м, где влияние параболической зависимости на табличные значения f_i особенно велико.

Сопоставление результатов, полученных в соответствии с требованиями СП 24.13330.2011 (средняя глубина расположения слоя грунта – от природного рельефа) и ГОСТа (на последней ступени нагружения с условной стабилизацией осадки), показывает, что расчетные величины при $\gamma_{R,f} = 1,0$ на 11,7 % превышают экспериментальные, а при $\gamma_{R,f} = 0,9$ – почти совпадают с экспериментальными.

При назначении коэффициента надежности по грунту в соответствии с требованиями п. 7.1.11 СП 24.13330.2011 (при определении несущей способности по боковой поверхности сваи расчетом с использованием таблиц свода правил – $\gamma_{c,g} = 1,4$, при определении по результатам полевых испытаний статической нагрузкой – $\gamma_{c,g} = 1,2$) сходимость аналогичных величин находится практически в пределах погрешности измерений (минус 4,3 %) (табл. 3).

При использовании для глин коэффициента $\gamma_{R,f} = 0,9$ получим расчетные величины на 16,1 % ниже экспериментальных значений.

Таблица 3

Результаты определения несущей способности грунта на боковой поверхности сваи экспериментальным и расчетным методами при коэффициенте надежности по грунту $\gamma_{c,g}$ по п. 7.1.11 СП 24.13330.2011

Table 3

Results of determination the bearing capacity of soil on the side surface of the pile by experimental and computational methods at a reliability coefficient on a soil $\gamma_{c,g}$ to paragraph 7.1.11 SP24

Сравниваемые параметры	Значения несущей способности боковой поверхности F_{du} и среднего удельного расчетного сопротивления грунта основания f по боковой поверхности сваи при $I_L \leq 0,2$			
	расчет по СП при $\gamma_{c,g} = 1,4$ и глубине расположения слоев		испытания по ГОСТу при $\gamma_{c,g} = 1,2$ с отметки дна котлована	
	от отметки дна котлована	от природного рельефа	при стабилизации	при срыве
F_{du} , кН	387,48 / 348,73*	438,13 / 394,32*	457,80	523,20
f , кПа	36,56 / 32,90*	41,34 / 37,21*	43,19	49,36

* При значении коэффициента условий работы для глин $\gamma_{R,f} = 0,9$.

Определим несущую способность (предельное сопротивление) пяты сваи F_{db} , принимая значения расчетных сопротивлений глинистых грунтов под нижним концом сваи R при $I_L = 0$ по табл. 7.2 СП 24.13330.2011 при коэффициенте условий работы сваи в грунте $\gamma_c = 1,0$ и коэффициенте условий работы грунта под нижним концом сваи $\gamma_{R,R} = 1,0$.

Расчетное сопротивление R глинистых грунтов под пятой сваи при глубине погружения нижнего конца от отметки дна котлована составит 10 233,33 кПа, а несущая способность нижнего конца сваи $F_{db} = 1739,67$ кН. Аналогичные величины, вычисленные при глубине погружения нижнего конца от природного рельефа: $R = 10\,740,00$ кПа, $F_{db} = 1825,80$ кН.

Ниже башмака сваи (на глубинах от 9 до 12 м), где прослойки отсутствовали, глинистые отложения однозначно определяются как глины.

Сопоставим значения несущей способности пяты и расчетного сопротивления грунта основания под нижним концом сваи, полученные по данным расчетов и результатам натурных испытаний (табл. 4).

Таблица 4

Результаты определения несущей способности и расчетного сопротивления грунта под нижним концом сваи экспериментальным и расчетным методами при коэффициенте надежности по грунту $\gamma_{c,g} = 1,0$

Table 4

Results of determination the bearing capacity and estimated resistance of soil under the lower end of the pile by experimental and computational methods at a reliability coefficient on a soil $\gamma_{c,g} = 1,0$

Сравниваемые параметры	Значения несущей способности пяты F_{db} и расчетного сопротивления грунта под нижним концом сваи R при $I_L = 0$			
	расчет по СП при глубине погружения		испытания по ГОСТу с отметки дна котлована	
	от отметки дна котлована	от природного рельефа	при стабилизации	при срыве
F_{db} , кН	1739,67	1825,80	686,67	784,80
R , кПа	10 233,33	10 740,00	4039,23	4616,47

Сопоставление результатов, полученных в соответствии с требованиями СП 24.13330.2011 (средняя глубина расположения слоя грунта – от природного рельефа) и ГОСТа (на последней ступени нагружения с условной стабилизацией осадки), показывает, что расчетные величины получаются в 2,66 раза больше, чем экспериментальные.

При принятии значений коэффициента надежности по грунту в соответствии с п. 7.1.11 СП 24.13330.2011 (при определении несущей способности под нижним концом сваи расчетом с использованием таблиц Свода правил – $\gamma_{c,g} = 1,4$, при определении по результатам полевых испытаний статической нагрузкой – $\gamma_{c,g} = 1,2$) расхождение результатов несколько уменьшается, но все равно остается очень большим (2,28 раза) – табл. 5.

Столь значительное расхождение свидетельствует о том, что к использованию табличных значений R в глинистых грунтах твердой консистенции следует относиться с большой осторожностью. Это может быть связано как с особенностями технологии изготовления свай Fundex, так и со спецификой грунтовых условий площадки. Но в любом случае требуются дополнительные исследования и уточнение методики расчета.

Разными авторами неоднократно указывалось, что применение одного классификационного параметра (I_L) для определения расчетного сопротивления грунтов свайного основания недостаточно. Например, в упоминавшейся ранее работе [17] показано, что расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи сильно зависит не только от показателя текучести глинистого грунта I_L , но и от его коэффициента пористости e . В табл. 7 [17] приведены значения расчетных сопротивлений под нижним концом свай для глинистых

грунтов твердой консистенции в диапазоне глубин от 5,0 до 16,0 м при коэффициенте пористости от 0,55 до 1,00. При глубине 11,0 м расчетное сопротивление снижается от $R = 7400$ кПа при $e = 0,55$ до $R = 2200$ кПа при $e = 1,00$.

Таблица 5

Результаты определения несущей способности грунта под нижним концом свай экспериментальным и расчетным методами при коэффициенте надежности по грунту $\gamma_{c,g}$ согласно п. 7.1.11 СП 24.13330.2011

Table 5

Results of determination the bearing capacity of soil under the lower end of the pile by experimental and computational methods at a reliability coefficient on a soil $\gamma_{c,g}$ to paragraph 7.1.11 SP24

Сравниваемые параметры	Значения несущей способности пяты F_{db} и расчетного сопротивления грунта под нижним концом свай R при $I_L = 0$			
	расчет по СП при $\gamma_{c,g} = 1,4$ и глубине погружения		испытания по ГОСТу при $\gamma_{c,g} = 1,2$ с отметки дна котлована	
	от отметки дна котлована	от природного рельефа	при стабилизации	при срыве
F_{db} , кН	1242,62	1304,14	572,23	654,00
R , кПа	7309,52	7671,43	3366,03	3847,06

В нашем случае коэффициент пористости e твердой глины под нижним концом свай в природном состоянии равен приблизительно 0,70, в уплотненном (после изготовления и «отдыха» свай) – 0,65. При глубине погружения нижнего конца свай от природного рельефа 11,0 м по табл. 7 [17] получим, соответственно, значения R , равные 4925 и 5650 кПа, что существенно ближе к нашим экспериментальным данным и намного меньше значений, рекомендуемых СП 24.13330.2011.

Заключение

Выполнены испытания свай Fundex статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками после длительного «отдыха» (3,0 мес.) в идентичных инженерно-геологических условиях, при практически полном исключении взаимного влияния свай при изготовлении и испытаниях.

При обработке результатов испытаний учитывались два значения несущей способности основания: по требованиям ГОСТа на последней ступени нагружения с условной стабилизацией осадки (при стабилизации) и при исчерпании несущей способности свай или при ее «срыве» (при срыве). Перемещения свай во всех случаях превышали значения сдвиговой осадки S_c .

Результаты сравнения значений несущей способности боковой поверхности F_{du} и среднего удельного расчетного сопротивления грунта основания по боковой поверхности f , полученные по данным расчетов согласно таблицам СП 24.13330.2011 и результатам натурных испытаний свай, показывают хорошую сходимость.

При устройстве свай Fundex в пределах всего ствола свай происходит активная «переработка» (перемещение, перемешивание) грунта, и при наличии тонких прослоек супесей и песка, включений алеврита, песчаника и т.д. свойства глинистого грунта, характеризующиеся числом пластичности I_p (по оценке лабораторными методами на образцах, отобран-

ных вблизи свай), могут снижаться от исходных значений, типичных для глин, до величин, характерных для суглинков и даже супесей. Незначительное изменение числа пластичности от 17,1 % (глина) до 16,9 % (суглинок) требует уменьшения коэффициента условий работы боковой поверхности свай с 1,0 до 0,9. Поэтому считаем, что коэффициент условий работы боковой поверхности свай γ_{Rf} целесообразно принимать равным 1,0 для всех глинистых грунтов.

Сопоставление значений несущей способности F_{db} и расчетного сопротивления грунта R под нижним концом свай, полученных экспериментальным и расчетным методами, показывает, что расчетные величины при всех вариантах сравнения значительно больше экспериментальных (от 2,66 до 2,28 раза).

Столь значительное завышение расчетного сопротивления грунта под нижним концом и несущей способности пяты в глинистых грунтах твердой консистенции требует ограничения непосредственного использования табличных значений R при оценке несущей способности свай Fundex и выполнения в обязательном порядке статических испытаний свай перед началом их массового изготовления.

Такая заметная разница в параметрах может быть связана как с особенностями технологии изготовления свай Fundex, так и со спецификой грунтовых условий площадки и указывает на необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований и уточнения методики расчета.

При очередной актуализации СП 24.13330.2011 целесообразно перенести вытеснительные сваи Fundex из раздела «Висячие набивные, буровые и сваи-оболочки, погружаемые с выемкой грунта и заполняемые бетоном (сваи трения)» в раздел «Висячие забивные, вдавливаемые всех видов и железобетонные сваи-оболочки, погружаемые без выемки грунта (забивные сваи трения)».

Библиографический список

1. Мангушев Р.А., Ершов А.В., Осокин А.И. Современные свайные технологии: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 240 с.
2. Сваи и свайные фундаменты: конструкции, проектирование и технологии: учеб. пособие / Р.А. Мангушев [и др.]; под ред. Р.А. Мангушева. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во АСВ, 2018. – 320 с.
3. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
4. Basu P., Prezzi M. Design and Applications of Drilled Displacement (Screw) Piles: Final Report / Joint Transportation Research Program. Project No: C-36-45U. File №: 6-18-19. – Purdue University, West Lafayette, Indiana, September 4, 2009. – P. 12–13. DOI: <https://doi.org/10.5703/1288284314278>
5. Лапшин Ф.К. Расчет оснований одиночных свай на вертикальную нагрузку: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1988. – 44 с.
6. Экспериментальные исследования изменения физико-механических характеристик грунтового основания при устройстве свай по технологии «Fundex» / А.В. Савинов [и др.] // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 29–31 мая 2018 г. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2018. – С. 623–633.

7. Tomlinson M.J., Woodward J. Pile Design and Construction Practice. – Sixth Edition. – Published: Taylor&Francis, 2014. – 608 p.
8. Барвашов В.А., Экимян Н.Б., Аршба Э.Т. Методы оценки несущей способности свай при действии вертикальной нагрузки // Строительство и архитектура. Серия 10. Инженерно-теоретические основы строительства: обзор. информ. / ВНИИИС. – М., 1986. – № 2. – 68 с.
9. Fellenius B.H. The Analysis of Results from Routine Pile Load Tests // Ground Engineering. – 1980. – Vol. 13, № 6. – P. 19–31.
10. Fellenius B.H. Basics of Foundation Design. – Pile Buck International, Inc., Vero Beach, FL. – 2019. – 484 p. – URL: www.Fellenius.net.
11. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
12. Савинов А.В. Применение свай, погружаемых вдавливанием, для усиления и устройства фундаментов в условиях реконструкции исторической застройки г. Саратова. – Саратов: СГТУ, 2000. – 124 с.
13. Савинов А.В. Современные методы оценки несущей способности вдавливаемых свай по предельному усилию погружения // Вестник Волгоград. гос. архит.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 30 (49). – С. 80–86.
14. Савинов А.В., Фролов В.Э. Расчетная и экспериментальная оценки несущей способности свай, погруженных вдавливанием в водонасыщенные глинистые грунты // Актуальные проблемы проектирования и устройства оснований и фундаментов зданий и сооружений: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2004. – С. 192–195.
15. Луга А.А. К нормам расчетных сопротивлений свай по грунту // Тр. ин-та ЦНИИС. – М.: Транспорт, 1965. – № 56. – С. 105–114.
16. Далматов Б.И., Лапшин Ф.К., Россихин Ю.В. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов. – Л.: Стройиздат, 1975. – 240 с.
17. Козаков Ю.Н., Шишканов Г.Ф. Свайные фундаменты в условиях Восточной Сибири. – Л.: Стройиздат, 1983. – 120 с.

References

1. Mangushev R.A., Ershov A.V., Osokin A.I. Sovremennye svainye tekhnologii [Modern pile technology]. 2nd ed. Moscow, ASV, 2010, 240 p.
2. Mangushev R.A. Svai i svainye fundamenty: konstruksii, proektirovanie i tekhnologii [Piles and pile foundations: structures, design and technology]. Ed. R.A. Mangushev. 2nd ed. Moscow, ASV, 2018, 320 p.
3. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniia, fundamenty i podzemnye sooruzheniia [Handbook of geotechnics. Bases, foundations and underground structures]. 2nd ed. Eds. V.A. Il'ichev, R.A. Mangushev. Moscow, ASV, 2016, 1040 p.
4. Basu P., Prezzi M. Design and applications of drilled displacement (screw) piles: Final report / *Joint transportation research program. Project No: C-36-45U*. File №: 6-18-19. Purdue University, West Lafayette, Indiana, September 4, 2009, pp. 12–13.
5. Lapshin F.K. Raschet osnovanii odinochnykh svai na vertikal'nuiu nagruzku [Calculation of the bases of single piles for vertical load]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Moscow, 1988, 44 p.
6. Savinov A.V. et al. Eksperimental'nye issledovaniia izmeneniia fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik gruntovogo osnovaniia pri ustroistve svai po tekhnologii «Fundex» [Experimental

studies of changes in the physicomaterial characteristics of the soil base when piling using the Fundex technology]. *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii: mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*, Novocherkassk, 29–31 May 2018, pp. 623–633.

7. Tomlinson M.J., Woodward J. Pile design and construction practice. Sixth Edition. Taylor&Francis, 2014, 608 p.

8. Barvashov V.A., Ekimian N.B., Arshba E.T. Metody otsenki nesushchei sposobnosti svai pri deistvii vertikal'noi nagruzki [Methods for assessing the bearing capacity of piles under vertical load]. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Inzhenerno-teoreticheskie osnovy stroitel'stva: obzornaia inform.* Moscow, VNIIS, 1986, no. 2, 68 p.

9. Fellenius B.H. The Analysis of Results from Routine Pile Load Tests. *Ground Engineering*, 1980, vol. 13, no. 6, pp. 19–31.

10. Fellenius B.H. Basics of Foundation Design. Pile Buck International, Inc., Vero Beach, FL. Electronic Edition, www.Fellenius.net, 2019, 484 p.

11. Bartolomei A.A., Omel'chak I.M., Iushkov B.S. Prognoz osadok svainykh fundamentov [Pile foundation sediment forecast]. Moscow, Stroiizdat, 1994, 384 p.

12. Savinov A.V. Primenenie svai, pogruzhaemykh vdavlivaniem, dlia usileniia i ustroistva fundamentov v usloviakh rekonstruktsii istoricheskoi zastroiki g. Saratova [The use of indented piles for reinforcing and building foundations in the context of reconstruction of the historical buildings of the city of Saratov]. Saratov, SGTU, 2000, 124 p.

13. Savinov A.V. Sovremennye metody otsenki nesushchei sposobnosti vdavli-vaemykh svai po predel'nomu usiliu pogruzheniia [Modern methods for assessing the bearing capacity of pressed piles by the ultimate immersion force]. *Vestnik VolgGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 30 (49), pp. 80–86.

14. Savinov A.V., Frolov V.E. Raschetnaia i eksperimental'naia otsenka nesushchei sposobnosti svai, pogruzhennykh vdavlivaniem v vodonasyshchennye glinistyie grunty [Estimated and experimental estimates of the bearing capacity of piles immersed by indentation in water-saturated clay soils]. *Aktual'nye problemy proektirovaniia i ustroistva osnovanii i fundamentov zdaniy i sooruzhenii: sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Penza, 2004, pp. 192–195.

15. Luga A.A. K normam raschetnykh soprotivlenii svai po gruntu [To the norms of design resistance of piles on the ground]. *Trudy TsNIIS*. Moscow, Transport, 1965, no. 56, pp. 105–114.

16. Dalmatov B.I., Lapshin F.K., Rossikhin Iu.V. Proektirovanie svainykh fundamentov v usloviakh slabykh gruntov [Designing pile foundations in soft soils]. Leningrad, Stroiizdat, 1975, 240 p.

17. Kozakov Iu.N., Shishkanov G.F. Svainye fundamenty v usloviakh Vostochnoi Sibiri [Pile foundations in Eastern Siberia]. Leningrad, Stroiizdat, 1983, 120 p.