

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 3 / 2025, Vol. 12, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2025.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS325.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS325 (<https://doi.org/10.15862/05SATS325>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 691

Принципы и методы укрепления, стабилизации грунтов естественных оснований

¹Войтих А.Н., ^{1,2}Тюрюханов К.Ю.

¹ООО «Газпромнефть — Промышленные инновации», Санкт-Петербург, Россия

²ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия

Автор, ответственный за переписку: Тюрюханов Кирилл Юрьевич, e-mail: Turuchanov.k.u@list.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные методы и способы укрепления, повышения прочностных характеристик и стабильности грунтов основания, широко применяемых в инженерно-строительной практике. Основной целью исследования является систематизированный анализ существующих технологических решений, позволяющих повысить прочность и устойчивость грунтов, используемых в основаниях зданий и сооружений различного функционального назначения. Кроме того, авторы представляют обзор передовых научно-технических достижений в сфере укрепляющих мероприятий, акцентируя внимание на перспективных направлениях развития технологий, таких как биологические методы, основанные на внедрении микроорганизмов и различных представителей флоры (ботаники) улучшающих структуру и свойства почвенного массива, а также новые строительные материалы и добавки, способные значительно усилить структурные характеристики слабых и нестабильных грунтов. Описаны физико-механические и химические процессы, происходящие при уплотнении, механическом

перемешивании, термическом закреплении, оттаивании, замораживании, электроосмосе, понижении уровня грунтовых вод, замачивании, силикатизации, цементации, смолообразовании, карбонизации, битумизации, электрохимическом закреплении, грунтозамещении, армировании, с помощью удерживающих конструкций, облегченных оснований и дренажных систем, а также инновационных методов, включающих биогрунтовое укрепление. Приведены примеры успешного применения этих методов на различных объектах строительства. Особое внимание уделено охвату наибольшего числа технологий улучшения состояния грунтов оснований. Рассмотрены механические, физические, химические и конструкционные способы закрепления и стабилизации грунтов оснований. Сделаны выводы о важности учета особенностей геологического строения участка и условий эксплуатации сооружения при выборе метода улучшения грунтов оснований.

Ключевые слова: грунт; укрепление грунта; несущая способность; стабилизация грунта; основание

Principles and methods for strengthening and stabilization of natural foundation soils

¹Aleksey N. Voytikh, ^{1,2}Kirill Yu. Tyuryukhanov

¹Gazpromneft — Industrial Innovations Limited Liability Company, Saint Petersburg, Russia

²Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Prianishnikov, Perm, Russia

Corresponding author: Kirill Yu. Tyuryukhanov, e-mail: Turuchanov.k.u@list.ru

Abstract. The article considers the main methods and techniques for strengthening, improving the strength characteristics and stability of foundation soils, widely used in engineering and construction practice. The main goal of the research is a systematic analysis of existing technological solutions that allow increasing the strength and stability of soils used in foundations of buildings and structures for various functional purposes. Furthermore, the authors provide a review of advanced scientific and technical achievements in the field of strengthening measures, focusing on promising directions of technology development, such as biological methods based on the introduction of microorganisms and various representatives of flora (botany) that improve the structure and properties of the soil mass, as well as new construction materials and additives capable of significantly enhancing the structural characteristics of weak and unstable soils. The physical-mechanical and chemical processes occurring during compaction, mechanical mixing, thermal stabilization, freezing, thawing, electroosmosis, lowering of the

groundwater level, soaking, silicization, cementation, resin formation, carbonization, bituminization, electrochemical stabilization, soil replacement, reinforcement, using retaining structures, lightweight foundations and drainage systems, as well as innovative methods, including bio-soil strengthening, are described. Examples of successful application of these methods at various construction sites are provided. Particular attention is paid to covering the greatest number of technologies for improving the condition of foundation soils. Mechanical, physical, chemical and structural methods of foundation soil stabilization and strengthening are considered. Conclusions are drawn about the importance of considering the features of the geological structure of the site and the operating conditions of the structure when choosing a method for improving foundation soils.

Keywords: soil; soil strengthening; soil stabilization; bearing capacity; foundation

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В области строительства оснований и фундаментов, работа грунтов имеет некоторую специфику по сравнению с работой материалов, из которых выполняют строительные конструкции, в том числе и фундаменты. Грунты оснований обладают малой прочностью и большой деформативностью. Прочность грунтов в сотни и тысячи раз меньше прочности камня, бетона, железобетона и металла, деформативность в десятки тысяч раз больше упомянутых материалов. Грунты оснований способны воспринимать только сжимающие и сдвигающие усилия и практически не работают на растяжение. В большинстве случаев грунты состоят из трех компонентов: твердых частиц, воды и газов. Соотношение этих компонентов обуславливает многие свойства грунта. Прочностные и деформационные свойства оснований в значительной степени зависят от пористости и величины сцепления между собой частиц скелета грунта воспринимающего нагрузку от сооружения. Следовательно, увеличить прочность и уменьшить сжимаемость грунтов можно как за счет уменьшения пористости грунта, так и путем увеличения сцепления между их частицами. Для водонасыщенных грунтов улучшение прочностных и деформационных свойств может произойти только в процессе отжатия из них определенного объема вода.¹

К сложным грунтовым условиям относят набухающие, просадочные, мягкие, органические и торфяные грунты, карстовые отложения с карстовыми воронками и различные техногенные грунты из побочных продуктов деятельности человека [1].

Пучинистые грунты, также известные как набухающие и усыхающие грунты, по своей природе являются одними из самых проблемных или сложных грунтов при строительстве зданий и сооружений. Они значительно меняют свой объем при набухании и усыхании, эти изменения в грунте приводят к неравномерным усадкам оснований инженерных конструкций, что соответственно может привести к аварийным ситуациям и создает угрозу обрушения конструкции. Набухающие грунты содержат особые глинистые минералы из группы смектитов, которые могут поглощать большое количество воды, создавая значительное давление набухания в массиве грунта. В большей степени на

¹ Мангушев Р.А. и др. Методы подготовки и устройства искусственных оснований // Учебное пособие — М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. С. 266.

Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Учебник. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 416 с.

Берлинов М.В. Основания и фундаменты // Учебник. 4-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 320 с.

возникновение неблагоприятных условий в подстилающих слоях фундаментов конструкций, влияет потеря несущей способности, в результате множества факторов, которые делят на природные и искусственные, но не ограничиваясь ими, основными из них являются: перенасыщение грунтов основания водой; частичное вымывание грунта или суффозия; вспучивание, проседание, смещение грунтов оснований; ошибки проектирования и строительства [2–4].

Решение этих проблем требует преобразования грунта основания, для увеличения его несущей способности, путем, условно разделим их на группы — физические, химические, механические и конструкционные воздействия.

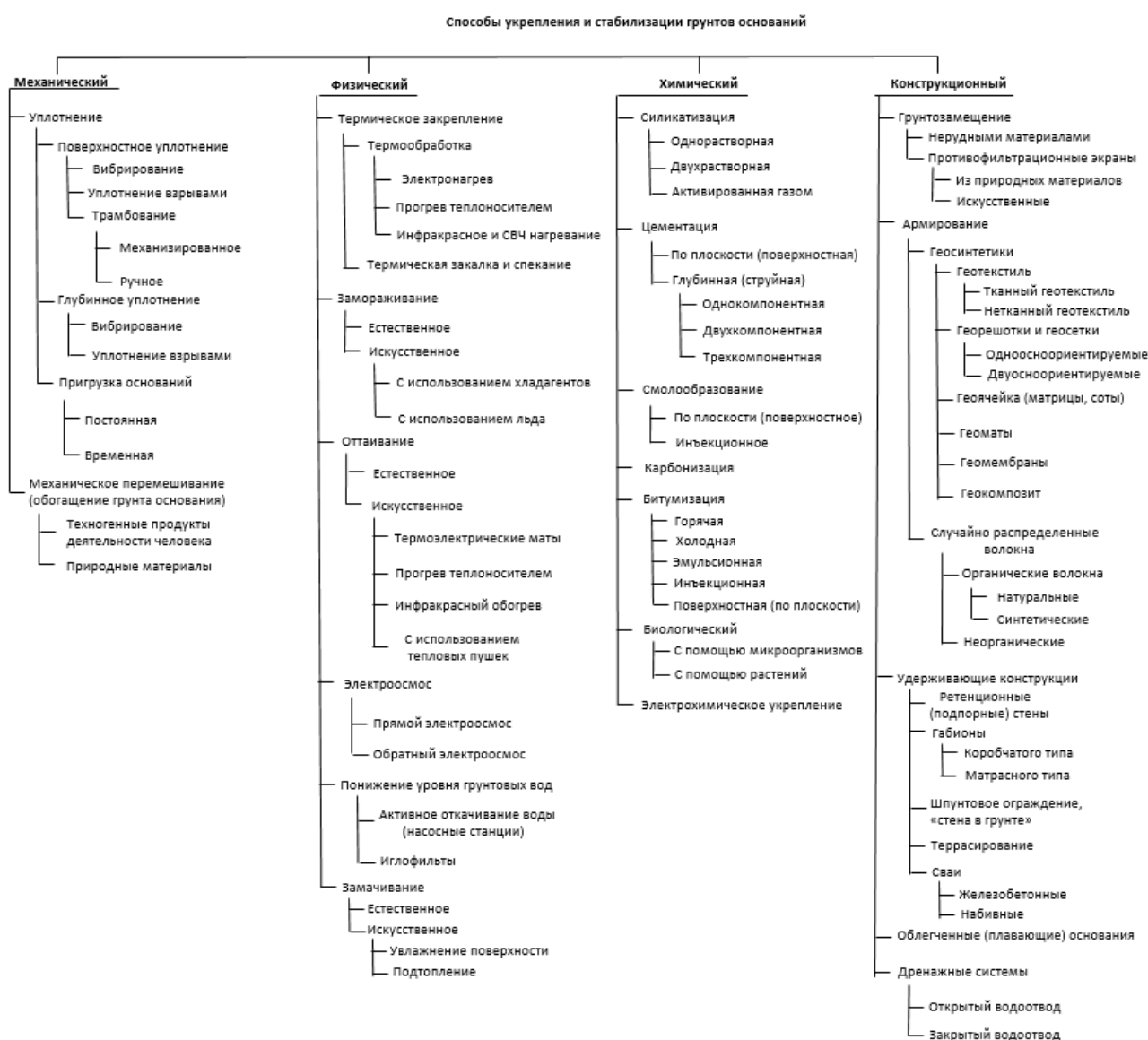


Рисунок 1. Способы укрепления и стабилизации грунтов оснований (разработано авторами)

Figure 1. Methods for strengthening and stabilization of foundation soils (developed by the authors)

Материалы и методы: в этом исследовании для поиска существующей литературы использовались: научные электронные библиотеки (такие как eLIBRARY), научно технические и профильные библиотеки, национальная электронная библиотека.

Цель работы: обобщить и актуализировать имеющиеся литературные данные по способам и методам укрепления грунтов оснований.

Основная часть: для повышения несущей способности и снижения деформаций грунтовых оснований существует множество способов их преобразования [5], на рисунке 1 изображены основные способы, по мнению авторов, применяемые в мировой практике. При этом в данной статье мы не рассматриваем узконаправленные и специализированные способы, предназначенные для частных случаев.

Механические способы

Mechanical methods

Рассмотрим первую группу — механические способы воздействия на грунт. На рисунке 1 представлены основные способы этой группы: уплотнение грунтов основания и изменением физико-механических свойств грунтов оснований за счёт введения и смешения различных материалов с грунтом, улучшая его гранулометрический состав.

Улучшение физико-механических характеристик грунта основания можно добиться уплотнением, тем самым уменьшить его пористость и увеличить несущую способность [6; 7]. Разделяют три основных вида поверхностного уплотнения: вибрированием, трамбованием и взрывами. Поверхностное виброуплотнение осуществляется в основном с использованием виброкатков и виброплит, масса которых доходит до 20 тонн и чистоте колебаний до 3 000 в минуту.² Уплотнение укаткой применяют для всех видов насыпных, песчаных, глинистых, крупнообломочных грунтов и аналогичных им отходов производства на свободных участках и при большом фронте работ.³ Вибрационное уплотнение является наиболее широко применяемым методом при строительстве автомобильных и железнодорожных насыпей, а также при возведении дамб. С усовершенствованием вибрационных катков и повышением требований к качеству уплотнения мощность и вес вибрационных катков постоянно увеличиваются. Вес обычного катка увеличился с 8 тонн в прошлом до более чем 18 тонн в настоящее время.

² Берлинов М.В. Основания и фундаменты // Учебник. 4-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 320 с.

³ Мангушев Р.А. и др. Методы подготовки и устройства искусственных оснований // Учебное пособие — М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. С. 266.

Результаты исследования показывают, что пиковая частота вибрации, создаваемая вибрирующим катком на подстилающем слое, приблизительно соответствует частоте вибрации. Эффективное расстояние воздействия вибрации варьируется от 10 до 14 м, а горизонтальная радиальная вибрация сильнее, чем вертикальная и горизонтальная окружная. Вибрация каменного основания затухает медленнее всего и распространяется дальше всего [1]. Трамбование грунтов оснований бывает ручным, что обуславливается стесненными условиями производства работ, экономической целесообразностью и небольшими объемами, и механизированным, применяется при большой просадочности грунтов и характеризуется приложением периодической нагрузки на грунт основания до приобретения требуемой плотности и несущей способности. Метод взрывной замены (поверхностные взрывы) — это высокоэффективный способ укрепления глубоких слоев илистых грунтов, который приводит к оседанию засыпки после взрыва [8]. Основными способами глубинного уплотнения грунтов являются вибрирование и глубинные взрывы. Глубинное уплотнение грунтов вибраторами, применяется в рыхлых песчаных грунтах на глубину более 1,5 метров, с использованием грузоподъемных механизмов и глубинных вибраторов которые погружаются в грунт под собственным весом [9]¹, глубинные взрывы характеризуются высвобождением большого количества кинетической энергии, часть которой рассеивается при образовании кратера, а остальная преобразуется в ударную волну. Авторами [10] разработаны технологии, которые значительно сокращают время фильтрационного уплотнения лессовых просадочных массивов при их уплотнении глубинными взрывами. Согласно разработанной технологии, в массиве увлажнённого просадочного грунта устанавливаются взрывные заряды на разных глубинах с последующим поочередным подрывом. Количество серий взрываемых зарядов принимается от 3 до 5. Продолжительность периода между взрывами, в зависимости от состава грунта, составляет от 1 до 15 дней. Время уплотнения сокращается в 4–5 раз. Постоянной и временной (предпостроечной) пригрузкой оснований пользуются для консолидации слабых и сильносжимаемых водонасыщенных грунтов. Предпостроечное уплотнение оснований особенно рационально при возведении сооружений, имеющих развитую площадь опирания на грунт и рекомендуются в случаях, когда толщина слоёв водонасыщенных сильносжимаемых грунтов превышает 3 метра.³

Обогащение грунтов оснований как минеральными так и техногенными отходами деятельности человека получило наибольшее распространение при укреплении оснований обширной площади, в основном в дорожном строительстве с применением дорожных ресайклеров. Отмечено отсутствие четких рекомендаций по проектированию составов таких смесей в нормативной документации Российской

Федерации [11]. За рубежом ряд исследователей проводят разработки способов утилизации завершивших свой срок службы строительный материал и различных его модификаций при укреплении и стабилизации слабых грунтов [12]. По результатам исследований [13] наименьшее значение модуля деформации экспериментальных участков соответствует содержанию щебня в грунтощебеночной смеси 40 % по объему смеси, а максимальное при 60 %.

Физические способы

Physical methods

Вторая условная группа — физические способы укрепления грунтов оснований, которая включает в себя: термическое закрепление, замораживание и оттаивание грунтов, электроосмос, замачивание и понижение уровня грунтовых вод.

Обзор литературы показывает, что термическая обработка грунтов с содержанием глинистых частиц улучшает их физико-механические свойства. Степень эффекта применения термообработки зависит от типа грунта и принятых режимов воздействия на грунт. Установлены зависимости, что температура воздействия влияет на потерю влаги и изменение минералогического состава, а время охлаждения влияет на развитие трещин, время выдержки влияет на степень консолидации [14]. При термическом укреплении происходит изменение физико-механических свойств грунтов под воздействием высоких температур в течении некоторого времени. Термические способы закрепления лесовых грунтов позволяют полностью ликвидировать их просадочные свойства и одновременно повысить несущую способность грунтов на глубину 10–15 метров. При нагревании суглинков в диапазоне 300–400⁰С отмечается существенное улучшение прочностных характеристик, а 500–1 000⁰С происходит спекание [15]. Прогрев и спекание теплоносителем грунта обычно проводится через пробуренные в толще грунтов скважины диаметром 0,1–0,2 метра на глубину до 20 метров. Термическая обработка производится до подстилающего слоя непросадочного грунта образуя грунтовые сваи. В качестве источников тепла используются все виды топлива, в том числе электроэнергия. С помощью термического закрепления можно немедленно прекратить процесс осадок, в том числе аварийных, вызванных увлажнением грунтов под нагрузкой.⁴ Одним из редко

⁴ Мангушев Р.А. и др. Методы подготовки и устройства искусственных оснований // Учебное пособие — М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. С. 266.

П.А. Коновалов Основания и фундаменты реконструируемых зданий // Учебник. 4-е изд., перераб. И доп. — М: ВНИИТПИ 2000. — 320 с.

встречающихся, но перспективных решений при укреплении грунтов является использование мобильных установок сверхвысоких частот или инфракрасного излучения, нагревающих грунт до стадии плавления [16].

В настоящее время в качестве способов улучшения механических свойств грунтов при использовании оснований по принципу I применяется искусственное замораживание, а при использовании оснований по принципу II — искусственное оттаивание с последующим укреплением. Мероприятия по замораживанию грунтов не рекомендуется применять для оттаявших пучинистых грунтов в связи с возможными деформациями оснований, возникающими при замерзании грунтов [17]. При классическом укреплении грунтов замораживанием создается временное ледогрунтовое ограждение. Технология искусственного замораживания неустойчивых и обводненных грунтов, традиционно используется в подземном строительстве, и характеризуется агрессивным воздействием на массив грунта, который при замораживании испытывает деформации пучения, а при оттаивании значительные оседания [18]. Замораживание — окаменение водонасыщенных грунтов применяют для проходки в нем выработки, удержание откосов, траншей, подтоплений и затоплений котлованов, предотвращения оттаивания вечномерзлых грунтов [19–21].⁵ При строительстве на многолетнемерзлых грунтах в зависимости от конструктивных и технологических особенностей зданий и сооружений, инженерно-геокриологических условий и возможности целенаправленного изменения свойств грунтов основания применяется II принцип использования многолетнемерзлых грунтов в качестве основания, использование оттаявшего либо в оттаивающем состоянии (с их предварительным оттаиванием на расчетную глубину до начала возведения сооружения или с допущением их оттаивания в период эксплуатации сооружения).⁶

Электроосмос это эффективный метод обезвоживания грунтов с высокой сжимаемостью и содержанием влаги. Электроосмос это устоявшийся метод, который был исследован многими учёными ещё сто лет назад. Факторами, влияющими на эффективность электроосмотического уплотнения, являются тип электрода, градиент напора воды, смена полярности, прерывистость тока и продолжительность обработки. В качестве электродов используются медь, низкоуглеродистая сталь и нержавеющая сталь в различных формах. Электрические поля, воздействующие на массу глинистого грунта, приводят к электролизу, переносу веществ путём диффузии, ионной миграции, электроосмосу и электрофорезу. Реакции переноса, адсорбции, осаждения и растворения

⁵ Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Учебник. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 416 с.

⁶ СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

являются основными механизмами, влияющими на процесс электроосмотического укрепления. Сила тока является одним из важных факторов, влияющих на энергопотребление и дренажный эффект метода [22–24]. В 1992 году было предложено использовать концепцию электроосмоса для удаления тяжелых металлов из почвы. Последующие эксперименты и исследования подтвердили эффективность метода в очистке загрязненных почв и отложений [25].

Понижение грунтовых вод иглофильтрами это метод временного водопонижения (водоотведения), который применяется для осушения грунта на строительных площадках перед началом работ. Этот способ часто используется для укрепления слабых водонасыщенных грунтов основания, когда необходимо снизить уровень грунтовых вод, чтобы обеспечить несущую способность основанию или ограничить, предотвратить попадание грунтовых вод в котлован. Иголфильтры как правило делятся на легкие иглофильтровые установки, эжекторные иглофильтровые установки, системы скважин оборудованных глубинными насосами и представляют собой металлические трубы с перфорированными отверстиями, через которые вода откачивается насосами. Иглы погружаются в грунт на нужную глубину, и затем подключаются к вакуумному насосу, который создает разрежение внутри системы. В результате вода поднимается вверх по трубам и удаляется с участка. При укреплении грунтов оснований дренаж иглофильтрами особенно полезен, поскольку позволяет стабилизировать основание, снизив давление воды и улучшая механические свойства грунта. Это делает возможным строительство на участках с высоким уровнем грунтовых вод или на слабых грунтах. Наиболее экономически оправданным способом является устройство зумпфов (приямков) для сбора поверхностных и грунтовых вод на дне котлована с последующей откачкой воды за пределы котлована, но он целесообразен в грунтах с малым притоком воды (до $0,08 \text{ м}^3/\text{ч}$ с 1 м^2 поверхности). Применение вертикальных дрен с сердечником выполненным из специального пластика, который защищён геотекстильной оболочкой от загрязнения сердечника обычно применяют совместно с пригрузкой основания. Принцип работы такого водоотвода заключается в создании избыточного давления в массиве грунта, под действием которого вода по капиллярам поднимается на поверхность [26].⁷

Уплотнение грунтов предварительным замачиванием рекомендуется применять для уплотнения просадочных грунтов. Сущность уплотнения грунтов предварительным замачиванием сводится к тому, что при

⁷ Квачев В.Н. Водоснабжение и инженерные мелиорации / учебное пособие / В.Н. Квачев, Е.В. Леонтьева. — Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. — 276 с.

Юдина А.Ф. Производство работ нулевого цикла / учебное пособие / А.Ф. Юдина. — Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2021. — 96 с.

замачивании частицы грунта напитываются водой и постепенно происходит ослабление их структурных связей с последующей просадкой уплотняемого массива под собственным весом. Замачивание может-быть как естественным в виде осадков, так и искусственным, поверхностным розливом воды для придания оптимальной влажности грунту с последующим уплотнением различными грунтоуплотняющими механизмами.³

Химические способы

Chemical methods

Химические способы укрепления грунтов оснований относятся к 3 группе и включает в себя: силикатизацию, цементацию, смолизацию, карбонизацию, битумизацию, электрохимическое укрепление, с применением биологических материалов.

Закрепление грунтов оснований методом силикатизации это один из способов улучшения физико-механических свойств слабых грунтов, чтобы повысить их несущую способность перед нагрузками от строительных конструкций или при восстановлении несущей способности грунта основания в процессе эксплуатации сооружений. Этот метод заключается в введении в грунт с помощью зондов инъекторов специальных растворов, содержащих силикат натрия (жидкое стекло) и другие химические реагенты, которые взаимодействуют с частицами грунта, образуя прочное соединение или с предварительной активацией грунта основания с помощью газа. Данный способ применяется для укрепления песков и просадочных макропористых грунтов. Установлено, что в грунтах с влажностью более 20 % по массе укрепление силикатизацией проводить не целесообразно, газовая активация грунта перед силикатизацией показывает себя эффективнее на 35–200 %, чем без нее, рекомендуется применять однорастворную силикатизацию в слабо дренирующих грунтах с коэффициентом фильтрации меньше 5 м/сутки, а двухрастворную силикатизацию в грунтах с фильтрацией больше 2 м/сутки [27].⁸

⁸ Мангушев Р.А. и др. Методы подготовки и устройства искусственных оснований // Учебное пособие — М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. С. 266.

Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Учебник. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 416 с.

Берлинов М.В. Основания и фундаменты // Учебник. 4-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 320 с.

П.А. Коновалов Основания и фундаменты реконструируемых зданий // Учебник. 4-е изд., перераб. И доп. — М: ВНИИТПИ 2000. — 320 с.

Юдина А.Ф. Производство работ нулевого цикла / учебное пособие / А.Ф. Юдина. — Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2021. — 96 с.

Улучшение несущей способности, инженерно-геологических, прочностных свойств грунта цементацией происходит за счет образования цементного камня — грунтобетона и бывает поверхностным, с применением грунтосмесительных механизмов и глубинным, с применением бурового инструмента или струйной (инъекционной) цементацией.

Набирает популярность способ комплексного холодного ресайклинга, используемого для укрепления и стабилизации грунтов при строительстве автомобильных дорог, аэродромов и площадных объектов, который характеризуется фрезерованием и перемешиванием грунта с цементирующими вяжущими для формирования прочного основания.

Методом струйной цементации закрепляются любые грунты.

Наибольшее распространение струйной цементации получили технологии: однокомпонентной (jet-1) — размыв грунта производится струей цементного раствора; двухкомпонентной (jet-2) — где дополнительно с цементным раствором используется энергия сжатого воздуха для увеличения условного радиуса закрепления; трехкомпонентной (jet-3) — разрушение грунта производится водной струей в искусственном воздушном потоке, а цементный раствор подается в виде отдельной струи.

Струйная цементация характеризуется образованием в массиве грунта грунтобетонных столбов или иных конфигураций воспринимающих на себя нагрузку сооружения.

Глубинная бурсмесительная технология представляет собой механическое измельчение грунта с последующим вводом цементного раствора или цемента в сухом состоянии. Известно два вида глубинного бурсмесительного укрепления, с устройством грунтоцементных колонн (до 40 метров) и объемного закрепления (до 7 метров).

Традиционные (на основе кальция) стабилизаторы, позволяют изменять свойства глинистых грунтов с помощью пяти различных процессов: гидратации, катионного обмена, флокуляции и агломерации и пуццолановой реакции.

Процесс катионного обмена, возникающий при смешивании стабилизатора с почвой, приводит к флокуляции и агломерации частиц, в результате чего в почве образуются более крупные частицы, которые характеризуются меньшей водопроницаемостью и пластичностью.

Этот процесс начинается сразу после смешивания стабилизатора с почвой и длится всего несколько часов.

Процесс гидратации занимает больше времени, иногда до 28 дней.

Кроме того, наличие ионов OH^- повышает уровень pH почвы, что способствует развитию пуццолановой реакции [28; 29].⁹

Технология и применяемое оборудование при закреплении грунтов оснований синтетическими смолами аналогична способу силикатизации. Следует отметить, что закрепление грунтов различными синтетическими смолами наиболее эффективно в лесовых грунтах и песках, с проникающей способностью воды 0,5–8 м/сутки, и содержанием глинистых частиц в нем до 2 %, pH водной вытяжки их грунта более 7,6. Прочность закрепленного грунта на сжатие зависит от количества вводимой смолы и гранулометрического состава грунта и варьируется 2–8 МПа.¹ Встречаются разработки в области поверхностного закрепления грунтов смолами, а именно обработка полимерами откосов. Лабораторные испытания показали, что добавление полиуретана может значительно повысить прочность на сжатие грунта, а также его прочность на растяжение и срез, особенно первые две характеристики, которые увеличились примерно с нуля до 952,61 и 211,47 кПа соответственно. Добавление полиуретана также привело к снижению проницаемости и повышению водоудерживающей способности. Полевые наблюдения показали, что обработка полиуретаном может эффективно и экологично защищать почву, повышая устойчивость верхнего слоя почвы к эрозии, механическую прочность и удерживать воду, тем самым ускоряя рост и покрытие растительностью. Эффект стабилизации полиуретановой смолой обусловлен улучшением микроструктуры грунта за счёт адсорбции, связывания и заполнения полиуретаном. Это приводит к образованию более плотного и жёсткого покрытия на поверхности склона, которое, с одной стороны, повысило устойчивость поверхности склона и ослабило воздействие осадков и стоков, а с другой стороны, способствовало росту растительности [30].

Инновационная технология карбонизации, основанная на реакциях оксида магния и углекислого газа, была признана экологически безопасным и эффективным методом укрепления слабых грунтов. Предыдущие лабораторные исследования показали, что карбонизированные грунты с добавлением оксида магния значительно улучшают свои

⁹ Мангушев Р.А. и др. Методы подготовки и устройства искусственных оснований // Учебное пособие — М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. С. 266.

Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Учебник. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 416 с.

Берлинов М.В. Основания и фундаменты // Учебник. 4-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 320 с.

П.А. Коновалов Основания и фундаменты реконструируемых зданий // Учебник. 4-е изд., перераб. И доп. — М: ВНИИТПИ 2000. — 320 с.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО УКРЕПЛЕНИЮ ГРУНТОВ МЕТОДАМИ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ, ГЛУБИННЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ, ИНЪЕКЦИИ РАСТВОРАМИ НА ОСНОВЕ МИКРОЦЕМЕНТОВ, МАНЖЕТНОЙ ИНЪЕКЦИЕЙ В РЕЖИМЕ ГИДРОРАЗРЫВОВ / Москва 2020. — 83 с.

механические свойства. Исследования показали, что укрепленные карбонизацией основания в 2–3 раза увеличили динамический модуль упругости [31]. Комбинированное вяжущее из оксида магния и углекислого газа рассматривается как новый отвердитель вместо традиционного портландцемента. Технология карбонизации и стабилизации грунта с помощью инъектирования может обеспечить карбонизацию и укрепление слабых грунтов на месте, но следует отметить, что углекислый газ следует закачивать снизу, максимальный радиус вентиляции должен составлять 0,6 м, а расстояние между трубами для подачи газа должно быть менее 1,2 м. Основания закрепленные карбонизацией характеризуются несущей способностью более 200 кПа, а модули упругости составляют около 20 МПа [32].

Пески, трещиноватые скальные породы, супеси и суглинки эффективно укреплять битумом и битумопроизводными продуктами (вспененный битум, битумные эмульсии), однако одноразмерные пески и связные грунты с высоким содержанием коллоидных частиц, соединений натрия и кислых гумусовых частиц не рекомендуется укреплять битумными вяжущими. При укреплении грунтов вяжущими на основе битумов под воздействием процесса коагуляции в массиве грунта образуются агрегаты которые формируют пространственную структуру укрепленного грунта, которая характеризуется небольшой прочностью на сжатие, тиксотропностью, высокими показателями пластичности и водостойкости. Достижение высоких показателей водостойчивости и теплоустойчивости укрепленных битумом грунтов обеспечивается за счет хемосорбционных связей, которые создаются предварительной обработкой грунтов известью, наличием в вяжущем анионоактивных соединений, протеканием процесса структурообразования в воде. Широко применяются методы горячей и холодной стабилизации грунтов битумизацией. При горячем способе применяют битумы, которые обладают высокой вязкостью для прохождения через инъекторные системы и грунт, холодный способ используется в основном при использовании эмульсий. Инъекционная или глубинная битумизация грунтов по технологическим операциям схожа с силикатизацией, а поверхностная с холодным ресайклингом при строительстве автомобильных дорог [33–36].⁵

Биогеотехнология — это раздел геотехнической инженерии, в котором используются микробные подходы для улучшения технических характеристик грунтов. Использование биологических процессов при укреплении грунта демонстрирует большой потенциал с точки зрения устойчивости и экологичности по сравнению с использованием химических веществ, таких как цемент и известь. Считается, что эти добавки оказывают менее благоприятное воздействие на окружающую

среду, в частности, из-за большого количества парниковых газов, которые обычно образуются в процессе их производства. Таким образом одним из потенциально экологически чистых материалов для укрепления грунтов является использование биополимеров получаемых из живых организмов. Биоцементация — это метод улучшения свойств грунтов, который заключается в заполнение пор между частицами грунта путём микробно-индуцированного карбонатного осаждения [37–40]. Результаты [41] прямого испытания на сдвиг показывают, что у контрольного (небиоцементированного) образца сухого песка сцепление составляет около 0 кПа, а угол внутреннего трения равен $32,9^\circ$. После биоцементирования с использованием 2,5 % в составе грунта натурального конопляного волокна сцепление песка становится равным 9 кПа, а угол внутреннего трения увеличивается до 35° . Это подтверждает улучшение свойств песчаного грунта за счет биоцементирования и использования конопляного волокна в качестве армирования грунта. Наиболее эффективный диапазон содержания клетчатки для укрепления составляет 0,3–0,5 % [42].

В последнее десятилетие биополимеры используются в качестве органических связующих веществ для грунтов при благоустройстве территорий и модификации грунтовых строительных материалов. Хотя обработанные биополимерами грунты значительно повышают механическую прочность, характеристики деформации под воздействием внешних нагрузок и долговечность материала (например, биodeградация из-за активности микроорганизмов) до сих пор до конца не изучены, что ограничивает практическое применение технологии обработки грунтов на основе биополимеров [43].

Электрохимическая обработка грунта — это метод применения внешнего электрического потенциала для введения стабилизирующих химических веществ в предполагаемую зону улучшения грунта и является эффективным методом ускорения силикатизации с помощью электроосмотических явлений при улучшении не дренирующих грунтов.

Этот метод стабилизирует грунт и повышает несущую способность за счет изменения pH грунта в результате химических реакций электролиза в грунте и может повысить его прочность на сдвиг. Однако электроды, используемые в этом методе, подвергаются коррозии из-за изменения pH почвы, что, в свою очередь, снижает электрический потенциал.

Коррозия электродов и потеря электрического потенциала могут значительно снизить эффективность метода. Кроме того, при использовании электрохимического метода для увеличения несущей способности грунтов оснований изменение pH может вызвать коррозию и повреждение свай [44; 45].⁵

Конструкционные способы

Structural methods

Четвертая условная группа — конструкционные способы воздействия на грунт. На рисунке 1 представлены основные способы этой группы: грунтозамещение, армирование, удерживающими конструкциями, «плавающие» основание и дренажные системы.

Полная замена грунтов основания — замена верхней части мягкого грунта на гранулированный грунт повышает несущую способность и уменьшает усадку [46]. В данной статье, под полной заменой принимается неглубокая замена грунта основания, до 2 метров. Заменой мягкого грунта оснований на уплотнённые несвязные грунты добиваются эффектов уменьшения осадки фундамента примерно на 50 % и увеличения несущей способности примерно на 100 %. Перед укладкой верхнего слоя уплотнённого материала (песок, щебень, гравий, шлак, отходов различных производств) для получения хороших результатов в виде более высокой несущей способности, а также низкой и равномерной осадки необходимо улучшить основание путём уплотнения и предварительного увлажнения [47]. К материалу, применяемому для замены, предъявляют следующие требования: удобоукладываемость с заданной плотностью, маленькая сжимаемость, относительно высокое сопротивление сдвигу, устойчивость его скелета при движении грунтовых вод. Грунтозамещение оснований могут производить до твердого минерального основания и частичной заменой слабого грунта — так называемая висячая подушка. Технология устройства замены грунта аналогична способам уплотнения грунтов, обычно укатка. Допускается производить замену грунтов оснований связными грунтами при обоснованности принятых решений. Полной или частичной заменой грунтов оснований связным грунтом добиваются уменьшения водопроницаемости и доступа воды к объекту, может осуществляться как поверхностным способом, так и с помощью инъектирования глинистой суспензии, битумов, смол.¹⁰

Геосинтетические материалы стали инновационными, эффективными и экономичными решениями множества инженерных задач в строительстве. Различные типы геосинтетических материалов, такие как геотекстиль, геомембрана, геосетка, георешётка, геокомпозит, геоволокно, геомешки, геотрубы, геосинтетическая глиняная подкладка и геопена, ещё больше расширяют сферу их применения. Особое внимание уделяется стабилизации грунта, где геосинтетические материалы играют

¹⁰ Мангушев Р.А. и др. Методы подготовки и устройства искусственных оснований // Учебное пособие — М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. С. 266.

Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Учебник. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 416 с.

важнейшую роль в укреплении слабых грунтов, повышении устойчивости, защите от эрозии, улучшении дренажа и эффективном удержании грунта. Геотекстиль обладает такими свойствами, как прочность, пористость, тонкость, гибкость, изготовленный из волокон, которые состоят из полиэстера, полиамида, полипропилена и т. д. В результате получаются очень прочные и тонкие волокна, которые либо сплетаются машинами, образуя тканый геотекстиль, либо соединяются между собой механическими, термическими или химическими связями, образуя нетканый геотекстиль. Геотекстильные материалы применяют для разделения, обеспечения дренажа и фильтрация при использовании в грунте. Георешетки это материал, представляющий собой сетку или решётку. В них есть широкое отверстие, называемое апертурой. Полиэстер, поливинил и полиэтилен являются основными материалами для их производства. Они изготавливаются с помощью таких процессов, как экструзия и плетение. Принцип работы заключается в том, что эти материалы очень прочны на растяжение и могут легко распределять и передавать нагрузку на большие площади поверхности грунта. Геомембраны это тонкие, прочные и непроницаемые синтетические листы, которые используются для борьбы с потоками жидкости в качестве покрытия на свалках и в хранилищах жидкостей, барьера для дамб и водосливов. Геосинтетические маты это композитные материалы, используемые для защиты окружающей среды, которые состоят из слоёв геотекстильной ткани, покрывающей слой бентонитовой глины. Такая структура образует высокоэффективный барьер для жидкостей и газов. Они широко используются в системах покрытия свалок, системах покрытия каналов, при добыче полезных ископаемых и в водоёмах-отстойниках для предотвращения попадания загрязняющих веществ в окружающую среду. Геоячейки, также известные как ячеистые системы сдерживания, представляют собой трёхмерные сотовые структуры, состоящие из полиэтилена высокой плотности или других полимеров. Эти конструкции состоят из соединённых между собой ячеек, которые образуют прочную основу при заполнении грунтом, щебнем или бетоном. Геоячейки лёгкие, но при этом обладают высокой прочностью и устойчивостью, равномерно распределяя нагрузку по большей площади и уменьшая эрозию почвы. Они широко используются в дорожном и железнодорожном строительстве для увеличения несущей способности, уменьшения оседания грунта и повышения общей эффективности дорожного покрытия. Геокомпозиты это материалы, которые были разработаны для совмещения двух или более геосинтетических компонентов с целью создания единого продукта с улучшенными характеристиками и функциями. В качестве таких компонентов обычно используются геотекстильные материалы, геосетки, геомембраны и другие специализированные геосинтетические материалы. Улучшенная фильтрация,

дренаж, армирующие и барьерные функции — вот лишь некоторые из преимуществ геокомпозитов. Композиты из геотекстиля и геомембраны, дренажные геокомпозиты и композиты из геотекстиля и геосетки являются примерами распространённых геокомпозитов [48-50].¹¹

Гео волокна это небольшие тонкие, похожие на волосы структуры, состоящие из натуральных, синтетических или неорганических волокон. Возможность использования органических волокон для укрепления грунта в последнее время стала предметом многих исследований из-за потребности в экологически чистых материалах в области благоустройства территорий. Однако в некоторых развивающихся странах использование натуральных волокон в цементных смесях применяется уже некоторое время из-за их экономичности и доступности. На самом деле, на качество натурального волокна влияют некоторые факторы, в том числе возраст растения, способ выделения волокна и место на растении, откуда его извлекают. Синтетическое волокно это искусственное волокно с более длительным сроком службы, чем натуральные волокна. Длина и форма волокна полностью контролируются человеком, независимо от того, в виде штапеля или жгута оно изготовлено. В отличие от органических волокон, синтетическое волокно, такое как полипропилен, полиэстер и полиэтилен, наносит вред окружающей среде. Неорганические волокна это как правило минералы, такие как базальт или металлические волокна. Синтетическое волокно используется для армирования грунта благодаря высокой прочности на разрыв и хорошей коррозионной стойкости. Эти волокна доступны в различных размерах: 3 мм, 6 мм, 10 мм, 12 мм, 15 мм, 30 мм, 50 мм, 60 мм и других, с диаметром от 10 до 100 микрон. Эти волокна, смешанные с грунтом, действуют как армирующий материал, потому что грунт слаб на растяжение, а волокно действует как армирующий материал и повышает его прочность. На основании многочисленных исследований был сделан вывод, что, как правило, волокна смешивают с грунтом вручную, и если в грунт добавить слишком много волокон, то в ней могут образоваться комки и волокна распределятся неравномерно, что приведёт к недостаточной связи между волокном и почвой. Ограничено, для смешения и объемного распределения волокон в грунте, можно пользоваться дорожными ресайклерами и грунтосмесительными установками [48; 51–54].

Подпорные стены возводятся для удержания грунта или других сыпучих материалов, когда устойчивость откоса требуемой крутизны не обеспечивается, а уположить откос нельзя, например, при строительстве

¹¹ Мангушев Р.А. и др. Методы подготовки и устройства искусственных оснований // Учебное пособие — М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. С. 266.

Костин В.И. Геосинтетические материалы в дорожном строительстве: учеб. — метод. Пос. / В.И. Костин; Нижегород. Гос. Архитектур.-Строит. Ун-т — Н. Новгород: ННГАСУ, 2022. — 145 с., ил. 85.

линейных объектов инфраструктуры, таких как железные дороги или автомагистрали. Существует множество видов подпорных стен, различающихся по форме и конструктивным характеристикам. За последние три-четыре десятилетия благодаря развитию материалов и совершенствованию технических знаний в области геотехнической инженерии появились различные типы систем удержания грунта. В общих чертах эти конструкции можно разделить на две группы: стены с внешней стабилизацией и стены с внутренней стабилизацией. Примерами первой категории являются массивные железобетонные стены, консольные железобетонные стены и контрфорсные железобетонные стены. Эти стены, по сути, характеризуются тем, что боковое давление грунта, вызванное собственным весом удерживаемого грунта и сопутствующими нагрузками, воспринимается конструктивной стеной. Стены, стабилизированные внутри, включают стены из металлических полос, стены, армированные геотекстилем, и земляные стены с анкерным креплением. Эти стены состоят из горизонтально уложенных арматурных элементов, которые воспринимают большую часть или все боковое давление грунта за счет взаимодействия грунта с арматурой или за счет пассивного сопротивления анкерного блока [55; 56].⁵ Габрионная стена это один из современных видов подпорных стен, который состоит из заполненных камнем сетчатых коробов, связанных между собой для формирования подпорной стены. В настоящее время габрионные стены пользуются популярностью благодаря своей простоте, скорости возведения, гибкости, экологичности и широкому спектру применения. Как и любая другая подпорная конструкция, габрионная стена должна быть проверена на устойчивость к сдвигу, опрокидыванию, потере несущей способности и т. д. как в статических, так и в динамических условиях. Также необходимо исследовать прочность габрионных блоков и их отдельных элементов. Габрионы матрасного типа в основном служат для укрепления русел водотоков, защита эрозии почвы или удержание откоса [57–60]. Шпунтовое ограждение представляет собой ряд вертикально установленных элементов (шпунтин), которые погружаются в грунт и соединяются между собой специальными замками. Эти элементы могут быть изготовлены из различных материалов, наибольшее распространение получил металлический с корытным профилем типа «Ларсен». Основная функция шпунтового ограждения — удерживать грунт и предотвращать его осыпание или смещение, так же шпунтовые ограждения задерживают движения воды. Для увеличения жесткости шпунтовой стенки, снижения возникающего момента и резкого уменьшения ее горизонтального смещения применяют распорки или анкеры. Относительно недавно стали применяться способы закрепления грунтов «стена в грунте». Сущность метода заключается в устройстве глубокой траншеи или скважины, ряда секущихся скважин с последующим армированием (если предусмотрено) и бетонированием.

Несущую способность подобных конструкций обычно определяют как несущую способность свай. Террасирование это процесс создания террас (ступеней) на склонах холмов или гор для различных целей, включая сельское хозяйство, предотвращение эрозии почвы и создание зон полезной площади. Этот метод широко используется в сельском хозяйстве, особенно в горных районах [56; 61; 62].¹² Свая это погружаемый или формируемый в грунте в вертикальном или наклонном положении столбы, предназначенные для передачи нагрузок от сооружений. Сваи можно отнести к удерживающим конструкциям при укреплении грунтов, они могут использоваться для удержания откоса, защиты котлованов от обрушения, передача нагрузок от фундамента грунту или при укреплении площадей как свайно-плитное основание. По несущей способности сваи бывают сваи — стойки, это когда свая упирается в твердое основание и сваи трения (висячие), это когда свая воспринимает нагрузку за счет трения поверхности сваи с грунтом. По способу погружения в грунт сваи различают на забивные, погружаемые вибрированием, вдавливаемые и ввинчиваемые. Сваи, изготовляемые в грунте, называют набивными, в качестве наполнителя таких свай служит бетон, песок, щебень, грунтобетон и аналогичные материалы. Рассмотрим свайно-плитное основание. Несущий механизм свайно-плитной конструкции аналогичен механизму свайного фундамента моста. Как правило, вес плиты (жесткой или гибкой) и нагрузка, действующая на плиту, передаются сваям, а при необходимости грунт или фундамент также могут передавать часть нагрузки. Как правило, сваи принимают на себя большую часть верхних нагрузок, а это означает, что контактное давление между плитой и грунтом основания очень мало. При этом хорошо контролируется не только вертикальное оседание основания, но и поперечная деформация благодаря высокой жесткости всей конструкции. Таким образом, независимо от того, является ли конструкция свайно-плитной с неглубоким или глубоким заложением, этот тип конструкции всегда хорошо справляется с контролем оседания основания из мягких грунтов, а также с долгосрочной динамической устойчивостью основания [63–67].¹³

¹² Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Учебник. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 416 с.

Берлинов М.В. Основания и фундаменты // Учебник. 4-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 320 с.

Костин В.И. Геосинтетические материалы в дорожном строительстве: учеб. — метод. Пос. / В.И. Костин; Нижегород. Гос. Архитектур. — строит. Ун-т — Н. Новгород: ННГАСУ, 2022. — 145 с., ил. 85.

¹³ Мангушев Р.А. и др. Методы подготовки и устройства искусственных оснований // Учебное пособие — М., СПб.: Изд-во АСВ, 2012. С. 266.

Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Учебник. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 416 с.

Берлинов М.В. Основания и фундаменты // Учебник. 4-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2011. — 320 с.

Татьянников, Д.А. Инженерная защита в сложных инженерно-геологических условиях: учеб. пособие / Д.А. Татьянников, О.А. Шутова. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2023. — 111 с.

Облегченное основание это конструкция, предназначенная для уменьшения давления от сооружений на грунт и повышения устойчивости фундаментов. Оно применяется в ситуациях, когда грунт обладает низкой несущей способностью или существует риск неравномерной осадки здания. Основная идея заключается в снижении массы самого фундамента или перераспределении нагрузки таким образом, чтобы минимизировать воздействие на слабый грунт. Может исполняться из блоков вспененного полистирола или экструдированного полистирола, которые используются в различных областях строительства. Эти блоки, изготовленные путём вспенивания и формования шариков полистирола, имеют низкую плотность и отличную прочность на сжатие, что делает их идеальными для снижения давления на грунт, минимизации оседания и обеспечения теплоизоляции. Блоки из вспененного полистирола, которые обычно используется для возведения дорожных насыпей, стабилизации склонов и в качестве лёгкого заполнителя, имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными заполнителями, такими как грунт или гравий. К ним относятся простота в обращении, сокращение времени строительства и меньшее воздействие на окружающую среду [68–70]. Так же для устройства облегченных оснований можно использовать легкий вспененный грунт, это легкий геотехнический материал, который полностью перемешивается и взбалтывается путём добавления отвердителя, воды и предварительно изготовленной группы воздушных пузырьков в определённой пропорции к исходному грунту. Исходным грунтом может быть мелкий песок, мелкодисперсные отходы производства и ил; таким образом, свойства лёгкого вспененного грунта можно адаптировать под конкретные цели и задачи. Основные характеристики вспененного грунта заключаются в том, что он содержит пузырьки воздуха в растворе, что делает его легче других грунтов, а его насыпная плотность меньше, чем у традиционного грунта. Помимо этих характеристик, он обладает отличными теплоизоляционными свойствами и регулируемой прочностью, его легче перекачивать, чем другие материалы, а для его производства используется недорогое сырьё. Вспененный легкий грунт используется во многих областях дорожного строительства, таких как расширение дорог, отсыпка дорог, снижение нагрузки на основание на оползневых участках, предотвращение оседания мягких грунтовых оснований и теплоизоляция дорожного полотна на вечной мерзлоте. Согласно наблюдениям за проектом по расширению дорожного полотна в Чунцине, неравномерная осадка основания из вспененного легкого грунта составляет всего 25,93 % от осадки традиционного основания. Кроме того, при анализе конструкции опоры с использованием вспененного лёгкого грунта на мосту Ханчжоу-Бэй было обнаружено, что при высоте насыпи 2 м осадка уменьшилась на 65 %, а при высоте насыпи 5 м осадка уменьшилась на 44 %. Это означает, что

вспененный лёгкий грунт может эффективно уменьшить нагрузку от собственного веса [71–73].

Таблица 1 / Table 1

**Рекомендации по применению способов
укрепления и стабилизации грунтов оснований**
**Recommendations for the application of methods
for strengthening and stabilization of foundation soils**

Способ укрепления или стабилизации <i>Method of strengthening or stabilization</i>	Преимущества <i>Advantages</i>	Недостатки <i>Disadvantages</i>	Рекомендуемые грунтовые условия <i>Recommended soil conditions</i>
Уплотнение <i>Compaction</i>	Увеличение несущей способности основания <i>Increase in foundation bearing capacity</i>	Ограниченная глубина воздействия <i>Limited depth of influence</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Механическое перемешивание (обогащение) <i>Mechanical mixing (enrichment)</i>	Улучшение физико- механических свойств основания <i>Improvement of physical- mechanical properties of the foundation</i>	Высокая стоимость оборудования <i>High cost of equipment</i>	Глинистые, суглинистые <i>Clayey, loamy soils</i>
Термическое закрепление <i>Thermal stabilization</i>	Увеличение прочности и водонепроницаемости <i>Increase in strength and water resistance</i>	Высокие энергозатраты <i>High energy consumption</i>	Глинистые, суглинистые <i>Clayey, loamy soils</i>
Замораживание <i>Freezing</i>	Быстрое создание временного укрепленного слоя, экологичность <i>Rapid creation of a temporary strengthened layer, environmental friendliness</i>	Временный характер, высокие энергозатраты <i>Temporary nature, high energy consumption</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Оттаивание <i>Thawing</i>	Разработка вечномёрзлых грунтов <i>Development of permafrost soils</i>	Длительный процесс, осадки <i>Lengthy process, settlements</i>	Мёрзлые грунты <i>Frozen soils</i>
Электроосмос <i>Electroosmosis</i>	Удаление воды из насыщенных водой грунтов, скорость процесса, экологичность <i>Removal of water from water- saturated soils, process speed, environmental friendliness</i>	Ограниченное применение, энергозатратно, технологичность <i>Limited application, energy- intensive, requires technological sophistication</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Понижение уровня грунтовых вод <i>Lowering of the groundwater level</i>	Снижение влажности и улучшение характеристик основания <i>Reduction of moisture content and improvement of foundation characteristics</i>	Требует постоянного контроля и обслуживания, капиталоемкость <i>Requires constant monitoring and maintenance, capital intensity</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Замачивание <i>Soaking</i>	Экономичность, экологичность <i>Cost-effectiveness, environmental friendliness</i>	Медленный процесс <i>Slow process</i>	Пески <i>Sands</i>
Силикатизация <i>Silicatization</i>	Универсальность применения, повышение прочности и водонепроницаемости <i>Versatility of application, increase in strength and water resistance</i>	Стоимость химикатов, технологичность <i>Cost of chemicals, requires technological sophistication</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>

Способ укрепления или стабилизации <i>Method of strengthening or stabilization</i>	Преимущества <i>Advantages</i>	Недостатки <i>Disadvantages</i>	Рекомендуемые грунтовые условия <i>Recommended soil conditions</i>
Цементация <i>Cementation</i>	Универсальность применения, повышение прочности и водонепроницаемости <i>Versatility of application, increase in strength and water resistance</i>	Технологичность <i>Requires technological sophistication</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Смолообразование <i>Resin formation</i>	Водонепроницаемость и устойчивость к агрессивным средам <i>Water resistance and resistance to aggressive environments</i>	Технологичность, стоимость смолы <i>Requires technological sophistication, cost of resin</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Карбонизация <i>Carbonization</i>	Экологичность процесса <i>Environmental friendliness of the process</i>	Технологичность, медленный процесс, ограниченное применение <i>Requires technological sophistication, slow process, limited application</i>	Содержащие кальций и/или магний грунты <i>Soils containing calcium and/or magnesium</i>
Битумизация <i>Bituminization</i>	Гидроизоляционные свойства <i>Waterproofing properties</i>	Невысокая прочность соединения <i>Low bond strength</i>	Пески, супеси <i>Sands, silty sands</i>
Биологический <i>Biological method</i>	Экологическая безопасность <i>Environmental safety</i>	Не исследованность показателей долговечности <i>Lack of researched durability indicators</i>	—
Электрохимическое укрепление <i>Electrochemical strengthening</i>	Быстрое повышение несущей способности <i>Rapid increase in bearing capacity</i>	Ограниченное применение, энергозатратно, технологичность <i>Limited application, energy-intensive, requires technological sophistication</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Грунтозамещение <i>Soil replacement</i>	Универсальность применения <i>Versatility of application</i>	Затраты на материалы и транспортировку <i>Cost of materials and transportation</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Армирование <i>Reinforcement</i>	Увеличение несущей способности, долговечность <i>Increase in bearing capacity, durability</i>	Сложность монтажа <i>Complexity of installation</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Удерживающие конструкции <i>Retaining structures</i>	Надежность, долговечность <i>Reliability, durability</i>	Высокая стоимость строительства <i>High construction cost</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>
Облегченные (плавающие) основания <i>Lightweight (floating) foundations</i>	Минимизация воздействия нагрузок на слабые грунты <i>Minimization of load impact on weak soils</i>	Ограниченность применения, сложность монтажа <i>Limited applicability, complexity of installation</i>	Торф <i>Peat</i>
Дренажные системы <i>Drainage systems</i>	Защита от затоплений, эрозии почв, отвод воды <i>Protection from flooding, soil erosion, water drainage</i>	Постоянная необходимость обслуживания, капиталоемкость <i>Constant need for maintenance, capital intensity</i>	Пески, супеси, суглинки, глины <i>Sands, silty sands, sandy loams, clays</i>

Разработано авторами / Developed by the authors

Дренажные конструкции играют ключевую роль в обеспечении устойчивости грунта и предотвращении его разжижения и потери несущей

способности. Они делятся на открытый (канавы, лотки и желоба, зумпф) и закрытый (скважины вертикальные и горизонтальные, колодцы, всевозможных дрен) способ устройства. Дренажные канавы представляют собой простейший способ организации отвода воды с участка строительства. Она предназначена для сбора и транспортировки поверхностных вод, а также частично грунтовых вод за пределы строительной площадки или в зумпф с последующей откачкой. Закрытая дренажная система это инженерная конструкция, предназначенная для сбора и отвода избыточной воды с участка или территории без нарушения внешнего вида ландшафта. В отличие от открытых дренажных канав, эта система располагается под землей и состоит из комплекса взаимосвязанных элементов, обеспечивающих эффективный дренаж даже в условиях ограниченного пространства. Закрытая дренажная система обычно состоит из перфорированных ПВХ, ПНД труб в которые проникает грунтовая вода и транспортируется дальше по уклону, эти трубы должны находится в дренирующем грунте, между труб устраиваются коллекторы и смотровые колодцы для обслуживания системы. Так же к закрытой системе дренажа можно отнести осушение с помощью иглофильтров и насосов через скважины [26; 74–76].¹⁴

На основании выше изложенной информации была составлена таблица 1 с рекомендациями по применению способов укрепления и стабилизации оснований их обобщенные преимущества и недостатки, область применения. В таблице 1 к пескам так же относятся минеральные дисперсные не связные грунты с примесью гальки (дресвы) и гравия (щебня) с содержанием частиц по мелше не более 50 %.

Заключение

Conclusion

Анализ показал, что каждый из рассмотренных методов обладает своими преимуществами и недостатками, которые зависят от типа грунта, гидрогеологических условий, глубины залегания и других факторов. Исследования также показали, что правильный выбор метода укрепления зависит не только от характеристик грунта, но и от специфики строительного проекта, сроков выполнения работ и бюджета. Например, быстрые сроки возведения объектов могут потребовать применения технологий, обеспечивающих немедленное увеличение несущей

¹⁴ Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты / Учебник. — 4-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 416 с.

Татьянников, Д.А. Инженерная защита в сложных инженерно-геологических условиях: учеб. пособие / Д.А. Татьянников, О.А. Шутова. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2023. — 111 с.

способности основания, в то время как долгосрочные проекты допускают использование менее интенсивных, но экономически выгодных методов. Подчеркнуты направления исследований, направленные на создание композитных материалов, сочетающих в себе прочность и долговечность, а также адаптацию существующих методов к новым строительным стандартам и требованиям экологической безопасности. Отмечена необходимость внедрения цифровых технологий и автоматизированных систем мониторинга состояния укрепленных грунтов, что позволит своевременно выявлять потенциальные проблемы и принимать меры по их устранению. Таким образом, укрепление грунтов остается актуальной проблемой в современном строительстве, требующей комплексного подхода и учета множества факторов. Представленные изыскания подчеркивают значимость дальнейших научных исследований и практических разработок в этой области, направленных на повышение надежности и долговечности возводимых сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen, A. Ground vibration propagation and attenuation of vibrating compaction / A. Chen [et al.] // Journal of Vibroengineering. — 2019. — Vol. 21. — № 5. — P. 1342–1352. URL: <https://www.extrica.com/article/20388> DOI: [10.21595/jve.2019.20388](https://doi.org/10.21595/jve.2019.20388) (дата обращения: 11.06.2025).
2. Tanyıldızı, M. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review / M. Tanyıldızı, V.E. Uz, İ. Gökalp // Construction and Building Materials. — 2023. — Vol. 398. — P. 132435. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823021517> DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.132435](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435) EDN: [TBSSIH](https://www.edn.net/TBSSIH) (дата обращения: 11.06.2025).
3. Ali, L.H. Effective Use of Pozzolan Materials for Stabilizing Expansive Soils: A Review / L.H. Ali, Y.K. Atemimi // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2024. — Vol. 1374. — № 1. — P. 012014. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1374/1/012014> DOI: [10.1088/1755-1315/1374/1/012014](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1374/1/012014) EDN: [ZNFXAM](https://www.edn.net/ZNFXAM) (дата обращения: 11.06.2025).
4. Utkarsh A review on innovative approaches to expansive soil stabilization: Focussing on EPS beads, sand, and jute / Utkarsh, P.K. Jain // Science and Engineering of Composite Materials. — 2024. — Vol. 31. — № 1. — P. 20240005. URL: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/secm-2024-0005/html> DOI: [10.1515/secm-2024-0005](https://doi.org/10.1515/secm-2024-0005) (дата обращения: 11.06.2025).
5. Панарин, И.И. Инъекционные растворы на композиционных цементах для закрепления грунтов / И.И. Панарин [и др.] // Строительные материалы и изделия. — 2023. — Т. 6. — № 4. — С. 15–29. URL: <https://bstu-journals.ru/wp-content/uploads/2023/08/panarin.pdf> DOI: [10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29](https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29) EDN: [SADJRE](https://www.edn.net/SADJRE) (дата обращения: 11.06.2025).
6. Кабалин, М.Д. Теоретические аспекты укрепления грунта в дорожном строительстве / М.Д. Кабалин [и др.] // Вестник ГГНТУ. Технические науки. — 2023. — Т. 19. — № 3. — С. 33. URL: <https://search.rads-doi.org/project/13647/object/199582> DOI: [10.26200/GSTOU.2023.50.11.004](https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.50.11.004) EDN: [PADQLY](https://www.edn.net/PADQLY) (дата обращения: 11.06.2025).
7. Nazari, Z. Effect of compaction delay on the strength and consolidation properties of cement-stabilized subgrade soil / Z. Nazari, A. Tabarsa, N. Latifi // Transportation Geotechnics. — 2021. — Vol. 27. — P. 100495. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214391220303834> DOI: [10.1016/j.trgeo.2020.100495](https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100495) EDN: [TACPVZ](https://www.edn.net/TACPVZ) (дата обращения: 11.06.2025).
8. Wang, J. Post-settlement of rockfill in silty soil reinforced by explosive replacement method / J. Wang [et al.] // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering. — 2024. — P. 1–13. URL: <https://www.emerald.com/jgeen/article-abstract/178/5/545/1269426/Post-settlement-of-rockfill-in-silty-soil?redirectedFrom=fulltext> DOI: [10.1680/jgeen.24.00312](https://doi.org/10.1680/jgeen.24.00312) (дата обращения: 11.06.2025).

9. Wotzlaw, M. Experimental and numerical study on the compaction of granular soils by vibrations / M. Wotzlaw, D. Aubram, F. Rackwitz // Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society. — CRC Press, 2024. — P. 2735–2738. URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.1201/9781003431749-532/experimental-numerical-study-compaction-granular-soils-vibrations-wotzlaw-aubram-rackwitz> DOI: [10.1201/9781003431749-532](https://doi.org/10.1201/9781003431749-532) (дата обращения: 11.06.2025).
10. Shokarev, V.S. Acceleration of consolidation of water-saturated loess subsidence massifs during their compaction by deep explosions / V.S. Shokarev, F.G. Gabibov // Smart Geotechnics for Smart Societies. — CRC Press, 2023. — P. 493–497. URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.1201/9781003299127-59/acceleration-consolidation-water-saturated-loess-subsidence-massifs-compaction-deep-explosions-shokarev-gabibov> DOI: [10.1201/9781003299127-59](https://doi.org/10.1201/9781003299127-59) (дата обращения: 11.06.2025).
11. Буданова, Е.С. Холодный ресайклинг. Повышение эффективности использования на территории РФ / Е.С. Буданова, В.А. Ярмолинский // Умные композиты в строительстве. — 2022. — Т. 3. — № 2. — С. 54–67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49090927> DOI: [10.52957/27821919_2022_2_54](https://doi.org/10.52957/27821919_2022_2_54) EDN: [TSMGJK](https://elibrary.ru/item.asp?id=49090927) (дата обращения: 11.06.2025).
12. Zhao, G. Utilization of recycled concrete powder in modification of the dispersive soil: A potential way to improve the engineering properties / G. Zhao [et al.] // Construction and Building Materials. — 2023. — Vol. 389. — P. 131626. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823013399> DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.131626](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131626) EDN: [WETZRZ](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823013399) (дата обращения: 11.06.2025).
13. Пролягин, А.С. Влияние содержания щебня на модуль деформации грунтощебеночного слоя / А.С. Пролягин [и др.] // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. — 2021. — Т. 18. — № 6(82). — С. 772–789. URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/1375> DOI: [10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789) EDN: [DZYYVY](https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/1375) (дата обращения: 11.06.2025).
14. Perusomula, H. Effect of elevated temperature on geotechnical properties of soils-A review / H. Perusomula, S. Krishnaiah // Materials Today: Proceedings. — 2022. — Vol. 69. — P. 1130–1133. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322053548> DOI: [10.1016/j.matpr.2022.08.178](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.178) EDN: [VBHPQV](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322053548) (дата обращения: 11.06.2025).
15. Кондрашин, К.Г. Методы термического укрепления грунтов / К.Г. Кондрашин, В.Н. Пилипенко, Е.М. Голубничева // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2021. — № 2(36). — С. 20–25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46288934> DOI: [10.52684/2312-3702-2021-36-2-20-25](https://doi.org/10.52684/2312-3702-2021-36-2-20-25) EDN: [QXRUSF](https://elibrary.ru/item.asp?id=46288934) (дата обращения: 11.06.2025).
16. Соколов, Н.С. Воздействие физических процессов для устройства буровых свай / Н.С. Соколов // Наука России: Цели и задачи. — 2023. — С. 114–120. URL: <https://doicod.ru/doi/sr/39/nrciz-10-2023-26.pdf> DOI: [10.18411/nrciz-10-2023-26](https://doi.org/10.18411/nrciz-10-2023-26) EDN: [UZFUEG](https://doicod.ru/doi/sr/39/nrciz-10-2023-26.pdf) (дата обращения: 11.06.2025).
17. Алексеев, А.Г. Восстановление эксплуатационной пригодности оснований и фундаментов в Арктической зоне и криолитозоне России / А.Г. Алексеев [и др.] // Вестник НИЦ "Строительство". — 2024. — Т. 43. — № 4. — С. 66–80. URL: <https://vestnik.cstroy.ru/jour/article/view/PNLOKS> DOI: [10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-66-80](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-66-80) EDN: [PNLOKS](https://vestnik.cstroy.ru/jour/article/view/PNLOKS) (дата обращения: 11.06.2025).
18. Волохов, Е.М. Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения / Е.М. Волохов, Д.З. Мукминова // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 826–839. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/14785> DOI: [10.31897/PMI.2021.6.5](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.5) EDN: [XLWFAP](https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/14785) (дата обращения: 11.06.2025).
19. Пат. № 2755770 Российская Федерация, МПК Е 02 D 3/115. Устройство для охлаждения пластично-мерзлых грунтов / Д.А. Махно, Р.В. Агинеи, А.Е. Белоусов, А.Ф. Пужайло; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет. — № 2021106482; заявл. 12.03.2021; опубл. 21.09.2021, Бюл. № 27. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2755770C1/ru> (дата обращения: 11.06.2025).
20. Пат. № 2779153 Российская Федерация, МПК Е 02 D 3/12; Е 01 С 7/36. Способы защиты наклонной поверхности грунтов от эрозии / А.В. Величкин, Д.Н. Одинцов, Д.А. Кашурин, А.Б. Осокин, Э.В. Николайчук, А.О. Васильева, Д.И. Михальченко; заявитель и патентообладатель ООО "Газпром добыча Надым". — № 2021139565; заявл. 27.12.2021; опубл. 05.09.2022, Бюл. № 25. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2779153C1/ru> (дата обращения: 11.06.2025).

21. Li, X. A soil freezing-thawing model based on thermodynamics / X. Li, X. Li // Cold Regions Science and Technology. — 2023. — Vol. 211. — P. 103867. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165232X23000976> DOI: [10.1016/j.coldregions.2023.103867](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103867) EDN: [CBHMAD](https://www.edn.net/CBHMAD) (дата обращения: 11.06.2025).
22. Пат. № 2149949 Российская Федерация, МПК Е 02 D 3/11. Способ закрепления глинистых грунтов / В.Х. Шаймуратов; заявитель и патентообладатель В.Х. Шаймуратов. — № 98105274/03; заявл. 12.03.1998; опубл. 27.05.2000. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2149949C1/ru> (дата обращения: 11.06.2025).
23. Sahib, A.A. Electro-osmosis: a review from the past / A.A. Sahib, I. Bushra, G. Rejimon // Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns: Proceedings of IGC 2018. — 2021. — P. 433–442. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-6237-2_36 DOI: [10.1007/978-981-15-6237-2_36](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6237-2_36) (дата обращения: 11.06.2025).
24. Sun, Z. Electroosmotic strengthening of soft clay under different electrification modes / Z. Sun [et al.] // Energy Science & Engineering. — 2024. — Vol. 12. — № 7. — P. 3126–3141. URL: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.1806> DOI: [10.1002/ese3.1806](https://doi.org/10.1002/ese3.1806) EDN: [SCNIDJ](https://www.edn.net/SCNIDJ) (дата обращения: 11.06.2025).
25. Han, D.W. Comparing shallow landslide susceptibility maps in Northeastern Türkiye (Beşikdüzü, Trabzon): a multivariate statistical, machine learning, and physical data-based analysis / D.W. Han [et al.] // Water Air and Soil Pollution. — 2024. — Vol. 83. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-021-05182-4> DOI: [10.1007/s11270-021-05182-4](https://doi.org/10.1007/s11270-021-05182-4) (дата обращения: 11.06.2025).
26. Романов, Н.В. Обзор современных методов усиления и стабилизации слабых оснований / Н.В. Романов, Р. Жером // Вестник МГСУ. — 2018. — Т. 13. — № 4(115). — С. 499–513. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35003221> DOI: [10.22227/1997-0935.2018.4.499-513](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.4.499-513) EDN: [XOUHHV](https://www.edn.net/XOUHHV) (дата обращения: 11.06.2025).
27. Михайлов, А.А. Усиление грунтов основания фундаментов методом инъекционной силикатизации / А.А. Михайлов [и др.] // Строительство и архитектура. — 2019. — Т. 7. — № 1. — С. 5–9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37395271> DOI: [10.29039/article_5c646f166c48d2.74103573](https://doi.org/10.29039/article_5c646f166c48d2.74103573) EDN: [ZERBPF](https://www.edn.net/ZERBPF) (дата обращения: 11.06.2025).
28. Zotsenko, M. Methods of soils cementation / M. Zotsenko, O. Novytskyi // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2684. — № 1. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2684/1/030045/2893627/Methods-of-soils-cementation?redirectedFrom=fulltext> DOI: [10.1063/5.0119941](https://doi.org/10.1063/5.0119941) (дата обращения: 29.06.2025).
29. Bonić, Z. Chemical Stabilisation of Clayey Soil-Comparison of a Variety of Additives with Respect to Their Effects on the Soil Compressive Strength and Shear Strength / Z. Bonić [et al.] // Buildings. — 2025. — Vol. 15. — № 4. — P. 552. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/4/552> DOI: [10.3390/buildings15040552](https://doi.org/10.3390/buildings15040552) EDN: [MZMZMB](https://www.edn.net/MZMZMB) (дата обращения: 29.06.2025).
30. Bai, Y. Soil stabilization using synthetic polymer for soil slope ecological protection / Y. Bai [et al.] // Engineering Geology. — 2023. — Vol. 321. — P. 107155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795223001734> DOI: [10.1016/j.enggeo.2023.107155](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107155) EDN: [BOOGKF](https://www.edn.net/BOOGKF) (дата обращения: 29.06.2025).
31. Liu, S.Y. Field investigation of shallow soft-soil highway subgrade treated by mass carbonation technology / S.Y. Liu [et al.] // Canadian Geotechnical Journal. — 2021. — Vol. 58. — № 1. — P. 97–113. URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cgj-2020-0008> DOI: [10.1139/cgj-2020-0008](https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0008) EDN: [FAPJDK](https://www.edn.net/FAPJDK) (дата обращения: 29.06.2025).
32. Liu, S. Experimental Study on Mass Stabilization of Soft Soil Foundation Based on MgO-CO₂ Carbonation Technology / S. Liu [et al.] // Advances in Transportation Geotechnics IV: Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Geotechnics Volume 1. — Cham: Springer International Publishing, 2021. — P. 743–752. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77230-7_56 DOI: [10.1007/978-3-030-77230-7_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77230-7_56) (дата обращения: 29.06.2025).
33. Ahmad, A. Feasibility of bituminous stabilizer in the stabilization of problematic soil: An overview on the non-traditional soil additive / A. Ahmad [et al.] // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2688. — № 1. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2688/1/040012/2890299/Feasibility-of-bituminous-stabilizer-in-the?redirectedFrom=fulltext> DOI: [10.1063/5.0113900](https://doi.org/10.1063/5.0113900) (дата обращения: 29.06.2025).

34. Пугин, К.Г. Улучшение характеристик грунтов, используемых для дорожного строительства / К.Г. Пугин, И.О. Норин, А.И. Кетов // Транспорт. Транспортные сооружения. Серия: Экология. — 2023. — № 1-С. — С. 13–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50506686> DOI: [10.15593/24111678/2023.01.02](https://doi.org/10.15593/24111678/2023.01.02) EDN: [CQPCRY](https://elibrary.ru/item.asp?id=50506686) (дата обращения: 29.06.2025).
35. Чудинов, С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса: монография / С.А. Чудинов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. — Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. — 164 с. — ISBN 978-5-94984-852-4. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53667094> EDN: [LYZPVU](https://elibrary.ru/item.asp?id=53667094) (дата обращения: 29.06.2025).
36. Окольников, Г.Э. Химическая стабилизация пучинистых грунтов / Г.Э. Окольников, Е.Ю. Симоненко // Системные технологии. — 2023. — № 2(47). — С. 178–181. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54013280> DOI: [10.55287/22275398_2023_2_178](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_2_178) EDN: [LKORZW](https://elibrary.ru/item.asp?id=54013280) (дата обращения: 29.06.2025).
37. Zhang, J. A review on soils treated with biopolymers based on unsaturated soil theory / J. Zhang, J. Liu // Polymers. — 2023. — Vol. 15. — № 22. — P. 4431. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/22/4431> DOI: [10.3390/polym15224431](https://doi.org/10.3390/polym15224431) EDN: [XDRBVO](https://www.mdpi.com/2073-4360/15/22/4431) (дата обращения: 29.06.2025).
38. Кусбергенова, Ж. Обзор использования уреолитических бактерий в процессе биоцементации грунта / Ж. Кусбергенова // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н.Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. — 2024. — Т. 146. — № 1. — С. 158–176. URL: <https://bultech.enu.kz/index.php/main/article/view/588> DOI: [10.32523/2616-7263-2024-146-1-158-176](https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-146-1-158-176) EDN: [NCLLOK](https://bultech.enu.kz/index.php/main/article/view/588) (дата обращения: 29.06.2025).
39. Omoregie, A.I. Soil bio-cementation treatment strategies: state-of-the-art review / A.I. Omoregie [et al.] // Geotechnical Research. — 2023. — Vol. 11. — № 1. — P. 3–27. URL: <https://www.emerald.com/jgere/article/11/1/3/1222292/Soil-bio-cementation-treatment-strategies-state-of> DOI: [10.1680/jgere.22.00051](https://doi.org/10.1680/jgere.22.00051) (дата обращения: 29.06.2025).
40. Sulaiman, H. Performance of soil stabilized with biopolymer materials-xanthan gum and guar gum / H. Sulaiman [et al.] // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. — 2022. — Vol. 128. — P. 103276. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474706522001693> DOI: [10.1016/j.pce.2022.103276](https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103276) EDN: [OOMLHA](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474706522001693) (дата обращения: 29.06.2025).
41. Iamchaturapatr, J. Characteristics of sandy soil treated using EICP-based urease enzymatic acceleration method and natural hemp fibers / J. Iamchaturapatr, K. Piriyaikul, A. Petcherdchoo // Case Studies in Construction Materials. — 2022. — Vol. 16. — P. e00871. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522000031> DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e00871](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00871) EDN: [PPSRXK](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522000031) (дата обращения: 29.06.2025).
42. Xiao, Y. Experimental studies on compressive and tensile strength of cement-stabilized soil reinforced with rice husks and polypropylene fibers / Y. Xiao [et al.] // Construction and Building Materials. — 2022. — Vol. 344. — P. 128242. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822019055> DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.128242](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128242) EDN: [XVZVUA](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822019055) (дата обращения: 29.06.2025).
43. Ni, J. Mechanical and biodeterioration behaviours of a clayey soil strengthened with combined carrageenan and casein / J. Ni, S.S. Li, X.Y. Geng // Acta Geotechnica. — 2022. — Vol. 17. — № 12. — P. 5411–5427. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11440-022-01588-4> DOI: [10.1007/s11440-022-01588-4](https://doi.org/10.1007/s11440-022-01588-4) EDN: [WJPRSS](https://link.springer.com/article/10.1007/s11440-022-01588-4) (дата обращения: 29.06.2025).
44. Kollannur, N.J. Electrochemical treatment and associated chemical modifications of clayey soils: a review / N.J. Kollannur, D.N. Arnepalli // International Journal of Geotechnical Engineering. — 2021. — Vol. 15. — № 3. — P. 349–358. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19386362.2019.1653513> DOI: [10.1080/19386362.2019.1653513](https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1653513) (дата обращения: 29.06.2025).
45. Sadeghian, F. Effects of variations of voltage and pH value on the shear strength of soil and durability of different electrodes and piles during electrokinetic phenomenon / F. Sadeghian [et al.] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2022. — Vol. 14. — № 2. — P. 625–636. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775521001438> DOI: [10.1016/j.jrmge.2021.07.017](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.017) EDN: [TDTBVN](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775521001438) (дата обращения: 29.06.2025).
46. Abdrabbo, F.M. Towards construction of embankment on soft soil: a comparative study of lightweight materials and deep replacement techniques / F.M. Abdrabbo [et al.] // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14. — № 1. — P. 29628. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-77587-0> DOI: [10.1038/s41598-024-77587-0](https://doi.org/10.1038/s41598-024-77587-0) EDN: [QYWLUI](https://www.nature.com/articles/s41598-024-77587-0) (дата обращения: 29.06.2025).

47. Ali, N.A. Performance of partially replaced collapsible soil-Field study / N.A. Ali // Alexandria Engineering Journal. — 2015. — Vol. 54. — № 3. — P. 527–532. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815000745> DOI: [10.1016/j.aej.2015.05.002](https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.002) (дата обращения: 29.06.2025).
48. Chatrabhuj Use of geosynthetic materials as soil reinforcement: an alternative eco-friendly construction material / Chatrabhuj, K. Meshram // Discover Civil Engineering. — 2024. — Vol. 1. — № 1. — P. 41. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44290-024-00050-6> DOI: [10.1007/s44290-024-00050-6](https://doi.org/10.1007/s44290-024-00050-6) EDN: [FKYHGB](https://www.edn.net/FKYHGB) (дата обращения: 29.06.2025).
49. Kumar, S. Subgrade soil stabilization using geosynthetics: A critical review / S. Kumar, S.K. Singh // Materials Today: Proceedings. — 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323021685> DOI: [10.1016/j.matpr.2023.04.266](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.266) EDN: [FHKWQT](https://www.edn.net/FHKWQT) (дата обращения: 29.06.2025).
50. Канатова, Ж.К. Исследования влияния армирования геосинтетическими материалами на прочность грунтов в условиях трехосного сжатия и одноплоскостного среза / Ж.К. Канатова [и др.] // Вестник КазГАСА. — 2024. — Т. 3. — № 93. — С. 121–138. URL: <https://vestnik.mok.kz/index.php/vestnik/article/view/174/53> DOI: [10.51488/1680-080X/2024.3-09](https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-09) EDN: [UBQZAD](https://www.edn.net/UBQZAD) (дата обращения: 29.06.2025).
51. Keskin, N. Zeminlerin Doğal ve Sentetik Lifler ile Güçlendirilmesi Üzerine Bir Derleme Çalışması / N. Keskin [et al.] // Erzincan University Journal of Science and Technology. — Vol. 14. — № 2. — P. 631–663. URL: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/erzifbed/issue/64740/874339> DOI: [10.18185/erzifbed.874339](https://doi.org/10.18185/erzifbed.874339) EDN: [VVGEXH](https://www.edn.net/VVGEXH) (дата обращения: 29.06.2025).
52. Alqawasmeh, H. State-of-the-Art Review: Fiber-Reinforced Soil as a Proactive Approach for Liquefaction Mitigation and Risk Management / H. Alqawasmeh, Y. Alzubi, A. Mahamied // Journal of Engineering. — 2023. — Vol. 2023. — № 1. — P. 8737304. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/8737304> DOI: [10.1155/2023/8737304](https://doi.org/10.1155/2023/8737304) EDN: [CPSXOY](https://www.edn.net/CPSXOY) (дата обращения: 29.06.2025).
53. Shalchian, M.M. A review of soil reinforcement with planetary fibers / M.M. Shalchian, M. Arabani // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. — 2022. — Vol. 22. — № 4. — P. 4496–4532. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42729-022-01052-y> DOI: [10.1007/s42729-022-01052-y](https://doi.org/10.1007/s42729-022-01052-y) EDN: [XSGYEB](https://www.edn.net/XSGYEB) (дата обращения: 29.06.2025).
54. Medina-Martinez, C.J. Use of sawdust fibers for soil reinforcement: a review / C.J. Medina-Martinez [et al.] // Fibers. — 2023. — Vol. 11. — № 7. — P. 58. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6439/11/7/58> DOI: [10.3390/fib11070058](https://doi.org/10.3390/fib11070058) EDN: [OQWBAN](https://www.edn.net/OQWBAN) (дата обращения: 29.06.2025).
55. Munoz-Medina, B. Typology selection of retaining walls based on multicriteria decision-making methods / B. Munoz-Medina [et al.] // Applied Sciences. — 2021. — Vol. 11. — № 4. — P. 1457. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1457> DOI: [10.3390/app11041457](https://doi.org/10.3390/app11041457) EDN: [IHLXTQ](https://www.edn.net/IHLXTQ) (дата обращения: 29.06.2025).
56. Топчий, Д.В. Технологические особенности устройства подпорных стен / Д.В. Топчий, З.Х. Чипова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2024. — № 4. — С. 151–154. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67853330> DOI: [10.24412/2071-6168-2024-4-151-152](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-4-151-152) EDN: [NTQUAQ](https://www.edn.net/NTQUAQ) (дата обращения: 29.06.2025).
57. Chikute, G.C. Gabion Wall: Eco-friendly and Cost-Efficient Retaining Wall / G.C. Chikute, I.P. Sonar // Advances in Sustainable Construction Materials: Select Proceedings of ASCM 2020. — Singapore: Springer Singapore, 2021. — P. 229–249. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-33-4590-4_22 DOI: [10.1007/978-981-33-4590-4_22](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4590-4_22) (дата обращения: 29.06.2025).
58. Анохин, А.М. Комплекс конструкций и сооружений для защиты берегов рек и каналов от эрозии / А.М. Анохин, А.Ю. Гарбуз // Мелиорация и гидротехника. — 2023. — Т. 13. — № 2. — С. 318–333. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1370> DOI: [10.31774/2712-9357-2023-13-2-318-333](https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-318-333) EDN: [NVGMWG](https://www.edn.net/NVGMWG) (дата обращения: 29.06.2025).
59. Созаев, А.А. Новая конструкция берегоукрепительного сооружения для русел в легкоразмываемых грунтах / А.А. Созаев [и др.] // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета имени В.М. Кокова. — 2024. — № 3(45). — С. 16–22. URL: <https://kbgau.ru/riu/vypuski/arkhiv-nomerov/2024/3/2.pdf> DOI: [10.55196/2411-3492-2024-3-45-16-22](https://doi.org/10.55196/2411-3492-2024-3-45-16-22) EDN: [CDGSAM](https://www.edn.net/CDGSAM) (дата обращения: 29.06.2025).

60. Усова, А.В. Обследование армогрунтовых подпорных стен / А.В. Усова // Тенденции развития науки и образования. — 2021. — № 79-2. — С. 98–101. URL: <https://doicodex.ru/doi/10.18411/trnio-11-2021-71.pdf> DOI: [10.18411/trnio-11-2021-71](https://doi.org/10.18411/trnio-11-2021-71) EDN: [EPTAKL](https://www.edn.net/EPTAKL) (дата обращения: 29.06.2025).
61. Нуриева, Д.М. Анализ опыта проектирования и строительства подземных сооружений с применением "стены в грунте" / Д.М. Нуриева, И.В. Агафонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2023. — № 4(66). — С. 61–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55036174> DOI: [10.52409/20731523_2023_4_61](https://doi.org/10.52409/20731523_2023_4_61) EDN: [EREYGS](https://www.edn.net/EREYGS) (дата обращения: 29.06.2025).
62. Овчинников, Н.М. Обзор методов реконструкции причалов типа "больверк" / Н.М. Овчинников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. — 2021. — № 1. — С. 98–107. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45555616> DOI: [10.15593/2409-5125/2021.01.08](https://doi.org/10.15593/2409-5125/2021.01.08) EDN: [TKBGNL](https://www.edn.net/TKBGNL) (дата обращения: 29.06.2025).
63. Liu, X. Recent advances in subgrade engineering for high-speed railway / X. Liu [et al.] // Intelligent Transportation Infrastructure. — 2023. — Vol. 2. — P. liad001. URL: <https://academic.oup.com/iti/article/doi/10.1093/iti/liad001/7026058?login=false> DOI: [10.1093/iti/liad001](https://doi.org/10.1093/iti/liad001) EDN: [HAMWHT](https://www.edn.net/HAMWHT) (дата обращения: 29.06.2025).
64. Abdrabbo, F.M. Towards construction of embankment on soft soil: a comparative study of lightweight materials and deep replacement techniques / F.M. Abdrabbo [et al.] // Scientific Reports. — 2024. — Vol. 14. — № 1. — P. 29628. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-77587-0> DOI: [10.1038/s41598-024-77587-0](https://doi.org/10.1038/s41598-024-77587-0) EDN: [QYWLUI](https://www.edn.net/QYWLUI) (дата обращения: 29.06.2025).
65. Тер-Мартirosян, З.Г. Напряженно-деформированное состояние слабых и насыпных грунтов, армированных железобетонными и грунтовыми сваями соответственно / З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, А.С. Акулецкий // Вестник МГСУ. — 2021. — Т. 16. — № 9. — С. 1182–1190. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47174546> DOI: [10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190) EDN: [NQKSQP](https://www.edn.net/NQKSQP) (дата обращения: 29.06.2025).
66. Иванов, А.Ю. Применение трёхкомпонентной системы "свая-грунт-плита" в карстовых районах / А.Ю. Иванов // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. — 2023. — Т. 3. — № 1. — С. 039–043. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54134753> DOI: [10.51639/2713-0576_2023_3_1_39](https://doi.org/10.51639/2713-0576_2023_3_1_39) EDN: [SSUAUZ](https://www.edn.net/SSUAUZ) (дата обращения: 29.06.2025).
67. Багинова, К.В. Способ укрепления грунтов основания по технологии "щебенистые (щебеночные) сваи" / К.В. Багинова, А.В. Петров // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2020. — Т. 10. — № 1(32). — С. 32–45. URL: https://journals.istu.edu/izvestia_invest/journals/2020/32/articles/03 DOI: [10.21285/2227-2917-2020-1-32-45](https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-32-45) EDN: [ALBOPI](https://www.edn.net/ALBOPI) (дата обращения: 29.06.2025).
68. Amran, M. An ultra-lightweight cellular concrete for geotechnical applications-A review / M. Amran [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2022. — Vol. 16. — P. e01096. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522002285> DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e01096](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01096) EDN: [JBRRFY](https://www.edn.net/JBRRFY) (дата обращения: 29.06.2025).
69. Решетилов, Н.О. Алгоритм расчета облегченной насыпи с применением пенополистирольных блоков / Н.О. Решетилов, Г.П. Иванов // Инновационные научные исследования. — 2023. URL: <https://zenodo.org/records/7991899> DOI: [10.5281/zenodo.7991899](https://doi.org/10.5281/zenodo.7991899) EDN: [ZNDYJX](https://www.edn.net/ZNDYJX) (дата обращения: 29.06.2025).
70. Колос, А.Ф. Исследование эффективности конструктивных решений земляного полотна автомобильных дорог при различной высоте насыпи на слабом основании / А.Ф. Колос, В.А. Черняева, О.В. Максимов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. — 2024. — № 7-2(94). — С. 175–180. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68589244> DOI: [10.24412/2500-1000-2024-7-2-175-180](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-7-2-175-180) EDN: [IVXZBS](https://www.edn.net/IVXZBS) (дата обращения: 29.06.2025).
71. Yuan, X. Engineering Properties and Applications of Air-Foamed Lightweight Soil / X. Yuan [et al.] // Advances in Materials Science and Engineering. — 2022. — Vol. 2022. — № 1. — P. 4967037. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/4967037> DOI: [10.1155/2022/4967037](https://doi.org/10.1155/2022/4967037) EDN: [BFWRJL](https://www.edn.net/BFWRJL) (дата обращения: 29.06.2025).
72. Chaiyaput, S. Application of a cement-clay-air foam mixture as a lightweight embankment material for construction on soft clay / S. Chaiyaput [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2023. — Vol. 18. — P. e02188. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523003686> DOI: [10.1016/j.cscm.2023.e02188](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02188) EDN: [UkLNTN](https://www.edn.net/UkLNTN) (дата обращения: 29.06.2025).

73. Jiang, P. Strength properties and microscopic mechanism of lime and fly ash modified expandable poly styrene lightweight soil reinforced by polypropylene fiber / P. Jiang [et al.] // *Case Studies in Construction Materials*. — 2022. — Vol. 17. — P. e01250. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S214509522003825> DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e01250](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01250) EDN: [DVMDHC](https://www.edn.net/DVMDHC) (дата обращения: 29.06.2025).
74. Зайцев, Д.А. Опыт и перспективы использования горизонтальных дренажных скважин на объектах горнодобывающей промышленности / Д.А. Зайцев [и др.] // *Горный журнал*. — 2022. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2164/article/35974/?language=en> DOI: [10.17580/gzh.2022.11.05](https://doi.org/10.17580/gzh.2022.11.05) EDN: [TUHETQ](https://www.edn.net/TUHETQ) (дата обращения: 29.06.2025).
75. Пчелкин, В.В. Конструкция, способ строительства и метод расчета дренажа автомобильных тоннелей / В.В. Пчелкин, К.С. Семенова, С.О. Владимиров // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. — 2024. — № 3(60). — С. 82–95. URL: <https://journals.dvfu.ru/vis/article/view/1397> DOI: [10.24866/2227-6858/2024-3/82-95](https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-3/82-95) EDN: [ESTVOB](https://www.edn.net/ESTVOB) (дата обращения: 29.06.2025).
76. Chen, H. Land reclamation using the horizontal drainage enhanced geotextile sheet method / H. Chen [et al.] // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2023. — Vol. 51. — № 1. — P. 131–150. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114422001121> DOI: [10.1016/j.geotexmem.2022.10.003](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.10.003) EDN: [MXGIJH](https://www.edn.net/MXGIJH) (дата обращения: 29.06.2025).

Сведения об авторах:

Войтих Алексей Николаевич — руководитель направления общестроительных решений, ООО «Газпромнефть — Промышленные инновации», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: abz-1_lab@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5157-773X>

Тюрюханов Кирилл Юрьевич — кандидат технических наук, руководитель направления по минеральным материалам и грунтам, ООО «Газпромнефть — Промышленные инновации», Санкт-Петербург, Россия, доцент кафедры «Строительных технологий», ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, Россия, e-mail: Turuchanov.k.u@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6417-5481>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=969266

Статья получена: 29.08.2025. Принята к публикации: 21.11.2025. Опубликовано онлайн: 05.12.2025.

REFERENCES

1. Chen A., Wang J., Li Y., Zhang Q., Liu H. Ground vibration propagation and attenuation of vibrating compaction. *Journal of Vibroengineering*. 2019;21(5):1342–1352. DOI: [10.21595/jve.2019.20388](https://doi.org/10.21595/jve.2019.20388). (In Eng.).
2. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review. *Construction and Building Materials*. 2023;398:132435. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.132435](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435). (In Eng.).
3. Ali L.H., Atemimi Y.K. Effective Use of Pozzolan Materials for Stabilizing Expansive Soils: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024;1374(1):012014. DOI: [10.1088/1755-1315/1374/1/012014](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1374/1/012014). (In Eng.).
4. Utkarsh, Jain P.K. A review on innovative approaches to expansive soil stabilization: Focussing on EPS beads, sand, and jute. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2024;31(1):20240005. DOI: [10.1515/secm-2024-0005](https://doi.org/10.1515/secm-2024-0005). (In Eng.).
5. Panarin I.I., Fediuk R.S., Vykhodtsev I.A., Vavrenyuk S.V., Klyuev A.V. Injection mortars based on composite cements for soil fixation. *Construction Materials and Products*. 2023;6(4):15–29. DOI: [10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29](https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Akhtaev S.S., Uzdieva N.S., Nuradinov A.S., Elmurzaev A.A. Controlling the processes of crystallization and structure formation of ingots by external physical and chemical influences on liquid and solidifying metal. *Herald of GSTOU. Engineering Sciences*. 2023;19(3):33. DOI: [10.26200/GSTOU.2023.50.11.004](https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.50.11.004). (In Russ., abstract in Eng.).

7. Nazari Z., Tabarsa A., Latifi N. Effect of compaction delay on the strength and consolidation properties of cement-stabilized subgrade soil. *Transportation Geotechnics*. 2021;27:100495. DOI: [10.1016/j.trgeo.2020.100495](https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100495). (In Eng.).
8. Wang J., Li P., Zhang Y., Liu R., Zhao X. Post-settlement of rockfill in silty soil reinforced by explosive replacement method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*. 2024:1–13. DOI: [10.1680/jgeen.24.00312](https://doi.org/10.1680/jgeen.24.00312). (In Eng.).
9. Wotzlaw M., Aubram D., Rackwitz F. Experimental and numerical study on the compaction of granular soils by vibrations. In: *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*. CRC Press; 2024:2735–2738. DOI: [10.1201/9781003431749-532](https://doi.org/10.1201/9781003431749-532). (In Eng.).
10. Shokarev V.S., Gabibov F.G. Acceleration of consolidation of water-saturated loess subsidence massifs during their compaction by deep explosions. In: *Smart Geotechnics for Smart Societies*. CRC Press; 2023:493–497. DOI: [10.1201/9781003299127-59](https://doi.org/10.1201/9781003299127-59). (In Eng.).
11. Budanova E.S., Yarmolinsky V.A. Cold recycling. Of use improving the efficiency of the in the territory Russian Federation. *Smart Composite in Construction*. 2022;3(2):54–67. DOI: [10.52957/27821919_2022_2_54](https://doi.org/10.52957/27821919_2022_2_54). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Zhao G., Wang H., Li F., Zhang Y., Chen X. Utilization of recycled concrete powder in modification of the dispersive soil: A potential way to improve the engineering properties. *Construction and Building Materials*. 2023;389:131626. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.131626](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131626). (In Eng.).
13. Prolygin A.S., Alexandrov A.S., Dolgih G.V., Chusov V.V. Influence of the crushed stone content on the deformation modulus of the soil-crushed stone layer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6(82)):772–789. DOI: [10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-772-789). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Perusomula H., Krishnaiah S. Effect of elevated temperature on geotechnical properties of soils-A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022;69:1130–1133. DOI: [10.1016/j.matpr.2022.08.178](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.178). (In Eng.).
15. Novikov M.V., Sotnikova O.A., Goikalov A.N. Bearing capacity of complex structures of cellular concrete. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2021;2(36):20–25. DOI: [10.52684/2312-3702-2021-36-2-20-25](https://doi.org/10.52684/2312-3702-2021-36-2-20-25). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Sokolov N.S. [The influence of physical processes on the installation of bored piles]. In: [Science of Russia: Objectives and Tasks: Collection of scientific papers based on the results of the XXXIX International Scientific and Practical Conference, Samara, October 5, 2023]. 2023:114–120. DOI: [10.18411/nrciz-10-2023-26](https://doi.org/10.18411/nrciz-10-2023-26). (In Russ.).
17. Alekseev A.G., Sazonov P.M., Zorin D.V., Alekseeva A.A., Dymchenko I.A. Restoration of serviceability of bases and foundations in the Arctic zone and permafrost zone of Russia. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;43(4):66–80. DOI: [10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-66-80](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-66-80). (In Russ., abstract in Eng.).
18. Volokhov E.M., Mukminova D.Z. Deformations assessment during subway escalator tunnels construction by the method of artificial freezing of soil for the stage of ice wall formation. *Journal of Mining Institute*. 2021;252:826–839. DOI: [10.31897/PMI.2021.6.5](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.5). (In Russ.).
19. Makhno D.A., Aginej R.V., Belousov A.E., Puzhajlo A.F. Pat. No. 2755770 Russian Federation, MPK E02D3/115. [Device for cooling plastic-frozen soils]. patent holder: Sankt-Peterburgskij gornyj universitet. No. 2021106482; declared: 12.03.2021; published: 21.09.2021, Bull. No. 27. Available from: <https://patents.google.com/patent/RU2755770C1/ru>. (In Russ.).
20. Velichkin A.V., Odintsov D.N., Kashurin D.A., Osokin A.B., Nikolajchuk E.V., Vasil'eva A.O., Mihal'chenko D.I. Pat. No. 2779153 Russian Federation, MPK E02D3/12; E01C7/36. [Methods for protecting sloping soil surfaces from erosion]. patent holder: OOO "Gazprom dobycha Nadym". No. 2021139565; declared: 27.12.2021; published: 05.09.2022, Bull. No. 25. Available from: <https://patents.google.com/patent/RU2779153C1/ru>. (In Russ.).
21. Li X., Li X. A soil freezing-thawing model based on thermodynamics. *Cold Regions Science and Technology*. 2023;211:103867. DOI: [10.1016/j.coldregions.2023.103867](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103867). (In Eng.).
22. Shajmuratov V.H. Pat. No. 2149949 Russian Federation, MPK E02D3/11. [Method of stabilizing clay soils]. patent holder: V.H. Shajmuratov. No. 98105274/03; declared: 12.03.1998; published: 27.05.2000. Available from: <https://patents.google.com/patent/RU2149949C1/ru>. (In Russ.).

23. Sahib A.A., Bushra I., Rejimon G. Electro-osmosis: a review from the past. In: *Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns: Proceedings of IGC 2018*. 2021;433–442. DOI: [10.1007/978-981-15-6237-2_36](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6237-2_36). (In Eng.).
24. Sun Z., Li Y., Wang J., Zhang H., Liu F. Electroosmotic strengthening of soft clay under different electrification modes. *Energy Science & Engineering*. 2024;12(7):3126–3141. DOI: [10.1002/ese3.1806](https://doi.org/10.1002/ese3.1806). (In Eng.).
25. Han D.W., Lee S., Kim J., Park J., Choi Y. Comparing shallow landslide susceptibility maps in Northeastern Türkiye (Beşikdüzü, Trabzon): a multivariate statistical, machine learning, and physical data-based analysis. *Water Air and Soil Pollution*. 2024;83. DOI: [10.1007/s11270-021-05182-4](https://doi.org/10.1007/s11270-021-05182-4). (In Eng.).
26. Romanov N.V., Racinais J. Review of modern technologies of reinforcement and stabilization of soft soils. *Moscow State University of Civil Engineering*. 2018;13(4(115)):499–513. DOI: [10.22227/1997-0935.2018.4.499-513](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.4.499-513). (In Russ., abstract in Eng.).
27. Mikhailov A., Evlahova E., Ivanova A., Matveev M. Strengthening the soil foundations by the method of injection of silication. *Construction and Architecture*. 2019;7(1):5–9. DOI: [10.29039/article_5c646f166c48d2.74103573](https://doi.org/10.29039/article_5c646f166c48d2.74103573). (In Russ., abstract in Eng.).
28. Zotsenko M., Novytskyi O. Methods of soils cementation. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2684(1):030045. DOI: [10.1063/5.0119941](https://doi.org/10.1063/5.0119941). (In Eng.).
29. Bonić Z., Vasić M., Vukićević M., Đogo M., Lojpur M. Chemical Stabilisation of Clayey Soil-Comparison of a Variety of Additives with Respect to Their Effects on the Soil Compressive Strength and Shear Strength. *Buildings*. 2025;15(4):552. DOI: [10.3390/buildings15040552](https://doi.org/10.3390/buildings15040552). (In Eng.).
30. Bai Y., Wang L., Li J., Zhang K., Liu Y. Soil stabilization using synthetic polymer for soil slope ecological protection. *Engineering Geology*. 2023;321:107155. DOI: [10.1016/j.enggeo.2023.107155](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107155). (In Eng.).
31. Liu S.Y., Du Y.J., Yi Y.L., Zhang M., Feng S.J. Field investigation of shallow soft-soil highway subgrade treated by mass carbonation technology. *Canadian Geotechnical Journal*. 2021;58(1):97–113. DOI: [10.1139/cgj-2020-0008](https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0008). (In Eng.).
32. Liu S., Du Y., Yi Y., Zhang M. Experimental Study on Mass Stabilization of Soft Soil Foundation Based on MgO-CO₂ Carbonation Technology. In: *Advances in Transportation Geotechnics IV: Proceedings of the 4th International Conference on Transportation Geotechnics Volume 1*. Cham: Springer International Publishing; 2021:743–752. DOI: [10.1007/978-3-030-77230-7_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77230-7_56). (In Eng.).
33. Ahmad A., Hassan M.I., Yusof M.Z., Ismail M.A., Othman N.H. Feasibility of bituminous stabilizer in the stabilization of problematic soil: An overview on the non-traditional soil additive. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2688(1):040012. DOI: [10.1063/5.0113900](https://doi.org/10.1063/5.0113900). (In Eng.).
34. Pugin K.G., Norin I.O., Ketov A.I. Improving the characteristics of soils used for road construction. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2023;1-S:13–19. DOI: [10.15593/24111678/2023.01.02](https://doi.org/10.15593/24111678/2023.01.02). (In Russ., abstract in Eng.).
35. Chudinov S.A. [Improving soil stabilization technology in the construction of forestry roads]. Ekaterinburg: UGLTU; 2022. 164 p. ISBN 978-5-94984-852-4. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53667094>. (In Russ.).
36. Okolnikova G.E., Simonenko E.Y. Chemical stabilization of expansive soils. *Systems technologies*. 2023;2(47):178–181. DOI: [10.55287/22275398_2023_2_178](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_2_178). (In Russ., abstract in Eng.).
37. Zhang J., Liu J. A review on soils treated with biopolymers based on unsaturated soil theory. *Polymers*. 2023;15(22):4431. DOI: [10.3390/polym15224431](https://doi.org/10.3390/polym15224431). (In Eng.).
38. Kusbergenova Zh.T., Tulebekova A.S., Zhumadilov I.T. A review of the use of ureolytic bacteria in the process of biocementation of soils. *Bulletin of LN Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series*. 2024;146(1):158–176. DOI: [10.32523/2616-7263-2024-146-1-158-176](https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-146-1-158-176). (In Russ., abstract in Eng.).
39. Omoregie A.I., Khosravi A., He J., Unluer C. Soil bio-cementation treatment strategies: state-of-the-art review. *Geotechnical Research*. 2023;11(1):3–27. DOI: [10.1680/jgere.22.00051](https://doi.org/10.1680/jgere.22.00051). (In Eng.).
40. Sulaiman H., Al-Bared M., Marto A., Kasa A., Farooq K. Performance of soil stabilized with biopolymer materials-xanthan gum and guar gum. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2022;128:103276. DOI: [10.1016/j.pce.2022.103276](https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103276). (In Eng.).

41. Iamchaturapatr J., Piriyaikul K., Petcherdchoo A. Characteristics of sandy soil treated using EICP-based urease enzymatic acceleration method and natural hemp fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16:e00871. DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e00871](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00871). (In Eng.).
42. Xiao Y., Liu H., Nan B., Zhang W., Li L. Experimental studies on compressive and tensile strength of cement-stabilized soil reinforced with rice husks and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2022;344:128242. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.128242](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128242). (In Eng.).
43. Ni J., Li S.S., Geng X.Y. Mechanical and biodeterioration behaviours of a clayey soil strengthened with combined carrageenan and casein. *Acta Geotechnica*. 2022;17(12):5411–5427. DOI: [10.1007/s11440-022-01588-4](https://doi.org/10.1007/s11440-022-01588-4). (In Eng.).
44. Kollannur N.J., Arnepalli D.N. Electrochemical treatment and associated chemical modifications of clayey soils: a review. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021;15(3):349–358. DOI: [10.1080/19386362.2019.1653513](https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1653513). (In Eng.).
45. Sadeghian F., Ghasemi M., Bayat M., Mousivand M. Effects of variations of voltage and pH value on the shear strength of soil and durability of different electrodes and piles during electrokinetic phenomenon. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022;14(2):625–636. DOI: [10.1016/j.jrmge.2021.07.017](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.017). (In Eng.).
46. Abdrabbo F.M., Gaaver K.E., El-Sayed M.H., El-Molla D.A. Towards construction of embankment on soft soil: a comparative study of lightweight materials and deep replacement techniques. *Scientific Reports*. 2024;14(1):29628. DOI: [10.1038/s41598-024-77587-0](https://doi.org/10.1038/s41598-024-77587-0). (In Eng.).
47. Ali N.A. Performance of partially replaced collapsible soil-Field study. *Alexandria Engineering Journal*. 2015;54(3):527–532. DOI: [10.1016/j.aej.2015.05.002](https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.002). (In Eng.).
48. Chatrabhuji, Meshram K. Use of geosynthetic materials as soil reinforcement: an alternative eco-friendly construction material. *Discover Civil Engineering*. 2024;1(1):41. DOI: [10.1007/s44290-024-00050-6](https://doi.org/10.1007/s44290-024-00050-6). (In Eng.).
49. Kumar S., Singh S.K. Subgrade soil stabilization using geosynthetics: A critical review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: [10.1016/j.matpr.2023.04.266](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.266). (In Eng.).
50. Kanatova Zh.K., Jumadilova S.Zh., Temirbekova F.B., Aliev I.O. Studies of the effect of reinforcement with geosynthetic materials on the strength of soils under conditions of triaxial compression and single-plane section. *Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction*. 2024;3(93):121–138. DOI: [10.51488/1680-080X/2024.3-09](https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-09). (In Russ., abstract in Eng.).
51. Keskin N., Yildiz A., Ozturk T., Guler M. A Review Study on the Reinforcement of Soils with Natural and Synthetic Fibers. *Erzincan University Journal of Science and Technology*. 14(2):631–663. DOI: [10.18185/erzifbed.874339](https://doi.org/10.18185/erzifbed.874339). (In Eng.).
52. Alqawasmeh H., Alzubi Y., Mahamied A. State-of-the-Art Review: Fiber-Reinforced Soil as a Proactive Approach for Liquefaction Mitigation and Risk Management. *Journal of Engineering*. 2023;2023(1):8737304. DOI: [10.1155/2023/8737304](https://doi.org/10.1155/2023/8737304). (In Eng.).
53. Shalchian M.M., Arabani M. A review of soil reinforcement with planetary fibers. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2022;22(4):4496–4532. DOI: [10.1007/s42729-022-01052-y](https://doi.org/10.1007/s42729-022-01052-y). (In Eng.).
54. Medina-Martinez C.J., Martinez-Barrera G., Hidalgo-Santiago C.E., Brostow W., Menchaca-Campos C. Use of sawdust fibers for soil reinforcement: a review. *Fibers*. 2023;11(7):58. DOI: [10.3390/fib11070058](https://doi.org/10.3390/fib11070058). (In Eng.).
55. Munoz-Medina B., Pujadas P., Cavalaro S.H.P., Aguado A. Typology selection of retaining walls based on multicriteria decision-making methods. *Applied Sciences*. 2021;11(4):1457. DOI: [10.3390/app11041457](https://doi.org/10.3390/app11041457). (In Eng.).
56. Topchy D.V., Chipova Z.H. Technological features of construction of retaining walls. *Izvestiya Tula State University*. 2024;4(4):151–154. DOI: [10.24412/2071-6168-2024-4-151-152](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-4-151-152). (In Russ., abstract in Eng.).
57. Chikute G.C., Sonar I.P. Gabion Wall: Eco-friendly and Cost-Efficient Retaining Wall. In: *Advances in Sustainable Construction Materials: Select Proceedings of ASCM 2020*. Singapore: Springer Singapore; 2021:229–249. DOI: [10.1007/978-981-33-4590-4_22](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4590-4_22). (In Eng.).
58. Anokhin A.M., Garbuz A.Yu. A complex of river bank-and-canal protection structures and facilities from erosion. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(2):318–333. DOI: [10.31774/2712-9357-2023-13-2-318-333](https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-318-333). (In Russ., abstract in Eng.).
59. Sozaev A.A., Kurbanov S.O., Kokoev M.N., Badzhmuk A.M.S. A new design of a shore protection structure for riverbeds in easily eroded soils. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2024;3(45):16–22. DOI: [10.55196/2411-3492-2024-3-45-16-22](https://doi.org/10.55196/2411-3492-2024-3-45-16-22). (In Russ., abstract in Eng.).

60. Usova A.V. [Обследование армогрунтовых подпорных стен]. *Trends in the development of science and education*. 2021;79-2:98–101. DOI: [10.18411/trnio-11-2021-71](https://doi.org/10.18411/trnio-11-2021-71). (In Russ.).
61. Nurieva M.D., Agafonov I.V. Analysis of experience in design and construction of underground structures using "diaphragm wall". *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023;4(66):61–72. DOI: [10.52409/20731523_2023_4_61](https://doi.org/10.52409/20731523_2023_4_61). (In Russ., abstract in Eng.).
62. Ovchinnikov N. Review of methods for reconstruction of bulwark type berths. *PNRPU Bulletin, Applied ecology. Urban development*. 2021;(1):98–107. DOI: [10.15593/2409-5125/2021.01.08](https://doi.org/10.15593/2409-5125/2021.01.08). (In Russ., abstract in Eng.).
63. Liu X., Bian X., Li W., Zhang J., Chen Y. Recent advances in subgrade engineering for high-speed railway. *Intelligent Transportation Infrastructure*. 2023;2:liad001. DOI: [10.1093/iti/liad001](https://doi.org/10.1093/iti/liad001). (In Eng.).
64. Abdrabbo F.M., Gaaver K.E., El-Sayed M.H., El-Molla D.A. Towards construction of embankment on soft soil: a comparative study of lightweight materials and deep replacement techniques. *Scientific Reports*. 2024;14(1):29628. DOI: [10.1038/s41598-024-77587-0](https://doi.org/10.1038/s41598-024-77587-0). (In Eng.).
65. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Akuletskij A.S. Stress-strain state of weak and filled soils reinforced with reinforced concrete and soil piles, respectively. *Vestnik MGSU*. 2021;16(9):1182–1190. DOI: [10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.9.1182-1190). (In Russ., abstract in Eng.).
66. Ivanov A.U. Application of the three-component «pile-soil-slab» system in karst areas. *Youth Journal of Novorossiysk Branch of Belgorod V.G. Shukhov State Technology University*. 2023;3(1):039–043. DOI: [10.51639/2713-0576_2023_3_1_39](https://doi.org/10.51639/2713-0576_2023_3_1_39). (In Russ., abstract in Eng.).
67. Baginova K.V., Petrov A.V. Reinforcement of soils using vibro-stone piling. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*. 2020;10(1(32)):32–45. DOI: [10.21285/2227-2917-2020-1-32-45](https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-32-45). (In Russ., abstract in Eng.).
68. Amran M., Fediuk R., Vatin N., Lee Y.H., Murali G. An ultra-lightweight cellular concrete for geotechnical applications-A review. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16:e01096. DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e01096](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01096). (In Eng.).
69. Reshetilov N.O., Ivanov G.P. Algorithm for calculating a lightweight embankment using polystyrene foam blocks. *Innovative Scientific Research*. 2023. DOI: [10.5281/zenodo.7991899](https://doi.org/10.5281/zenodo.7991899). (In Russ., abstract in Eng.).
70. Kolos A.F., Chernyaeva V.A., Maksimov O.V. Study of the effectiveness of design solutions for highway subgrades at different embankment heights on a weak foundation. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;7-2(94):175–180. DOI: [10.24412/2500-1000-2024-7-2-175-180](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-7-2-175-180). (In Russ., abstract in Eng.).
71. Yuan X., Wang L., Li P., Liu Y., Zhang K. Engineering Properties and Applications of Air-Foamed Lightweight Soil. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;2022(1):4967037. DOI: [10.1155/2022/4967037](https://doi.org/10.1155/2022/4967037). (In Eng.).
72. Chaiyaput S., Bergado D.T., Artidteang S., Tanchaisawat T. Application of a cement-clay-air foam mixture as a lightweight embankment material for construction on soft clay. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e02188. DOI: [10.1016/j.cscm.2023.e02188](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02188). (In Eng.).
73. Jiang P., Li Y., Wang J., Liu F., Zhang H. Strength properties and microscopic mechanism of lime and fly ash modified expandable poly styrene lightweight soil reinforced by polypropylene fiber. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;17:e01250. DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e01250](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01250). (In Eng.).
74. Zaitsev D.A., Genzel G.N., Edakin D.A., Fedorenko I.N. Horizontal well dewatering systems in mining: experience and prospects. *Gornyi Zhurnal*. 2022. DOI: [10.17580/gzh.2022.11.05](https://doi.org/10.17580/gzh.2022.11.05). (In Russ., abstract in Eng.).
75. Pchelkin V.V., Semenova K.S., Vladimirov S.O. Design, construction method and method for calculating drainage of road tunnels. *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU, FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2024;3(60):82–95. DOI: [10.24866/2227-6858/2024-3/82-95](https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-3/82-95). (In Russ., abstract in Eng.).
76. Chen H., Wang J., Li P., Liu R., Zhang Y. Land reclamation using the horizontal drainage enhanced geotextile sheet method. *Geotextiles and Geomembranes*. 2023;51(1):131–150. DOI: [10.1016/j.geotexmem.2022.10.003](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.10.003). (In Eng.).

Information about the authors:

Aleksey N. Voytikh — Gazpromneft — Industrial Innovations Limited Liability Company, Saint Petersburg, Russia, e-mail: abz-1_lab@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5157-773X>

Kirill Yu. Tyuryukhanov — Gazpromneft — Industrial Innovations Limited Liability Company, Saint Petersburg, Russia, Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Prianishnikov, Perm, Russia, e-mail: Turuchanov.k.u@list.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6417-5481>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=969266

Submitted: 29th August 2025. Revised: 21st November 2025. Published online: 5th December 2025.