

УДК 624.131.524.4

Збицкая В. В.,

к.т.н. Псюк В. В.

(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, k1r1lch@i.ua)

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРО-ИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

В работе на базе методик исследований несущей способности буро-инъекционных свай был выполнен анализ основных параметров. Исследованиями доказано, что погрешности несущей способности буро-инъекционных свай, рассчитанные тремя методами, находятся в допустимых интервалах погрешностей для технических расчетов и измерений, то есть менее 20 %.

Ключевые слова: грунт, инъекция, цементный раствор, свая, технологические параметры, методика, несущая способность, абсолютная погрешность, относительная погрешность.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Строительные площади на 70 % представлены просадочными грунтами. В результате суффозии и обводнения такие грунты со временем меняют свои свойства. Под воздействием различных нагрузок наблюдаются вертикальные деформации провального характера.

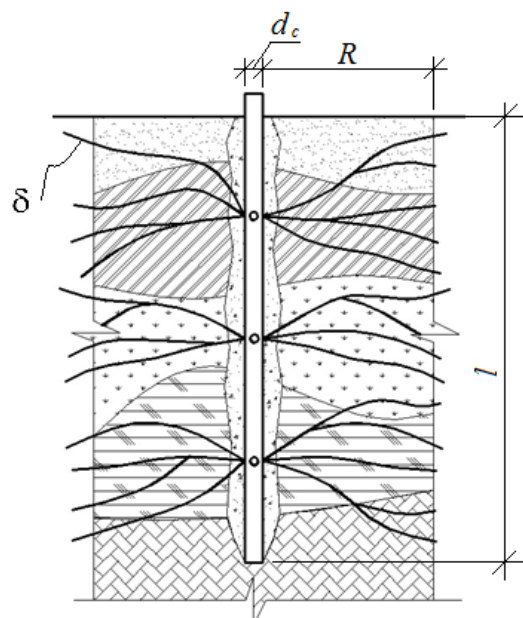
Абсолютные величины просадок часто превышают предельно допустимые, образуются разуплотненные зоны и локальные пустоты, в результате чего происходит потеря несущей способности грунта.

Для повышения прочности грунтов оснований эксплуатируемых сооружений и предотвращения развития в их конструкциях деформаций аварийного характера, а также для работ по реконструкции существующих фундаментов и их оснований известны различные методы закрепления грунтов: силикатизация, химизация, цементация. Однако и они не всегда улучшают инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации сооружения. Одним из перспективных способов усиления грунтов основания и реконструкции фундаментов аварийных зданий является использование буро-инъекционных свай.

При изготовлении буро-инъекционных свай вокруг них в грунте образуются разнонаправленные каналы гидроразрыва, в результате чего образуется система из инъекционной трубы и цементных ушире-

ний (рис. 1) [1, 2]. Основными преимуществами буро-инъекционных свай являются:

- высокая скорость и низкая трудоемкость их выполнения;
- применение таких свай исключает большой объем земляных работ;
- буро-инъекционные сваи обеспечивают твердение бетона даже при отрицательных температурах.



d_c — диаметр инъекционной трубы; l — длина рабочей части трубы; R — радиус каналов гидроразрыва; δ — раскрытие каналов гидроразрыва

Рисунок 1 Модель буро-инъекционной сваи

Главной характеристикой сваи является несущая способность. На сегодняшний день для ее определения существуют такие методы:

- теоретический расчет по формулам нормативных документов [3];
- по результатам лабораторных исследований, то есть физического моделирования;
- по результатам натурных исследований;
- по результатам исследований математической модели.

Кроме вышеперечисленных методов, на кафедре строительных конструкций ДонГТУ был предложен новый метод аналитического определения несущей способности [1], результаты расчета которого, в отличие от расчета по нормативным документам, в большей степени соответствуют реальным. Причиной этому послужили конструктивные особенности сваи, которые не были учтены в справочниках нормативных документов. Выполнив аналитическое исследование несущей способности буро-инъекционных свай, получили, что несущая способность $F_d = 930$ кН.

Также на кафедре строительных конструкций впервые реализовано лабораторное моделирование буро-инъекционной сваи, в результате чего была установлена зависимость несущей способности от коэффициента постели инъекционного раствора и выведена формула определения несущей способности сваи с помощью ее модели [4]. С помощью этого метода была определена несущая способность $F_d = 1524$ кН.

Кроме того, были проведены натурные испытания буро-инъекционных свай [2], в результате которых определена несущая способность $F_d = 1830$ кН.

Целью работы является анализ показателей несущей способности буро-инъекционных свай, полученных различными методами, а также погрешностей при реализации этих методов.

Цель достигалась решением следующих **задач**:

- выявление ошибок расчетов несущей способности буро-инъекционных свай различными методами;

- определение наиболее точного метода расчета несущей способности буро-инъекционных свай.

Объект исследования — буро-инъекционные сваи, возведенные в слабых просадочных, разуплотненных и обводненных грунтах.

Предмет исследований — несущая способность буро-инъекционных свай.

Методика исследований — анализ литературных и нормативных источников, обработка результатов натурных, экспериментальных и аналитических исследований.

Изложение материала и его результаты. Любые проведенные исследования не дают идеально точных результатов. Существуют некоторые погрешности, допущенные в ходе как самих исследований, так и при проведении экспериментов.

В методах определения несущей способности, выполненных ранее [1, 2, 4], имели место погрешности.

Оценка погрешностей результатов аналитических исследований. Проведенные аналитические исследования [1] показали, что несущая способность буро-инъекционных свай имеет четыре составляющих (рис. 2)

$$F_d = \gamma_c \cdot (R_c + R_y + f_z + f_y), \quad (1)$$

где R_c — сила сопротивления под нижним концом сваи

$$R_c = \gamma_{cR} \cdot R \cdot \pi \cdot r_c^2; \quad (2)$$

R_y — сила сопротивления под цементным уширением

$$R_y = \gamma_{cR} \cdot R \cdot \pi \cdot (R_y - r_c)^2 \cdot k_n; \quad (3)$$

f_z — сила сопротивления грунта на боковой поверхности сваи

$$f_z = u \cdot \sum \gamma_{cf} \cdot f_{z_i} \cdot h_{z_i} \cdot k_{k_i}; \quad (4)$$

f_y — сила сопротивления цемента на боковой поверхности сваи

$$f_y = u \cdot \sum \gamma_{cf} \cdot f_{y_i} \cdot h_{y_i}, \quad (5)$$

где γ_c — коэффициент условий работы сваи;

γ_{cR} , γ_{cf} — коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи;

R — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа;

r_c — радиус инъекционной трубы, м;

R_3 — эффективный радиус, м;

k_n — коэффициент постели для инъекционного раствора;

u — внешний периметр поперечного сечения сваи, м;

f_{z_i} — расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности сваи, кПа;

h_{z_i} — толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м;

k_{k_i} — коэффициент консолидации i -го слоя грунта;

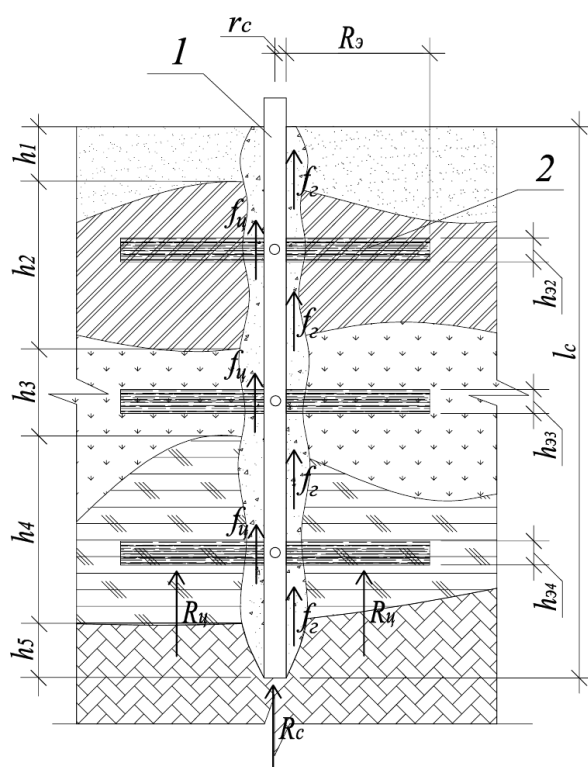
f_{u_i} — расчетное сопротивление i -го слоя цементного раствора на боковой поверхности сваи, кПа;

$h_{э_i}$ — эквивалентная полость раскрытия трещин гидроразрыва в i -том слое грунта, м.

При расчете каждой из этих сил были допущены некоторые ошибки, так как в состав формул входят значения, имеющие погрешность за счет измерительных инструментов. Так, например, радиус инъекционной трубы r_c , измеренный с помощью штангенциркуля, был определен с ошибкой в 1 %, так как погрешность самого измерительного инструмента (штангенциркуля) составляет 1 %.

Расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи R определялось по таблицам и формулам нормативных документов [3], и погрешность величины составит не более 1 %.

Эффективный радиус R_3 определялся как усредненное значение, зависящее от максимального радиуса распространения раствора и эффективного давления раствора на стенки канала разрыва, в связи с этим погрешность измерения может достигать 10 %.



1 — инъекционная труба; 2 — цементное уширение

Рисунок 2 Расчетная схема буро-инъекционной сваи

Внешний периметр поперечного сечения сваи u , так же, как и радиус инъекционной трубы r_c , измерялся с помощью штангенциркуля. Погрешность измерения не превышает 1 %.

Расчетные сопротивления i -го слоя грунта f_{z_i} и цементного раствора f_{u_i} на боковой поверхности сваи определялись по таблицам нормативных документов [3], а погрешность этих величин не превышает 2 %.

Толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи h_{z_i} , была определена исходя из данных геологического разреза грунтового основания. Относительная погрешность этой величины достигает 2 %.

Эквивалентная полость раскрытия трещин гидроразрыва в i -том слое грунта $h_{э_i}$ зависит от коэффициентов пористости i -го слоя грунта e , взятых в соответствии с

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

нормативными документами [3], достигает относительной погрешности в 2 %.

Составим таблицу 1 расчетных величин и относительных погрешностей их измерения.

В соответствии с правилами подсчета номинальных погрешностей [5] и данными таблицы 1, приведенные силы были косвенно измерены со следующими погрешностями

$$\varepsilon_{R_c} = \varepsilon_R + \varepsilon_{r_c}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{R_c} = 1 + 2 \cdot 1 = 3\%,$$

$$\varepsilon_{R_u} = \varepsilon_R + 2 \left(\frac{0,01R_3 + 0,01r_c}{R_3 - r_c} \right), \quad (7)$$

$$\varepsilon_{R_u} = 1 + 2 \cdot 1,35 = 3,7\%,$$

$$\varepsilon_{f_z} = \varepsilon_u + \varepsilon_{f_{zi}} + \varepsilon_{h_{zi}}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{f_z} = 1 + 2 + 2 = 5\%,$$

$$\varepsilon_{f_u} = \varepsilon_u + \varepsilon_{f_{ui}} + \varepsilon_{h_{ui}}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{f_u} = 1 + 2 + 2 = 5\%.$$

Определим суммарную относительную погрешность несущей способности буро-инъекционных свай

$$\varepsilon_{F_d} = \varepsilon_{R_c} + \varepsilon_{R_u} + \varepsilon_{f_z} + \varepsilon_{f_u}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{F_d} = 3 + 3,7 + 5 + 5 = 17,7\%.$$

Таким образом, несущая способность буро-инъекционных свай, рассчитанная аналитическим методом, дает нам погрешность не более 17,7 %.

Оценка погрешностей результатов лабораторных исследований. Во время лабораторного моделирования буро-инъекционных свай (рис. 3) [4] и снятия показаний с измерительных приборов имели место измерительные погрешности из-за неточности, заложенной в приборы.

На первый взгляд эти неточности могут показаться незначительными, но в итоге приводят к весомым отклонениям результатов расчетов.

Таблица 1

Погрешности расчетных величин

Наименование величины	Обозначение	Единицы измерения	Погрешность ε , %
Расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи	R	кПа	1
Радиус инъекционной трубы	r_c	м	1
Эффективный радиус	R_3	м	10
Внешний периметр поперечного сечения сваи	u	м	1
Расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности сваи	f_{zi}	кПа	2
Толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи	h_{zi}	м	2
Расчетное сопротивление i -го слоя цементного раствора на боковой поверхности сваи	f_{ui}	кПа	2
Эквивалентна полость раскрытия трещин гидроразрыва	$h_{эi}$	м	2



Рисунок 3 Готовая к эксперименту модель сваи

Полученная формула расчета несущей способности буро-инъекционных свай, в результате проведенного эксперимента [4], имеет вид

$$F_{\max} = \Delta l \cdot \pi \cdot d \cdot (k_n \cdot (E_u - E_z) + E_z), \quad (11)$$

где Δl — абсолютная деформация сваи, мм;

d — диаметр трубки модели, мм;

k_n — коэффициент постели для инъекционного раствора;

E_u и E_z — соответственно модуль деформации цементного раствора и грунта, МПа.

Относительная погрешность абсолютной деформации сваи Δl в пределах 1 %, так как эта величина была измерена с помощью индикатора часового типа, дает относительную погрешность измерений 1 %.

Диаметр трубки модели d был измерен с помощью штангенциркуля, поэтому относительная погрешность измерения не превышает 1 %.

Модули деформации цементного раствора E_u и грунта E_z определялись по результатам лабораторной обработки материалов, поэтому относительная погрешность данных величин достигает 5 %.

Составим таблицу измеряемых величин и их относительных погрешностей (табл. 2).

Пользуясь правилами вычисления погрешности, можем определить погрешность расчета несущей способности буро-инъекционных свай методом лабораторного моделирования

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{\Delta l} + \varepsilon_d + \left(\frac{0,05E_u + 0,05E_z}{E_u - E_z} \right) + \varepsilon_{E_u}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_F = 1 + 1 + 5,02 + 5 = 12,02\%.$$

Таким образом, несущая способность буро-инъекционной сваи, рассчитанная методом лабораторного моделирования, имеет погрешность не более 12,02 %.

Таблица 2

Расчетные величины и их относительные погрешности

Наименование величины	Обозначение	Единицы измерения	Погрешность ε , %
Абсолютная деформация сваи	Δl	мм	1
Диаметр трубки модели	d	мм	1
Модуль деформации цементного раствора	E_u	МПа	5
Модуль деформации грунта	E_z	МПа	5

Оценка погрешностей результатов натурных исследований. Проведенные натурные испытания и их обработка (рис. 4) [2] так же, как и в двух предыдущих методах, дают неточные результаты. Несущая способность в данном методе была определена как переданная свае сжимающая нагрузка, которая контролировалась с помощью образцового манометра.

Образцовый манометр предназначен для испытаний, поверки и калибровки приборов давления, а также для точных измерений избыточного давления жидкости и газа.

Испытания проводились с помощью образцового манометра МО-250, класс точности которого 0,25 %, а цена деления равна 1 МПа.

Погрешность такого манометра составляет $\varepsilon_m = 0,25 \%$.

При нагрузке буро-инъекционных свай, согласно методике, проводилось не менее трех измерений вдавливающей силы, которые соответствуют одному и тому же моменту времени.

Исходя из результатов измерений, приведенных в работе [2], случайная ошибка, которая представляет собой среднее абсолютное отклонение, $\varepsilon_{сл} = 5 \%$.

Номинальная погрешность измерения несущей способности буро-инъекционных свай составляет

$$\varepsilon_F = \varepsilon_m + \varepsilon_{сл} = 0,25 + 5 = 5,25\%.$$

Таким образом, несущая способность буро-инъекционной сваи, определенная с помощью натуральных испытаний, имеет погрешность не более 5,25 %.

В аналитическом методе, методе лабораторного моделирования и натуральных испытаниях несущая способность буро-инъекционных свай определялась с систематической ошибкой, которая заключалась в неточности при измерении расчетных величин.

Также при проведении натуральных испытаний имела место случайная ошибка, которая представляет собой среднее абсолютное отклонение.

Основными показателями ошибок несущей способности буро-инъекционных свай стали относительная ε и абсолютная Δ погрешности косвенных измерений. Данные погрешности были определены в соответствии с существующей методикой обработки результатов исследований.

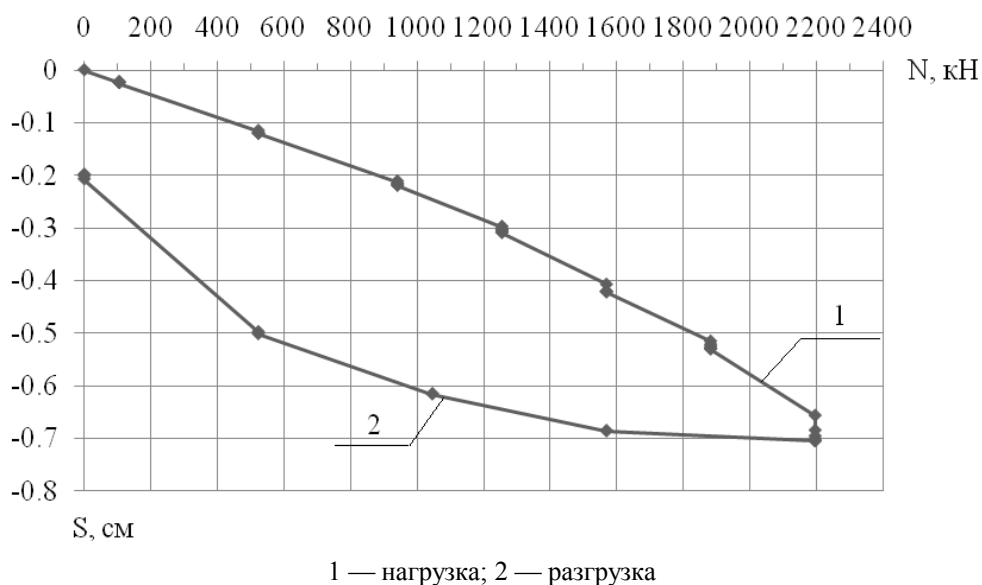


Рисунок 4 Зависимость осадки сваи от вдавливающей нагрузки

Итак, исходя из того, что в технических расчетах и измерениях погрешность не должна превышать 20 %, можно утверждать, что все рассмотренные методы дают удовлетворительную погрешность.

Наиболее точным является метод натурных измерений несущей способности буро-инъекционных свай с погрешностью $\varepsilon_F = 5,25$ %.

Однако лабораторный метод определения несущей способности буро-инъекционных свай, впервые использованный кафедрой строительных конструкций в ДонГТУ, дает удовлетворительную погрешность $\varepsilon_F = 12,02$ %. Поэтому результаты лабораторного моделирования буро-инъекционных свай с высокой достоверностью могут быть перенесены в расчет несущей способности буро-инъекционных свай для выполнения практических работ.

Также впервые предложенная формула расчета несущей способности буро-инъекционных свай позволяет с достаточной степенью точности выполнять их проектирование при укреплении грунтов оснований сооружений.

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Анализ показал, что каждый из использованных методов определения несущей способности буро-инъекционных свай не является абсолютно точным. Относительные погрешности этих методов не были одинаковыми, однако удовлетворяли требованиям технических расчетов и измерений и не превышали относительной погрешности в 20 %. Итак, все методы

приемлемы для определения несущей способности буро-инъекционных свай.

2. Наиболее точным оказался метод натурных испытаний буро-инъекционных свай. Относительная погрешности такого метода составила $\varepsilon_F = 5,25$ %. Таким образом, несущая способность, определенная натурным методом, должна быть представлена в следующем виде: $F = 1830 \pm 96$ кН.

Менее точным, но не менее значимым для нас методом, оказался метод лабораторного моделирования. Относительная погрешность этого метода составила $\varepsilon_F = 12,02$ %. Несущая способность, определенная для испытуемого образца, должна быть записана в следующем виде: $F = 1524 \pm 183$ кН. Данный метод рекомендован для выполнения практических задач.

Самую большую ошибку в расчете дал аналитический метод. Относительная погрешность данного метода не превышает $\varepsilon_F = 17,7$ %, что в пределах допустимых норм. Таким образом, несущая способность, определенная аналитическим методом, должна быть представлена в следующем виде: $F = 930 \pm 164$ кН. Данный метод определения несущей способности может быть рекомендован для проектирования буро-инъекционных свай при укреплении грунтов оснований сооружений.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение поправочного коэффициента для уточнения несущей способности буро-инъекционной сваи, определенной аналитически, по сравнению с результатом расчета несущей способности сваи в натуральных условиях.

Библиографический список

1. Должиков, П. Н. Аналитическое исследование несущей способности буро-инъекционной сваи [Текст] / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая // Збірник наукових праць ДонДТУ. — Алчевськ : СПС «Лад», 2014. — № 1 (42). — С. 117–121.
2. Должиков, П. Н. О несущей способности буро-инъекционных свай при реконструкции аварийных зданий [Текст] / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая // Проблемы развития городской среды : научно-технический сборник. — К. : НАУ, 2014. — Вып. 2 (12). — С. 135–142.
3. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* [Текст]. — Введ. 2017-06-17. — М. : 2016. — 225 с.

4. Должиков, П. Н. Физическое моделирование буро-инъекционной сваи в разуплотненных грунтах [Текст] / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая // Збірник наукових праць ДонДТУ. — Алчевськ : ППС «Ладос», 2013. — № 41. — С. 190–195.

5. Должиков, П. Н. Основы планирования и обработки результатов экспериментальных исследований [Текст] : учебн. пособ. / П. Н. Должиков, С. В. Семирягин. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 191 с.

© Збицкая В. В.

© Псюк В. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СА ЛГУ им. В. Даля Емец Е. В.,
к.т.н., доц., зав. каф. инженерной графики ДонГТИ Бондарчук В. В.*

Статья поступила в редакцию 17.02.2021.

Zbitskaia V. V., PhD in Engineering Psiuk V. V. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, ki1ri1ch@i.ua)

ANALYZING THE INDICATORS OF BORED PILES CAPACITY OBTAINED BY VARIOUS METHODS

In the work on the basis of research methods of bored piles capacity, an analysis of the main parameters was carried out. Studies have proved that the errors of bored piles capacity, calculated by three methods, are in tolerance error ranges for technical calculations and measurements, that is, less than 20 %.

Key words: *ground, intrusion, cement mortar, pile, technological parameters, technique, bearing capacity, absolute error, relative error.*