



А. В. МАЛЬЦЕВ
А. А. КАРПОВ

ОБ УСТРОЙСТВЕ ГРУНТОПОЛИМЕРНОГО УШИРЕНИЯ ПЯТЫ БУРОВОЙ СВАИ

ABOUT THE DEVICE OF THE GROUND POLYMER WIDENING OF THE HEEL DRILLING PILE

Одним из существенных недостатков буровой сваи, который появляется при устройстве скважины и приводит к снижению её несущей способности, является скапливание бурового шлама на дне скважины. В статье рассматривается авторская технология по повышению несущей способности буровых свай за счёт инъецирования под их нижний конец расширяющихся полимерных смол. Описан результат взаимодействия химических реагентов и его последствия при инъецировании полимерных смол в грунт. Представлена методика лабораторного эксперимента по исследованию возможности упрочнения грунтового основания под нижним концом буровой сваи с применением расширяющейся смолы на физических моделях в лабораторном лотке и его результаты. Приведены методика полевой (натурного) эксперимента и его результаты. Сравнительные испытания на площадке статической вдавливающей нагрузкой двух бетонных буровых свай с грунтополимерным уширением под нижним концом и без уширения (контрольной) показали значительное увеличение несущей способности буровой сваи по грунту за счет устройства грунтополимерного уширения под пяткой сваи.

Ключевые слова: буровая свая, несущая способность сваи, расширяющиеся полимерные смолы, инъецирование полимерных смол в грунт, грунтополимерное уширение под нижним концом сваи, лабораторный эксперимент на физических моделях в лотке, полевой (натурный) эксперимент

One of the significant disadvantages of a drilling pile, which appears during the construction of a well and leads to a decrease in its bearing capacity, is the accumulation of drilling mud at the bottom of the well. This article discusses the author's technology to increase the bearing capacity of drilling piles by injecting expanding polymer resins under their lower end. The result of the interaction of chemical reagents and its consequences when injecting polymer resins into the soil are described. The methodology of a laboratory experiment to study the possibility of hardening the soil base under the lower end of a drilling pile using expanding resin on physical models in a laboratory tray and its results are presented. The methodology of the field (full-scale) experiment and its results are presented. Comparative tests on the site with a static pressure load of two concrete drilling piles with a ground polymer broadening under the lower end and without a broadening (control) showed a significant increase in the bearing capacity of the drilling pile on the ground due to the device of a ground polymer broadening under the heel of the pile.

Keywords: drilling pile, bearing capacity of the pile, expanding polymer resins, injection of polymer resins into the soil, primer polymer broadening under the lower end of the pile, laboratory experiment on physical models in a tray, field (natural) experiment

Введение

На текущий момент развития направления свайного фундаментостроения предложено большое количество технических решений и технологий по увеличению несущей способности буровых свай. Как известно, основным недостатком буровых свай, влияющим на снижение их несущей способности, является скапливание бурового шлама на забое скважины [1, 2]. Таким образом, большинство известных технических решений направлено на устранение этого фактора [3–5]. В данной статье рассматривается авторская технология по повышению несущей способности буровых свай за счёт инъецирования под их нижний конец расширяющихся полимерных смол.

Постановка задачи

Применение расширяющихся или вспенивающихся полимерных смол при закреплении грунтов основания в последние годы приобретает широкое распространение на территории нашей страны [6, 7]. Как правило, данный материал применяется при работах, реализующих технологию гидроразрыва [8 – 10]. Особенностью этой технологии является инъецирование в грунт раствора смолы под высоким давлением (от 5 до 30 атм), за счёт чего происходит разрыв сплошности грунтового массива. При этом двухкомпонентная смола, имеющая высокую скорость реакции (её вспенивание происходит в течение 10 с), заполняет образовавшиеся при гидроразрыве полости и благодаря увеличению в объёме обжимает грунт.

Авторы в своей экспериментальной работе исследовали на физических моделях особенности рассматриваемых материалов и дали оценку возможности применения расширяющихся смол при закреплении грунта под нижним концом буровой сваи.

Методика лабораторного эксперимента на физических моделях и его результаты

Характерной особенностью расширяющихся смол является их способность увеличиваться в объёме вследствие взаимодействия химических реагентов *полиола* и *изоцианата*. При смешивании этих компонентов происходит бурная экзотермическая реакция с выделением диоксида углерода (CO_2 – *углекислый газ*), что вызывает объемное расширение смеси и образование пористой структуры, в которой задерживаются пузырьки газа. В течение короткого промежутка времени, в зависимости от количественного соотношения реагентов, смесь

полимеризуется и затвердевает. Время отвердевания зависит от свойств конкретной смолы, используемых катализаторов, температуры компонентов, но, как правило, составляет не более 15 мин (реакция составов, применяемых при технологии гидроразрыва, длится примерно 5–10 с). Плотность жидкой фазы смеси до реакции 1,10 г/см³. После вспенивания и полимеризации в свободных условиях плотность достигает 0,3–0,4 г/см³, коэффициент объемного расширения смолы в свободных условиях может достигать 40 единиц.

Для исследования возможности упрочнения грунтового основания под нижним концом буровой сваи с применением расширяющейся смолы был выполнен физический эксперимент в лабораторных условиях. С этой целью в грунтовом лотке, заполненном мелким песком, была выполнена модель буровой сваи из гипса диаметром 100 мм и длиной 400 мм (рис. 1). Перед устройством ствола сваи в пробуренную скважину был помещен иньектор из полипропиленовой трубы с перфорированной боковой поверхностью и с закрытым нижним концом, который в свою очередь заглублялся в рыхлый грунт забоя скважины. Верхняя часть иньектора была оборудована перекрывным краном для предотвращения выхода вспенивающейся смолы наружу. После набора прочности материала ствола сваи через иньектор под нижний конец сваи закачивались растворы реагентов при помощи двухкомпонентного насоса. По окончании инъецирования кран иньектора перекрывался.

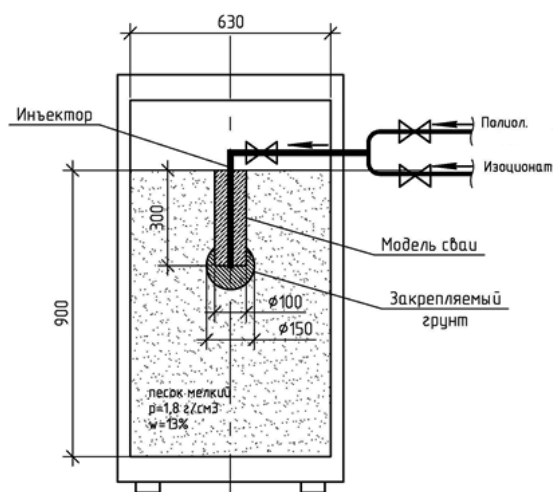


Рис. 1. Схема лотка и оборудования для лабораторных испытаний
Fig. 1. Diagram of the tray and equipment for laboratory testing

Вследствие высокой фильтрационной способности песка подача смолы осуществлялась в режиме пропитки в диапазоне давлений, не превышающих 1 атм. Количество закаченного материала смолы в ходе проведенных экспериментов составило от 300 до 600 г. Как показали проведенные эксперименты, период набора первичной прочности грунтополимера составляет 1 час, по истечении данного времени свая извлекалась из лотка для исследования (рис. 2).

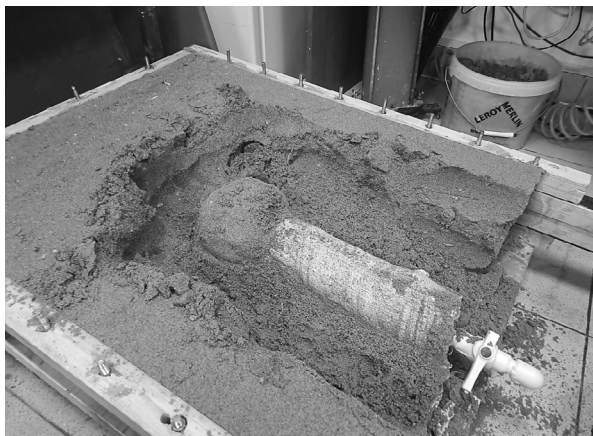


Рис. 2. Модель сваи с грунтополимерным уширением под нижним концом
Fig. 2. Model of a pile with a soil-polymer broadening under the lower end

Опытным путем установлено, что смешивание компонентов смолы происходит во время прокачки через иньектор. При попадании получившегося состава в грунт начинается описанная выше реакция образования пенополиуритана. При этом распространение смолы происходит за счёт движения газа, который в свою очередь стремится подняться наверх, используя для этого поры грунта, а также контактную зону боковой поверхности сваи и грунта. Вследствие расширения полипропилен пропитывает грунт вокруг области иньектирования. Из-за характерных особенностей происходящей реакции под пятой сваи образуется закреплённая зона грунта, имеющая шарообразную форму (рис. 3). В зависимости от количества закаченной смолы зона закрепления способна распространиться вдоль ствола сваи снизу-вверх, образуя так называемую «рубашку» (рис. 4). Данный эффект можно объяснить траекторией движения газа, являющегося проводником для смолы и стремящегося подняться на поверхность. Таким образом, в результате применения расширяющейся смолы получается комбинированная буровая свая с грунтополимерным уширением. Образованная зона закрепления



Рис. 3. Модель сваи с грунтополимерным уширением, при устройстве которого использовано 350 г смолы

Fig. 3. Model of a pile with a soil-polymer broadening, in the construction of which 350 g of resin was used



Рис. 4. Модель сваи с грунтополимерным уширением, при устройстве которого использовано 550 г смолы

Fig. 4. Model of a pile with a soil-polymer broadening, in the construction of which 550 g of resin was used

увеличивает площадь контакта сваи с грунтом в его естественном состоянии как по лобовой, так и по боковой поверхности, повышая тем самым несущую способность сваи. Как выявлено в ходе эксперимента, первичный набор прочности образованного грунтополимера достигается в течение первого часа. Этот факт показывает значительное преимущество расширяющихся смол в сравнении с классическими технологиями закрепления грунтов, применяющими составы на основе портландцемента.

Проведённые дальнейшие исследования показали, что вспенивающаяся смола только пропитывает окружающий её грунт, без изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового пространства вокруг сваи. Для подтверждения этого факта модель сваи с грунтополимерным уширением устраивалась в грунтовом лотке с прослойками из покрашенного песка толщиной 5 мм, которые были отсыпаны через 50 мм и служили индикаторами изменения НДС. После выполнения всех этапов устройства сваи передняя стенка лотка разбиралась и модель откапывалась. По результатам опыта изменения положения индикаторных прослоев выявлено не было (рис. 5).



Рис. 5. Модель сваи с грунтополимерным уширением, выполненная с индикаторными прослойками
Fig. 5. Model of a pile with soil-polymer widening, made with indicator layers

Методика полевого (натурного) эксперимента и его результаты

Для оценки возможности повышения несущей способности буровой сваи за счет образования грунтополимерного уширения были выполнены натурные полевые испытания ста-

тической вдавливающей нагрузкой двух бетонных буровых свай, одна из которых имела грунтополимерное уширение под нижним концом, другая являлась контрольной (без уширения).

Чтобы решить поставленную задачу на опытной площадке, расположенной в черте Самары, были выполнены две опытные буровые бетонные сваи:

- буровая свая БС30-25 с диаметром ствола 250 мм и длиной 3,0 м;
- буровая свая БСПУ30-25 с диаметром ствола 250 мм, длиной 3,0 м и имеющая грунтополимерное уширение.

Геологический разрез опытной площадки, сложенной песчаными грунтами, представлен на рис. 6.

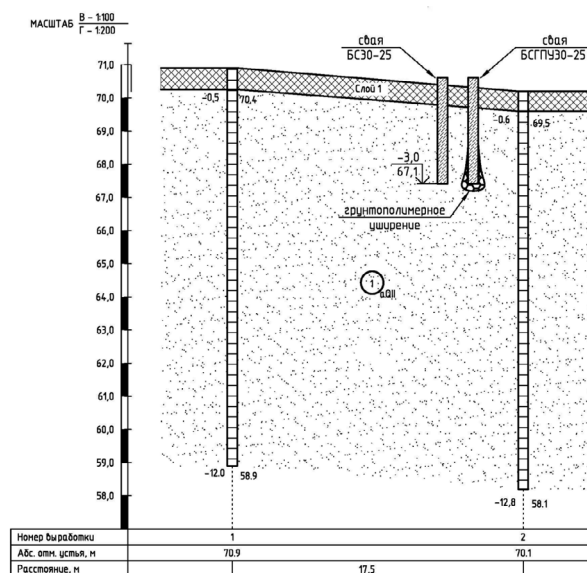


Рис. 6. Инженерно-геологический разрез опытной площадки
Fig. 6. Engineering-geological section of the experimental site

Устройство скважин выполнялось малогабаритной буровой установкой СБГ-ПМ-03. Скважины заполнялись мелкозернистой бетонной смесью с классом бетона по прочности на сжатие В 20. Заполнение скважин производилось при помощи бетонолитной трубы. В скважину для изготовления сваи БСПУ 30-25 предварительно был установлен иньектор из полипропиленовой трубы с радиальными центраторами. У иньектора имелся запорный шарнирный кран, установленный на верхнем конце. Общий вид и конструкция иньектора показаны на рис. 7 и 8.

После набора прочности бетона свай в течение трех суток, через иньектор под пяту сваи БСПУ 30-35 была произведена закачка полимерного состава «полиол+изоционат» в объеме 6 кг.

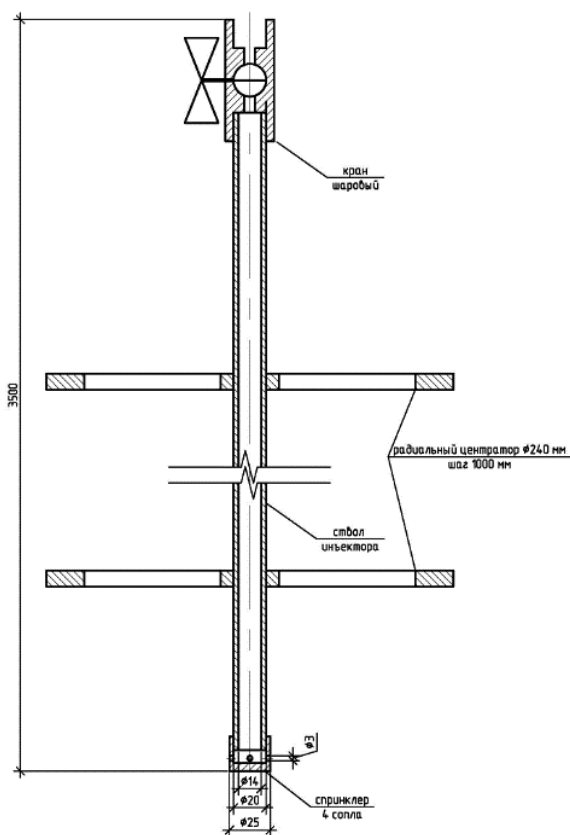


Рис. 7. Конструкция иньектора
Fig. 7. Design of the injector

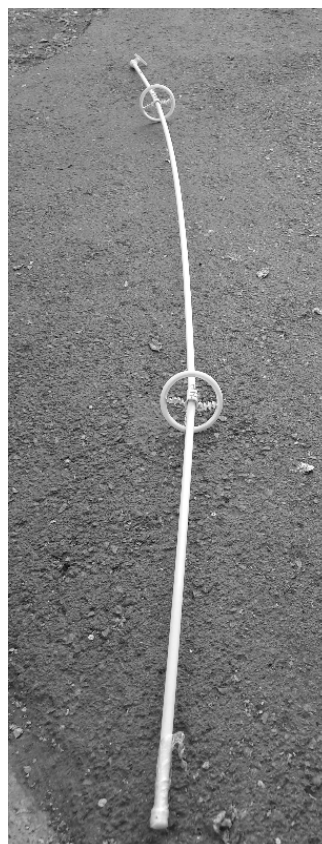


Рис. 8. Общий вид иньектора
Fig. 8. General view of the injector

Инъектирование проводилось при помощи двух-компонентного поршневого насоса IP-600/2К.

Испытание буровых свай статической вдавливающей нагрузкой проводилось через три недели после укладки бетонной смеси в скважины и выполнялось в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5686-2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» (приложение Б). Схема испытаний представлена на рис. 9.

Загружение свай осуществлялось равномерно, ступенчато-возрастающей нагрузкой с помощью гидродомкрата ДГ50П100 и насосной ручной масляной станции НРГ 7030. Упором для гидродомкрата служила конструкция, состоящая из силовой металлической балки, закрепленная металлическими тяжами к анкерным сваям (рис. 10). Величина ступеней нагрузки составляла не более 1/10 от ожидаемого значения предельной несущей способности свай.

Осадка свай фиксировалась двумя индикаторами часового типа с точностью деления 0,01 мм (модификация ИЧ 50). После достижения сваями вертикального перемещения 40 мм проводилась разгрузка опытных свай ступенями, равными удвоенным значениям ступеней нагружения.

В качестве предельного сопротивления сваи вдавливающей силе принята нагрузка на одну ступень меньше того значения, при котором достигнуто вертикальное перемещение в 40 мм.

По результатам исследования установлено следующее:

- 1) Осадка 40 мм достигнута свай БС30-25 при нагрузке 198,5 кН.
- 2) Осадка 40 мм достигнута свай БСПУ 30-25 при нагрузке 308,7 кН.
- 3) Предельная несущая способность свай БС30-25 составила 191,1 кН.
- 4) Предельная несущая способность свай БСПУ30-25 составила 294,0 кН.

Графики зависимостей «осадка-нагрузка», построенные по данным испытаний свай, представлены на рис. 11.

Фактическое увеличение несущей способности буровой сваи по грунту за счет устройства грунтополимерного уширения под ее нижним концом достигает 53 %. Таким образом, прирост несущей способности свай вследствие закачки под нижний конец расширяющейся смолы в количестве 6 кг можно сопоставить с увеличением общей её длины минимум на 1,0 м.

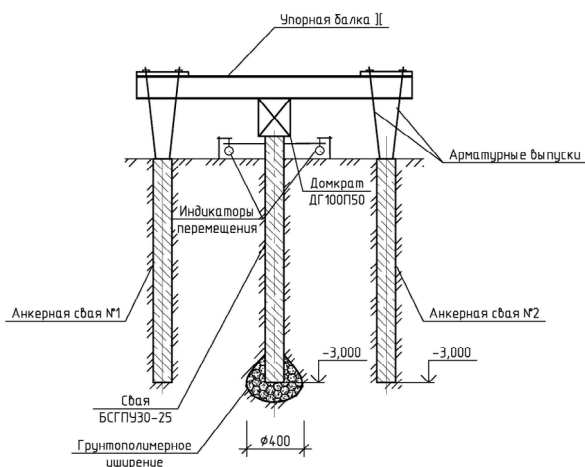


Рис. 9. Схема испытания сваи вертикальной статической вдавливающей нагрузкой
Fig. 9. Scheme of pile testing with vertical static pressing load



Рис. 10. Испытание вертикальной статической вдавливающей нагрузкой сваи БСГПУ30-25
Fig. 10. Testing of vertical static pressing load of pile SBGPU30-25

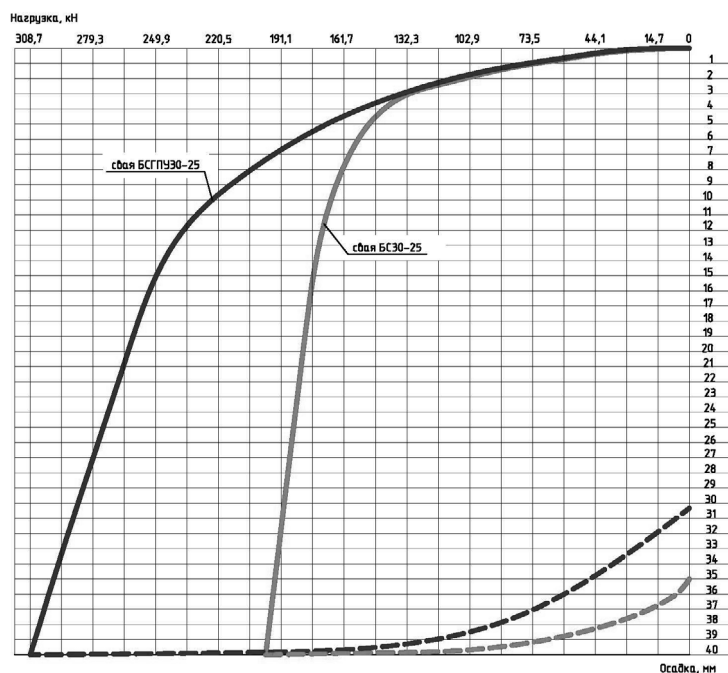


Рис. 11. Графики зависимости «осадка-нагрузка», построенные по результатам статических испытаний опытных свай
Fig. 11. Graphs of the "settlement-load" dependence, constructed based on the results of static tests of experimental piles

Выводы

Исходя из полученных в ходе лабораторных и полевых экспериментов опытных данных, можно сделать следующие выводы относительно возможности применения расширяющейся полимерной смолы для увеличения несущей способности буровой сваи:

1. При использовании полимерной смолы в качестве инъекционного раствора происходит образование области закрепленного грунта в околосвайном пространстве нижней части ствола сваи и непосредственно под её нижним концом, что главным образом решает проблему с наличием рыхлого грунта в виде бурового шлама под пятой буровой сваи.

2. За счет равномерного расширения полимера появляется возможность создания контролируемого грунтополимерного уширения. Регулирование параметров уширения осуществимо путем изменения количества закачиваемой смеси.

3. Образующее под нижним концом сваи грунтополимерное уширение обладает достаточными прочностными свойствами, для того чтобы включиться в общую работу с телом сваи и обеспечить прирост ее несущей способности по грунту.

4. Способность формировать грунтополимерное уширение предоставляет геотехникам инструмент дополнительного варьирования параметрами свай в такой важной сфере строительного производства, как усиление фундаментов. Общеизвестно, что работы, связанные с усилением фундаментов, сопряжены с многоточечностью и стесненными условиями труда. Поэтому уменьшение трудоемкости и материалоемкости работ при устройстве буровых свай за счет уменьшения их длины, но при этом без потери их несущей способности, является задачей актуальной, целесообразной и эффективной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еремин В.Я., Еремин А.В., Сарафанов Н.В., Буданов А.А. Некоторые проблемы качества буровых свай // Труды Международной научно-технической конференции. Т. 1. Уфа, 2006. С. 85–96.
2. Дзагов А.М., Китайкин В.А., Чернов Р.И. О влиянии качества зачистки уширения скважины на несущую способность буронабивной сваи // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 4. С. 31–36.
3. Леонтьев А.И., Мальцев А.В., Исаев В.И. Лабораторные исследования устройства уширенной пяты вибробабивной сваи, полученной способом доавливания // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сборник статей. Самара: СамГТУ, 2017. С. 302–306.
4. Мальцев А.В., Силкина Ю.Г. Методика экспериментального исследования усиления винтовой сваи способом химического закрепления околосвайного пространства // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей. Самара: СамГТУ, 2022. С. 222–229.
5. Исаев В.И., Тюкилин Д.А. Способы повышения несущей способности буронабивной сваи // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сборник статей. Самара: СамГТУ, 2018. С. 299–303.
6. Ибрагимов М.Н., Семин В.В., Шапошников А.В. Закрепление грунтов в подземном строительстве. М.: Издательский дом АСВ, 2022. 434 с.
7. Калач Ф.Н. Оценка эффективности использования технологии инъекционного укрепления слабых грунтов в основании фундаментов мелкого заложения саморасширяющимися растворами // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11, № 2. С. 62–77. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06.
8. Попсуенко И.К., Борисов А.С., Дегтярев П.П. Подъем фундаментов нагнетанием в их основания цементных растворов и расширяющихся геополимеров // Применение гидроразрывной технологии в практике строительства: материалы конференции. М.: Научно-исследовательский центр «Строительство», 2022. С. 87–112.
9. Попсуенко И. К. Методика расчета подъема фундамента на заданную величину путем нагнетания в грунт геополимеров // Фундаменты. 2020. № 2. С. 16–20.
10. Soil stabilization and foundation restoration using an expandable polyurethane resin / M.M. Sabri, K.G. Shashkin, E. Zakharin, A.V. Ulybin // Magazine of Civil Engineering. 2018. N. 6(82). P. 68–80.

REFERENCES

1. Eremin V.Ya., Eremin A.V., Sarafanov N.V., Budanov A.A. Some problems of drilling piles quality. *Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. T. 1 [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. V. 1]. Ufa, 2006, pp. 85–96. (In Russian).
2. Dzagov A.M., Kitaykin V.A., Chernov R.I. On the impact of the quality of stripping of the well broadening on the bearing capacity of the bored pile. *Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov* [Foundations and Soil Mechanics]. 2016, no. 4, pp. 31–36. (in Russian)
3. Leontiev A.I., Maltsev A.V., Isaev V.I. Laboratory studies of the construction of a widened heel of a vibrating pile obtained by pressing. *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo: sbornik statej* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction: collection of articles]. Samara, SamSTU, 2017, pp. 302–306. (In Russian).
4. Maltsev A.V., Silkina Yu.G. Procedure for Experimental Study of Reinforcement of Helical Pile by Chemical Fixing of Near-Pile Space. *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo i stroitel'nye tehnologii: sbornik statej* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and construction technologies: collection of articles]. Samara, SamSTU, 2022, pp. 222–229. (In Russian).
5. Isaev V.I., Tyukilin D.A. Ways to increase the bearing capacity of a bored pile. *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo: sbornik statej* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction: collection of articles]. Samara, SamSTU, 2018, pp. 299–303. (In Russian).
6. Ibragimov M.N., Semin V.V., Shaposhnikov A.V. *Zakreplenie gruntov v podzemnom stroitel'stve* [Stabilization of soils in underground construction]. Moscow, Publishing House ASV, 2022. 434 p.
7. Kalach F.N. Evaluation of the efficiency of using the technology of injectable strengthening of weak soils

at the base of shallow foundations with self-expanding solutions. *Construction and Geotechnics* [Construction and Geotechnics], 2020, vol. 11, no. 2, pp. 62–77. (in Russian) DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06

8. Popsuenko I.K., Borisov A.S., Degtyarev P.P. Lifting of foundations by injection of cement mortars and expanding geopolymers into their bases. *Primenenie gidrorazryvnoy tekhnologii v praktike stroitel'stva: materialy konferencii* [Application of hydraulic fracturing technology in construction practice: conference materials]. Moscow, Research Center "Construction", 2022, pp. 87–112. (In Russian).

9. Popsuenko I.K. Methodology for Calculating Foundation Lifting by a Given Value by Injecting Geopolymers into the Soil. *Fundamenty* [Bases], 2020, no. 2, pp. 16–20. (in Russian)

10. Sabri M.M., Shashkin K.G., Zakharin E., Ulybin A.V. Soil stabilization and foundation restoration using an expandable polyurethane resin. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. N. 6(82). P. 68–80.

Об авторах:

МАЛЬЦЕВ Андрей Валентинович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры строительной механики, инженерной
геологии, оснований и фундаментов
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: geologof@yandex.ru

КАРПОВ Андрей Анатольевич

заведующий лабораторией НПП «ГЕОТЕХНИКА»
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: andrkarpow@yandex.ru

MALTSEV Andrey V.

PhD in Engineering Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Structural Mechanics,
Engineering Geology, Base and Foundations Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: geologof@yandex.ru

KARPOV Andrey An.

Head of the Laboratory of the Research and Production
Center «GEOTECHNIKA»
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: andrkarpow@yandex.ru

Для цитирования: Мальцев А.В., Карпов А.А. Об устройстве грунтополимерного уширения пяты буровой сваи // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 2. С. 4–11. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.02.01.

For citation: Maltsev A.V., Karpov A.A. About the device of the ground polymer widening of the heel drilling pile. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 2, pp. 4–11. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.02.01.