

УДК 624.154.54

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-71-77

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ КОНИЧЕСКИХ СВАЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ

Г. Г. Солонов

Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар, Россия

Аннотация. Рассматриваются конструктивные решения буроинъекционных конических свай, которые могут применяться в составе фундаментов при реконструкции зданий. Применение буроинъекционных свай конической формы обусловлено повышением их несущей способности на действие вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также снижением осадок фундаментов зданий, что подтверждается результатами численных и экспериментальных исследований. В работе приводится сопоставление численных расчетов работы буроинъекционных цилиндрических и конических свай в глинистых грунтах.

Ключевые слова: буроинъекционная коническая свая, глинистый грунт, инженерный метод расчета, численные исследования несущая способность, осадка

JUSTIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF USING BORED-INJECTION CONICAL PILES IN BUILDING RECONSTRUCTION

G. G. Solonov

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Annotation. The paper considers the design solutions of bored-injection conical piles, which can be used as part of foundations during the reconstruction of buildings. The use of bored-injection conical piles is due to the increase in their load-bearing capacity under vertical and horizontal loads, as well as the reduction of foundation settlements of buildings, which is confirmed by the results of numerical and experimental studies. The paper provides a comparison of numerical calculations of the performance of bored-injection cylindrical and conical piles in clay soils.

Keywords: bored-injection conical pile, clay soil, engineering calculation method, numerical studies, bearing capacity, settlement

Введение

При новом строительстве и реконструкции зданий в России находят широкое применение буроинъекционные сваи из мелкозернистого бетона. В последнее время все большее развитие получают буроинъекционные сваи с конической формой ствола. Эффективность конструктивных решений буроинъекционных конических свай обусловлена повышением их несущей способности по сравнению с буроинъекционными цилиндрическими сваями равной длины и равного объема. Коническая форма буроинъекцион-

ных свай [1] была разработана для условий нового строительства и реконструкции зданий. Устройство таких свай осуществляется путем нагнетания мелкозернистого бетона в скважину без избыточного давления на ее стенки, что исключает вероятность возникновения гидроразрыва глинистого грунта. Конструктивные решения конических свай из мелкозернистого бетона были предложены в период 2010–2025 гг. специалистами Кубанского государственного аграрного университета [1–3] (рис. 1). Исследованиям их работы в глинистых грунтах посвящены публикации А. И. Полищука, О. Ю. Ещенко, Д. А. Чернявского, И. В. Семенова, Г. Г. Солонова и др. [4, 5]. Настоящая работа выполнялась под руководством д-ра техн. наук, проф. А. И. Полищука.

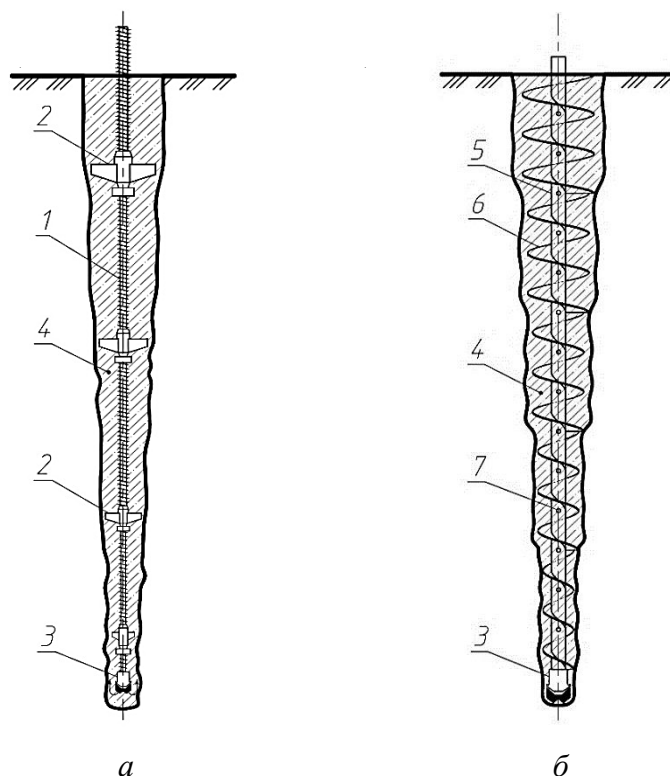


Рис. 1: Конические сваи из мелкозернистого бетона:

а – буроинъекционная коническая свая по данным Д. А. Чернявского и др. (2011);

б – буроинъекционная коническая свая по данным Г. Г. Солонова и др. (2025);

1 – металлическая полая штанга с резьбой; *2* – соединительные муфты-коронки с лопастями разного размера; *3* – буровое долото; *4* – мелкозернистая бетонная смесь; *5* – металлическая перфорированная полая штанга; *6* – винтовая поверхность (шнеки) разного диаметра; *7* – отверстие для нагнетания мелкозернистой бетонной смеси

Результаты исследований

В 2024 г. А. И. Полищуком, Г. Г. Солоновым и др. был предложен инженерный метод расчета осадки одиночной буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах, в котором подразумевается отдельный учет работы ее боковой поверхности и нижнего конца. Авторы рассматривают три этапа нагружения сваи (рис. 2).

Первый этап нагружения сваи описывается графиком $S = f(N)$, который характеризует осадку конической сваи, изменяющуюся по линейному закону. Внешняя нагрузка N передается на основание преимущественно за счет трения грунта по ее боковой поверхности, а нижний конец сваи практически не принимает участия в работе. Определение осадки сваи на первом этапе нагружения (S_1) основывается на решении, разработанном М. F. Randolph и др. (1978) для цилиндрической формы ствола сваи. Исходное решение (S_1) было усовершенствовано авторами для конической формы буринъекционной сваи, которое представлено в виде

$$S_1 = \frac{N_1}{2\pi l G} \ln \left(\frac{r_m}{r_{cp}} \right), \quad (1)$$

где все обозначения приняты согласно работе [6] и рис. 2.

Предложенный метод расчета осадки сваи (S_1) учитывает изменение свойств глинистого грунта вокруг ее ствола за счет инъекции под давлением мелкозернистого бетона и уплотнения околосвайного массива.

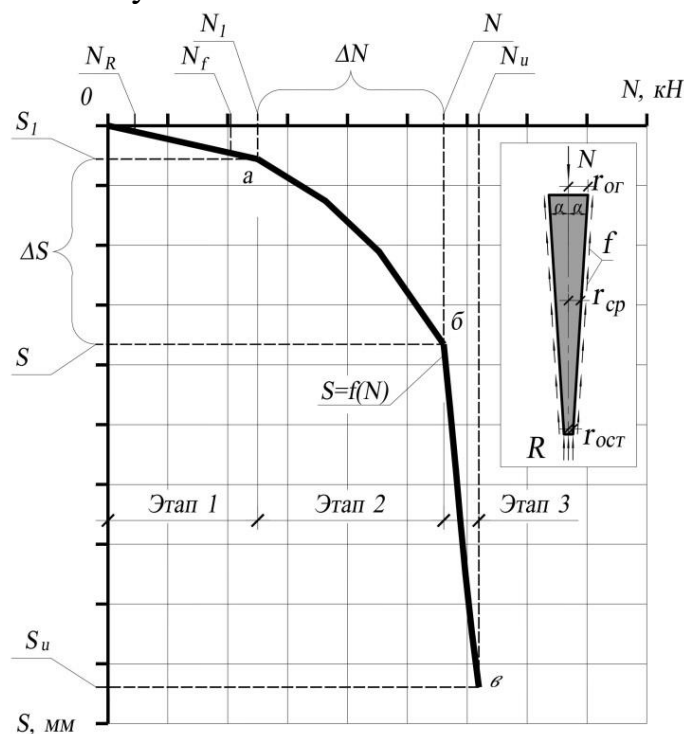


Рис. 2. График нагружения буринъекционной конической сваи в глинистом грунте:

N_f — часть внешней нагрузки, передаваемой боковой поверхностью сваи; N_R — часть внешней нагрузки, передаваемой грунт нижним концом сваи на этапе окончания линейной зависимости; N_1 — нагрузка на первом этапе нагружения; ΔN — приращение нагрузки на сваю с момента окончания линейной зависимости; N — нагрузка на втором этапе нагружения в диапазоне нелинейной зависимости; N_u — предельная нагрузка на сваю; S_1 — осадка сваи на первом этапе нагружения; ΔS — приращение осадки сваи с момента окончания линейной зависимости; S — осадка сваи на втором этапе нагружения в диапазоне нелинейной зависимости; S_u — предельная осадка сваи

При уплотнении грунта вокруг ствола сваи опытным путем установлено увеличение его прочностных характеристик (удельного сцепления c и угла внутреннего трения φ) [6]. При определении осадки S_1 учтено обжатие (давление) стенок скважины ($\sigma_r^{\text{обж}}$) за счет инъекции бетона, которое суммируется с естественным (природным) боковым давлением грунта. Эта формула (S_1) получена с учетом наклона боковых граней к вертикали, а также обжатия стенок скважины мелкозернистым бетоном при устройстве буроинъекционной конической сваи [7].

Второй этап нагружения сваи описывается графиком $S = f(N)$, который характеризует осадку буроинъекционной конической сваи, протекающую по нелинейному закону. В процессе уплотнения грунта вокруг сваи постепенно включается в работу нижний ее конец. На втором этапе нагружения определяется приращение осадки сваи (ΔS). Для этого используется метод Малышева-Никитиной для фундаментов мелкого заложения, преобразованный Максимовым Ф.А. для свай [8]:

$$\Delta S = S_1 \frac{\Delta N (N_u - N_R) - N_R (\Delta N - N_R)}{N_R (N_u - \Delta N)}, \quad (2)$$

где все обозначения приняты согласно работе [7] и рис. 2.

Формула (2) позволяет рассчитать приращение осадки сваи ΔS в нелинейном диапазоне ее работы (рис. 2).

Авторы считают, что на третьем этапе нагружения сваи наступает предельное состояние основания. Происходит полное проскальзывание грунта по боковой поверхности ствола и полное включение в работу нижнего конца буроинъекционной конической сваи. На третьем этапе нагружения происходит образование нестабилизированной (предельной) ее осадки (S_u). Приращение осадки (ΔS) на третьем этапе в расчете не учитывается.

Численные исследования работы буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах выполнялись с использованием ПК Midas GTS NX в пространственной постановке задачи. В ходе исследований предстояло моделировать работу одиночных буроинъекционных конических и цилиндрических свай. Грунты основания моделировались с использованием модели *упрочняющегося грунта* (табл. 1). Взаимодействие свай с грунтом описывалось с помощью интерфейсных элементов (Г. Г. Болдырев, 2017-2024). Программой численных исследований предусматривалось сопоставление результатов определения осадки одиночных буроинъекционных цилиндрических и конических свай [5, 7]. Рассматривались буроинъекционные сваи длиной 7 м, диаметром 0,325 м. Угол наклона боковых граней конических свай составлял 1° . В качестве грунта основания принят суглинок мягкопластичной консистенции (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики грунтов основания, используемые для модели упрочняющегося грунта

Наименование	ИГЭ суглинок мягкопластичный	Ед. изм.
Секущий модуль деформации, E_{50}^{ref}	4900	кПа
Одометрический модуль деформации, E_{oed}^{ref}	3200	кПа
Модуль деформации при разгрузке, E_{ur}^{ref}	21300	кПа
Козф. Пуассона, ν	0,2	—
Удельный вес, γ	18	кН/м ³
Опорное давление, p	100	кПа
Степенной показатель, m	0,9	—
Эффективный угол внутр. трения, ϕ'	13	град
Кэффициент бокового давления покоя, K_0^{nc}	0,775	—
Угол дилатансии, ψ	0	град
Эффективное сцепление, c'	14	кПа
Козф. переуплотнения, OCR	2,2	—
Давление предуплотнения, POP	0	кПа

Нагружение свай рассматривалось до их несущей способности F_d , за которую принималась нагрузка на сваю при расчетной величине осадки реконструируемого здания, равной 3 см (СП 22.13330.2021, прил. Е, п. 3). По результатам расчетов были построены изополя вертикальных перемещений сваи и грунтового массива (рис. 3, а), а также графики зависимости осадки сваи от внешней нагрузки (рис. 3, б).

Было установлено, что в рассматриваемых грунтовых условиях несущая способность конических свай F_d длиной 7 м составляет по результатам численных исследований $F_d = 279$ кН; для цилиндрических свай длиной 7 м их несущая способность F_d равна 248 кН. С учетом вышеизложенного характера работы буроинъекционной конической сваи в глинистом грунте были получены зависимости $S = f(N)$ [формулы (1), (2)] на рассматриваемых этапах нагружения, которые приведены в работе [7]. Результаты сопоставления данных численного и инженерного метода расчета конечной осадки (при рассматриваемых значениях $F_d = 248$ кН и $F_d = 279$ кН) показали, что отклонение в расчетах составляет для свай длиной 7,0 м — 12,1 % – 15,6 %. В целом несущая способность F_d буроинъекционных конических свай длиной 7,0 м примерно на 14 % больше, чем цилиндрических (рис. 3, табл. 2).

Выполненные исследования подтверждают, что применение буроинъекционных конических свай в условиях реконструкции зданий может быть вполне оправданным. Эффективность конструктивных решений буроинъекционных конических свай обусловлена повышением их несущей способности по сравнению буроинъекционными цилиндрическими сваями такой же длины при равном объеме. Такие сваи имеют меньшую осадку (табл. 2), что

является важным критерием при проектировании фундаментов реконструируемых зданий вследствие жестких ограничений в нормативной документации по дополнительной осадке проектирования фундаментов реконструируемых зданий (СП 22.13330.2016, прил. Е).

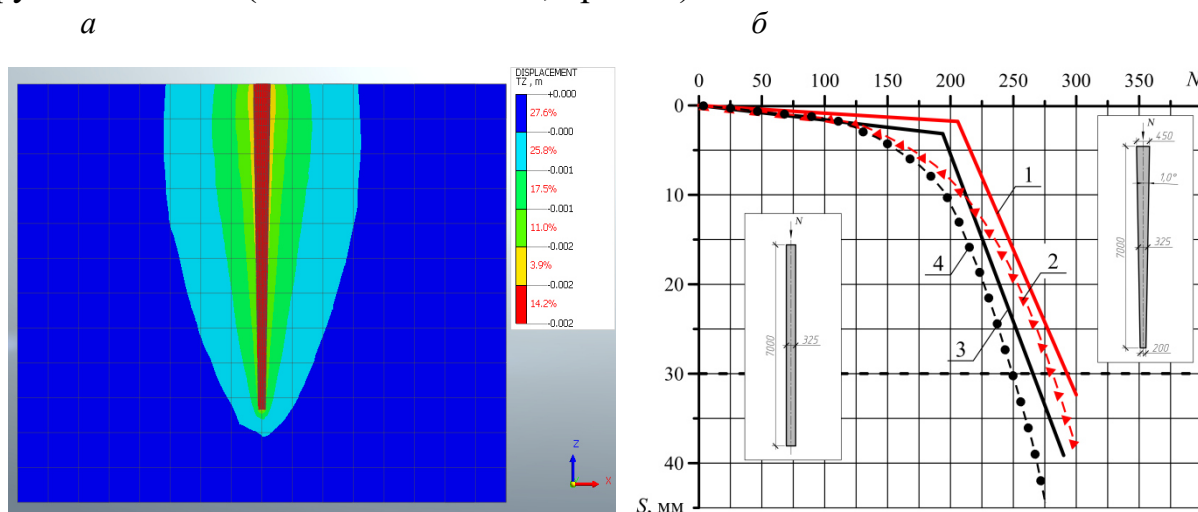


Рис. 3. Результаты определения конечной осадки одиночной буроинъекционной конической сваи:

a – изополя вертикальных перемещений (осадок) сваи и грунтового массива;

б – график зависимости осадки от внешней нагрузки буроинъекционной конической сваи: 1 – инженерный метод расчета [формулы (1), (2)]; 2 – расчет в ПК Midas GTS NX

Таблица 2. Результаты расчета осадок буроинъекционных конических и цилиндрических свай

Буроинъекционная свая	Геометрические параметры свай		Осадка сваи S , мм, установленная методом		
			инженерным	численным	отклонение, %
Коническая	$L = 7$ м $d_{cp} = 0,325$ м	$\alpha = 1$ град	32,3	38,3	15,6%
Цилиндрическая	$L = 7$ м $d = 0,325$ м		39,1	44,5	12,1%

Закключение

Из анализа материалов проектирования фундаментов реконструируемых зданий в настоящее время находят все большее применение буроинъекционные конические сваи преимущественно в глинистых грунтах различной разновидности. Специалистами кафедры оснований и фундаментов Кубанского ГАУ ведутся исследования по совершенствованию конструктивных решений и способов устройства буроинъекционных конических свай в условиях реконструкции зданий, которые находят применение в промышленном, гражданском и сельскохозяйственном строительстве. Выполненные исследования подтверждают, что применение рассматриваемых конических свай в условиях реконструкции зданий является перспективным направлением. Они сваи обладают повышенной несущей способностью на

действие вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также меньшей осадкой по сравнению с цилиндрическими сваями равной длины и равного объема расходуемого материала на их изготовление.

Список источников

1. Анкерная свая: пат. Рос. Федерация / О. Ю. Ещенко, Д. А. Чернявский. – № 2425924 С1; заявл. 11.05.2010; опубл. 10.08.2011. – 5 с.
2. Устройство для изготовления буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах: пат. Рос. Федерация / А. И. Полищук, Г. Г. Солонов, Д. А. Чернявский, В. В. Панченко. – № 2847988 С1; заявл. 22.11.2024; опубл. 15.10.2025. – 10 с.
3. Устройство для изготовления буроинъекционной конической сваи: пат. Рос. Федерация / А. И. Полищук, И. В. Семенов, Д. А. Чернявский. – №2672698 С1; заявл. 16.11.2017; опубл. 19.11.2018. – 10 с.
4. Чернявский, Д. А. Разработка конструкции и метода расчета несущей способности буроинъекционных конических свай в глинистых грунтах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Чернявский. – Краснодар, 2020. – 23 с.
5. Полищук, А. И. Моделирование работы буроинъекционных свай в глинистых грунтах для обоснования выбора модели грунта при проведении численных исследований / А. И. Полищук, Г. Г. Солонов // Теория и практика фундаментостроения: сборник тезисов докладов XV Международного симпозиума по реологии грунтов, посвященного 95-летию КГАСУ и 60-летию кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология», Казань, 04–06 июня 2025 года. – Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 87-88.
6. Петухов, А. А. Совершенствование способа устройства инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для условий реконструкции зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Петухов. – Томск, 2006. – 23 с.
7. Полищук, А. И. Совершенствование метода расчета осадки одиночной буроинъекционной конической сваи в глинистых грунтах / А. И. Полищук, Г. Г. Солонов, Д. А. Чернявский // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 2(794). – С. 19-29. – DOI 10.32683/0536-1052-2025-794-2-19-29.
8. Полищук, А. И. Инженерный метод расчета осадки винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте / А. И. Полищук, Ф. А. Максимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 6. – С. 9–14.

© Солонов Г. Г., 2026