УДК 624.1

© А. В. Бояринцев, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: Andrey_boyarintsev@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-75-84

© A. V. Boyarintsev, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: Andrey_boyarintsev@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ ПО ГРУНТУ

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF THE METHOD FOR INCREASING THE PILE CAPACITY

Трение грунтов и подземных конструкций зданий является одним из основных механизмов передачи нагрузок от надземных конструкций на основание. Общая несущая способность свай напрямую зависит от ее несущей способности по грунту. Устойчивость ограждающих конструкций — от величин активного и пассивного воздействия грунта. Все это зависит от параметров трения грунта по рассматриваемому материалу. Представлено описание нового способа повышения несущей способности подземных конструкций по грунту, а также его сопоставление с существующими методами. Приведенный способ заключается в создании неровностей на поверхности конструкции, которая соприкасается с грунтом. Особенностью метода является то, что развитие поверхности не влечет изменения расчетной схемы и, как следствие, не усложняет методику расчета. Тогда как существующие сегодня альтернативы, например ребристые сваи, имеют более сложную расчетную схему. Помимо касательных сил сопротивления грунта, на ребрах свай дополнительно возникают еще и нормальные. Эффективность нового способа оценена лабораторными исследованиями. Приведено их описание. В опытах определялись параметры трения талых грунтов и сцепление мерзлых грунтов с разными материалами. К сравнению были приняты образцы металла с заводской поверхностью и образцы, усиленные новым способом. Полученные результаты исследования демонстрируют эффект от усиления поверхности конструкции: несущая способность свай по грунту увеличилась на 53 %.

Ключевые слова: сваи, несущая способность свай, усиление свай, многолетнемерзлые грунты, трение грунта и фундамента.

Interface friction of soils and underground structures of buildings is the main mechanism for transferring loads from the building superstructure to the foundation base. The total pile bearing capacity directly depends on the pile capacity value in soil. The stability of the enclosing structures depends on the active and passive effects of the soil. It all depends on the soil friction parameters regarding the pile material. This article describes a method for increasing the bearing capacity of the underground structures and presents an inter-comparison analysis of this method with currently used methods. This method consists of creating roughness on the surface of the structure which is in contact with the soil. The feature of the method is that the development of the surface does not entail changes in the design scheme and, as a result, does not complicate the calculation method, whereas the alternative methods existing presently, such as using ribbed piles, have a more complex design scheme. In addition to the tangential forces of soil resistance, normal forces also appear on the edges of the pile. The effectiveness of the proposed method has been evaluated by laboratory tests. The tests' description is given. During the testing, the parameters of interface friction of thawed soils and the adhesion of frozen soils with different materials were determined. Samples of metal with a factory surface and samples reinforced by using the proposed method were taken for comparison. The obtained results of the study demonstrate the effect of strengthening the structure surface: pile capacity has increased by 53 %.

Keywords: laboratory tests, piles, piling, pile-soil friction, reinforced pile, permafrost.

Введение

Надежность, долговечность и экономическая эффективность подземных конструкций зданий и сооружений во многом зависят от принятых решений на стадии проектирования объекта строительства. В основном этот процесс включает моделирование системы «грунты основания – подземные конструкции – надземные конструкции», которое может выполняться как в численной, так и в аналитической постановке. В обоих случаях одним из наиболее важных и ответственных элементов системы является контакт подземной конструкции и грунта, отвечающий за передачу нагрузок на основание от надземных конструкций здания.

Наиболее очевидным примером аналитического расчета, учитывающего контактную работу свай, является определение несущей способности сваи по ее боковой поверхности. Элементом, моделирующим зону контакта, является расчетное сопротивление слоя грунта основания на боковой поверхности сваи f , зависящее от глубины расположения рассматриваемого слоя, типа грунта, его крупности, плотности или консистенции, а также от способа погружения сваи¹.

Вторым примером аналитического моделирования контакта «грунт – конструкция» является расчет подпорных сооружений, включающий определение значений активного и пассивного давления, а также несущей способности массивных подпорных стен при плоском сдвиге^{2,3} [1–3]. В данных расчетах вводятся понятия параметров трения на контакте «конструкция – грунтовый массив», к которым следует относить угол трения δ и сцепление c_k грунта с материалом конструкции. Определение данных параметров предлагается по простой формуле

$$\delta = \gamma_k \varphi,$$

где φ — угол внутреннего трения грунта; γ_k — коэффициент, учитывающий особенности контакта грунта с различными конструкциями. Значение c_k для дисперсных грунтов предлагается принимать равным 0.

¹ СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. М., 2011. 85 с.

² СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*). М.: ФГУП ЦПП, 2016. 228 с.

³ СП 381.1325800.2018. Сооружения подпорные. Правила проектирования. М., 2019. 165 с.

Значения коэффициента γ_k представлены в табл. 1.

В процессе численного моделирования особенности контакта грунта и конструкций задаются параметром интерфейса R , который либо увеличивает, либо уменьшает прочность на сдвиг в месте контакта и может иметь значения от 0 до 1, где 0 — отсутствие трения, 1 — трение по поверхностям «грунт – конструкция» и «грунт – грунт», равнозначно.

Изучению сдвиговой прочности грунтов на контакте с конструкциями фундаментов посвящено множество работ как советских, так и зарубежных ученых.

Отечественные исследования параметров трения конструкции и окружающего грунта относятся к советскому периоду [4]. Большое количество работ посвящено взаимодействию свай и мерзлых грунтов [5–7]. Так, в работе [8] установлена зависимость прочности смерзания

Таблица 1

Значения коэффициента условий работы при определении контактного трения (СП 22.13330.2016)

Материал конструкции	Технология устройства и особые условия	γ_k
Бетон, железобетон	Монолитные гравитационные и гибкие подпорные стены, бетонируемые насухо. Монолитные фундаменты	0,67
	Монолитные гибкие подпорные стены, бетонируемые под глинистым раствором в грунтах естественной влажности. Сборные гравитационные стены и фундаменты	0,5
	Монолитные гибкие стены, бетонируемые под глинистым раствором в водонасыщенных грунтах. Сборные гибкие стены, устраиваемые под глинистым раствором в любых грунтах	0,33
Металл, дерево	В мелких и пылеватых водонасыщенных песках	0
	В прочных грунтах	0,33
Любой	При наличии вибрационных нагрузок на основание	0

грунта от шероховатости поверхности материала (рис. 1). Согласно приведенным данным видно, что сдвиговая прочность мерзлого грунта (прочность смерзания) возрастает с увеличением грубости поверхности.

Зарубежные исследования подтверждают наблюдения советских ученых [9–12]. Кроме того, в работах [13, 15] демонстрируется зависимость контактного трения от размеров частиц грунта и их угловатости.

Таким образом, все приведенные исследования приходят к выводу о том, что основным параметром, наиболее сильно влияющим на величину трения на границе «конструкция – грунт», является неровность внешней поверхности материала подземной конструкции.

1. Способы повышения несущей способности свай по грунту

На основе исследований, представленных выше, существует множество способов повышения несущей способности свай по их боковой поверхности. Наибольшее распространение получило развитие боковой поверхности свай, как заводского изготовления, так и изготавливаемых на строительной площадке.

Рассматривая сваи заводского изготовления, можно выделить железобетонные ребристые

сваи и металлические винтовые и спиралевидные (рис. 2). Способ повышения несущей способности по грунту бетонной сваи посредством выполнения на ее поверхности ребер диаметром больше, чем диаметр сваи, расположенных с определенным шагом, реализуется при бетонировании тела сваи путем заполнения бетоном полостей на внутренней поверхности специальной опалубки [16]. Способы повышения несущей способности по грунту металлических свай реализуются посредством крепления к их поверхности винтов, как одиночных, так и с определенным шагом, а также винтовых спиралей, представляющих собой металлические листы, приваренные к наружной поверхности сваи с определенной частотой [17, 18].

Развитие наружной поверхности буронабивных свай реализуется посредством создания неровностей наружной поверхности при изготовлении свай. Известна технология буровых свай «Атлас» [19, 20], которая заключается в использовании специального бурового инструмента, снабженного лопастями (рис. 3, а). Данные лопасти образуют спиралевидные каналы вдоль тела будущей сваи по мере погружения бурового инструмента в глубь основания. Затем при бетонировании выполненные канавки заполняются бетоном.

Немалое распространение получила разрядно-импульсная технология изготовле-

Рис. 1. Зависимость прочности смерзания грунта от высоты неровностей поверхности материала [8]

Рис. 2. Сваи заводского изготовления с развитой боковой поверхностью: а — ребристая железобетонная свая; б — многовинтовая; в — спиральная [18] металлические сваи

ния свай, так называемые сваи РИТ (рис. 3, б). В основе технологии лежит применение взрывоподобного преобразования электроэнергии в момент подачи разряда токового импульса высокого напряжения. В результате по длине сваи создаются уширения, шаг которых задается в проекте, а размеры зависят от грунтовых условий и величины импульсного воздействия.

Недостатками известных способов повышения несущей способности свай по грунту являются их высокая трудоемкость изготовления, а также сложность адекватной оценки несущей способности свай по грунту аналитическими методами расчета. Трудоемкость изготовления обусловлена наличием дополнительных технологических операций (разрядно-импульсное воздействие при изготовлении свай РИТ или сварка в металлических сваях), специальной оснастки (опалубки в случае с ребристыми бетонными сваями или специального бурового инструмента для свай «Атлас»). Сложность аналитической оценки несущей способности заключается в изменении напряженно-деформированного состояния грунта на контакте со свайей. Так, на выступах свай, будь то ребра или лопасти, от реактивного воздействия грунта возникает нормальное напряжение, а на прямолинейном участке тела сваи — касательные напряжения. При этом не всегда можно точно определить размеры выступов и характер их взаимодействия с грунтом. Таким образом, при аналитическом методе определения несущей способности свай инженеры вы-

нуждены делать запас прочности, который ведет к перерасходу материала.

Указанные недостатки присущи способам, в которых реализуется значительное развитие поверхности. При этом существуют методы по увеличению несущей способности свай, также основанные на развитии поверхности (путем увеличения ее неровности) и не приводящие к образованию значительных выступов и возникновению нормальных реактивных сил грунта. Подобный метод представлен в изобретении [21]. Сущность данного способа заключается в создании искусственной шероховатости на наружной поверхности сваи путем равномерного нанесения и соединения с ней материала, формирующего шероховатость. Причем наносимый на наружную поверхность свай материал может быть как сыпучим и наноситься обсыпанием поверхности свай, так и предварительно изготовленным матом с заданными размерами и шероховатостью. Соединение формирующего шероховатость материала, вне зависимости от его типа, с поверхностью свай осуществляют посредством связующего материала, например клея.

Технический результат, достигаемый изобретением, заключается в снижении трудоемкости изготовления свай с повышенной несущей способностью по грунту путем создания равномерной шероховатости на наружной поверхности свай, позволяющей увеличить зацепление частичек грунта с искусственно созданными неровностями на поверхности свай. При этом равномерно нанесенный по всей длине сваи материал воспринимает исключительно касательные реактивные силы, не создавая никаких выступов, провоцирующих возникновение нормальных реактивных сил. Это позволяет установить силы трения грунта о созданную поверхность свай стандартными срезными испытаниями, а полученные данные с достаточной точностью использовать при аналитическом определении несущей способности свай по грунту.

Для определения эффекта от применения представленного способа повышения несущей способности свай по грунту был проведен ряд лабораторных экспериментов, в которых фиксировалось усилие среза на контакте «мерзлый грунт – усиленная конструкция» и «талый

Рис. 3. Изготавливаемые на строительной площадке сваи с развитой поверхностью: а — сваи «Атлас»; б — сваи РИТ

грунт – усиленная конструкция» и сопоставлялось с усилием среза тех же грунтов, но по металлической поверхности.

2. Методика лабораторного исследования

В исследовании к сравнению принято два образца материала: металл с необработанной поверхностью и металл с развитой поверхностью согласно [21] (рис. 4). Дополнительная шероховатость создавалась нанесением песка с размером частиц 0,5...1 мм и его фиксацией на поверхности материала клеем. Для определения срезного усилия немерзлых грунтов материал выполнялся в виде пластин круглого сечения диаметром 71 мм, для мерзлых — в виде колец с внутренним диаметром 102 мм и высотой 50 мм.

В исследовании производилась фиксация усилий: 1) среза талого грунта и 2) мерзлого грунта по испытуемым материалам.

В качестве грунтов приняты глинистые грунты нарушенного и ненарушенного сложения. Характеристики грунтов представлены в табл. 2.

Грунты ненарушенного сложения отбирались в одном из котлованов Санкт-Петербурга. Грунт нарушенной структуры изготавливался из порошка кембрийской глины путем его затворения водой.

Срезное усилие на контакте талого грунта и испытуемых материалов осуществлялось в стандартных срезных приборах, где в неподвижной части устанавливалась пластина материала, затем на нее устанавливался грунт

Рис. 4. Образцы с усиливающим покрытием [21]

(рис. 5). Между подвижной и неподвижной частями прибора создавался зазор таким образом, чтобы расстояние от края подвижной части прибора до поверхности материала было не менее 1 мм. Затем прикладывались нормальная и касательная нагрузки. Испытания проводились при трех значениях нормальной нагрузки: 0,1, 0,15 и 0,2 МПа. По результатам испытаний строились графики зависимости касательной нагрузки от нормальной, по которым определялись угол трения и сцепления на контакте с материалом. Линия среза проходила поперек слоев, моделируя тем самым реальную работу сваи.

Срезное усилие на контакте мерзлого грунта и испытуемых материалов выполнялось следующим образом (рис. 6): кольцо испытуемого материала 1 заполнялось грунтом 2, помещалось в морозильную камеру, промораживалось и охлаждалось до температуры -8°C , после промерзания кольцо с грунтом устанавливалось на пустотелую опору 3, установленную на ровную поверхность 4, которая препятствовала движению кольца, но не препятствовала движению грунта внутри кольца, и придавалась нагрузка 5 через распределительную пластину. Усилие 6, при котором происходило разрушение на контакте материала и грунта 7, принималось как срезное.

Рис. 5. Схема определения сдвигового усилия немерзлого грунта по материалу

Таблица 2

Физические характеристики принятых в испытании грунтов

№	Тип испытания	Наименование грунта	Сложение	W, %	γ , кН/м ³	I_p , %	I_L , д. е.
1	Талый грунт	Супесь пылеватая пластичная слоистая	Ненарушенное	30	18,9	7	0,55
2	Мерзлый грунт	Кембрийская глина текучая	Нарушенное	54,28	18,1	17,54	1,7

Рис. 6. Схема определения прочности смерзания грунта с испытываемыми материалами

3. Результаты и их обсуждение

Талые грунты

По результатам срезных испытаний были получены графики зависимостей деформации сдвига от касательной нагрузки (рис. 7).

По данным графикам можно заметить различие в характере разрушения двух образцов. Для образца металла с обыкновенной необработанной поверхностью график имеет ломаное очертание с характерным перегибом, соответствующим нарушению сцепления грунта на контакте с материалом. Поведение графика для образца металла с модифицированной поверхностью по [21] имеет иное очертание, схожее с графиком разрушения самого грунта. Исходя из данного наблюдения можно сделать вывод о том, что повышение шероховатости поверхности способствует переносу линии разрушения с «конструкция – грунт» на «грунт – грунт». Таким образом, согласно табл. 3, расчетное трение грунта по металлическим поверхностям (шпунтовые ограждения, стальные сваи) может быть увеличено на 67 %.

На рис. 8 приведены графики зависимости касательных напряжений от нормальных для трех видов среза: по грунту, по гладкому металлу и металлу с модифицированной поверхностью. По графикам были определены угол трения и сцепление на контакте. Результаты испытания приведены в табл. 3.

Рис. 7. Графики зависимости касательной нагрузки на грунт от горизонтальной деформации на границе: а — «грунт – грунт»; б — «грунт – металл»; в — «грунт – усиливающее покрытие»

Для более наглядной интерпретации полученных результатов были определены предельные усилия, необходимые для продавливания сваи сквозь слой испытанного грунта, расположенного на глубине 7 м от дневной поверхности грунта. Предельные усилия определяются согласно закону Кулона – Мора по формуле

$$f = \sigma \operatorname{tg}(\delta) + c_{\text{конт}},$$

где σ — нормальное давление слоя грунта, прижимающее грунт к свае, определенное как произведение удельного веса грунта на глубину заложения и на коэффициент бокового расширения грунта (при значении коэффициента Пуассона 0,35). Также для испытанного грунта было установлено нормативное значение трения по боковой поверхности, регламентированное СП 24.13330.2011. Результаты расчета сведены в табл. 3.

По данным таблицы видно, что расчетное сопротивление на линии «грунт – усиливающее покрытие» выше, чем «грунт – грунт». Данный результат может быть объяснен особенностями проведения испытания в стандартном срезном

Рис. 8. Графики зависимости касательных напряжений от нормальных на границах: а — «грунт – грунт»; б — «грунт – металл»; в — «грунт – усиливающее покрытие»

приборе, а также малой величиной зазора. Тем не менее, можно сделать вывод о том, что применение усиливающего покрытия способствует переносу линии разрушения с «грунт – конструкция» на «грунт – грунт» и дает прирост расчетного сопротивления по боковой поверхности на 53 %.

Мерзлые грунты

По результатам продавливания грунта сквозь кольца испытуемых материалов строились графики зависимости приложенного усилия от деформации. Максимальные усилия суммировались с весом грунта внутри кольца и делились на площадь контакта между грунтом и материалом. Данное отношение принималось как предельное касательное напряжение, при котором происходил срез. Результаты испытаний приведены на рис. 9.

По полученным кривым замечен различный характер разрушения: при сдвиге относительно обыкновенного металла разрушение имеет хрупкий характер, тогда как при сдвиге по усиливающему покрытию — пластичный, что свидетельствует о переходе поверхности разрушения от линии «грунт – конструкция» на «грунт – грунт».

Сопоставление предельных касательных напряжений показывает увеличение прочности смерзания стали с модифицированной поверхностью на 42 % по сравнению со сталью до модификации.

Таким образом, испытания показывают, что повышение неровностей на наружной поверхности подземных конструкций способствует увеличению трения с испытанными глинистыми грунтами и, как следствие, повышению несущей способности свай и устойчивости ограждающих конструкций.

В данной работе не рассматривался эффект от предложенного способа повышения несущей способности при работе в песчаных грунтах и глинистых грунтах твердой консистенции. Также

Таблица 3

Результаты расчета

№	Граница разрушения	σ , кПа	δ , град	$c_{\text{конт}}$, кПа	f , кПа
1	Грунт – грунт	71,24	16,75	42,81	64,25
2	Грунт – гладкий металл		14,25	23,89	41,98
3	Грунт – металл с повышенной грубостью поверхности		21,56	46,29	74,43
По табл. 7.3 СП 24.13330.2011					
1	Грунт – свая	–	–	–	22,5

Рис. 9. Зависимость деформации от приложенной к грунту нагрузки: а — поверхность «грунт – металл»; б — поверхность «грунт – песчаное покрытие»

не проводилась оценка сохранности покрытия в процессе погружения свай. Данные направления будут исследоваться автором в дальнейшем.

Заключение

В статье приведено описание способа повышения несущей способности свай по грунту [21]. Указаны его преимущества перед существующими методами. Кроме того, представлено описание и результаты лабораторных исследований, демонстрирующие количественный эффект от его применения. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Угол трения и сцепление немерзлого глинистого грунта с поверхностью с усиливающим покрытием стали выше, чем с исходной.
2. Применение способа повышения несущей способности свай по грунту [21] способствует увеличению несущей способности свай в немерзлых глинистых грунтах до 53 %.
3. Несущая способность свай по боковой поверхности, определенная по фактически измеренным параметрам трения глинистого грунта, в 1,86...2,86 раза выше, чем регламентированные

значения, представленные в нормативной литературе.

4. Прочность смерзания глинистого грунта со сталью, наружная поверхность которой усилена по указанному способу, выше на 42 % по сравнению со сталью без усиления.

5. Применение предложенного способа обеспечивает перенос линии разрушения с «грунт – конструкция» на «грунт – грунт», что имеет значительный эффект в глинистых грунтах слоистой структуры.

Согласно представленным выводам, можно говорить об эффективности использования представленного способа увеличения несущей способности свай по боковой поверхности при изготовлении подземных конструкций. Однако перед внедрением технологии следует дополнительно исследовать устойчивость данного покрытия при погружении свай вдавливанием, вибропогружением и забивкой. Данные исследования будут выполнены автором в продолжение представленного.

Библиографический список

1. Основания, фундаменты и подземные сооружения: справочник проектировщика / под общ. ред. Е. А. Сорочана и Ю. Г. Трофименкова. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.
2. Хасан Х. Ф. Взаимодействие анкерных конструкций «стена в грунте» с грунтовым массивом: дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 193 с.
3. Гакал Е. С., Ершов А. В. О расчете консольного ограждения котлована // Актуальные проблемы строительства: Материалы 69-й Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПб., 2016. С. 69–76.
4. Григорян А. А., Григорян Р. Г. Экспериментальное изучение сил «отрицательного трения» на боковой поверхности свай при просадке грунтов от собственного веса // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1975. № 5. С. 10–12.
5. Иоспа А. В., Аксёнов В. И., Шмелёв И. В. Некоторые результаты испытаний противупучинных и антикоррозионных покрытий для защиты металлических фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 5. С. 27–31.
6. Волохов С. С., Соловьева Н. В. Прочность смерзания мерзлых грунтов с материалом трубопрово-

дов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. № 5. С. 25–28.

7. Волохов С. С. Влияние строения зоны контакта мерзлых грунтов с материалами трубопроводов на прочность их смерзания // Газовая промышленность. 2014. № 2 (702). С. 44–47.

8. Соколов В. М. Исследование силового воздействия промерзающего грунта на вертикальные элементы трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1976. 230 с.

9. Aksoy H. S., Gör M., İnal E. A new design chart for estimating friction angle between soil and pile materials // Geomechanics and Engineering. 2016. Vol. 10. No. 3. Pp. 315–324.

10. Almallah A., Sadeghian P., Naggar H. Enhancing the Interface Friction between Glass Fiber-Reinforced Polymer Sheets and Sandy Soils through Sand Coating // Geomechanics and Geoengineering. 2020. Vol. 15. Issue 3. Pp. 186–202.

11. Sego D. C., Smith L. B. Effect of backfill properties and surface treatment on the capacity of adfreeze pipe piles // Canadian Geotechnical Journal. 1989. Vol. 26, № 4. Pp. 718–725.

12. Giraldo J., Rayhani M. T. Load transfer of hollow Fiber-Reinforced Polymer (FRP) piles in soft clay // Transportation Geotechnics. 2014. Vol. 1. Issue 2. Pp. 63–73.

13. Wen Z., Yu Q., Ma W., Dong S., Wang D., Niu F., Zhang M. Experimental investigation on the effect of fiberglass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 131. Pp. 108–115.

14. Pando M. A., Ealy C. D., Filz G. M., Lesko J. J., Hoppe E. J. A Laboratory and Field Study of Composite Piles for Bridge Substructures. Final Report, July 1999 – May 2003. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA. March 2006. 384 p.

15. Hussein A. Shaia, Ali K. Al-Asadi and Safwat H. Ramadan. Evaluation of the Interface Friction between Fiber-Reinforced Polymers and Granular Materials Using Modified Shear Apparatus // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9 (13). Pp. 1010–1016.

16. Набережный А. Д., Саввина А. Е. Экспериментальные исследования моделей висячих свай в мерзлых грунтах и методы повышения их несущей способности // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 8. С. 70–74.

17. Пат. 2278211 Российская Федерация, МПК E02D5/30, E02D5/34, E02D5/56. Винтообразная свая и способ ее сооружения / А. А. Землянский, С. А. Ращепкина, А. П. Денисова, О. С. Вертынский; Саратовский гос. техн. ун-т. № 2003129105/03; заявл. 29.09.2003, опублик. 20.06.2006.

18. Носков И. В., Сви́дeрских А. В. Работа свай винтовых конусно-спиральных в условиях морозного

пучения грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1 (72). С. 67–75.

19. Мангушев Р. А., Готтман А. Л., Знаменский В. В., Пономарев А. Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии. М.: АСВ, 2018. 320 с.

20. Мангушев Р. А., Ершов А. В., Осокин А. И. Со временные свайные технологии. М.: АСВ, 2010. 240 с.

21. Пат. 2720595, Российская Федерация, МПК E02D5/24. Способ повышения несущей способности свай по грунту / С. В. Ланько, А. В. Бояринцев; Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т. Заявл. 31.12.2019, опублик. 12.05.2020.

References

1. *Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya: spravochnik proektirovshchika* [Bases, foundations, and underground structures: designer's handbook]. Eds. Sorochan E. A. and Trofimenkov Yu. G. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985, 480 p.

2. Khasan Kh. F. *Vzaimodeystvie ankernykh konstruktсий «stena v grunte» s gruntovym massivom. Diss. kand. tekhn. nauk* [Interaction of “slurry-type wall” anchor structures with the soil mass. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2001, 193 p.

3. Gakal E. S., Ershov A. V. *O raschete konsol'nogo ograzhdeniya kotlovana* [On the calculation of the cantilever wall enclosing the pit]. *Trudy 69-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i doktorantov «Aktual'nye problemy stroitel'stva»* [Proceedings of the International scientific and practical conference of students, postgraduates, young scientists and doctoral students “Actual problems of construction”]. St. Petersburg, 2016, pp. 69–76.

4. Grigoryan A. A., Grigoryan R. G. *Eksperimental'noe izuchenie sil «otritsatel'nogo treniya» na bokovoy poverkhnosti svay pri prosadke gruntov ot sobstvennogo vesa* [Experimental study of the “negative friction” forces on the side surfaces of piles during subsidence of soils from their own weight]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and soil mechanics*, 1975, no. 5, pp. 10–12.

5. Iospa A. V., Aksyonov V. I., Shmelyov I. V. *Nekotorye rezul'taty ispytaniy protivopuchinnnykh i antikorrozionnykh pokrytiy dlya zashchity metallicheskich fundamentov na mnogoletnemerzlykh gruntakh* [Some test results of anti-scratch and anti-corrosion coatings for the protection of metal foundations on permafrost soils]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and soil mechanics*, 2015, no. 5, pp. 27–31.

6. Volokhov S. S., Solov'eva N. V. *Prochnost' smerzaniya merzlykh gruntov s materialom truboprovodov* [The strength of freezing of frozen soils with the material

of pipelines]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and soil mechanics*, 2010, no. 5, pp. 25–28.

7. Volokhov S. S. *Vliyanie stroeniya zony kontakta merzlykh gruntov s materialami truboprovodov na prochnost' ikh smerzaniya* [Influence of the structure of the contact zone of frozen soils with pipeline materials on the strength of their freezing]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas Industry*, 2014, no. 2 (702), pp. 44–47.

8. Sokolov V. M. *Issledovanie silovogo vozdeystviya promerzayushchego grunta na vertikal'nye elementy truboprovodov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Investigation of the force effect of freezing soil on vertical elements of pipelines. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1976, 230 p.

9. Aksoy H. S., Gör M., İnal E. A new design chart for estimating friction angle between soil and pile materials. *Geomechanics and Engineering*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 315–324.

10. Almallah A., Sadeghian P., Naggar H. Enhancing the Interface Friction between Glass Fiber-Reinforced Polymer Sheets and Sandy Soils through Sand Coating. *Geomechanics and Geoengineering*, 2020, vol. 15, iss. 3, pp. 186–202.

11. Sego D. C., Smith L. B. Effect of backfill properties and surface treatment on the capacity of adfreeze pipe piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, vol. 26, no. 4, pp. 718–725.

12. Giraldo J., Rayhani M. T. Load transfer of hollow fiber-reinforced polymer (FRP) piles in soft clay. *Transportation Geotechnics*, 2014, vol. 1, iss. 2, pp. 63–73.

13. Wen Z., Yu Q., et al. Experimental investigation on the effect of fiberglass reinforced plastic cover on adfreeze bond strength. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, vol. 131, pp. 108–115.

14. Pando M. A., et al. *Laboratory and field study of composite piles for bridge substructures*. Final report, July

1999 – May 2003. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA. March 2006. 384 p.

15. Hussein A. Shaia, Ali K. Al-Asadi and Safwat H. Ramadan. Evaluation of the interface friction between fiber-reinforced polymers and granular materials using modified shear apparatus. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018, vol. 9 (13), pp. 1010–1016.

16. Naberezhniy A. D., Savvina A. E. *Eksperimental'nye issledovaniya modeley visyachikh svay v merzlykh gruntakh i metody povysheniya ikh nesushchey sposobnosti* [Experimental studies of models of hanging piles in frozen soils and methods for increasing their load-bearing capacity]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 8, pp. 70–74.

17. Zemlyanskiy A. A., Rashchepkina S. A., Denisova A. P., Vertynskiy O. S. *Vintooobraznaya svaya i sposob ee sooruzheniya* [Screw-shaped pile and the method of its construction]. Patent RF, no. 2278211, Saratov, 2006.

18. Noskov I. V., Sviderskiy A. V. *Rabota svay vintovykh konusno-spiral'nykh v usloviyakh moroznogo pucheniya gruntov* [Performance of cone-spiral screw piles in soil frost heaving conditions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 1 (72), pp. 67–75

19. Mangushev R. A., Gotman A. L., Znamenskiy V. V., Ponomarev A. B. *Svai i svaynye fundamenty. Konstruktsii, proektirovanie i tekhnologii* [Piles and pile foundations. Constructions, design and technologies]. Moscow, ASV Publ., 2018, 320 p.

20. Mangushev R. A., Ershov A. V., Osokin A. I. *Sovremennye svaynye tekhnologii* [Modern pile technologies]. Moscow, ASV Publ., 2010, 240 p.

21. Lan'ko S. V., Boyarintsev A. V. *Sposob povysheniya nesushchey sposobnosti svai po gruntu* [A method for increasing the bearing capacity of a pile on soil]. Patent RF, no. 2720595, St. Petersburg, 2020.