

Научная статья

УДК 624.131

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/96-108>

Экспериментальные исследования физических и механических свойств грунтоцемента на основе однородных песков одной фракции

Александр Тевьевич Беккер¹, Андрей Александрович Красилов^{1✉}, Антон Андреевич Зверев¹, Евгений Викторович Чигров²

¹ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

² ООО «Дальинжстрой», Владивосток, Российская Федерация

✉ krasilov.aa@students.dvfu.ru

Аннотация. В статье рассмотрена технология струйной цементации грунтов как способ реконструкции портовых гидротехнических сооружений, обоснована актуальность ее применения. Приведен обзор технологии Jet Grouting, история ее развития. Рассмотрены примеры применения технологии струйной цементации грунтов в гидротехническом строительстве. Проведен анализ зависимостей плотности, прочности на одноосное сжатие и модуля деформации грунтоцемента, изготовленного в лабораторных условиях. В ходе анализа авторами предложено новое понятие «коэффициент заполнения пор» и описано влияние данного коэффициента на характеристики грунтоцемента. По результатам анализа сделаны выводы и даны рекомендации для дальнейших исследований.

Ключевые слова: струйная цементация грунтов, реконструкция, причальные сооружения, морские портовые сооружения, грунтоцемент, лабораторные исследования

Для цитирования: Беккер А.Т., Красилов А.А., Зверев А.А., Чигров Е.В. Экспериментальные исследования физических и механических свойств грунтоцемента на основе однородных песков одной фракции // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2(59). С. 96–108.

Original article

Experimental studies of the physical and mechanical properties of soil-cement based on homogeneous sands of one fraction

Alexander T. Bekker¹, Andrey A. Krasilov^{1✉}, Anton A. Zverev¹, Evgeniy V. Chigrov²

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² LLC «Dalinzhstroy», Vladivostok, Russian Federation

✉ krasilov.aa@students.dvfu.ru

Abstract. The article considers the technology of jet cementation of soils as a method of reconstruction of port hydraulic structures, substantiates the relevance of its application. An overview of the Jet Grouting technology and the history of its development is given. Examples of the application of the technology of jet cementation of soils in hydraulic engineering construction are considered. The analysis of the dependencies of density, uniaxial compressive strength and deformation modulus of soil-cement manufactured in laboratory conditions is carried out. In the course of the analysis, the authors proposed a new concept of "Pore filling coefficient" and described the effect of this coefficient on the characteristics of soil-cement. Based on the results of the analysis, conclusions were drawn and recommendations for further research were given.

Keywords: jet grouting of soils, reconstruction, berthing facilities, marine port engineering, soil-cement, laboratory research

For citation: Bekker A.T., Krasilov A.A., Zverev A.A., Chigrov E.V. Experimental studies of physical and mechanical properties of soil-cement based on homogeneous sands of one fraction. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 2(59), pp. 96–108. (In Russ.).

Введение

Большое количество портовых причальных сооружений подходит к такому возрасту, когда их физический износ достигает предела и появляется необходимость в ремонте как всего сооружения, так и некоторых его узлов. Такой ремонт подразумевает остановку перегрузочных процессов, что приводит к потере прибыли и необходимости в перераспределении грузовых потоков на другие порты. Часто встречаются случаи, когда перемещение линии кордона причального сооружения в сторону акватории для устройства шпунтовой оторочки невозможно. Тогда закрепление грунта – единственный рациональный способ. Применение струйной цементации грунтов позволяет улучшать грунты основания и засыпки до необходимых параметров, производить ремонт портовых сооружений без полной остановки производственных процессов.

Постоянно растущий грузооборот, в свою очередь, приводит к необходимости модернизировать уже эксплуатируемые причальные сооружения, что влечет за собой повышение нагрузок на причал и требует проведения дноуглубительных работ. В данном случае струйная цементация грунта позволяет повысить несущую способность оснований портовых сооружений, что дает возможность повысить мощности обработки грузов и увеличить глубину у причала.

Таким образом, вопрос применения струйной цементации грунтов в портовом гидротехническом строительстве является актуальным.

История развития и исследований струйной цементации грунтов

Технология заключается в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для разрушения и одновременного перемешивании грунта с цементным раствором. Струя цементно-водной суспензии разрезает, диспергирует структуру и частично замещает грунт, образуя грунтоцементную смесь. После твердения раствора образуется новый материал – грунтоцемент, обладающий высокими прочностными и деформационными характеристиками [1].

Устройство грунтоцементной колонны (ГЦК) или грунтоцементного элемента (ГЦЭ) происходит в два этапа: прямой ход колонны, во время которого производится бурение лидерной скважины до проектной отметки; обратный ход колонны, в процессе которого в форсунки монитора, расположенного на нижнем конце колонны, подают под высоким давлением цементный раствор и начинают подъем колонны с одновременным ее вращением [2].

Устройство ГЦЭ методом струйной цементации, согласно СП 291.1325800.2017, может производиться по следующим технологиям (рис. 1):

- однокомпонентная струйная цементация (Jet-1), когда через форсунку нагнетается струя цементно-водного раствора;
- двухкомпонентная цементация (Jet-2), когда через форсунки вращающегося монитора одновременно нагнетается цементно-водный раствор и подается струя воздуха (или воды);
- трехкомпонентная цементация (Jet-3), когда через форсунки монитора обеспечивается одновременная подача струи цементно-водного раствора, воздуха и воды.

Укрепление грунтов при помощи инъекции цемента впервые было применено Ш. Бериньи в 1802 г. К концу XIX в. цементация стала применяться в шахтном строительстве. К началу XX в. применение инъекции распространяется на область гидротехнического и дорожного строительства. К началу 30-х годов в СССР были выполнены исследования таких ученых, как М.М. Филатов, В.В. Охотин, Б.А. Ржаницын, А.Н. Адамович, В.М. Безрук и др. Исследования по укреплению грунтов цементом, а также строительство фундаментов из грунтоцемента ведут ученые Ю.Л. Винников, Н.Л. Зоценко, А.Н. Токин и др. Братья

Yamakodo в Японии впервые использовали струйную цементацию для создания тонкой стены, которая закрыла швы между шпунтовыми сваями. Суть состояла в предварительном размыве грунта водой при бурении скважины до проектной отметки, а затем заполнение размываемого объема инъекционным раствором под невысоким давлением. Данный способ использовался для устройства противофильтрационных завес, разработки мерзлого грунта под котлованы, уплотнения просадочных грунтов [3].

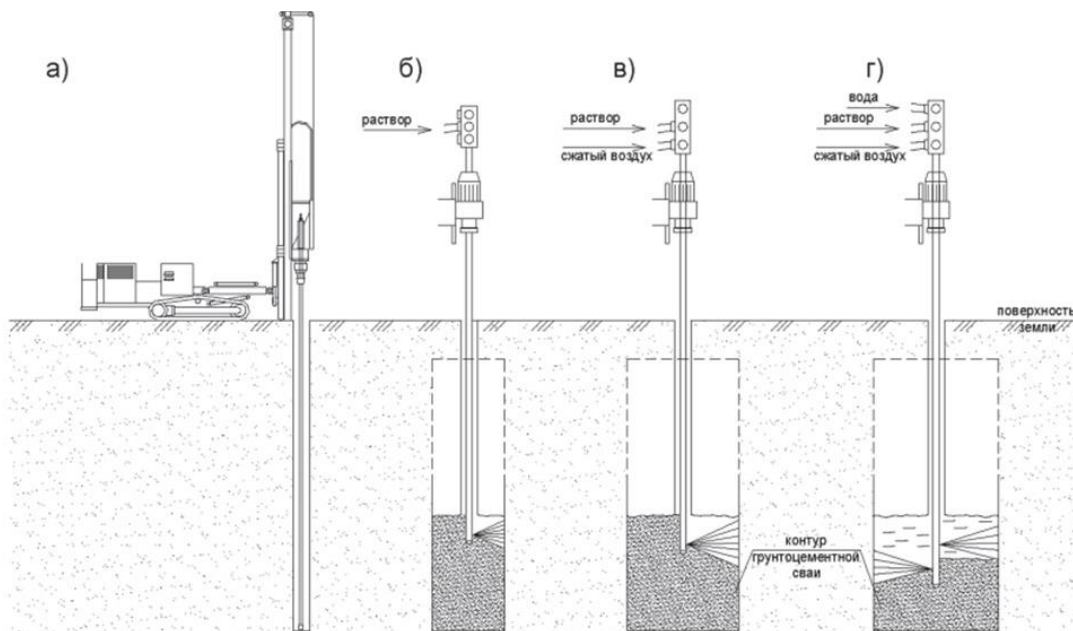


Рис. 1. Принципиальные технологические схемы видов струйной цементации:
а) бурение скважин вращательным способом буровой установкой с промывкой цементным или бентонитовым раствором; б) устройство грунтоцементных колонн по однокомпонентной технологии; в) устройство грунтоцементных колонн по двухкомпонентной технологии; г) устройство грунтоцементных колонн по трехкомпонентной технологии

Fig. 1. Basic technological schemes of types of jet cementation:

- a) drilling of wells in a rotational way by a drilling rig with flushing with cement or bentonite solution;
- b) installation of ground cement columns using one-component technology;
- c) installation of ground cement columns using two-component technology;
- d) installation of ground cement columns using three-component technology

В середине 70-х годов Nakanishi внедрил технологию с использованием химических и цементных растворов, нагнетаемых под высоким давлением через маленькие (диаметром 1,2–2 мм) форсунки, расположенные в нижней части буровой колонны, которая вращалась, создавая уже не тонкие панели, а колонны закрепленного грунта. Дальнейшие усовершенствования были предложены Shen, Peng, Sun и другими китайскими исследователями [4].

Компания Kajima Corporation предложила технологию трехкомпонентной струйной цементации. Затем её усовершенствовали специалисты фирм: «Кемикал граутинг», «Келлер», «Шандунг Тайан граутинг», «Родио», «Инъектоджет», «Паккиози», «Обояшигуми», «Бауэр» и др. На основе двухкомпонентной системы была разработана Super Jet. Для получения увеличенного диаметра колонны используются давление для раствора 30 МПа и сжатый воздух 0,7–1,05 МПа. В Super Jet применяются большие расходы раствора при двухкомпонентной технологии, что позволяет получать колонны диаметром до 5 м, но требует большого количества оборудования. Super Jet Mini – это технология Super Jet, но с ограничением предельного диаметра [4].

Технология X-jet разработана на основе трехкомпонентной цементации. Используются давление для раствора 40 МПа и сжатый воздух 0,6–1,05 МПа, после чего применяется низкое давление для более качественного и однородного перемешивания грунта и раствора.

В Европе данная технология широко используется с конца 70-х годов. Теория проектирования грунтоцементных свай развита в трудах Croce and Flora, 2000; Madoni et al., 2006; Madoni and Bzdowska, 2012. С начала 90-х годов КНР стала мировым лидером по применению струйной цементации [5].

В России первые технологические схемы струйной цементации разработали Гидроспецпроект и Гидроспецстрой Минэнерго СССР в конце 70-х годов при устройстве противофильтрационных завес [6, 7]. В 1980-е годы струйную технологию стали применять Ингеоком, Инженерное бюро «Юркевич», НИИпромстрой, ВНИИГиМ, Геосистема, Интермелиорация, Геореконструкция, «Космос» и др. НИИОСП им. Н.М. Герсевича в 1987 г. на японском оборудовании выполнил устройство завесы из грунтоцементных колонн вокруг опоры моста на р. Сюнь.

Значительный вклад в развитие теории и практики струйной цементации грунтов внесли: С.Г. Богов, И.И. Бройд, Н.В. Дмитриев, И.А. Запечалов, П.А. Коновалов, В.Н. Корольков, А.Г. Малинин, Л.И. Малышев, Л.Р. Петросян, А.В. Попов, М.И. Смородинов, В.Е. Соколов, Б.С. Федоров, М.Ф. Хасин и др. НИИОСП им. Н.М. Герсевича изучил результативность струйной технологии для фундаментов и ограждающих конструкций [8].

Краткий обзор результатов применения технологии приведен в [9, 10]. Современные достижения технологии того времени в этом направлении приведены в монографии [11]. В монографии А.Г. Малинина [1] дан обзор достижений и результаты исследований, полученных автором. А.В. Черняков разработал технологические решения при использовании jet-технологии в зависимости от природы укрепляемого грунтового массива и расположения сооружений в зоне строительства, разработал структурно-технологическую модель грунтобетона, предложил добавку КДСЦ.

Применение струйной цементации грунтов в портовом гидротехническом строительстве

Основными достоинствами струйной цементации грунтов в гидротехническом строительстве являются: экологическая чистота, возможность производства работ в стесненных условиях, отсутствие масштабных земляных работ, отсутствие необходимости в водолазных работах, сокращение сроков и стоимости строительства.

Реконструкция причалов № 34 и № 35 в морском порту Находка [12]. Основная задача реконструкции – увеличение проектных отметок дна. Причалы представляют собой анкеренный больверк из металлического шпунта Ларсен V. Отметка дна у кордона – минус 9,75 м по Балтийской системе высот. Проектными решениями предусматривались искусственное закрепление грунта оснований причалов по технологии струйной цементации грунтов с предварительным выделением опытного участка и дноуглубительные работы до отметки минус 12,5 м БС. Опытный участок производства работ был выделен для подбора рецептурных и технологических параметров струйной цементации в целях обеспечения требуемых характеристик закрепленного массива грунта и выполнения натурных испытаний в сопровождении мониторинга. В итоге проведена реконструкция действующих причалов без вывода их из эксплуатации, реализовано дноуглубление, причалы сданы в эксплуатацию. В августе 2020 г. Ростехнадзором выдано заключение о соответствии реконструированного объекта требованиям технических регламентов и проектной документации.

Ремонт пирса ГК «Трансбункер» [13]. Конструкция пирса представляет собой взаи-анкеренный больверк. Устройство дублирующей стены (рис. 2) из грунтоцементных колонн было выполнено ввиду того, что состояние пирса признано не пригодным к эксплуатации и требующим капитального ремонта. По технологии струйной цементации грунтов выполнена грунтонепроницаемая стена из секущихся свай, расположенных в три ряда. Диаметр грунтоцементных колонн принят 600 мм, длина колонн – до 18 м. Передний и задний ряд колонн армировались буровыми штангами для восприятия изгибающего момента.

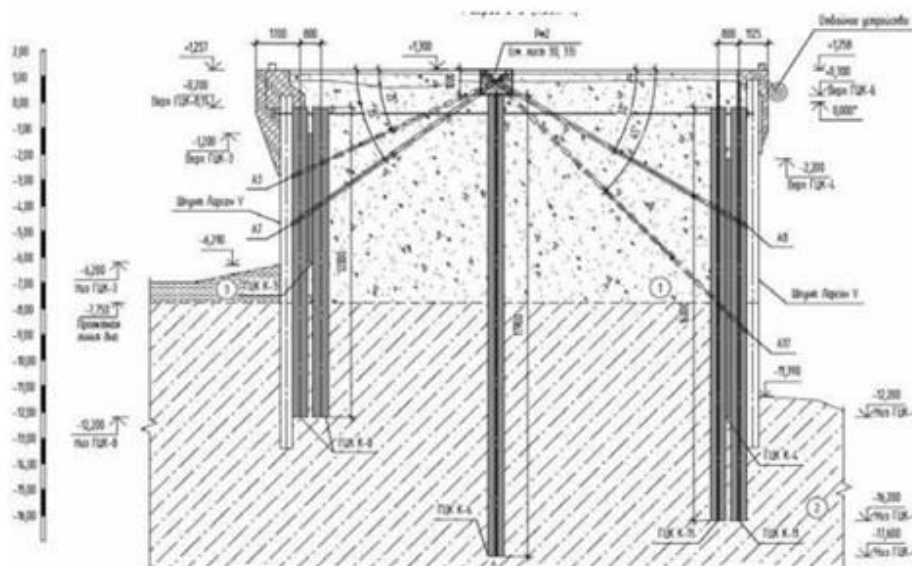


Рис. 2. Характерный разрез [13]

Fig. 2. Characteristic cross section [13]

Пирс 11А в Сан-Диего, Калифорния [14]. В результате образования полостей в грунте обратной засыпки перед подпорной стеной пирса № 11 в Сан-Диего, а также частичного разрушения деревянных свай, расположенных непосредственно под основанием железобетонной подпорной стены, произошли проседание и локальное разрушение асфальтового покрытия. Для восстановления несущей способности деревянных свай и заполнения образовавшихся пустот была применена двухкомпонентная технология струйной цементации грунтов, которая позволила выполнить грунтоцементные колонны большого диаметра в массиве грунта, состоящего из песка с редкими включениями булыжника.

Перед производством основного этапа были выполнены контрольные работы на двух опытных участках. Результаты опытных исследований подтвердили проектное решение, что позволило приступить к основной стадии устройства грунтоцементных колонн. В результате, с помощью струйной цементации грунтов (рис. 3) восстановлены несущая способность деревянных свай и грунто непроницаемость железобетонной шпунтовой стенки, а также заполнены образовавшиеся пустоты в грунте обратной засыпки.

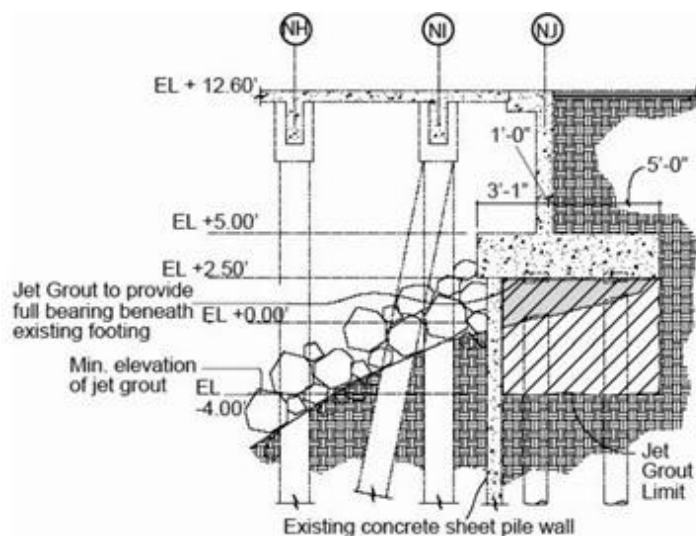


Рис. 3. Поперечное сечение основания железобетонной подпорной стены после устройства грунтоцементных колонн [14]

Fig. 3. Cross section of the base of a reinforced concrete retaining wall after the installation of cement columns [14]

Авиационная база ВМС, Корпус-Кристи, Техас [15]. Двухкомпонентная технология струйной цементации грунтов была применена и для восстановления шпунтовой стенки и повышения ее несущей способности на военно-морской авиабазе Корпус-Кристи. Устройство грунтоцементных колонн диаметром 4 м позволило стабилизировать грунт вокруг анкерных тяг и увеличить расчетное сечение шпунтовой стенки (рис. 4). В результате коэффициенты надежности по опрокидыванию тонкой стенки и скольжению основания составили 1,5 и 2,0 соответственно.

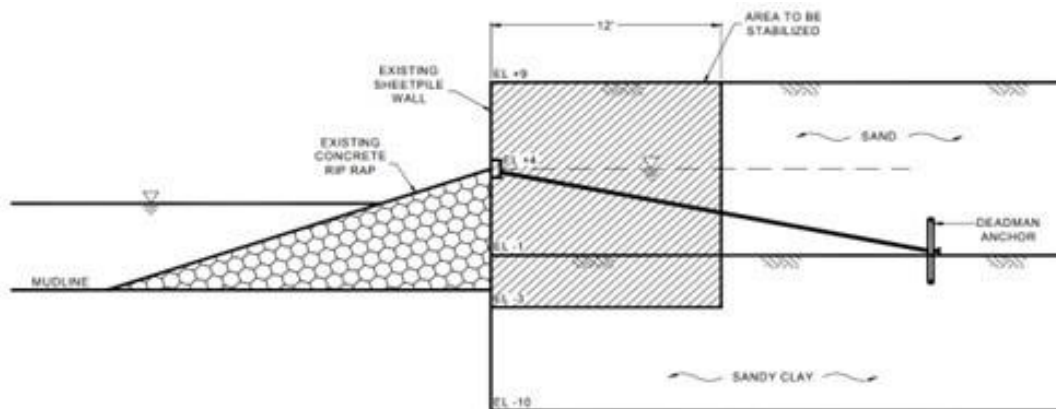


Рис. 4. Поперечное сечение шпунтовой стенки после устройства грунтоцементных колонн [15]
 Fig. 4. Cross section of a sheet pile wall after installation of soil-cement columns [15]

Бэттери-Парк-Сити, Нью-Йорк [15]. Передняя часть разгрузочной платформы, построенная для расширения полезного земельного пространства, была выполнена в виде шпунтовой стенки из деревянных свай. Долгое время моллюск *Teredo Navalis* воздействовал на деревянные сваи, создавая угрозу полного их разрушения. Вследствие этого было принято решение об устройстве стены толщиной 1 м из грунтоцементных колонн по технологии Jet-2 (рис. 5). Это позволило восстановить грунтонепроницаемость и несущую способность шпунтовой стенки, предотвратить ее разрушение.

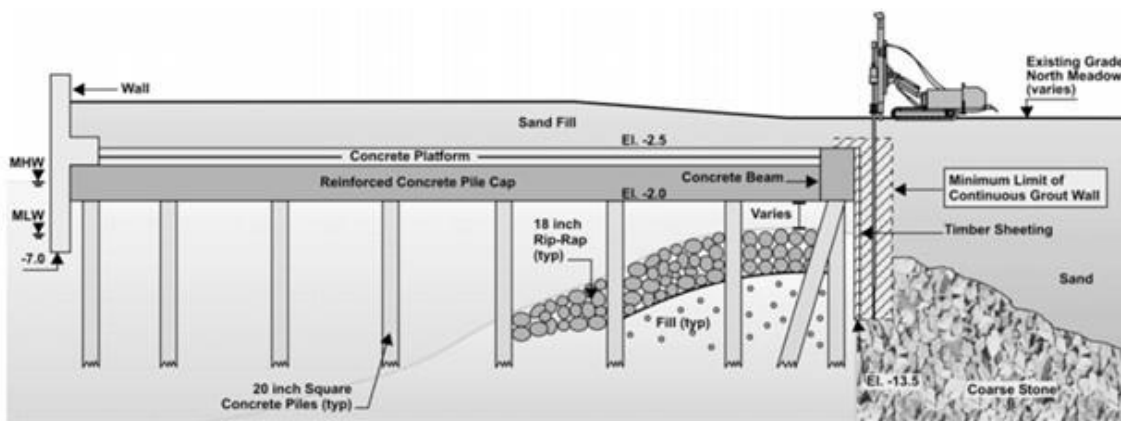


Рис. 5. Поперечное сечение участка для устройства грунтоцементных колонн [15]
 Fig. 5. Cross-section of the section of the installation of soil-cement columns [15]

Центр армейского резерва Рэтлснейк-Пойнт, Тампа, Флорида [15]. Разрушение материала, использованного для заполнения пространства между железобетонными шпунтовыми сваями ограждающей конструкции центра армейского резерва Рэтлснейк-Пойнт, привело к вымыванию грунта в воду и образованию пустот в теле грунта засыпки. Для восстановления грунтонепроницаемости было выполнено грунтоцементное ограждение по технологии Jet-2 (рис. 6).

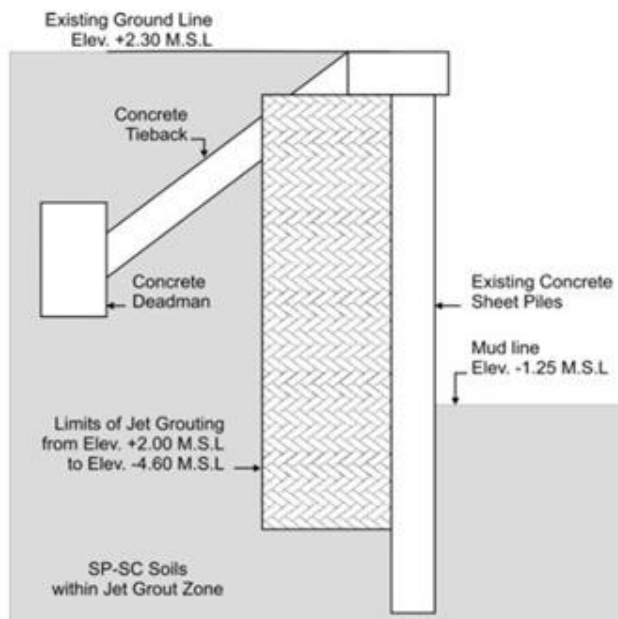


Рис. 6. Поперечное сечение шпунтовой стенки после устройства грунтоцементных колонн [15]

Fig. 6. Cross section of a sheet pile wall after installation of soil-cement columns [15]

Строительство искусственного острова для разработки нефтяного месторождения «Сухаревское» в Пермском крае [16]. Строительство искусственного острова вызвано необходимостью устройства технологической площадки из намывного песка с размерами в плане 250 на 250 м. Общая площадь технологической площадки составляет 54430 м². В основании искусственного острова залегает сильно разложившийся насыщенный водой торф. Исходя из опыта работы с подобным типом грунтов для обеспечения уплотнения торфов предложена методика закрепления грунтов по двухкомпонентной технологии струйной цементации грунтов.

В ходе производства работ по цементации грунтов осуществлялся постоянный контроль качества. Сплошность массива закрепленного грунта контролировалась бурением с отбором кернов. Образцы закрепленного грунта испытывались независимой лабораторией Горного института Уральского отделения РАН по стандартной методике определения предела прочности и модуля деформации материала.

Таким образом, технология Jet Grouting позволяет проводить ремонт и модернизацию причальных сооружений без остановки производственных процессов, а также производить строительно-монтажные работы в случае, когда перенос линии кордона в сторону акватории невозможен. Это приводит к сокращению времени строительства и экономии материальных средств.

Опыт применения грунтоцементных технологий в нашей стране и за рубежом показал, что струйная цементация грунтов применяется в гидротехническом строительстве уже на протяжении 20 лет. Но, несмотря на это, на территории нашей страны применение данной технологии в портовом строительстве только набирает популярность. Это объясняется высокой степенью неопределенности и непредсказуемости технологии, что обуславливает необходимость опережающего проведения этапа опытных работ. Так, на каждом из объектов, приведенных в обзоре, был создан опытный участок для подтверждения проектного решения. В нашей стране данное требование регламентировано СП 291.1325800.2017 и это связано с отсутствием рекомендаций по оценке (прогнозу) свойств грунтоцемента в различных грунтовых условиях. Поэтому актуальность применения данной технологии порождает необходимость дальнейших исследований грунтоцемента и самой технологии для целей гидротехнического строительства.

Экспериментальные исследования зависимостей механических свойств грунтоцемента из песчаных грунтов

Анализ опыта исследований и применения струйной цементации грунтов показал, что основным недостатком технологии струйной цементации грунтов является непредсказуемость результатов. Это связано с тем, что недостаточно изучены процессы формирования грунтоцемента с учетом влияния основных факторов:

- тип и свойства грунтов;
- расход цемента;
- технологические параметры процесса;
- динамика и характеристики процесса гидратации цемента и др.

В настоящее время практически отсутствуют достаточно апробированные методики прогнозирования механических характеристик грунтоцемента, и самым надежным способом их определения являются испытания отобранных образцов грунтоцемента из тела сооружения. Поэтому исследования грунтоцементных технологий продолжаются и имеют большое значение для строительной отрасли.

Одним из важнейших направлений исследований является экспериментальные исследования механических свойств грунтоцемента в зависимости от свойств исходных грунтов, расхода цемента и технологии производства работ.

Цель наших исследований – изучение влияния физических и механических характеристик песчаных грунтов, а также расход цемента на прочностные свойства грунтоцемента. Исследования проводились в лабораторных условиях с использованием поверенного оборудования.

Задачи исследований:

- изучение зависимости прочности на одноосное сжатие, модуля деформации, плотности образцов грунтоцемента от гранулометрического состава несвязного грунта;
- изучение зависимости прочности на одноосное сжатие, модуля деформации, плотности образцов грунтоцемента от расхода цемента.

Методика лабораторных исследований грунтоцемента. Образцы грунтоцемента цилиндрической формы изготавливались в лабораторных условиях из песка однородного гранулометрического состава различных фракций (крупности):

- гравелистый – >1,0 мм;
- крупный – от 0,5 до 1,0 мм;
- средней крупности – от 0,315 до 0,5 мм;
- мелкий – от 0,16 до 0,315 мм;
- пылеватый – <0,16 мм.

Опытные образцы грунтоцемента в лабораторных условиях изготавливались и испытывались по следующей схеме:

- 1) сушка и просеивание песка ситами разной крупности;
- 2) подготовка форм;
- 3) подготовка цементно-грунтового раствора;
- 4) послойная укладка смеси в формы с простукиванием для равномерной укладки и удаления пузырьков воздуха;
- 5) герметизация образца и его размещение в камеру нормального твердения бетона для набора прочности;
- 6) выдержка образцов в камере нормального твердения в течение стандартного периода времени;
- 7) изъятие образцов из формы без повреждения образца;
- 8) измерение размеров и массы образца;
- 9) испытание образца на прочность на одноосное сжатие с определением модуля деформации.

В ходе исследования было изготовлено 203 образца с различными вариациями таких параметров, как расход цемента на 1 м³ грунта (300, 450, 600 кг/м³), фракция исходного песчаного грунта и время твердения образца (14, 28, 56 сут.). Для экспериментов использован речной промытый песок, разделенный на условные фракции (см. таблицу).

Вариации параметров изготовления образцов
Variations of sample manufacturing parameters

Фракция песка	300 кг/м ³			450 кг/м ³			600 кг/м ³			Всего образцов
	14 сут.	28 сут.	56 сут.	14 сут.	28 сут.	56 сут.	14 сут.	28 сут.	56 сут.	
Пылеватый	-	7	-	-	-	-	-	-	-	7
Мелкий	-	7	-	-	-	-	-	-	-	7
Средней	7	7	7	7	7	7	7	7	7	63
Крупный	7	7	7	7	7	7	7	7	7	63
Гравелистый	7	7	7	7	7	7	7	7	7	63
Всего образцов	21	35	21	21	21	21	21	21	21	203

Испытания проводились на гидравлическом прессе SHIMADZU AG-Xplus, с контролем основных параметров испытаний: скорость нагружения, запись зависимости «сила-деформация» и пр.

Анализ результатов исследований. После проведения испытаний всех образцов грунтоцемента с помощью программного комплекса MS Excel была проведена статистическая обработка результатов. В ходе обработки вычислены доверительный интервал для каждой серии образцов и среднее значение прочности на одноосное сжатие. На основе этих данных получены интервалы с коэффициентом доверия 0,95, и образцы с прочностью, выходящей за данный интервал, были исключены из дальнейшего анализа. Такие же процедуры проведены и для модуля деформаций и плотности образцов грунтоцемента.

По результатам испытаний образцов проведен анализ зависимости прочности на одноосное сжатие, модуля деформации, плотности грунтоцемента от расхода цемента на 1 м³ и фракции исходного несвязного грунта.

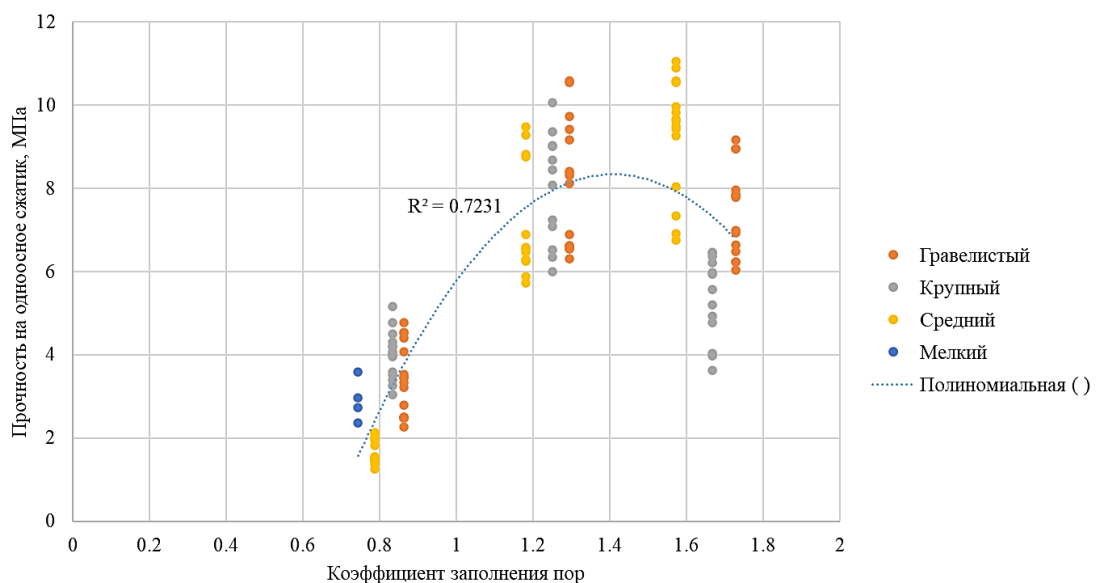


Рис. 7. График зависимости прочности на одноосное сжатие от коэффициента заполнения пор

Fig. 7. Graph of the dependence of uniaxial compression strength on the pore filling factor

Для анализа результатов экспериментальных исследований введен параметр, характеризующий степень заполнения пор грунта цементным раствором (камнем) – **коэффициент заполнения пор (КЗП)** грунтоцемента, который определяется как отношение объема цементного раствора к общему объему пор в грунте.

Анализ зависимости прочности на одноосное сжатие от коэффициента заполнения пор (рис. 7) показывает, что наибольшей прочностью обладают образцы с коэффициентом заполнения пор от 1,2 до 1,6, а по построенной линии тренда можно сделать вывод, что оптимальным КЗП будет значение 1,4. При меньших значениях КЗП грунтоцемент не набирает максимальную прочность, так как поры полностью не заполнены цементным камнем, а при больших значениях КЗП цементный камень в избытке и нарушает контакт между прочными частицами песка.

Анализ зависимости модуля деформации грунтоцемента от коэффициента заполнения пор показывает, что наибольшее значение модуля деформации образцов грунтоцемента также наблюдается при значении КЗП, близком к 1,4 (рис. 8).

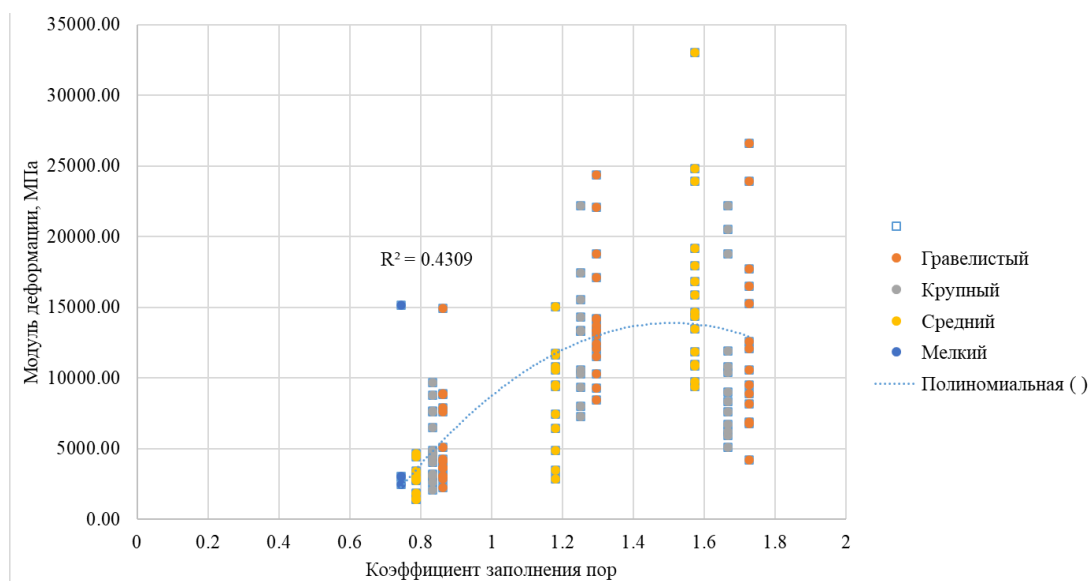


Рис. 8. График зависимости модуля деформации грунтоцемента от коэффициента заполнения пор

Fig. 8. Graph of the dependence of the deformation modulus of the soil-cement on the pore filling coefficient

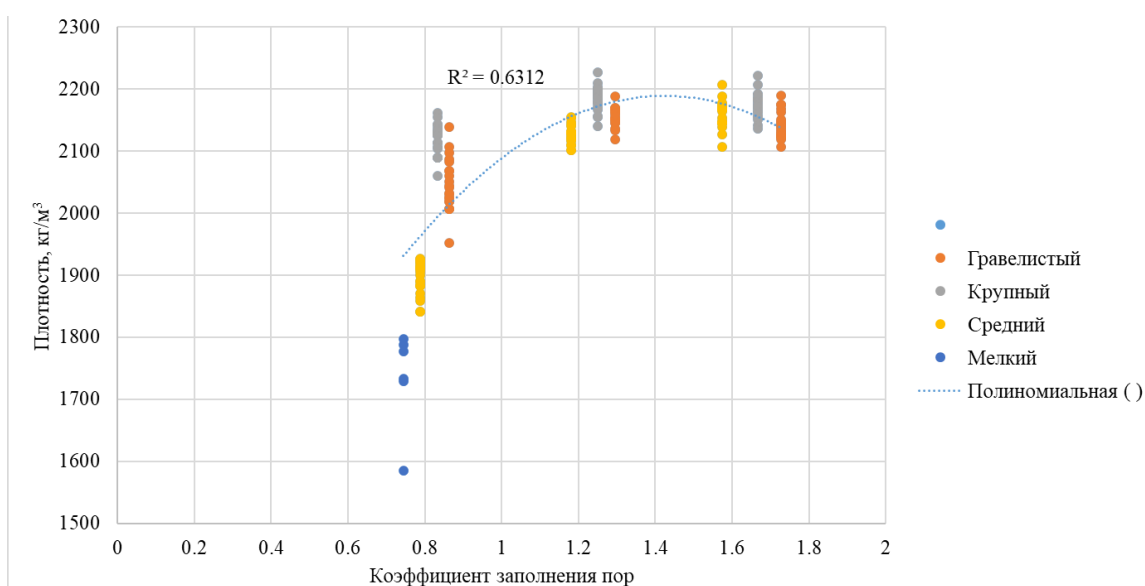


Рис. 9. График зависимости плотности грунтоцемента от коэффициента заполнения пор

Fig. 9. Graph of the dependence of the density of the soil-cement on the pore filling factor

График зависимости плотности грунтоцемента от КЗП показывает, что максимальное значение плотности достигается при значении КЗП, равном также 1,4, а затем оно снижается (рис. 9).

Таким образом, на основе выполненных лабораторных исследований можно считать, что степень заполнения пор цементным раствором является значимым параметром для оценки физических, механических и прочностных свойств грунтоцемента.

Заключение

1. По результатам исследований прочности, модуля деформаций и плотности грунтоцемента, приготовленного в лабораторных условиях на основе однородного песка одной фракции, можно отметить значительное влияние на их значения степени заполнения пор цементным раствором (камнем). На этой основе следует принять этот показатель за один из основных критериев оценки физических, механических и прочностных свойств грунтоцемента на основе однородных песков одной фракции.

2. Можно предполагать, что эта тенденция будет справедлива и для природных несвязных грунтов различного гранулометрического состава и что степень заполнения пор цементным раствором можно использовать в качестве критерия для оценки их свойств.

3. Поэтому исследования свойств грунтоцемента на основе природных песков необходимо выполнить, оценив их свойства с помощью предложенного критерия. Это будет способствовать разработке обоснованных рекомендаций для прогнозирования фактических свойств грунтоцемента на основе песчаных (несвязных) грунтов.

4. Для дальнейшего развития применения грунтоцементных технологий в гидротехническом строительстве также целесообразно провести исследования в следующих направлениях:

- продолжить исследования физических, прочностных и механических свойств грунтоцемента на основе песка мелкой и пылеватой фракции;
- для проверки выдвинутой гипотезы выполнить комплекс исследований по оценке влияния расхода цемента на прочностные и механические свойства грунтоцемента на основе природных несвязных грунтов;
- исследовать грунтоцемент из слабых глинистых грунтов и илов, что особенно важно для гидротехнического строительства.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А.Т. Беккер, А.А. Красилов, А.А. Зверев, Е.В. Чигров – разработка концепции и дизайна исследования, сбор данных, анализ и интерпретация результатов, подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

A.T. Bekker, A.A. Krasilov, A.A. Zverev, E.V. Chigrov – development of the concept and design of the study, data collection, analysis and interpretation of the results, preparation and editing of the text. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. Москва: Стройиздат, 2010. 165 с.
2. Котова Я.Д., Аксенова С.М. Современная технология струйной цементации грунтов "Jet Grouting" // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2018: материалы 7-й Международной молодежной научной конференции. Курск, 13–14 ноября 2018 г.: в 4 т. Курск: Университетская книга, 2018. Т. 3. С. 163–166. EDN: YTPZYD
3. Wang Z.F., Shen S.L., Ho C.E., Kim Y.H. Jet Grouting Practice: an Overview // Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 44, № 4. P. 88–96.
4. Njock P.G.A. Chen J., Modoni G. et al. A review of jet grouting practice and development // Arabian Journal of Geosciences. 2018. Vol. 11. P. 459–466. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3809-7>

5. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet grouting technology, design and control. CRC, New York, 2014.
6. Дмитриев Н.В., Попов А.В., Малышев Л.И., Хасин М.Ф. Струйная технология сооружения противофильтрационных завес // Гидротехническое строительство. 1980. № 3. С. 33–35.
7. Малышев Л.И., Хасин М.Ф., Бройд И.И. О способе сооружения противофильтрационных завес с образованием прорези водовоздушной струей // Прогрессивные решения в проектировании и производстве гидротехнических работ. Труды Гидропроекта. Москва, 1974. С. 27–36.
8. Корольков В.Н., Смородинов М.И., Сухарев С.Г., Федоров Б.С. Струйная технология устройства несущих конструкций в грунте // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1984. № 5. С. 19–26.
9. Маковский Л.В., Меркин В.Е. Струйная цементация грунтов при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов. Москва: ТИМР, 1994.
10. Смородинов М.И., Корольков В.Н. Струйная технология устройства противофильтрационных завес и несущих конструкций // Обзорная информация. Москва: ВНИИМС, 1984.
11. Kutzner C. Grouting of rock and soil. London: CRC Press, 2020. 282 p. <https://doi.org/10.1201/9781003077893>
12. Горцуга Р.Ю., Лисовский С.В. Применение современных методов реконструкции причальных сооружений типа больверк без вывода из эксплуатации // Гидротехника XXI век. 2020. № 3(43). С. 49–51.
13. Гладков И.Л., Жемчугов А.А. Опыт применения технологии струйной цементации грунтов при реконструкции причальных сооружений // Гидротехника. 2019. № 4. С. 58–59.
14. Aroga S., Kinley J. Jet Grouting for the Re-support of Pier 11A in San Diego, CA // Coastal Engineering Practice / ASCE. 2011. P. 25–27. [https://doi.org/10.1061/41190\(422\)6](https://doi.org/10.1061/41190(422)6)
15. Dennis W. B. The Utilization of Jet Grouting and Soil Mixing Methods to repair and Support Bulkhead Structures // Port Development in the Changing World Proceedings of the Ports 2004. Conference American Society of Civil Engineers. Houston, 2004. [https://doi.org/10.1061/40727\(2004\)96](https://doi.org/10.1061/40727(2004)96)
16. Зуев С.С., Рубцова С.С. Применение специальных геотехнических технологий в портовом строительстве // Гидротехника. 2020. № 4(61). С. 64–69. EDN: JLMKKK

REFERENCES

1. Malinin A.G. Jet Grouting. Moscow, Stroyizdat, 2010. 165 p. (In Russ.). <https://jet-grouting.tilda.ws/publications> (accessed: May 8, 2024).
2. Kotova Ya.D., Aksenova S.M. Modern technology of jet cementation of soils "Jet Grouting". *Generation of the Future: A View of Young Scientists – 2018*. Kursk, Closed Joint-Stock Company "University Book", 2018. Vol. 3. P. 163–166. (In Russ.).
3. Wang Z.F., Shen S.L., Ho C.E., Kim Y.H. Jet Grouting Practice: an Overview. *Geotechnical Engineering*, 2013, vol. 44, no. 4, pp. 88–96. (accessed: June 19, 2024).
4. Njock P.G.A., Chen J., Modoni G. et al. A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11, pp. 459–466. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3809-7>
5. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet grouting technology, design and control. CRC, New York, 2014.
6. Dmitriev N.V., Popov A.V., Malyshev L.I., Khasin M.F. Jet technology for the construction of anti-seepage curtains. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo*, 1980, no. 3, pp. 33–35. (In Russ.).
7. Malyshev L.I., Khasin M.F., Broyd I.I. On the method of construction of anti-filtrating curtains with the formation of a water-air stream slot. *Proceedings of Hydroproject*. Moscow, 1974, pp. 27–36. (In Russ.).
8. Korol'kov V.N., Smorodinov M.I., Suharev S.G., Fedorov B.S. Jet technology for the construction of bearing structures in the ground. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1984, no 5, pp. 19–26. (In Russ.).
9. Makovsky L.V., Merkin V.E. Jet Cementation of Soils in the Construction of Transport Tunnels and Metros. Moscow, TIMR Publ., 1994. (In Russ.).
10. Smorodinov M.I., Korol'kov V.N. Jet technology for the device of impervious curtains and bearing structures. Overview information. Moscow, VNIIMS Publ., 1984. (In Russ.).
11. Kutzner C. Grouting of rock and soil. London, CRC Press, 2020. 282 p. <https://doi.org/10.1201/9781003077893>
12. Gortsuga R.Yu., Lisovsky S.V. Application of modern methods of reconstruction of berthing structures of the bolverk type without withdrawal from operatio. *Gidrotekhnika XXI century*, 2020, no. 3(43), pp. 48–51. (In Russ.).

13. Gladkov I.L., Zhemchugov A.A. Experience in the application of the technology of jet cementation of soils in the reconstruction of berthing structures. *Gidrotechnica*, 2019, no. 4, pp. 58–59. (In Russ.).
14. Arora S., Kinley J. Jet Grouting for the Re-support of Pier 11A in San Diego, CA. *Coastal Engineering Practice / ASCE*, 2011, pp. 25–27. [https://doi.org/10.1061/41190\(422\)6](https://doi.org/10.1061/41190(422)6)
15. Dennis W. B. The Utilization of Jet Grouting and Soil Mixing Methods to repair and Support Bulkhead Structures. *Port Development in the Changing World Proceedings of the Ports 2004 Conference American Society of Civil Engineers*. Houston, 2004. [https://doi.org/10.1061/40727\(2004\)96](https://doi.org/10.1061/40727(2004)96)
16. Zuev S.S., Rubtsova S.S. Application of special geotechnical technologies in port construction. *Gidrotechnica*, 2020, no. 4(61), pp. 64–69. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Беккер Александр Тевьевич – доктор технических наук, профессор, профессор Департамента морских арктических технологий Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация, bekker.at@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2899-7995>

Alexander T. Bekker – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Marine Arctic Technologies, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, bekker.at@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2899-7995>

Красилов Андрей Александрович – магистрант Департамента морских арктических технологий Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация, krasilov.aa@students.dvfu.ru

Andrey A. Krasilov, Master Student of the Department of Marine Arctic Technologies, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, krasilov.aa@students.dvfu.ru

Зверев Антон Андреевич – старший преподаватель Департамента морских арктических технологий Политехнического института, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация, zverev.aa@dvfu.ru

Anton A. Zverev, Senior Lecturer at the Department of Marine Arctic Technologies, Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation, zverev.aa@dvfu.ru

Чигров Евгений Викторович – главный инженер ООО «Дальинжстрой», Владивосток, Российская Федерация, cev@dvisk.ru

Evgeniy V. Chigrov, Chief Engineer of LLC «Dalinzhstroy», Vladivostok, Russian Federation, cev@dvisk.ru

Статья поступила в редакцию / Received: 08.06.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 14.06.2024.

Принята к публикации / Accepted: 14.06.2024.