

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 4. С. 189–198.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (4): 189–198.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.154

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-189-198

EDN: HADLDI

АНАЛИЗ ЗНАЧЕНИЙ УСИЛИЯ ВДАВЛИВАНИЯ СВАЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ПУТЕМ, В СРАВНЕНИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО МЕТОДИКАМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

**Сергей Васильевич Ющубе, Александр Александрович Тарасов,
Артем Сергеевич Устюгов**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Исследованы усилия вдавливания свай в инженерно-геологических условиях г. Томска.

Актуальность. Метод вдавливания свай является одним из немногих, позволяющих погружать сваи заводского изготовления в условиях плотной городской застройки с большим количеством исторических зданий, что делает настоящую работу крайне актуальной для г. Томска и других аналогичных городов.

В статье приводятся результаты сопоставления усилий вдавливания свай, полученных экспериментальным путем на реальных строительных площадках г. Томска, с расчетными усилиями вдавливания, определенными по методикам нормативных документов.

Результаты исследований позволили оценить применимость указанных методик для инженерно-геологических условий г. Томска, а также выявить факторы, которые могут снизить их достоверность.

Практическая значимость. Даны рекомендации по выбору методики определения усилия вдавливания свай в зависимости от грунтовых условий площадки строительства.

Ключевые слова: усилие вдавливания, статическое вдавливание свай, водонасыщенные глинистые грунты

Для цитирования: Ющубе С.В., Тарасов А.А., Устюгов А.С. Анализ значений усилия вдавливания свай, полученных экспериментальным путем, в сравнении с результатами расчетов, выполненных по методикам нормативных документов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 189–198. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-189-198. EDN: HADLDI

ORIGINAL ARTICLE

COMPARISON OF EXPERIMENTAL PILE PENETRATION FORCE AND CALCULATED BY REGULATORY DOCUMENTS**Sergei V. Yushchube, Aleksandr A. Tarasov, Artem S. Ustyugov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The paper studies the pile penetration force in engineering and geological conditions of Tomsk. The pile penetration method allows piles to be penetrated in urban conditions with a large number of historical buildings, which makes this work extremely relevant for Tomsk and other cities.

The paper presents experimental data and theoretical calculations of the pile penetration in various districts of Tomsk. Theoretical calculations are based on several regulatory documents.

Research results allow assessing the applicability of the proposed methods to engineering and geological conditions of Tomsk as well as identifying factors reducing the reliability this method. Recommendations are given for selecting methods to determine the pile penetration force, depending on the soil conditions at the construction site.

Keywords: penetration force, static indentation, water-saturated clay soils

For citation: Yushchube S.V., Tarasov A.A., Ustyugov A.S. Comparison of experimental pile penetration force and calculated by regulatory documents. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (4): 189–198. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-189-198. EDN: HADLDI

Введение

Долгое время на территории г. Томска основным способом погружения свай являлась забивка дизель-молотами. В последнее время в связи с ужесточением требований к предельным динамическим воздействиям на окружающую застройку и инженерные коммуникации, а также развитием материально-технической базы, всё большее распространение стал получать способ погружения свай вдавливанием. Это обусловлено тем, что при применении статического вдавливания практически исключаются динамические воздействия на строительные конструкции, а также снижается шумовое воздействие, характерное для ударного и виброударного типа погружения, что отмечается в многочисленных работах известных отечественных [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9] и зарубежных [3] авторов.

Специфическим параметром, определяемым для данного способа погружения, является усилие вдавливания свай $F_{вд}$. В нормативной литературе $F_{вд}$ определяется через значение несущей способности сваи F_d с применением определенных переводных коэффициентов:

$$F_{вд} = kF_d,$$

где k – коэффициент условий работы; F_d – несущая способность сваи на различных глубинах ее погружения, кН.

Так, согласно СП 24.13330.2021 и СП 45.13330.2017, при назначении минимально необходимого усилия вдавливания, вне зависимости от грунтовых условий, несущую способность сваи F_d следует умножать на коэффици-

ент условия работы, равный 1,2. РТМ 36.44.12,2-90 предписывает принимать предварительные значения ожидаемого максимального вдавливающего усилия с учетом коэффициента, равного 1,9 для песчаных и 1,4 для глинистых грунтов. ТСН 50-302-96 рекомендует при определении усилия вдавливания в глинистых грунтах в зависимости от показателя текучести I_L использовать коэффициент, изменяемый от 0,55 до 1,1.

Однако в научно-технической литературе практически отсутствуют данные об апробации существующих нормативных методик определения $F_{вд}$ с учетом особенностей региональных грунтовых условий, что сдерживает внедрение данного способа погружения свай в практику проектирования, а также снижает его эффективность при производстве работ.

В статье выполнено сопоставление экспериментальных данных $F_{вд}$, полученных на трех строительных площадках в г. Томске при массовом погружении свай, с результатами расчетов по различным нормативным документам.

Инженерно-геологические условия

Натурные экспериментальные исследования процесса вдавливания железобетонных призматических свай производились на трех площадках строительства, находящихся в различных частях г. Томска, сложенных преимущественно водонасыщенными глинистыми грунтами. На каждой из площадок был выполнен стандартный комплекс инженерно-геологических изысканий, включающий в том числе статическое зондирование грунтов.

На первой экспериментальной площадке были получены значения усилия вдавливания для 11 свай сечением 350×350 мм и длиной 8,0 м. Погружение происходило со дна котлована глубиной 5,5 м с абсолютной отметки +73,70 м до отметки +66,15 м. Площадка сложена глинами аллювиальными легкими тугопластичными (ИГЭ-2: $I_p = 18 \%$, $I_L = 0,37$, $E = 8,0$ мПа, $e = 0,85$, $\varphi = 17$, $C = 31$ кПа, $S_r = 0,96$), суглинками аллювиальными тяжелыми мягкопластичными (ИГЭ-3: $I_p = 16 \%$, $I_L = 0,61$, $E = 3$ мПа, $e = 0,86$, $\varphi = 16$, $C = 14$ кПа, $S_r = 0,96$), супесями аллювиальными текучими (ИГЭ-4: $I_p = 5 \%$, $I_L > 1$, $e = 0,73$, $\varphi = 21$, $C = 12$ кПа, $S_r = 0,90$), гравийными грунтами с песчаным заполнителем (ИГЭ-5: $E = 37,0$ мПа, $\varphi = 32$, $C = 5$ кПа). Инженерно-геологический разрез с посадкой свай приведен на рис. 1.

На второй площадке были получены значения усилия вдавливания для 154 свай сечением 300×300 мм и длиной 12 м. Сверху площадка перекрыта насыпными грунтами (tQIV) толщиной слоя 0,9–2,2 м. Насыпные грунты подстилаются серовато-коричневыми суглинками мягкопластичной консистенции с прослойками супесей, песков и включением органических веществ, общая мощность слоя – 1,5–2,3 м (ИГЭ-2: $I_p = 9 \%$, $I_L = 0,68$, $e = 0,69$, $S_r = 0,87$, $\varphi = 16$, $C = 18$ кПа). Ниже, на глубине 2,6–4,1 м от поверхности, а также на глубинах 7,2–7,9 м (в скв. 2, скв. 3) и на глубине 10,7–13,9 м залегают суглинки серые текучепластичной консистенции с прослойками песка пылеватого (ИГЭ-3: $I_p = 8 \%$, $I_L = 0,83$, $e = 0,66$, $S_r = 0,96$, $\varphi = 15$, $C = 16$ кПа). На глубине 4,0–5,6 м от поверхности залегают супеси серые текучей консистенции с прослойками (10–20 см) песка (ИГЭ-4: $I_p = 4 \%$, $I_L > 1$, $e = 0,64$, $S_r = 0,91$, $\varphi = 19$, $C = 12$ кПа). Начиная с глубины 11,5–16,7 м, текучепластичные суглин-

ки подстилаются тугопластичными (в кровле суглинка – мягкопластичными) (ИГЭ-5: $I_p = 11 \%$, $I_L = 0,43$, $e = 0,74$, $S_r = 0,91$, $\varphi = 19$, $C = 26$ кПа). Основанием тугопластичных суглинков являются гравийно-песчаные грунты, залегающие, начиная с глубины 15,7–18,6 м (ИГЭ-6: $R_0 = 300\text{--}500$ кПа). Инженерно-геологический разрез с посадкой свай приведен на рис. 2.

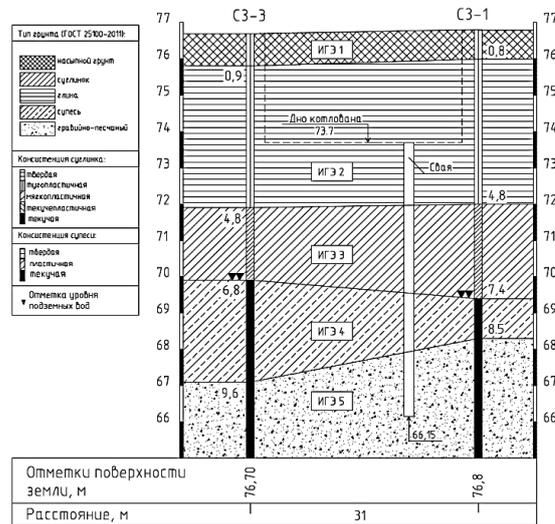


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез первой экспериментальной площадки
 Fig. 1. Engineering and geological section of the first experimental site

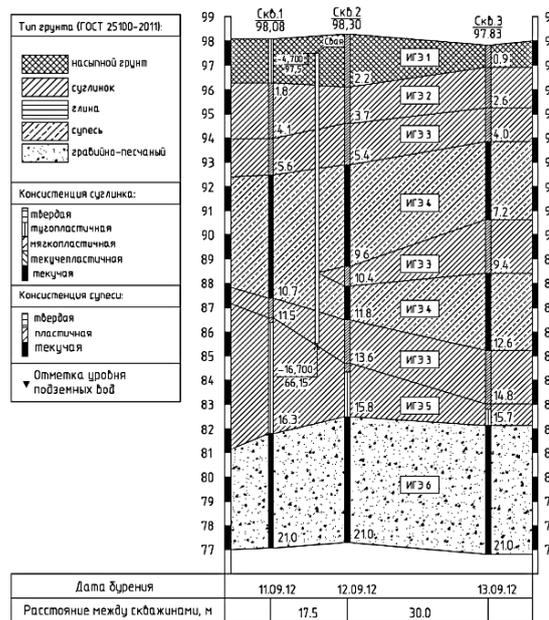


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез второй экспериментальной площадки
 Fig. 2. Engineering and geological section of the second experimental site

На третьей площадке были получены значения усилия вдавливания для 37 свай сечением 300×300 мм и длиной 12,0 м. В инженерно-геологическом разрезе площадки выделено 4 инженерно-геологических элемента (ИГЭ). ИГЭ-1 – суглинок насыпной тяжелой мягкопластичной консистенции с включениями строительного мусора до 30 %. Грунты ИГЭ-1 распространены по всей площадке с поверхности до глубины 2,1–2,6 м ($I_p = 13 \%$, $I_L = 0,57$, $e = 0,80$, $S_r = 0,93$, $R_0 = 150$ кПа). ИГЭ-2 – супесь аллювиальная текучей консистенции. Грунты ИГЭ-2 залегают, начиная с глубины 2,1–2,6 м, до глубины 4,0–4,3 м, имеют мощность 1,7–1,9 м ($I_p = 6 \%$, $I_L > 1$, $e = 0,64$, $S_r = 0,91$, $\varphi = 18$, $C = 16$ кПа). ИГЭ-3 – суглинок аллювиальный тяжелый мягкопластичной консистенции. Грунты ИГЭ-3 залегают, начиная с глубины 4,0–4,3 м, до глубины 9,2–9,6 м, имеют мощность 5,1–5,3 м ($I_p = 15 \%$, $I_L = 0,64$, $e = 0,86$, $S_r = 1$, $\varphi = 18$, $C = 19$ кПа). ИГЭ-4 – суглинок аллювиальный тяжелый тугопластичной консистенции с примесью органических веществ (5,4 %). Грунты ИГЭ-4 залегают, начиная с глубины 9,2–9,6 м, по слою пройдено 7,4–7,8 м ($I_p = 15 \%$, $I_L = 0,34$, $e = 0,64$, $S_r = 0,96$, $\varphi = 20$, $C = 23$ кПа). Инженерно-геологический разрез с посадкой свай приведен на рис. 3.

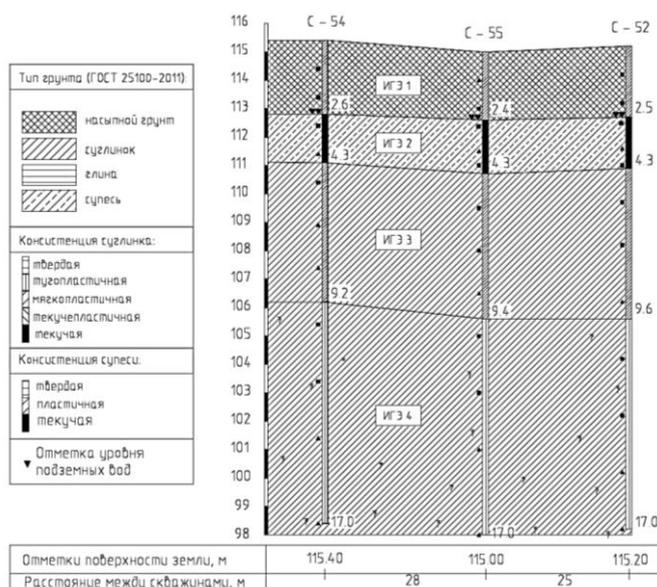


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез третьей экспериментальной площадки

Fig. 3. Engineering and geological section of the third experimental site

Результаты экспериментальных исследований

Погружение свай на проектную отметку осуществлялось гидравлической сваевдавливательной установкой со средней скоростью погружения $V_{вд} = 2,4\text{--}4$ м/мин. Измерение усилия вдавливания $F_{вд}$ производилось во время всего процесса погружения свай с регистрацией значений через каждые 40 см. Регистрация велась посредством штатного оборудования, встроенного в гид-

равлическую систему сваевдавливательной установки. Оборудование предварительно тарировалось. После проведения эксперимента полученные данные подвергались статистической обработке.

Затем для каждой площадки были построены графики изменения с глубиной погружения усилия вдавливания $F_{вд}$ свай по результатам экспериментальных исследований и расчетов по методикам нормативных документов СП 24.13330.2021, СП 45.13330.2017, РТМ 36.44.12,2-90, ТСН 50-302-96 (рис. 4–6). При проведении расчетов несущая способность свай определялась по результатам статического зондирования грунтов.

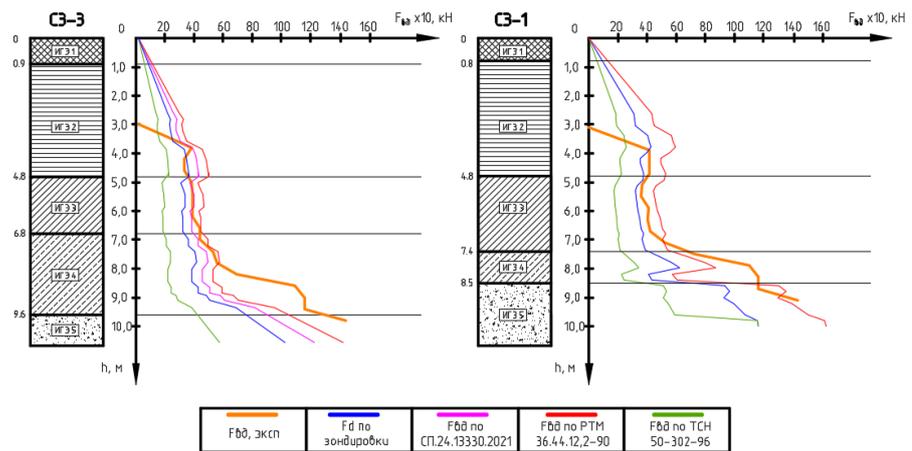


Рис. 4. Сопоставление графиков значений экспериментального и расчетного усилия вдавливания на первой площадке

Fig. 4. Experimental and theoretical pile penetration force on the first experimental site

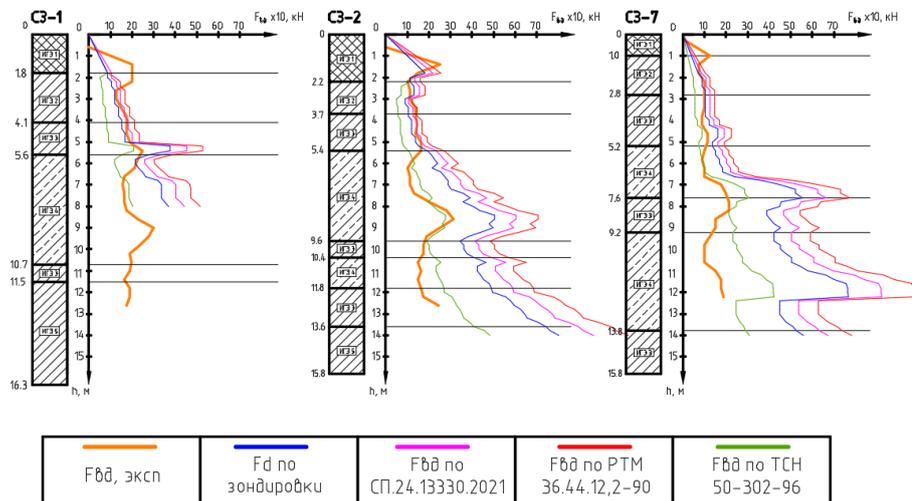


Рис. 5. Сопоставление графиков значений экспериментального и расчетного усилия вдавливания на второй площадке

Fig. 5. Experimental and theoretical pile penetration force on the second experimental site

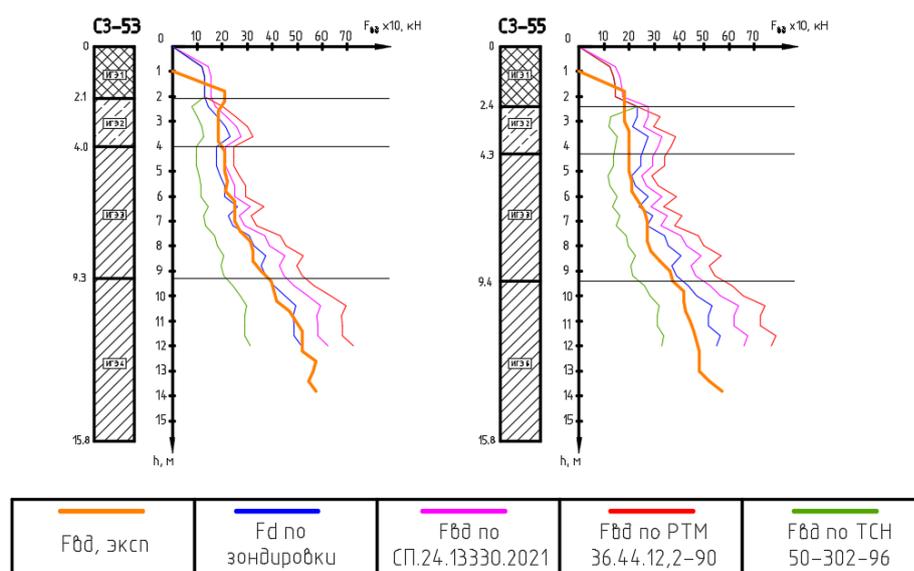


Рис. 6. Сопоставление графиков значений экспериментального и расчетного усилия вдавливания на третьей площадке

Fig. 6. Experimental and theoretical pile penetration force on the third experimental site

Сопоставление графиков и их дальнейший анализ показали, что сходимость экспериментальных и расчетных данных напрямую зависит от глубины, характера напластования и состояния грунтов. Выявлено, что хорошая сходимость экспериментальных и расчетных данных наблюдается только на небольших глубинах погружения (до 3,2–6,8 м). С ростом глубины точность расчетных методов снижается, отклоняясь от экспериментальных значений как в большую (до 300 %), так и меньшую (до 80 %) сторону.

Так, на первой площадке при приближении нижнего конца сваи к супесям аллювиальным текучим (ИГЭ-4) был зафиксирован резкий рост усилия вдавливания, значительно обгоняющий изменения расчетных значений (рис. 4). Данное явление, вероятно, связано с возникновением под острием сваи переуплотненного грунтового ядра и его взаимодействием с жестким основанием в виде песчано-гравийного слоя. На графике статического зондирования грунтов данный эффект также был зафиксирован. Однако ввиду малого поперечного сечения зонда влияние жесткого основания (ИГЭ-5), очевидно, проявляется не так явно и только при большем приближении зонда в ИГЭ-5.

На второй площадке начало значительного расхождения графиков было зафиксировано на глубине 3,5–5 м от дневной поверхности земли. С ростом глубины расхождение между экспериментальными и расчетными значениями $F_{вд}$ увеличивалось. Такой эффект может быть объяснен высокой степенью водонасыщения грунтов, прорезаемых свай, и последующим формированием «водной пленки» между грунтом и свай, минимизирующей сопротивление грунта по ее боковой поверхности. Данное предположение основывается на анализе графиков изменения усилия вдавливания по глубине. Из данных рис. 5 видно, что с увеличением глубины погружения сваи рост $F_{вд}$ практически не происходит, что мож-

но объяснить только отсутствием значимого трения по боковой поверхности сваи. Также стоит отметить, что на глубинах 7–10 м при прохождении супесей текучих (ИГЭ-4) как для свай, так и для зондов был зафиксирован скачок значений усилия вдавливания, предположительно вызванный возникновением грунтового ядра, аналогично наблюдаемому на площадке 1.

Третья площадка, в отличие от двух других, имеет более однородное напластование грунтов, представленных в основном суглинками мягко-тугопластичными. Анализ графиков экспериментального значения $F_{вд}$ показал, что оно равномерно растет с глубиной без значительных скачков и провалов (рис. б). Стоит отметить, что графики усилия вдавливания, полученные на основе нормативных документов, все же несколько опережали натурные результаты, но по сравнению с первой и второй площадкой были максимально к ним приближены.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований, выполненных на реальных строительных площадках, расположенных в различных районах г. Томска, и на основе их сопоставления с результатами расчетов по нормативным документам можно сделать следующие выводы и дать соответствующие и рекомендации:

1. Для всех площадок на небольших глубинах погружения до 3,2–6,8 м наблюдается хорошая сходимость экспериментальных и расчетных данных. Исключение составляет ТСН 50-302-96, который в инженерно-геологических условиях г. Томска, начиная уже с глубины 2,0–3,0 м, дает заниженные по сравнению с фактическими значения усилия вдавливания свай. Использование ТСН 50-302-96 для определения усилия вдавливания свай длиной до 6,0 м в инженерно-геологических условиях г. Томска не рекомендуется.

2. Выявлено, что с ростом глубины погружения свай точность определения усилия вдавливания по всем рассмотренным методикам снижается с отклонениями от экспериментальных значений как в большую (до 300 %), так и в меньшую (до 80 %) сторону. При этом установлено, что на величину усилия вдавливания существенное влияние оказывает не только вид и состояние грунтов, но и характер их переслаивания относительно друг друга. Наибольшая сходимость экспериментальных и расчетных данных наблюдается в однородных грунтах, сложенных мягкотугопластичными суглинками. При этом предпочтение в таких грунтах следует отдавать методике СП 24.13330, использование которой позволяет получить расчётные значения усилия вдавливания с минимальными коэффициентами запаса.

3. Установлено, что при прохождении сваями супесей наблюдается резкий рост усилия вдавливания, что, вероятно, связано с формированием в них уплотненного грунтового ядра под нижними концами свай. При наличии жесткого подстилающего основания рост усилия вдавливания в таких грунтах ещё более существенен. В грунтовых условиях с жесткими подстилающими основаниями все рассмотренные выше методики показали значительное занижение расчетных значений по сравнению с фактическими, что может не позволить погрузить сваи на проектные отметки при производстве свайных работ на площадках, сложенных аналогичными грунтами.

4. Выявлено, что при погружении свай в водонасыщенные глинистые грунты текучепластичных – текучих консистенций рост усилия вдавливания с глубиной практически не происходит, что указывает на отсутствие значимых сил трения по боковой поверхности свай. Данный эффект можно объяснить формированием на контакте «свая-грунт» «водной пленки», играющей роль смазки и минимизирующей влияние сопротивления свай по боковой поверхности на величину усилия вдавливания. В таких грунтовых условиях на глубинах более 6,0 м наибольшая сходимости отмечена у ТСН 50-302-96. При этом на меньших глубинах данная методика также малоприменима.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что сегодня единой методики, позволяющей надежно определять усилие вдавливания свай в различных грунтовых условиях с учётом вида, состояния и взаимного напластования грунтов, не разработано. Процессы, происходящие в грунтах при погружении свай вдавливанием, малоизучены и требуют проведения дальнейших исследований. Сделанные в данной статье предположения о формировании переуплотненных грунтовых ядер и «водных пленок» являются на данный момент гипотезами, основанными на результатах многолетних наблюдений за погружением свай в грунтовых условиях г. Томска, и требуют экспериментально-теоретического обоснования в дальнейшем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бахолдин Б.В., Перлей Е.М., Светинский Е.В. Исследование процесса погружения свай вдавливанием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1997. № 3. С. 25–27.
2. Литвин О.В. Технология погружения свай вдавливанием с помощью установки с вакуумным анкером : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев, 1991. 20 с.
3. Фрейдман Б.Г. Совершенствование технологии вдавливания свай и шпунта в условиях плотной застройки : специальность 05.23.08 «Технология и организация строительства» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2002. 22 с.
4. Швецов В.М., Ибрагимов Р.К. О назначении усилия вдавливания свай // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 8. С. 129–131.
5. Нестеров А.С. Обоснование конструктивно-технологических параметров оборудования для погружения свай методом вдавливания: с применением анкерного устройства : специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные подъемно-транспортные машины» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск, 2008. 21 с.
6. Буров В.П. Исследование процесса погружения свай методом вдавливания с целью обоснования выбора оптимальных параметров сваявдавливающих установок : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск, 1969. 21 с.
7. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий / ВНИИТПИ. Москва, 2000. 316 с.
8. Полищук А.И., Тарасов А.А., Петухов А.А. Определение усилия вдавливания инъектора инъекционных свай в глинистых грунтах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 346–354.
9. Савинов А.В. Применение свай, погружаемых вдавливанием, при реконструкции исторической застройки городов : специальность 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Саратов, 2008.

REFERENCES

1. *Bakholdin B.V., Perley E.M., Svecinskiy E.V.* The pile penetration process. *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov*. 1997; (3): 25–27. (In Russian)
2. *Litvin O.V.* Pile penetration with a vacuum anchor system. PhD Thesis. Kiev, 1991. P. 20 (In Russian)
3. *Freidman B.G.* Improvement of pile penetration technology in compact planning. PhD Abstract. Saint-Petersburg, 2002. 22 p. (In Russian)
4. *Shvetsov V.M., Ibragimov R.K.* Setting the pile driving force. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2004; (8): 129–131. (In Russian)
5. *Nesterov A.S.* Design and technological parameters of equipment for pile driving by indentation method using anchor device. PhD Abstract. Omsk, 2008. 21 p. (In Russian)
6. *Burov V.P.* Pile driving by indentation method to select optimum parameters of pile driving units. PhD Abstract. Omsk, 1969. 21 p. (In Russian)
7. *Konovalov P.A.* Foundations of reconstructed buildings. Moscow, 2000, 316 p. (In Russian)
8. *Polishchuk A.I., Tarasov A.A., Petukhov A.A.* Indentation force of pile injection in clayey soils. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; (2): 346–354. (In Russian)
9. *Savinov A. V.* Indentation piles in reconstruction of historic urban planning. DSc Thesis. Saratov, 2008 (In Russian)

Сведения об авторах

Ющубе Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, sv@tsuab.ru

Тарасов Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tar.a.a@mail.ru

Устюгов Артем Сергеевич, студент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ram10kler6@gmail.com

Authors Details

Sergei V. Yushchube, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sv@tsuab.ru

Aleksandr A. Tarasov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tar.a.a@mail.ru

Artem S. Ustyugov, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ram10kler6@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023
Одобрена после рецензирования 17.04.2023
Принята к публикации 16.06.2023

Submitted for publication 11.04.2023
Approved after review 17.04.2023
Accepted for publication 16.06.2023