



DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.01

УДК 624.154

## **ПРОГНОЗ ДЛИТЕЛЬНОЙ ОСАДКИ СВАИ НА ПЕСЧАНИКАХ И АРГИЛЛИТОПОДОБНЫХ ГЛИНАХ ПЕРМСКОГО ВОЗРАСТА**

**Е.Н. Сычкина, Я.В. Офрихтер, В.В. Антипов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 20 декабря 2018  
Принята: 25 февраля 2019  
Опубликована: 28 июня 2019

#### *Ключевые слова:*

забивная свая, буронабивная свая, осадка, аргиллитоподобная глина, песчаник, Plaxis 3D.

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрена проблема оценки длительной осадки одиночных свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках. Некорректная оценка стабилизированной осадки свайного фундамента может привести к возникновению аварийной ситуации. В настоящее время для прогнозирования работы фундамента широко применяется метод конечных элементов, реализованный в различных программных комплексах. Целью исследования являлся выбор оптимальной модели в программном комплексе Plaxis 3D для прогноза осадки забивных и буронабивных свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках. Для достижения поставленной цели авторами были решены следующие задачи: 1) выполнен обзор исследований вопроса длительной работы одиночных свай и свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах и песчаниках; 2) описана методика и проведены численные эксперименты в программном комплексе Plaxis 3D по моделированию работы одиночной забивной и буронабивной свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках различной степени выветрелости; 3) выполнено сравнение результатов численных экспериментов с длительными натурными испытаниями свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках; 4) сформулированы выводы по исследованию. Численные эксперименты по моделированию в программном комплексе Plaxis 3D работы забивных свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках показали, что введение в расчетную схему зон уплотнения грунтов вокруг забивной сваи позволяет получить значения, близкие к длительной осадке натуральных свай. Авторы рекомендуют использовать модель Hardening soil для прогнозирования работы забивной сваи на аргиллитоподобных глинах и песчаниках и модель Linear-Elastic для моделирования работы буронабивной сваи на аргиллитоподобных глинах и песчаниках. Для сильновыветрелых аргиллитоподобных глин и песчаников необходима корректировка моделей грунта для численных расчетов в Plaxis 3D, поскольку применение моделей Hardening soil и Linear-Elastic показало заниженные значения осадки по отношению к натурным испытаниям забивных свай.

© ПНИПУ

© **Сычкина Евгения Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: aspirant123@mail.ru.  
**Офрихтер Ян Вадимович** – аспирант, e-mail: spstf@pstu.ru.  
**Антипов Вадим Валерьевич** – аспирант, e-mail: spstf@pstu.ru.

**Evgeniya N. Sychkina** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: aspirant123@mail.ru.  
**Ian V. Ofrikhter** – Postgraduate Student, e-mail: spstf@pstu.ru.  
**Vadim V. Antipov** – Postgraduate Student, e-mail: spstf@pstu.ru.

## **THE FORECAST OF LONG-TERM SETTLEMENT OF THE PILE ON SANDSTONES AND CLAYSTONES OF THE PERMIAN AGE**

**E.N. Sychkina, I.V. Ofrikhter, V.V. Antipovov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 20 December 2018  
Accepted: 25 February 2019  
Published: 28 June 2019

#### *Keywords:*

driven pile, bored pile, settlement,  
claystone, sandstone, Plaxis 3D.

### ABSTRACT

In the article the problem of ensuring the long-term settlement of single piles on claystones and sandstones are reviewed. Incorrect assessment of stabilized settlement of pile foundation can lead to an emergency situation. At the present time for prediction of foundation settlement is widely used finite element method, implemented in a variety of software systems. The aim of the study was to select the optimal model in the software package Plaxis 3D to forecast settlement of driven and bored piles on claystones and sandstones. The authors solved the following tasks: 1) review of the knowledge of long-term settlement of single piles and pile foundations on claystones and sandstones is performed; 2) the technique is described and numerical experiments are performed in the software package Plaxis 3D for modeling the settlement of a single driven pile and bored pile on claystones and sandstones with varying degrees of weathering; 3) comparison of the results of numerical experiments with long-term field tests of piles on claystones and sandstones is performed; 4) findings from the study are formulated. Numerical experiments of modeling in the software package Plaxis 3D work of driven piles on claystones and sandstones showed that the introduction of soil compaction zones around the driven pile into the calculation scheme makes it possible to obtain close values to long-term settlement of full-scale piles. The authors recommend using the Hardening soil model to predict the work of a driven pile on claystones and sandstones and the Linear-Elastic model to simulate the work of a bored pile on claystones and sandstones. For highly weathered claystones and sandstones soil models need to be corrected for numerical calculations in Plaxis 3D, since the use of the Hardening soil and Linear-Elastic models showed underestimated settlement values in relation to field tests of driven piles.

© PNRPU

---

Ответственным этапом проектирования оснований фундаментов зданий и сооружений является анализ длительной осадки и ее неравномерности. По мнению А.А. Бартоломея и др. [1], важным вопросом проектирования зданий и сооружений является достоверное описание длительной работы системы «фундамент – основание». Серьезным фактором, во многом определяющим работу данной системы, является инженерно-геологическое строение площадки строительства, в частности механические свойства грунтов основания фундамента.

Строительные свойства любого грунта определяются особенностями его формирования, что подтверждается результатами исследований А.А. Хмелевцова [2], F. Zhang и др. [3], L. Changdong и др. [4]. К настоящему времени доказано, что при опирании свай на аргиллитоподобные глины, алевролиты и песчаники осадка фундамента происходит в основном за счет ползучести грунта основания. В отличие от дисперсных грунтов аргиллитоподобные глины и песчаники пермского возраста имеют цементационные связи. В ходе своего формирования аргиллитоподобные глины и песчаники испытали разуплотнение, выветривание и техногенные воздействия. Массив данных отложений представляет собой неоднородную, слоистую и трещиноватую среду. Выветривание пермских аргиллитоподобных глин и песчаников приводит к снижению несущей способности и увеличению осадки фундаментов, опирающихся на данные отложения. В первую очередь эта неустойчивость к механическим и температурным воздействиям обусловлена:

- разрушением карбонатного цемента при взаимодействии с водой (растворение);
- «разгрузкой» сил внутреннего напряжения вследствие разработки грунта (разуплотнением), а также из-за переменного увлажнения и высушивания породы в обнажениях [5];
- разбуханием вследствие гидратации глинистых частиц (монтмориллонита), сцементированных карбонатным цементом [6];
- выветрелостью породы и ее трещиноватостью, в том числе скрытой.

Целью данного исследования являлась разработка рекомендаций по прогнозу длительной осадки сваи на аргиллитоподобных глинах и песчаниках пермского возраста. Для достижения поставленной цели авторами решены следующие задачи:

- 1) выполнен обзор исследований вопроса длительной работы одиночных свай и свайных фундаментов на аргиллитоподобных глинах и песчаниках;
- 2) описана методика и проведены численные эксперименты в программном комплексе Plaxis 3D по моделированию работы одиночной забивной и буронабивной свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках различной степени выветрелости;
- 3) выполнено сравнение результатов численных экспериментов с длительными натурными испытаниями свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках;
- 4) сформулированы выводы по исследованию.

## **1. Обзор исследований**

Вопросами работы фундаментов на песчаных и глинистых грунтах, в том числе на аргиллитоподобных глинах и песчаниках, занимались А. Bartolomei и А. Ponomarev [7], М.Г. Зерцалов и др. [8], З.Г. Тер-Мартиросян и др. [9], О.А. Шулятьев [10], А. Bond и R. Jardine [11], В. Lehane и R. Jardine [12], Р. Катценбах [13], А.Б. Пономарев и Е.Н. Сычкина [14]. В строительной практике для оценки несущей способности грунта основания сваи широко применяются краткосрочные испытания натуральных свай. Анализируя краткосрочные испытания свай, необходимо учитывать, что осадки при таких испытаниях имеют заниженные значения. Реологические процессы в аргиллитоподобных глинах и песчаниках не завершаются с окончанием процесса фильтрационного уплотнения и могут продолжаться длительное время. В работе [10] доказано, что осадка сваи на вендских глинах возрастает за 16 сут в 2 раза. Поэтому на основаниях, обладающих реологическими свойствами, необходимо прогнозировать длительное взаимодействие свайного фундамента и грунтового основания. Скорость затухания осадки сваи зависит от типа грунта и его генезиса. По данным А.А. Бартоломея [1], краткосрочные осадки одиночной сваи не превышают 2–3 мм, а стабилизированные осадки одиночной сваи в тугопластичных и твердых глинах составляют примерно 6–12 мм. Если в какой-либо момент разность осадок свайного фундамента превысит предельные значения, то в надземных конструкциях могут возникнуть дополнительные усилия, которые приведут к аварийной ситуации и разрушению элементов конструкций. Таким образом, проблема прогноза длительной работы сваи и грунтового основания, представленного аргиллитоподобными глинами и песчаниками, в настоящее время является актуальной. Кроме того, А.А. Бартоломея [1], М.Ф. Randolph и др. [15], В.В. Sheil и В.А. McCabe [16] было доказано, что при оценке работы одиночных забивных свай необходимо учитывать зоны уплотнения в грунтах околосвайного пространства, формирующиеся в результате процесса забивки сваи. В настоящее время в нашей стране изменение характеристик грунта в зоне уплотнения вокруг забивной сваи не учитывается при выполнении численных и аналитических расчетов осадки сваи.

## 2. Методика исследования

В работе рассмотрены результаты моделирования испытаний статической нагрузкой 7 натурных забивных свай на сильновыветрелых и выветрелых аргиллитоподобных глинах и песчаниках и 2 испытаний буронабивных свай на сильновыветрелых и выветрелых аргиллитоподобных глинах. Авторами были выполнены численные расчеты испытанных натурных свай в программном комплексе Plaxis 3D. В ходе численных экспериментов были проведены расчеты с применением моделей Hardening soil и Linear-Elastic для аргиллитоподобной глины и песчаника. По результатам сравнения расчетов была выбрана наиболее оптимальная модель для прогнозирования работы одиночной сваи на аргиллитоподобных глинах и песчаниках.

Устройство буронабивных свай не вносит существенных изменений в значения характеристик околосвайного грунта, что ранее подтверждалось расчетами в Plaxis 3D [17], поэтому характеристики грунта вокруг буронабивной сваи принимались согласно данным изысканий на площадках испытаний свай.

При моделировании работы забивных свай в расчетную схему дополнительно вводились зоны уплотнения грунта вокруг забивной сваи. Границы зон и значения характеристик грунтов принимались согласно данным А.А. Бартоломея [1] и данным изысканий на площадках испытаний свай.

Результаты численных расчетов сравнивались с результатами длительных наблюдений за осадками одиночных свай для выявления модели, наиболее точно отображающей работу сваи на аргиллитоподобных глинах и песчаниках.

## 3. Результаты численных экспериментов и их анализ

Графики осадки для двух забивных свай, опирающихся на выветрелые аргиллитоподобные глины и песчаники, представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

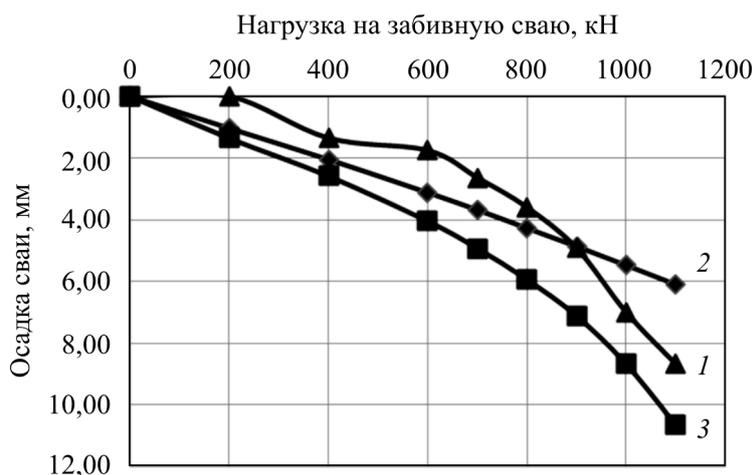


Рис. 1. Зависимость осадки от нагрузки для забивной сваи на аргиллитоподобной глине: 1 – стабилизированная длительная осадка натурной сваи; 2 – расчетная осадка для модели Linear-Elastic; 3 – расчетная осадка для модели Hardening soil

Fig. 1. The dependence of settlement from the load for driven pile on claystone: 1 – stabilized long-term settlement of a full-scale pile; 2 – calculated settlement for Linear-Elastic model; 3 – calculated settlement for Hardening soil model

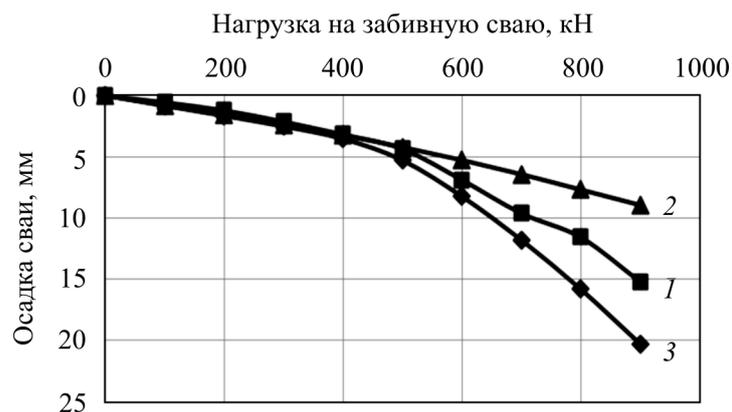


Рис. 2. Зависимость осадки от нагрузки для забивной сваи на песчанике:  
1 – стабилизированная длительная осадка натурной сваи; 2 – расчетная осадка для модели Linear-Elastic; 3 – расчетная осадка для модели Hardening soil  
Fig. 2. The dependence of settlement from the load for driven pile on sandstone:  
1 – stabilized long-term settlement of a full-scale pile; 2 – calculated settlement for Linear-Elastic model; 3 – calculated settlement for Hardening soil model

Полученные результаты расчетов осадки в программном комплексе Plaxis 3D были сопоставлены с ожидаемыми значениями стабилизированной осадки свай, рассчитанными по экспериментальным данным [1] и данным, полученным при краткосрочных испытаниях натуральных свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках. Ожидаемая длительная стабилизированная осадка забивных свай для выветрелых аргиллитоподобных глин при нагрузках 1100–1200 кН составляет 6,5–13,5 мм, для сильновыветрелых аргиллитоподобных глин (рухляков) при нагрузке 600 кН – 21,9–29,2 мм, для выветрелых песчаников при нагрузке 900 кН – 11,4–26,3 мм, для сильновыветрелых песчаников (рухляков) при нагрузке 600 кН – 44,6–59,5 мм. Ожидаемая длительная стабилизированная осадка буронабивной сваи на аргиллитоподобных глинах, по данным [1] и [10], при нагрузке на сваю 4400 кН будет составлять 7–23 мм и будет зависеть от степени выветрелости данных грунтов.

Численные эксперименты по моделированию в программном комплексе Plaxis 3D работы забивных свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках показали, что введение в расчетную схему зон уплотнения грунтов вокруг забивной сваи позволяет получить близкие значения длительной осадки сваи. Моделирование с использованием модели Hardening soil без учета изменения значений характеристик грунтов вокруг сваи в результате ее забивки показывает завышенные до 2,5 раз значения осадки сваи на аргиллитоподобной глине и до 2,7 раз – на песчанике.

Моделирование с использованием модели Hardening soil для аргиллитоподобной глины и песчаника позволяет получить более близкие значения осадки к длительным осадкам натуральных свай по сравнению с применением модели Linear-Elastic. Для аргиллитоподобных глин значения расчетных стабилизированных осадок, полученных с использованием модели Linear-Elastic при максимальных нагрузках на сваю 1100–1200 кН, составили 5,96–6,49 мм. При использовании модели Hardening soil для аргиллитоподобной глины значения осадки при аналогичных нагрузках на сваю составили 7,81–11,78 мм. Однако для коротких свай расчет с использованием модели Hardening soil показал превышение несущей способности грунта основания, что не позволило выполнить расчет при некоторых нагрузках на сваю.

Результаты моделирования работы забивной сваи на песчаниках свидетельствуют о том, что применение модели Linear-Elastic также показывает заниженные значения осад-

ки сваи по отношению к длительным стабилизированным осадкам натуральных свай. Расчетные осадки, полученные с использованием модели Linear-Elastic при нагрузке на сваю 900 кН, составили 6,24–8,93 мм. Расчетные осадки, полученные с использованием модели Hardening soil при нагрузке на сваю 900 кН, составили 6,27–31,51 мм, что хорошо соотносится с ожидаемыми стабилизированными длительными осадками забивной сваи на песчанниках.

Моделирование в Plaxis 3D также показало, что для сильновыветрелых разновидностей аргиллитоподобных глин и песчаников (рухляков) расчетные осадки с применением модели Linear-Elastic и модели Hardening soil могут оказаться заниженными по отношению к результатам натуральных длительных испытаний свай. Это может привести к ошибкам при прогнозе длительной стабилизированной осадки сваи на аргиллитоподобных глинах и песчаниках и возникновению аварийной ситуации, разрушению элементов конструкций. По мнению авторов, для сильновыветрелых аргиллитоподобных глин и песчаников (рухляков) необходима корректировка моделей грунта для численных расчетов в Plaxis 3D.

Графики осадки для одной из буронабивных свай представлены на рис. 3.

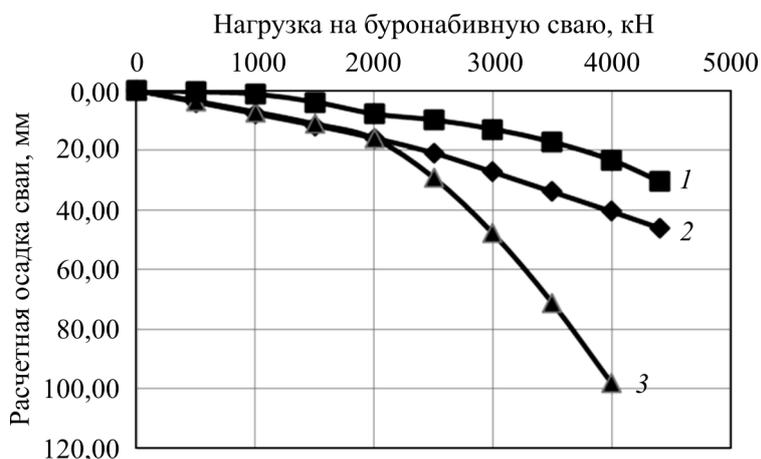


Рис. 3. Зависимость осадки от нагрузки для буронабивной сваи:

- 1 – стабилизированная длительная осадка натурной сваи;
- 2 – расчетная осадка для модели Linear-Elastic;
- 3 – расчетная осадка для модели Hardening soil

Fig. 3. The dependence of settlement from the load for bored pile:

- 1 – stabilized long-term settlement of a full-scale pile;
- 2 – calculated settlement for Linear-Elastic model;
- 3 – calculated settlement for Hardening soil model

Моделирование работы буронабивной сваи на аргиллитоподобных глинах показало, что применение модели Hardening soil свидетельствует о завышенных до 4,3 раз значениях осадки сваи. При использовании модели Hardening soil осадка для выветрелой аргиллитоподобной глины при нагрузке на сваю 4000 кН составила 31,01 мм, для сильновыветрелой аргиллитоподобной глины – 98,09 мм. Расчет осадки буронабивных свай при нагрузке 4000 кН с применением модели Linear-Elastic показал на сильновыветрелой аргиллитоподобной глине осадку 40,42 мм, на выветрелой аргиллитоподобной глине – 32,35 мм. Таким образом, расчет осадки буронабивной сваи в Plaxis 3D с применением модели Linear-Elastic для аргиллитоподобной глины показал наиболее близкие результаты, соотносящиеся с данными натуральных наблюдений за длительными осадками одиночных свай.

## Выводы

1. Численные эксперименты по моделированию в программном комплексе Plaxis 3D работы забивных свай на аргиллитоподобных глинах и песчаниках показали, что введение в расчетную схему зон уплотнения грунтов вокруг забивной сваи позволяет получить значения, близкие к длительной осадке натуральных свай. Моделирование с использованием модели Hardening soil без учета изменения значений характеристик грунтов вокруг сваи в результате ее забивки показывает завышенные до 2,5 раз значения осадки сваи на аргиллитоподобной глине и до 2,7 раз – на песчанике.

2. Моделирование работы одиночной забивной сваи с использованием модели Hardening soil для аргиллитоподобной глины и песчаника позволяет получить значения осадки, близкие к длительным осадкам натуральных свай. Расчетная осадка забивной сваи на выветрелой аргиллитоподобной глине – 7,81–11,78 мм, прогнозируемая натурная осадка – 6,5–13,5 мм. Расчетная осадка забивной сваи на выветрелом песчанике – 6,27–31,51 мм, прогнозируемая натурная осадка – 11,4–26,3 мм. Однако для коротких свай расчет с использованием модели Hardening soil показал превышение несущей способности грунта основания, что не позволило выполнить расчет при некоторых нагрузках на сваю.

3. Для буронабивных свай на аргиллитоподобных глинах лучший результат при моделировании в программном комплексе Plaxis 3D показало использование модели Linear-Elastic. Применение модели Linear-Elastic для аргиллитоподобной глины позволяет получить результаты, наиболее близкие к имеющимся данным наблюдений за длительными осадками одиночных свай: расчетная осадка буронабивной сваи на сильновыветрелой аргиллитоподобной глине при нагрузке на сваю 4000 кН составила 40,42 мм, натурная осадка – 23,24 мм.

4. Моделирование в Plaxis 3D также показало, что для сильновыветрелых разновидностей аргиллитоподобных глин и песчаников (рухляков) расчетные осадки с применением модели Linear-Elastic и модели Hardening soil могут оказаться заниженными по отношению к результатам натуральных длительных испытаний свай. Это может привести к ошибкам при прогнозе длительной стабилизированной осадки сваи на аргиллитоподобных глинах и песчаниках. По мнению авторов, для сильновыветрелых аргиллитоподобных глин и песчаников (рухляков) необходима корректировка моделей грунта для численных расчетов в Plaxis 3D.

5. Необходимо продолжать работы по дальнейшему обобщению опыта устройства свай на выветрелых аргиллитоподобных глинах и песчаниках для оценки длительной работы не только одиночной сваи, но и свайного фундамента.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда – проект № 18-79-00042.*

## Библиографический список

1. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
2. Хмелевцов А.А. Аргиллитоподобные глины в районе Большого Сочи и их физико-механические характеристики // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2011. – № 6. – С. 77–79.
3. Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone / F. Zhang [et al.]. // Applied Clay Science. – 2012. – No. 69. – P. 79–86. DOI: 10.1016/j.clay.2012.09.024

4. A preliminary study on the location of the stabilizing piles for colluvial landslides with interbedding hard and soft bedrocks / L. Changdong [et al.] // *Engineering geology*. – 2017. – Vol. 224. – P. 15–28. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.04.020
5. Жарницкий В.Я. Мергель как материал для устройства противофильтрационных элементов грунтовых плотин // *Гидротехническое строительство*. – 2015. – № 3. – С. 68–73.
6. Salehin S. Investigation into engineering parameters of marls from Seydoon dam in Iran // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2017. – No. 9. – P. 912–923.
7. Bartolomei A., Ponomarev A. Experimental investigations and prediction of settlement of conical-pile foundations // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2001. – No. 38 (2). – P. 42–50. DOI: 10.1023/A:1010422029681
8. Зерцалов М.Г., Знаменский В.В., Хохлов И.Н. Об особенностях расчета несущей способности буронабивных свай в скальных массивах при действии вертикальной нагрузки // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – № 1. – С. 52–59. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.05
9. Скорость осадки свай, погруженной в толщу глинистого грунта, с учетом его упруговязких и упругопластических свойств / З.Г. Тер-Мартиросян [и др.] // *Жилищное строительство*. – 2016. – № 11. – С. 3–6.
10. Шулятьев О.А. Фундаменты высотных зданий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2014. – № 4. – С. 202–244.
11. Bond A., Jardine R. Effects of installing displacement piles in high OCR clay // *Geotechnique*. – 1991. – No. 41. – P. 341–363. DOI:10.1680/geot.1991.41.3.341
12. Lehan B., Jardine, R. Displacement pile behaviour in glacial clay // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1994. – No. 31. – P. 79-90. DOI:10.1139/t94-009
13. Катценбах Р. Последние достижения в области фундаментостроения высотных зданий на сжимаемом основании // *Вестник МГСУ*. – 2006. – № 1. – С. 105–118.
14. Ponomarev A., Sychkina E. On the stress-strain state and load-bearing strength of argillite-like clays and sandstones // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2018. – Vol. 55, iss. 3. – P. 141–145. DOI: 10.1007/s11204-018-9517-1
15. Randolph M., Carter J., Wroth C. Driven piles in clay – the effects of installation and subsequent consolidation // *Geotechnique*. – 1979. – No. 29. – P. 361–393. DOI: 10.1680/geot.1979.29.4.361
16. Sheil B., McCabe B. An analytical approach for the prediction of single pile and pile group behaviour in clay // *Computers and Geotechnics*. – 2016. – No. 75. – P. 145–158. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.02.001
17. Lozovyi S., Zahoruiko E. Plaxis simulation of static pile tests and determination of reaction piles influence // *Scientific and Technical Journal: New Technologies in Construction*. – 2012. – Vol. 23–24 (1–2). – P. 68–73.

## References

1. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. Prognoz osadok svajnykh fundamentov [Forecast settlement pile foundations]. Moscow, Strojizdat, 1994, 384 p.
2. Hmelevcov A.A. Argillitopodobnye gliny v rajone Bol'shogo Sochi i ih fiziko-mekhanicheskie harakteristiki [Argillite-like clays in the area of Greater Sochi and their physico-mechanical characteristics]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Estestvennyye nauki*, 2011, no. 6, pp. 77-79.

3. Zhang F., Xie S., Hu D., Shao J., Gatmiri B. Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone. *Applied Clay Science*, 2012, no. 69, pp. 79-86. DOI: 10.1016/j.clay.2012.09.024.
4. Changdong L., Xiaoyi W., Huiming T., Guoping L., Junfeng Y., Yongguan Z. A preliminary study on the location of the stabilizing piles for colluvial landslides with interbedding hard and soft bedrocks. *Engineering geology*, 2017, vol. 224, pp. 15-28. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.04.020.
5. Zharnitsky V.Ya. Mergel' kak material dlya ustrojstva protivofil'tracionnyh ehlementov gruntovyh plotin [Marl as a material for the installation of anti-filtration elements of earth dams]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 3, pp. 68-73.
6. Salehin S. Investigation into engineering parameters of marls from Seydoon dam in Iran. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 2017, no. 9, pp. 912-923.
7. Bartolomei A., Ponomarev A. Experimental investigations and prediction of settlement of conical-pile foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2001, no. 38 (2), pp. 42-50. DOI: 10.1023/A:1010422029681.
8. Zertsalov M.G., Znamensky V.V., Khokhlov I.N. Ob osobennostyah rascheta nesushchej sposobnosti buronabivnyh svaj v skal'nyh massivah pri dejstvii vertikal'noj nagruzki [About the features of the calculation of bearing capacity of bored piles in rocks under the action of vertical load]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2018, no. 1, pp. 52-59. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.05.
9. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V., Ter-Martirosyan A.Z., Manukyan A.V. Skorost' osadki svai, pogruzhenoj v tolshechu glinistogo grunta, s uchetom ego uprugovyazkih i uprugoplasticheskikh svojstv [The rate of settlement of the pile, immersed in the thickness of the clay soil, taking into account its elastic-viscous and elastoplastic properties]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2016, no. 11, pp. 3-6.
10. Shulyatiev O.A. Fundamenty vysotnyh zdanij [Foundations of high-rise buildings]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 202-244.
11. Bond A., Jardine R. Effects of installing displacement piles in high OCR clay. *Geotechnique*, 1991, no. 41, pp. 341-363. DOI:10.1680/geot.1991.41.3.341.
12. Lehane B., Jardine, R. Displacement pile behaviour in glacial clay. *Canadian geotechnical journal*, 1994, no. 31, pp. 79-90. DOI:10.1139/t94-009.
13. Katzenbach R. Poslednie dostizheniya v oblasti fundamentostroeniya vysotnyh zdanij na szhimaemom osnovanii [The latest achievements in the field of foundation building of high-rise buildings on a compressible base]. *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2006, no. 1, pp. 105-118.
14. Ponomarev A., Sychkina E. On the stress-strain state and load-bearing strength of argillite-like clays and sandstones. *Soil mechanics and foundation engineering*, 2018, vol. 55, iss. 3, pp. 141-145. DOI: 10.1007/s11204-018-9517-1.
15. Randolph M., Carter J., Wroth C. Driven piles in clay – the effects of installation and subsequent consolidation. *Geotechnique*, 1979, no 29, pp. 361-393. DOI: 10.1680/geot.1979.29.4.361.
16. Sheil B., McCabe B. An analytical approach for the prediction of single pile and pile group behaviour in clay. *Computers and Geotechnics*, 2016, no 75, pp. 145-158. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.02.001.
17. Lozovyi S., Zahoruiko E. Plaxis simulation of static pile tests and determination of reaction piles influence. *Scientific and Technical Journal: New Technologies in Construction*, 2012, vol. 23–24 (1–2). pp. 68–73.