



АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS OF ANALYSIS OF STRUCTURES

 DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-5-500-518
 УДК 69.01

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Влияние конструктивных решений на жесткостные характеристики набивной монолитной железобетонной конусообразной сваи со щебневыми образованиями

Э.Р. Кужахметова

 Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация
 ✉ elja_09@bk.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 июня 2021 г.

Доработана: 21 сентября 2021 г.

Принята к публикации: 1 октября 2021 г.

Аннотация. *Актуальность.* Рассматриваются конструктивные решения новой свайной конструкции, представляющей собой монолитную железобетонную конусообразную сваю, заключенную в щебневую оболочку и опирающуюся на шарообразное щебневое уширение. В ходе численного исследования, проведенного с применением метода конечных элементов, выявлено влияние геометрических параметров щебневых образований свайного фундамента, таких как толщина стенки щебневой оболочки и радиус щебневого уширения, на его несущую способность. *Цель исследования* заключается в сравнительно-численном анализе напряженно-деформированного состояния свайной конструкции с разными конструктивными решениями, работающей в составе грунтового массива. *Материалы и методы.* Численный статический анализ конструкции монолитного железобетонного свайного фундамента, работающего в грунтовой массе, проводился с применением пространственной конечно-элементной модели в программном комплексе САЕ-класса. Представлены *результаты* численного анализа напряженно-деформированного состояния набивной монолитной железобетонной конусообразной сваи с разной толщиной стенки щебневой оболочки и разными диаметрами нижнего шарообразного щебневого уширения. Анализ показал, что изменение указанных геометрических параметров свайного фундамента оказывает существенное влияние на его несущую способность при внешних силовых воздействиях. Рациональный выбор указанных параметров позволяет экономно расходовать бетонную смесь и арматурные стержни, предназначенные для изготовления монолитной железобетонной набивной сваи, что, в свою очередь, приводит к уменьшению финансовых затрат на изготовление свайного фундамента и всего здания в целом. В дальнейших исследованиях предполагается провести сравнительный анализ численных результатов с экспериментальными данными, полученными в лабораторных и натурных условиях.

Ключевые слова: свая, свая в форме конуса, свая конической формы, свая конусообразной формы, буронабивная свая, набивная свая, несущая способность сваи, щебневая оболочка сваи, щебневая свайная опалубка, нижнее щебневое расширение, шарообразное щебневое уширение

Для цитирования

Кужахметова Э.Р. Влияние конструктивных решений на жесткостные характеристики набивной монолитной железобетонной конусообразной сваи со щебневыми образованиями // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 5. С. 500–518. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-5-500-518>

Кужахметова Эльвира Рафаэльевна, инженер промышленного и гражданского строительства, член-корреспондент Академии ЖКХ, старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-0907-786X, eLIBRARY SPIN-код: 1949-1140, Researcher ID: AAC-3301-2022; elja_09@bk.ru

© Кужахметова Э.Р., 2021


 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Influence of constructive solutions on the stiffness characteristics of the rammed monolithic reinforced concrete cone-shaped piles with side and bottom forms from crushed stones

Elvira R. Kuzhakhmetova 

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ elja_09@bk.ru

Article history

Received: June 17, 2021

Revised: September 21, 2021

Accepted: October 1, 2021

Abstract. *Relevance.* The article discusses the design solutions of a new pile structure, which is a monolithic reinforced concrete cone-shaped pile, enclosed in a crushed stone shell and resting on a spherical crushed stone broadening. In the course of a numerical study, carried out using the finite element method, the influence of the geometric parameters of the crushed stone formations of the pile foundation, such as the wall thickness of the crushed stone shell and the radius of the crushed stone broadening, on its bearing capacity was revealed. *The aim of the study* is to perform a comparative numerical analysis of the stress-strain state of a pile structure with different design solutions, operating as part of a soil massif. *Materials and methods.* Numerical static analysis of the structure of a monolithic reinforced concrete pile foundation operating in a soil massif was carried out using a spatial finite element model in the CAE-class software package. The article presents *the results* of a numerical analysis of the stress-strain state of a rammed monolithic reinforced concrete cone-shaped pile with different wall thicknesses of the crushed stone shell and different diameters of the lower spherical crushed stone broadening. The analysis showed that changes in the specified geometric parameters of the pile foundation have a significant impact on its bearing capacity under external forces. The rational choice of these parameters allows you to economically use the concrete mixture and reinforcing rods intended for the manufacture of monolithic reinforced concrete rammed piles, which, in turn, leads to a decrease in financial costs for the manufacture of the pile foundation and the entire building as a whole. The next research is supposed to carry out a comparative analysis of the numerical results with experimental data obtained in laboratory and field conditions.

Keywords: pile, cone-shaped pile, conical pile, cone-shaped pile, bored pile, rammed pile, bearing capacity of a pile, crushed stone pile shell, crushed stone pile formwork, lower crushed stone expansion, ball-shaped crushed stone widening

For citation

Kuzhakhmetova E.R. Influence of constructive solutions on the stiffness characteristics of the rammed monolithic reinforced concrete cone-shaped piles with side and bottom forms from crushed stones. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(5):500–518. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-5-500-518>

Введение

Реконструкцию и перепланировку гражданских и промышленных зданий (сооружений) можно отнести к числу важных задач строительной отрасли, поскольку их успешное решение позволяет продлить надежное и безопасное функционирование конструкций существующих строительных объектов. При этом изменение объемно-планировочных параметров и архитектурно-конструктивных решений эксплуатируемых зданий, включая усиление отдельных видов конструкций надземной и(или) подземной частей, должно осуществляться без существенных финансово-материальных затрат. В качестве примера можно привести практику строительной реконструкции и перепланировки квартир в жилых многоквартирных домах. К ним относится, в частности, перевод жилого помещения в нежилое (или наоборот)¹, а также дополнительное увеличение общей или жилой площади квартиры в существующем многоквартирном доме за счет пристройки, например эркеров и лоджий². Любое изменение объемно-планировочных параметров помещений и(или) всего здания требует от инженера-конструктора принятия правильных конструктивных решений.

Elvira R. Kuzhakhmetova, engineer, senior lecturer of the Department of Reinforced Concrete Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0907-786X, eLIBRARY SPIN-code: 1949-1140, Researcher ID: AAC-3301-2022; elja_09@bk.ru

¹ Жилищный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 №188-ФЗ.

² СП 54.13330.2016. Здания жилые многоквартирные. Правила проектирования. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003. М., 2016.

В данном случае наиболее рациональным конструктивным решением является набивной свайный фундамент³ [1–5], установка которого может и должна осуществляться без применения тяжелой (специализированной) техники, поскольку любые удары, сотрясения или сопутствующие вибрации могут негативно отразиться не только на существующем фундаменте и грунтовом основании, но и на всей надземной части здания (сооружения). Удачным конструктивным решением будет применение новой конструкции монолитной железобетонной конусообразной сваи со щебневой оболочкой (опалубкой) и нижним щебневым шарообразным расширением (уширением) (далее по тексту – свайная конструкция), оригинальность и новизна которой подтверждена патентной экспертизой (рис. 1)⁴. Применение новой свайной конструкции является рациональным решением не только при реконструкции существующих зданий (сооружений), но и для нового строительства, в том числе малоэтажного.

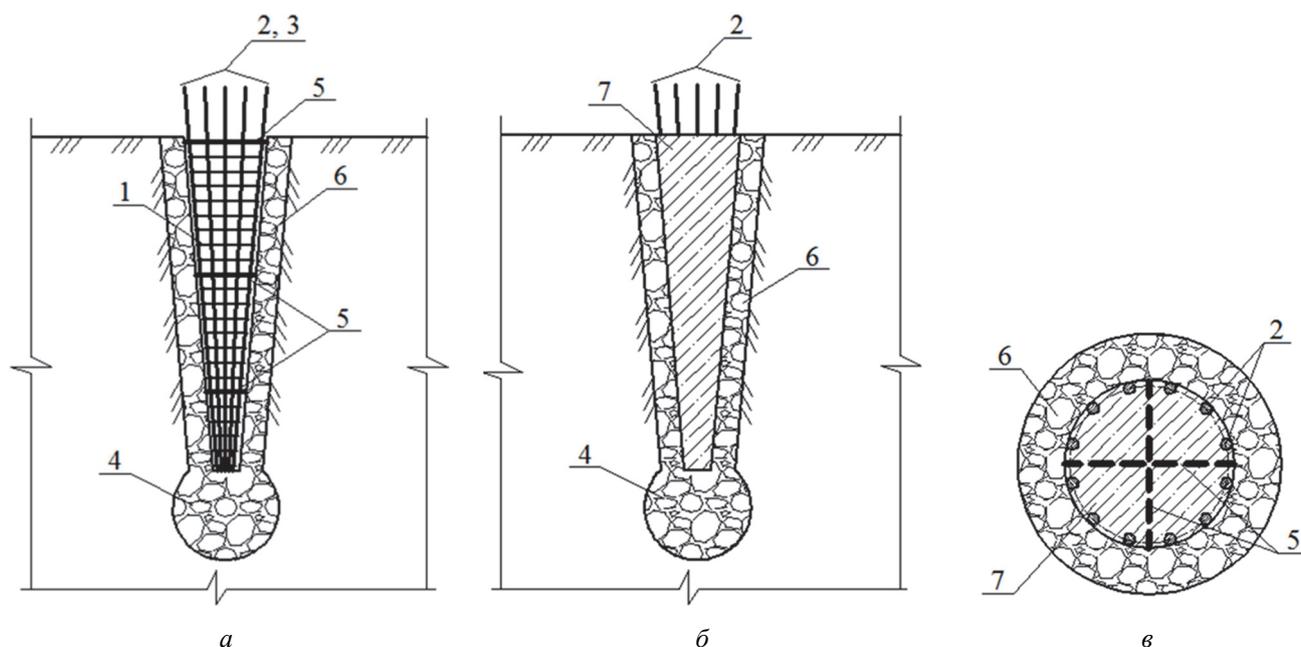


Рис. 1. Монолитная железобетонная свая конической формы:

a – вид сваи в разрезе; *б* – общий вид сваи; *в* – вид сваи в плане; 1 – пространственный арматурный каркас, выполненный в форме конуса; 2 – продольные арматурные стержни периодического профиля; 3 – поперечные стержни (хомуты); 4 – щебневое расширение округлой формы; 5 – дополнительный крепеж в виде стержней; 6 – утрамбованная щебневая оболочка; 7 – бетонный наполнитель

Figure 1. Monolithic reinforced concrete pile of conical shape:

a – sectional view of the pile; *б* – general view of the pile; *в* – plan view of the pile; 1 – spatial reinforcing frame made in the shape of a cone; 2 – longitudinal reinforcing bars of a periodic profile; 3 – transverse rods (clamps); 4 – crushed stone expansion of a round shape; 5 – additional fasteners in the form of rods; 6 – rammed crushed stone shell; 7 – concrete mix

Данное конструктивное решение набивной сваи позволяет применять ее при реконструкции зданий (сооружений), например пристройки помещений, лоджий и пр. В этом случае длина свай пристройки (нового конструктивного элемента) должна быть меньше длины сваи существующего здания⁵ [6; 7]. Уменьшение длины и количество свай возможно за счет изменения угла наклона конусообразной сваи и устройства нижнего щебневого расширения (уширения) под пятой железобетонной сваи, которая обеспечивает высокую несущую способность в отличие от свай других типов [8–17]. Устройство щебневой оболочки с утрамбованным околосвайным грунтом придает свае большую жесткость, прочность и обес-

³ Патент РФ № 141512. Монолитная железобетонная свая-оболочка большого диаметра / А.И. Сапожников. 2014. Бюл. № 16. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (дата обращения: 12.06.2021); Патент РФ № 154795. Конструкция соединения верхнего строения эстакады с монолитной свайей-оболочкой / А.И.Сапожников, Э.Р. Кужахметова. 2015. Бюл. № 25. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (дата обращения: 12.06.2021).

⁴ Патент РФ № 157318. Конструкция монолитной железобетонной сваи конической формы / Э.Р. Кужахметова, А.И. Сапожников. 2015. Бюл. № 33. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (дата обращения: 15.06.2021).

⁵ Метелюк Н.С., Шишко Г.Ф., Соловьева А.Б., Грузинцев В.В. Сваи и свайные фундаменты: справочное пособие. Киев: Будівельник, 1977. 256 с.; Рекомендации по проектированию и устройству оснований и фундаментов при возведении зданий вблизи существующих в условиях плотной застройки в г. Москве. М.: Стройиздат, 1999. 55 с.

печивает экономию бетонной смеси⁶ [8; 17]. Как правило, подобные решения, приводящие к увеличению площади помещений, эффективно применяют при реконструкции жилых зданий, имеющих до пяти этажей включительно, а также при малоэтажном строительстве (приусадебные дома) [18; 19].

Установка свайной конструкции со щебневыми образованиями сопровождается уплотнением – набивкой грунта. Набивка заключается в том, что в пробуренную до проектной отметки цилиндрическую скважину порционно засыпается щебень, который утрамбовывается в нижней части скважины до образования расширения шарообразной формы. Продолжая порционно подсыпать и вдавливать щебень в грунт с помощью раскатчика, установленного в скважину, формируется конусообразная щебневая оболочка (опалубка). Затем в нее устанавливается пространственный арматурный металлический каркас, повторяющий форму опалубки. Каркас крепится к стенкам щебневой оболочки при помощи специальных стержней (крепежей) и в дальнейшем бетонируется⁷ [8; 17]. Данная технология изготовления свайной конструкции позволяет контролировать расход бетонной смеси, подаваемой в щебневую конусообразную оболочку, который равен геометрическому объему указанной оболочки.

В [17] проанализировано влияние геометрических параметров набивной конической сваи на ее несущую способность под действием вертикальных и горизонтальных внешних нагрузок, в частности влияние ее угла конусности на несущую способность в однородном песчаном грунте. Для вычислительного эксперимента приняты свайные конструкции разной длины $L_i = 1–10$ м с верхними диаметрами $D_i = 0,6; 0,8; 1,0$ и $1,2$ м, толщиной t стенки щебневой опалубки (оболочки), равной $0,15$ м, и диаметром нижнего щебневого шара $D_i^{\text{шар}}$ на конце сваи 1 м. В ходе численного расчета выявлено, что щебневые образования (оболочка и шар на конце сваи) оказывают значительное влияние на несущую способность монолитной железобетонной сваи. Логичным продолжением указанного численного исследования является рассмотрение напряженно-деформированного состояния (НДС) свайной конструкции с разными толщинами t_i щебневой оболочки (опалубки) и диаметрами $D_i^{\text{шар}}$ шара на ее конце.

Цель настоящего расчетного исследования заключается в том, чтобы определить влияние на несущую способность свайной конструкции толщины щебневой опалубки (оболочки) и диаметра нижнего щебневого шара (нижнего расширения). Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) построены пространственные конечно-элементные модели свайной конструкции с разными формами щебневого образования;
- 2) определено влияние толщины щебневой оболочки и диаметра нижнего щебневого шара на напряженно-деформированное состояние конусообразной свайной конструкции;
- 3) выполнена сравнительная оценка несущей способности конусообразной сваи с разными конструктивными решениями.

Материалы исследования

Все материалы приняты из [8; 17; 20]:

– материал монолитной железобетонной сваи – бетон тяжелый класса В15 с модулем продольной упругости (модуль Юнга) $E_b = 24 \times 10^3$ МПа (табл. 6.11⁸), модулем сдвига $G_b = 0,4E_b = 0,4 \times 24 \times 10^3 = 9,6 \times 10^3$ МПа (п. 6.1.15⁹) и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,2$ (п. 6.1.17¹⁰), расчетное сопротивление бетона для предельных состояний первой группы при классе бетона В15 по прочности на сжатие $R_b = 8,5$ МПа (табл. 6.8)¹¹; расчетное сопротивление бетона для предельных состояний второй группы при классе бетона В15 по прочности на сжатие $R_{b,ser} = 11$ МПа (табл. 6.7)¹², плотность тяжелого бетона равна $\rho = 2500$ кг/м³ (п. 6.1.1)¹³;

– материал для оболочки (опалубки) монолитной железобетонной сваи конической формы – щебень группы «А» по ГОСТ 8267¹⁴ с размерами 40–70 мм (мелкий щебень) с моду-

⁶ Патент РФ № 157318. Конструкция монолитной железобетонной сваи конической формы / Э.Р. Кужахметова, А.И. Сапожников. 2015. Бюл. № 33. URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (дата обращения: 15.06.2021).

⁷ Там же.

⁸ СП 63.13330.2011. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 с изменениями № 1. М., 2015.

⁹ Там же. С. 24.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же. С. 22.

¹² Там же. С. 21.

¹³ Там же. С. 15.

¹⁴ ГОСТ 8267–93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. М.: Госстрой России, 1993.

лем упругости $E = 350$ МПа (табл. 3.2¹⁵) и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$ ¹⁶, плотность щебня $\rho = 2500$ кг/м³ (п. 1)¹⁷;

– грунт однородного основания – песок четвертичного отложения, пылеватый¹⁸ (коэффициент пористости $e = 0,65$) с модулем деформации $E = 18$ МПа, углом внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$, удельным сцеплением $c = 4$ кПа (все указанные характеристики приняты из табл. Б.1¹⁹) и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$ (табл. 5.10²⁰), плотность грунтового основания $\rho = 1400$ кг/м³ (табл.)²¹.

На свайные конструкции разной формы действуют следующие нагрузки: горизонтальная $P = 10$ т (100 кН) и вертикальная (сжимающая) $N = 100$ т (1000 кН)²² [8; 17; 20].

Метод исследования

Для исследования НДС свайной конструкции с грунтовым массивом применена трехмерная (3D) модель, построенная в программном комплексе FEMAP with NX NASTRAN, реализующем численный метод – метод конечных элементов (МКЭ). Все конструктивные элементы (КЭ) свайного фундамента набраны объемными конечными элементами типа *Solid* [21], представляющими простые многогранники (тетраэдры) [22]. Шаг разбиения сетки конечно-элементной модели принят равным 0,5 м [8; 17; 20; 21]. В расчетной пространственной модели грунт представляет собой сплошное, изотропное, линейно-деформированное тело, подчиняющееся обобщенному закону Гука²³ [23]. Расчет осадки основания фундамента определяется методом послойного суммирования по СП 22.13330.2011²⁴. Метод конечных элементов для упругого тела основан на методе Релея – Ритца [24; 25]. Уравнение равновесия системы имеет следующий вид:

$$\left(\|C_{\text{гр}}\| + \|C_{\text{св}}\| + \|C_{\text{щсб}}\| \right) \times \{V\} = \{P\}, \quad (1)$$

где $\|C_{\text{гр}}\|$ – матрица жесткости грунта, кН/м; $\|C_{\text{св}}\|$ – матрица жесткости сваи, кН/м; $\|C_{\text{щсб}}\|$ – матрица жесткости щебневой оболочки и расширения, кН/м; $\{V\}$ – вектор узловых перемещений сваи, щебневой оболочки и грунта, м; $\{P\}$ – вектор внешних нагрузок, действующих на сваю, кН.

Решением системы алгебраических уравнений (1) являются компоненты вектора узловых перемещений $\{V\}$, на основании которых определяются внутренние усилия, деформации и напряжения для каждого КЭ расчетной модели [24; 25]. В расчетах вертикальная и горизонтальная компоненты внешней силы, действующей на сваю, были приложены в центре верной системы *Rigid*-элементов типа, благодаря которой сосредоточенные силы распределялись по контуру верхней поверхности сваи как объемного тела [21].

Результаты

Для исследования выбрана монолитная железобетонная конусообразная свая длиной $L = 2$ м с верхним $D^{\text{св}} = 0,6$ м и нижним $d^{\text{св}} = 0,3$ м диаметрами²⁵ [8; 17]. Свая выбранной длины нашла широкое применение при проектировании малоэтажных зданий²⁶.

¹⁵ Методические рекомендации по повышению качества дорожных оснований из щебня различных пород. СоюзДОРНИИ. М., 1980.

¹⁶ Там же. С. 14.

¹⁷ Там же. С. 2.

¹⁸ СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М., 2010.

¹⁹ Там же. С. 134.

²⁰ Там же. С. 34.

²¹ Макаров Е.В., Светлаков Н.Д. Справочные таблицы весов строительных материалов. М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. 48 с.

²² Сапожников А.И., Кузяхметова Э.Р. Способы погружения, прочностные и деформационные расчеты свай. Б. и., 2015. 71 с. URL: <https://ruscont.ru/efd/314524> (дата обращения: 15.06.2021).

²³ Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973. 280 с.; Берлинов М.В., Ягутов Б.А. Расчет оснований и фундаментов: учебное пособие. 3-е изд., испр. СПб.: Лань, 2011. 272 с.

²⁴ СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М., 2010.

²⁵ ГОСТ 19804.5–83. Сваи полые круглого сечения и сваи-оболочки железобетонные цельные с ненапрягаемой арматурой. М.: Издательство стандартов, 1983; ГОСТ 19804.6–83 Сваи полые круглого сечения и сваи-оболочки железобетонные составные с ненапрягаемой арматурой. Конструкция и размеры. М.: Издательство стандартов, 1983.

Толщина t_i стенки щебневой оболочки (опалубки) принята в диапазоне 0,15; 0,2 и 0,3 м, а радиус нижнего щебневого шара – $D_i^{\text{шар}} = 1; 1,5$ и 2,0 м. Массив грунта задан в виде куба с размерами $7 \times 7 \times 7$ м [8; 17; 21]. В табл. 1 приведены геометрические параметры щебневых образований, а в табл. 2–5 – результаты численного расчета свайной конструкции разной формы совместно с грунтовым основанием.

Таблица 1

Геометрические параметры щебневых конструктивных элементов

Тип сваи	Параметры щебневых элементов		Тип сваи	Параметры щебневых элементов		Тип сваи	Параметры щебневых элементов	
	Толщина оболочки t_i , м	Диаметр шара $D_i^{\text{шар}}$, м		Толщина оболочки t_i , м	Диаметр шара $D_i^{\text{шар}}$, м		Толщина оболочки t_i , м	Диаметр шара $D_i^{\text{шар}}$, м
1.1	0,15	1,0	2.1	0,20	1,0	3.1	0,30	1,0
1.2	0,15	1,5	2.2	0,20	1,5	3.2	0,30	1,5
1.3	0,15	2,0	2.3	0,20	2,0	3.3	0,30	2,0

Table 1

Geometrical parameters of crushed stone structural elements

Type of pile	Parameters of crushed stone elements		Type of pile	Parameters of crushed stone elements		Type of pile	Parameters of crushed stone elements	
	Shell thickness t_i , m	Ball diameter D_i^{ball} , m		Shell thickness t_i , m	Ball diameter D_i^{ball} , m		Shell thickness t_i , m	Ball diameter D_i^{ball} , m
1.1	0.15	1.0	2.1	0.20	1.0	3.1	0.30	1.0
1.2	0.15	1.5	2.2	0.20	1.5	3.2	0.30	1.5
1.3	0.15	2.0	2.3	0.20	2.0	3.3	0.30	2.0

При одинаковой толщине стенки щебневой опалубки (оболочки) $t = \text{const}$ существенное влияние на уменьшение осадки сваи, полученной от вертикальной нагрузки $N = 1000$ кН, оказывает увеличение диаметра нижнего щебневого расширения $D_i^{\text{шар}}$. Аналогично и для горизонтального смещения Δ_{xi} под действием силы $P = 100$ кН (табл. 5). На примере трех свайных конструкций с одинаковой толщиной щебневой оболочки (опалубки) $t = 0,15$ м, но с разными радиусами нижнего щебневого шара $D_1^{\text{шар}} = 1$ м, $D_2^{\text{шар}} = 1,5$ м и $D_3^{\text{шар}} = 2$ м видно, что с увеличением диаметра осадка s_i уменьшается приблизительно на 12–20 %, а величина горизонтального смещения Δ_{xi} уменьшится на 7,7–20 % (табл. 6). При одинаковых же диаметрах нижнего щебневого шара $D_i^{\text{шар}} = \text{const}$ толщина стенки щебневой оболочки не существенно влияет на уменьшение осадки s_i сваи, в пределах 2–13 %. Значительное влияние на уменьшение горизонтального смещения Δ_{xi} свайной конструкции оказывает увеличение толщины щебневой стенки $t_i > 0,15$ м (табл. 7). Сравнительно-численный анализ максимальных перемещений свайной конструкции с разными параметрами: диаметром нижнего щебневого расширения (или уширения) и толщиной стенки щебневой опалубки (оболочки) от действия вертикальных $N = 1000$ кН и горизонтальных $P = 100$ кН нагрузок представлен в табл. 6 и 7.

На рис. 2 и 3 изображены графики перемещений (осадок) свайной конструкции с разными конструктивными решениями от вертикальной сжимающей нагрузки $N = 1000$ кН. С увеличением диаметра нижнего щебневого шара $D_1 > D_2 > D_3$ площадь его опирания на грунт возрастает, то есть происходит перераспределение давлений, отсюда и уменьшение осадки (рис. 2). В данном конструктивном решении щебневый шар на нижнем конце сваи является своего рода жестким (несжимаемым) материком в слабо-структурированных грунтах.

С увеличением толщины $t_1 > t_2 > t_3$ стенки щебневой оболочки дополнительно увеличиваются верхний $D^{\text{св}}$ и нижний d диаметры свайной конструкции и, соответственно, площадь ее боковой поверхности, которая значительно влияет на величину осадки s_i сваи (рис. 3). Однако при устройстве щебневой оболочки (опалубки) и нижнего шара увеличивается радиус r уплотнения грунта вокруг свайной конструкции.

Графики (рис. 2–5) демонстрируют влияние нижнего и бокового щебневого расширения на изменение несущей способности свайной конструкции, которая обусловлена суммарным сопротивлением грунтового основания под свай и на ее боковой поверхности.

Результаты расчета свайной конструкции с щелевой оболочкой $t_i = 0,15$ м

Типы свай	Диаметр шара $D_{шар}$, м	Максимальные перемещения свайной конструкции	
		Вертикальная осадка s_i , м от $N = 1000$ кН	Горизонтальное перемещение Δx_i , м от $P = 100$ кН
1.1	1,0	<p>$s_{1.1} = 0,0152$ м</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0152): Total Translation Nodal Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{1.1} = 0,0336$ м</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00336): Total Translation Nodal Contour: T1 Translation</p>
1.2	1,5	<p>$s_{1.2} = 0,012$ м</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.012): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{1.2} = 0,0033$ м</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0033): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>
1.3	2,0	<p>$s_{1.3} = 0,105$ м</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0105): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{1.3} = 0,00320$ м</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00326): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>

Примечание: вертикальное перемещение (осадка свай) представлено в виде заголовка вектора – Total Translation (Полное перемещение); горизонтальное перемещение – T1 Translation (Перемещение узла по оси x).

Table 2

Calculation results of a pile structure with a crushed stone shell $t_i = 0.15$ m

Types of piles	Ball diameter D^{ball} , m	Maximum displacements of the pile structure	
		Vertical draft s_i , m from $N = 1000$ kN	Horizontal displacement Δx_i , m from $P = 100$ kN
1.1	1.0	<p>$s_{1.1} = 0.0152$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0152): Total Translation Nodal Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{1.1} = 0.0336$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00336): Total Translation Nodal Contour: T1 Translation</p>
1.2	1.5	<p>$s_{1.2} = 0.012$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.012): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{1.2} = 0.0033$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0033): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>
1.3	2.0	<p>$s_{1.3} = 0.105$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0105): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{1.3} = 0.0032$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00326): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>

Note: vertical displacement (pile settlement) the Elemental Contour is presented – Total Translation; horizontal displacement the Elemental Contour – T1 Translation.

Результаты расчета свайной конструкции с щелевой оболочкой $t_i = 0,20$ м

Типы свай	Диаметр шара $D_{шар}$, м	Максимальные перемещения свайной конструкции	
		Вертикальная осадка s_b , м от $N = 1000$ кН	Горизонтальное перемещение Δx_b , м от $P = 100$ кН
2.1	1,0	$s_{2.1} = 0,0148$ м	$\Delta x_{2.1} = 0,0031$ м
2.2	1,5	$s_{2.2} = 0,0117$ м	$\Delta x_{2.2} = 0,00308$ м
2.3	2,0	$s_{2.3} = 0,00976$ м	$\Delta x_{2.3} = 0,00306$ м

Примечание: вертикальное перемещение (осадка свай) представлено в виде заголовка вектора – Total Translation (Полное перемещение); горизонтальное перемещение – T1 Translation (Перемещение узла по оси x).

Table 3

Calculation results of a pile structure with a crushed stone shell $t_i = 0.20$ m

Types of piles	Ball diameter D_{ball} , m	Maximum displacements of the pile structure	
		Vertical draft s_b , m from $N = 1000$ kN	Horizontal displacement Δx_b , m from $P = 100$ kN
2.1	1.0	<p>$s_{2.1} = 0.0148$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0148): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{2.1} = 0.0031$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0031): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>
2.2	1.5	<p>$s_{2.2} = 0.0117$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0117): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{2.2} = 0.00308$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00308): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>
2.3	2.0	<p>$s_{2.3} = 0.00976$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00976): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{2.3} = 0.00306$ m</p> <p>Output Set: XIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00306): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>

Note: vertical displacement (pile settlement) the Elemental Contour is presented – Total Translation; horizontal displacement the Elemental Contour – T1 Translation.

Результаты расчета свайной конструкции с щебневой оболочкой $t_i = 0,30$ м

Типы свай	Диаметр шара $D_{шар}$, м	Максимальные перемещения свайной конструкции	
		Вертикальная осадка s_i , м от $N = 1000$ кН	Горизонтальное перемещение Δx_i , м от $P = 100$ кН
3.1	1,0	<p>$s_{3.1} = 0,0141$ м</p> <p>Output Set: KIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0141): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{3.1} = 0,00268$ м</p> <p>Output Set: KIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00268): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>
3.2	1,5	<p>$s_{3.2} = 0,0114$ м</p> <p>Output Set: KIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.0114): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{3.2} = 0,00263$ м</p> <p>Output Set: KIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00263): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>
3.3	2,0	<p>$s_{3.3} = 0,00908$ м</p> <p>Output Set: KIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00908): Total Translation Elemental Contour: Total Translation</p>	<p>$\Delta x_{3.3} = 0,00256$ м</p> <p>Output Set: KIX NASTRAN Case 1 Deformed(0.00256): Total Translation Elemental Contour: T1 Translation</p>

Примечание: вертикальное перемещение (осадка свай) представлено в виде заголовка вектора – Total Translation (Полное перемещение); горизонтальное перемещение – T1 Translation (Перемещение узла по оси x).

Table 4

Calculation results of a pile structure with a crushed stone shell $t_i = 0.30$ m

Types of piles	Ball diameter D_i^{ball} , m	Maximum displacements of the pile structure	
		Vertical draft s_i , m from $N = 1000$ kN	Horizontal displacement Δx_i , m from $P = 100$ kN
3.1	1.0	<p>$s_{3.1} = 0.0141$ m</p>	<p>$\Delta x_{3.1} = 0.00268$ m</p>
3.2	1.5	<p>$s_{3.2} = 0.0114$ m</p>	<p>$\Delta x_{3.2} = 0.00263$ m</p>
3.3	2.0	<p>$s_{3.3} = 0.00908$ m</p>	<p>$\Delta x_{3.3} = 0.00256$ m</p>

Note: vertical displacement (pile settlement) the Elemental Contour is presented – Total Translation; horizontal displacement the Elemental Contour – T1 Translation.

Таблица 5

Максимальные перемещения свайной конструкции $L = 2$ м
от горизонтальной $P = 100$ кН и сжимающей $N = 1000$ кН нагрузки

Диаметр шара $D_i^{\text{шар}}$, м	Максимальные перемещения монолитной железобетонной сваи и щебневой оболочки при следующих толщинах t_i , м					
	0,15		0,20		0,30	
	Вертикальные s_i , м	Горизонтальные Δ_{xi} , м	Вертикальные s_i , м	Горизонтальные Δ_{xi} , м	Вертикальные s_i , м	Горизонтальные Δ_{xi} , м
1,0	0,0152	0,00336	0,01480	0,00310	0,01410	0,00268
1,5	0,0120	0,00330	0,01170	0,00308	0,01140	0,00263
2,0	0,0105	0,00320	0,00976	0,00306	0,00908	0,00256

Table 5

Maximum displacement of the pile structure $L = 2$ m
from horizontal $P = 100$ kN and compressive $N = 1000$ kN load

Ball diameter D_i^{ball} , m	Maximum displacements of a monolithic reinforced concrete pile and crushed stone shell at the following thicknesses t_i , m					
	0.15		0.20		0.30	
	Vertical s_i , m	Horizontal Δ_{xi} , m	Vertical s_i , m	Horizontal Δ_{xi} , m	Vertical s_i , m	Horizontal Δ_{xi} , m
1.0	0.0152	0.00336	0.01480	0.00310	0.01410	0.00268
1.5	0.0120	0.00330	0.01170	0.00308	0.01140	0.00263
2.0	0.0105	0.00320	0.00976	0.00306	0.00908	0.00256

Таблица 6

Сравнительно-численный анализ максимальных перемещений конусообразных свай
с разными диаметрами $D_i^{\text{шар}}$ нижнего щебневого шара

Толщина щебневой оболочки (опалубки) t_i , м	Соотношение максимальных перемещений свай по типам и диаметрам $D_i^{\text{шар}}$ нижнего щебневого шара					
	Типы конусообразной сваи					
	1.1–1.2 $D_1^{\text{шар}}-D_2^{\text{шар}}$ 1,0–1,5 м		1.2–1.3 $D_2^{\text{шар}}-D_3^{\text{шар}}$ 1,5–2,0 м		1.1–1.3 $D_1^{\text{шар}}-D_3^{\text{шар}}$ 1,0–2,0 м	
<i>Процентное соотношение вертикальных перемещений s_i, %</i>						
0,15	21,00		12,50		31,00	
0,20	20,90		16,50		34,00	
0,30	19,10		20,00		20,00	
<i>Процентное соотношение горизонтальных перемещений Δ_{xi}, %</i>						
0,15	7,70		13,50		20,00	
0,20	6,70		16,50		14,60	
0,30	6,14		16,40		21,50	

Table 6

Comparative-numerical analysis of the maximum displacements of cone-shaped piles
with different diameters D_i^{ball} of the lower crushed stone ball

Crushed stone shell (formwork) thickness t_i , m	The ratio of the maximum displacements of piles by types and diameters D_i^{ball} of the lower crushed stone ball					
	Taper pile types					
	1.1–1.2 $D_1^{\text{ball}}-D_2^{\text{ball}}$ 1.0–1.5 m		1.2–1.3 $D_2^{\text{ball}}-D_3^{\text{ball}}$ 1.5–2.0 m		1.1–1.3 $D_1^{\text{ball}}-D_3^{\text{ball}}$ 1.0–2.0 m	
<i>Percentage of vertical displacement s_i, %</i>						
0.15	21.00		12.50		31.00	
0.20	20.90		16.50		34.00	
0.30	19.10		20.00		20.00	
<i>Percentage of horizontal displacements Δ_{xi}, %</i>						
0.15	7.70		13.50		20.00	
0.20	6.70		16.50		14.60	
0.30	6.14		16.40		21.50	

Таблица 7

Сравнительно-численный анализ максимальных перемещений конусообразных свай с разными толщинами щебневой оболочки (опалубки) t_i

Диаметр щебневой расширения $D_i^{шар}$, м	Соотношение максимальных перемещений свай по типам и толщине щебневой оболочки t_i		
	Типы конусообразной сваи		
	1.1–2.1 t_1-t_2 0,15–0,20 м	2.1–3.1 t_2-t_3 0,20–0,30 м	1.1–3.1 t_1-t_3 0,15–0,30 м
	Процентное соотношение вертикальных перемещений s_i , %		
1,0	2,60	4,70	7,20
1,5	2,50	2,60	5,00
2,0	7,00	13,50	0,00066
	Процентное соотношение горизонтальных перемещений Δ_{xi} , %		
1,0	7,70	13,50	20,00
1,5	6,70	16,50	14,60
2,0	6,14	16,40	21,50

Table 7

Comparative-numerical analysis of the maximum displacements of cone-shaped piles with different thicknesses of the crushed stone shell (formwork) t_i

Crushed stone expansion diameter D_i^{ball} , m	The ratio of the maximum displacements of piles by types and thickness of crushed stone t_i		
	Taper pile types		
	1.1–2.1 t_1-t_2 0.15–0.20 m	2.1–3.1 t_2-t_3 0.20–0.30 m	1.1–3.1 t_1-t_3 0.15–0.30 m
	Percentage of vertical displacement s_i , %		
1.0	2.60	4.70	7.20
1.5	2.50	2.60	5.00
2.0	7.00	13.50	0.00066
	Percentage of horizontal displacements Δ_{xi} , %		
1.0	7.70	13.50	20.00
1.5	6.70	16.50	14.60
2.0	6.14	16.40	21.50

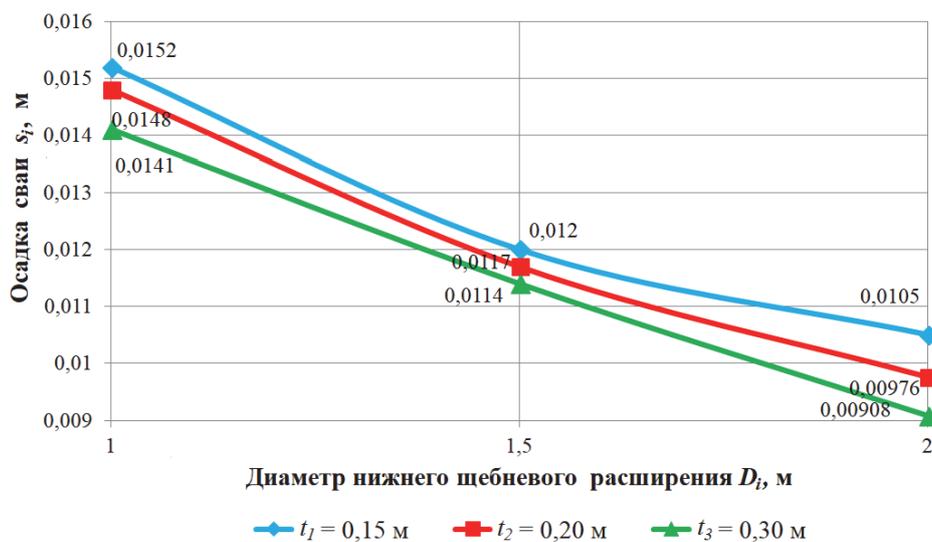


Рис. 2. График зависимости «осадки – диаметр нижнего щебневого расширения» конусообразной сваи длиной $L = 2$ м при $N = 1000$ кН

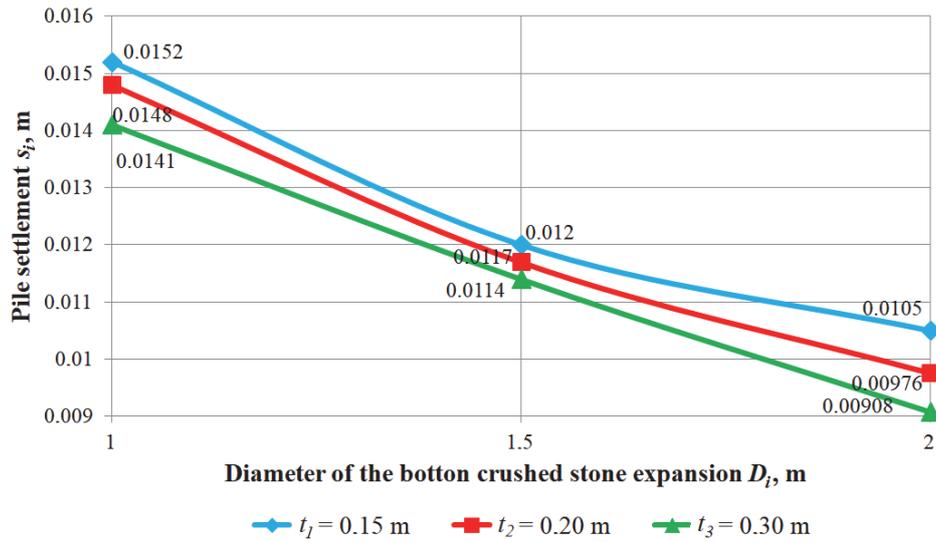


Figure 2. The graph of the dependence “settlement – diameter of the lower crushed stone expansion” of a cone – shaped pile with a length of $L = 2$ m at $N = 1000$ kN

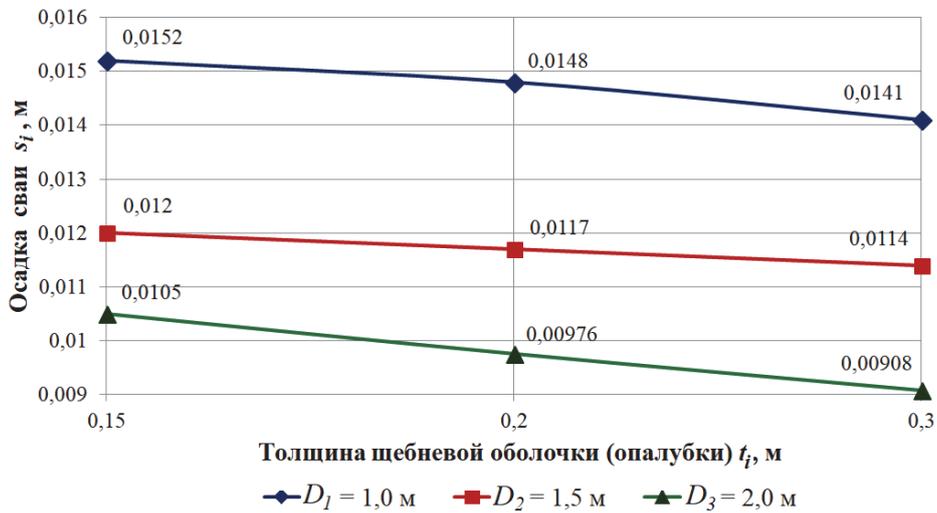


Рис. 3. График зависимости «осадки – толщины щебневой оболочки (опалубки)» конусообразной сваи длиной $L = 2$ м при $N = 1000$ кН

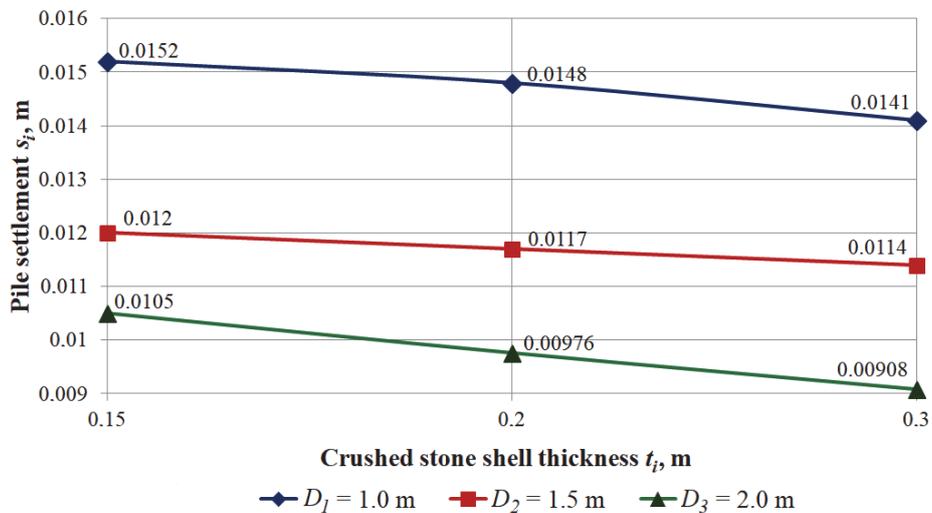


Figure 3. The graph of the dependence “settlement – thickness of the crushed stone shell (formwork)” of a cone-shaped pile with a length of $L = 2$ m at $N = 1000$ kN

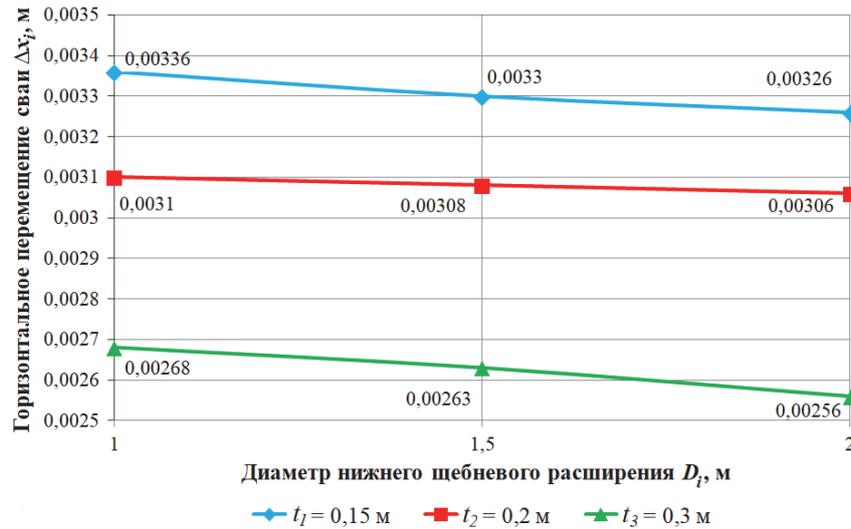


Рис. 4. График зависимости «горизонтального перемещения – диаметра нижнего щебневого расширения» конусообразной сваи длиной $L = 2$ м при $P = 100$ кН

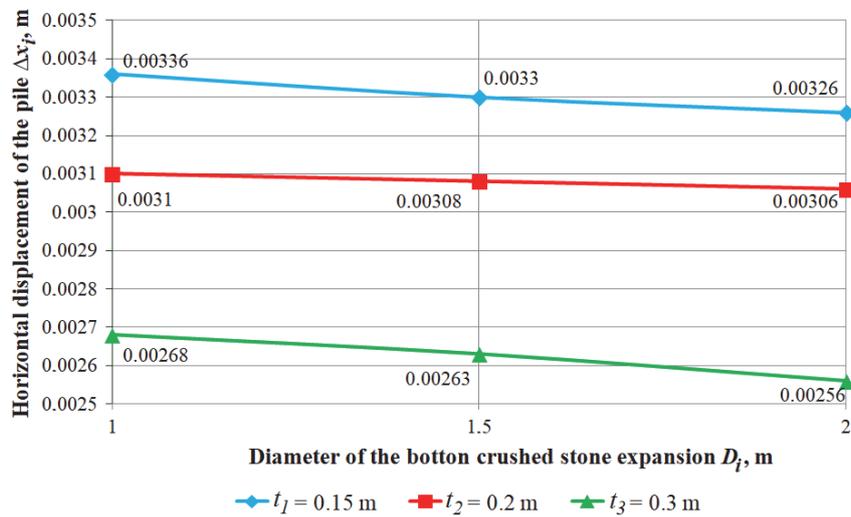


Figure 4. Graph of dependence of “horizontal displacement – diameter of the lower crushed stone expansion” of a cone-shaped pile with a length of $L = 2$ m at $P = 100$ kN

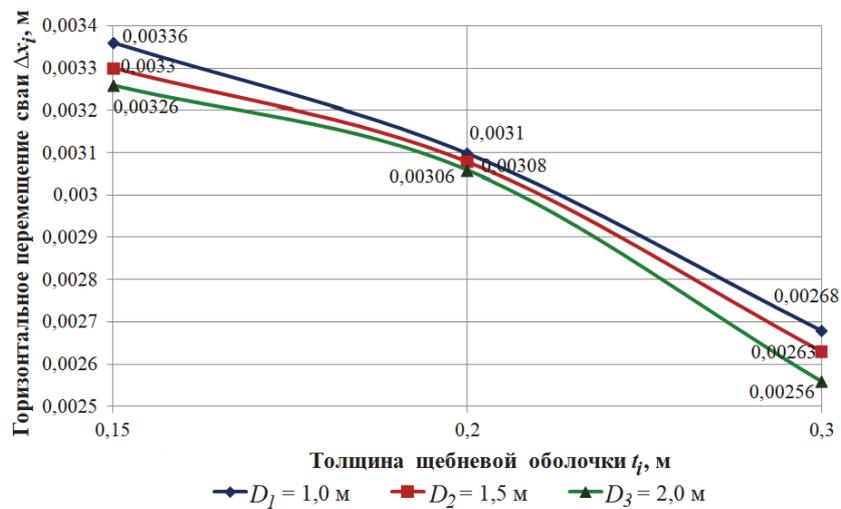


Рис. 5. График зависимости «горизонтального перемещения – толщины щебневой оболочки (опалубки)» конусообразной сваи длиной $L = 2$ м при $P = 100$ кН

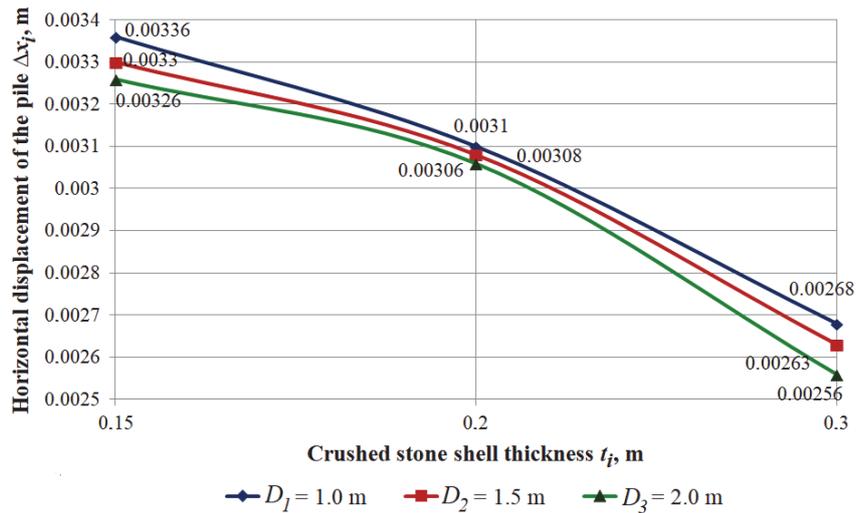


Figure 5. Graph of the dependence of ‘horizontal displacement – thickness of the crushed stone shell’ of a cone-shaped pile with a length of $L = 2$ m at $P = 100$ kN

Аналогичные графики зависимости смещений свайных конструкций от горизонтальной нагрузки $P = 100$ кН приведены на рис. 4 и 5. Размеры диаметра нижнего щебневого шара незначительно влияют на горизонтальное перемещение Δ_{xi} сваи в направлении приложенной внешней силы P (рис. 4). Однако они оказывают влияние в большей степени на перемещение нижнего конца короткой сваи (жесткой сваи) [17], то есть увеличение диаметра щебневого шара уменьшает смещение на конце сваи (табл. 2–4). Существенное влияние на уменьшение горизонтального смещения сваи Δ_{xi} оказывает увеличение верхнего и нижнего диаметров сваи за счет толщины ($t_1 > t_2 > t_3$) стенки щебневой оболочки (опалубки) (рис. 5).

Заключение

1. Новая конструкция свайного фундамента на примере двухметровой сваи с боковыми и нижними щебневыми образованиями является рациональным и экономичным решением не только для нового строительства, но и для реконструкции существующих зданий и сооружений. Выбор ее конструктивного решения зависит от типа грунта и внешней нагрузки.

2. Сравнительный анализ показал, что на вертикальные s , м и горизонтальные Δ_x , м перемещения конусообразной свайной конструкции существенное влияние оказывают ее геометрические и жесткостные параметры, принятые при конструировании, технологии погружения и изготовления, а также физико-механические свойства материалов сваи и грунта.

3. Увеличение несущей способности сваи достигается за счет увеличения угла конусности, толщины t , м щебневой оболочки (опалубки), диаметра $D^{\text{шар}}$, м нижнего щебневого шара (нижнего расширения шарообразной формы), а также путем уплотнения грунта в околосвайной области, то есть за счет структурных изменений грунтового массива.

4. Геометрические особенности щебневых образований (бокового и нижнего) приводят к дополнительному повышению несущей способности (жесткости) сваи за счет увеличения площади контакта с грунтовым основанием. Сцепление щебневых образований с частицами грунтового массива увеличивается благодаря угловатой форме, характерным размерам и шероховатости поверхности щебневого камня.

5. Концевое шарообразное щебневое образование сваи способствует равномерному распределению давления p , МПа на основание и образует жесткую подложку (материк) в слабоструктурированных грунтах.

6. В ходе дальнейших исследований несущей способности конусообразной свайной конструкции предполагается провести сопоставление численных результатов с результатами лабораторных и(или) натуральных экспериментов, включая анализ поведения расчетной модели грунта за пределами теории упругости. Особый интерес вызывает определение жесткостных и прочностных характеристик щебневого образования свайной конструкции при ее порционной забивке в грунтовое основание с разными физико-механическими свойствами. Предполагается также определить рациональную форму и размеры

околосвайной области уплотненного грунта при образовании щебневой оболочки и нижнего щебневого уширения (расширения) шарообразной формы, которые, как показал численный анализ, оказывают существенное влияние на несущую способность свайной конструкции.

Список литературы

1. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс. М.: Стройиздат, 1991. 728 с.
2. Веселов В.А. Проектирование оснований и фундаментов (основы теории и примеры расчета). М.: Стройиздат, 1990. 304 с.
3. Сапожников А.И., Кужахметова Э.Р. Глубокое погружение и деформационный расчет монолитной свайно-оболочки большого диаметра // Международная научная конференция научно-педагогических работников Астраханского государственного технического университета, посвященная 85-летию со дня основания вуза (59 НПП): материалы. Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2015. С. 191–192.
4. Кальницкий А.А., Пешковский Л.Н. Расчет и конструирование железобетонных фундаментов гражданских и промышленных зданий и сооружений. М.: Высшая школа, 1974. 260 с.
5. Ободовский А.А. Проектирование свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1977. 112 с.
6. Трофименко Ю.Г., Ободовский А.А. Свайные фундаменты для жилых и промышленных зданий. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Издательство литературы по строительству, 1970. 241 с.
7. Сотников С.Н., Симагин В.Г., Вершинин В.П. Проектирование и возведение фундаментов вблизи существующих зданий. М.: Стройиздат, 1986. 96 с.
8. Кужахметова Э.Р. Погружение, расчет и конструирование монолитной железобетонной сваи конической формы // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 57–64.
9. Kong G.-Q., Yang Q., Liu H.L., Liang R.Y. Numerical study of a new belled wedge pile type under different loading modes // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2013. No. 17. Pp. 37–41.
10. Khan M.K., Nagggar M.H.E., Elkasabgy M. Compression testing and analysis of drilled concrete tapered piles in cohesive-frictional soil // Canadian Geotechnical Journal. 2008. Vol. 45. No. 3. Pp. 377–392.
11. Rybnikov A.M. Experimental investigations of bearing capacity of bored-cast-in-place tapered piles // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1990. Vol. 27. No. 2. Pp. 48–52.
12. Nagggar M.H.E., Wei J.Q. Axial capacity of tapered piles established from model tests // Canadian Geotechnical Journal. 1999. Vol. 36. No. 6. Pp. 1185–1194.
13. Nagggar M.H.E., Sakr M. Evaluation of axial performance of tapered piles from centrifuge tests // Canadian Geotechnical Journal. 2000. Vol. 37. No. 6. Pp. 1295–1308.
14. Рыбникова И.А., Рыбников А.М. Анализ результатов натурных испытаний буронабивных конических свай на действие различных видов нагрузок // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2018. Т. 3. № 3. С. 24–29. http://doi.org/10.12737/article_5abfc9b8b80fd1.89721982
15. Рыбникова И.А., Рыбников А.М. Анализ результатов тензометрических исследований работы натурных буронабивных конических свай // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 44–55. <http://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-44-55>
16. Чернявский Д.А. Оценка влияния прочностных характеристик глинистых грунтов на несущую способность одиночных конических буронабивных свай // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9. № 4. С. 69–79. <http://doi.org/10.15593/2224-9826/2018.4.07>
17. Кужахметова Э.Р. Исследование напряженно-деформированного состояния набивной монолитной железобетонной конусообразной сваи с щебневыми боковыми и нижними образованиями // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 4. С. 335–356. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-335-356>
18. Перич А.И. Экономические фундаменты малоэтажных зданий и усадебных домов. М.: ГУП ЦПП, 2002. 148 с.
19. Zhukov N.V. Construction of pile foundations for instrudial farm buildings // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1968. Vol. 5. Issue 4. Pp. 251–254.
20. Кужахметова Э.Р., Сапожников А.И. Сравнительный анализ работы длинных и коротких свай при горизонтальном нагружении // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2015. № 5–6 (196–197). С. 30–34.
21. Кужахметова Э.Р. Моделирование свайного фундамента в среде Femap with NX Nastran // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 4. С. 250–260. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-4-250-260>.
22. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 540 с.
23. Budhu M. Soil mechanics and foundations. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
24. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.
25. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2003. 448 с. (Серия «Проектирование»).

References

1. Baykov V.N., Sigalov E.E. *Reinforced concrete structures. General course*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1991. (In Russ.)
2. Veselov V.A. *Design of foundations and foundations (fundamentals of theory and examples of calculation)*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1990. (In Russ.)
3. Sapozhnikov A.I., Kuzhakhmetova E.R. Deep immersion and deformation calculation of a monolithic pile-shell of large diameter. *Proceedings of the International Scientific Conference of Scientific and Pedagogical Workers of Astrakhan State Technical University, Dedicated to the 85th Anniversary from the Basis of the University*. Astrakhan: Astrakhan State Technical University; 2015. p. 191–192. (In Russ.)
4. Kalnitskiy A.A., Peshkovskiy L.N. *Calculation and design of reinforced concrete foundations of civil and industrial buildings and structures*. Moscow: Vysshaya Shkola; 1974. (In Russ.)
5. Obodovsky A.A. *Design of pile foundations*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1977. (In Russ.)
6. Trofimenkov Yu.G., Obodovskiy A.A. *Pile foundations for residential and industrial buildings*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1970. (In Russ.)
7. Sotnikov S.N., Simagin V.G., Vershinin V.P. *Design and construction of foundations near existing buildings*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1986. (In Russ.)
8. Kuzhakhmetova E.R. Dipping, calculation and construction of the monolithic reinforced concrete pile of the conical form. *Scientific Review. Technical Science*. 2017;(2):57–64.
9. Kong G.-Q., Yang Q., Liu H.L., Liang R.Y. Numerical study of a new belled wedge pile type under different loading modes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2013;17:37–41.
10. Khan M.K., Nagggar M.H.E., Elkasaby M. Compression testing and analysis of drilled concrete tapered piles in cohesive-frictional soil. *Canadian Geotechnical Journal*. 2008;45(3):377–392.
11. Rybnikov A.M. Experimental investigations of bearing capacity of bored-cast-in-place tapered piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1990;27(2):48–52.
12. Nagggar M.H.E., Wei J.Q. Axial capacity of tapered piles established from model tests. *Canadian Geotechnical Journal*. 1999;36(6):1185–1194.
13. Nagggar M.H.E., Sakr M. Evaluation of axial performance of tapered piles from centrifuge tests. *Canadian Geotechnical Journal*. 2000;37(6):1295–1308.
14. Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. Analysis of the field tests results of bored conical piles under the action of various types of loads. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018;3(3):24–29. (In Russ.) http://doi.org/10.12737/article_5abfc9b8b80fd1.89721982
15. Rybnikova I.A., Rybnikov A.M. Analysis of the results of tensometric studies of natural bored conical piles. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020;(2):44–55. (In Russ.) <http://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-44-55>
16. Cherniavsky D.A. Assessment of the influence of the strength characteristics of clay soils on the bearing capacity of single conical CFA piles. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2018;9(4):69–79. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2018.4.07>
17. Kuzhakhmetova E.R. Research of stress-deformed state of the rammed monolithic reinforced concrete cone-shaped piles with side and bottom forms from crushed stones. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(4):335–356. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-335-356>
18. Perich A.I. *Economic foundations of low-rise buildings and manor houses*. Moscow: GUP TSPP Publ.; 2002. (In Russ.)
19. Zhukov N.V. Construction of pile foundations for instrudial farm buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1968;5(4): 251–254.
20. Kuzhakhmetova E.R., Sapozhnikov A.I. Comparative analysis of long and short piles with horizontal uploading. *Building Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2015;(5–6):30–34. (In Russ.)
21. Kuzhakhmetova E.R. Modeling of a piled foundation in a Femap with NX Nastran. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(4):250–260. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-4-250-260>
22. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. Moscow: Mir Publ.; 1975. (In Russ.)
23. Budhu M. *Soil mechanics and foundations*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc.; 2010.
24. Rychkov S.P. *Structural modeling in Femap with NX Nastran*. Moscow: DMK Press; 2013. (In Russ.)
25. Shimkovich D.G. *Structural analysis in MSC/NASTRAN for Windows*. Moscow: DMK Press; 2003. (In Russ.)