

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

О.А.МАКОВЕЦКИЙ¹, д-р техн. наук, С.С. РУБЦОВА², Д.И. САМОЙЛОВ¹, С.С. ЗУЕВ²

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, д. 29, г. Пермь, Пермский край, 614990, Россия

АО «Нью Граунд», ул. Кронштадская, 35, г. Пермь, Пермский край, 614081, Россия

Аннотация

Введение. Территория распространения многолетнемерзлых грунтов занимает большую часть территории России, поэтому расширение возможностей использования этих регионов для развития промышленного строительства является важной стратегической задачей для государства. На сегодняшний день, в соответствии со Стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2028 года, приоритетным регионом, с точки зрения экономического роста и стратегического влияния, является Арктическая зона Российской Федерации.

Цель. При проектировании, строительстве и дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах наиболее актуальной задачей является обеспечение надежности грунтового основания.

Материалы и методы. В связи с этим выбор конструктивно-технологических и организационных решений промышленного строительства, прежде всего, это прогноз деформативности, мероприятия по обеспечению устойчивости грунтового основания и разработка рациональных организационных схем по их реализации, должны быть экономически целесообразными, оптимальными или близкими к оптимальным для конкретного инженерного сооружения и региона его расположения.

Результаты. Обоснована возможность применения технологии струйной цементации грунта в основном режиме и в режиме высоконапорной инъекции для устройства искусственных оснований в растепленных многолетнемерзлых грунтах.

Выводы. Имеющийся опыт показывает, что при определенных инженерно-геологических условиях технология струйной цементации является эффективным и надежным способом модификации грунтов и устройства искусственных оснований.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, струйная цементация, грунтоцементный элемент, грунтоцементная свая, закрепление грунтов, талые грунты, закрепление в ММГ, инъекция грунта

Для цитирования: Маковецкий О.А., Рубцова С.С., Самойлов Д.И., Зув С.С. Геотехнические вопросы строительства в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2026. № 1(48). С. 156–167. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-156-167](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-156-167)

Вклад авторов

Маковецкий О.А. – научное руководство, методологическая поддержка, критический пересмотр и научное редактирование текста.

Самойлов Д.И. – концепция исследований, разработка программы и методики испытаний.

Зув С.С. – подготовка к проведению экспериментальных работ, экспертная оценка результатов.

Рубцова С.С. – консультации по нормативно-технической базе, критический пересмотр рукописи и уточнение выводов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.01.2026

Поступила после рецензирования 27.01.2026

Принята к публикации: 05.03.2026

GEOTECHNICAL ISSUES OF CONSTRUCTION IN PERMANENTLY FROZEN ZONES

O.A. MAKOVETSKIY¹, Dr. Sci. (Engineering), S.S. RUBTSOVA², D.I. SAMOYLOV¹, S.S. ZUEV²

¹Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Prospekt, Perm, Perm Krai, 614990, Russia

²New Ground JSC, 35 Kronstadskaya Street, Perm, Perm Krai, 614081, Russia

Abstract

Introduction. The area of permafrost occupies most of Russia's territory, making it crucial for the country to expand its use for industrial construction. Currently, the Arctic zone of the Russian Federation is a priority region for economic growth and strategic influence, as outlined in the Spatial Development Strategy of the Russian Federation until 2028.

Aim. When designing, constructing, and operating buildings and structures on permafrost soils, the most important task is to ensure the reliability of the soil foundation.

Materials and methods. In this regard, the choice of design, technological, and organizational solutions for industrial construction, primarily the prediction of deformability, measures to ensure the stability of the soil foundation, and the development of rational organizational schemes for their implementation, should be economically feasible, optimal, or close to optimal for a specific engineering structure and the region where it is located.

Results. The possibility of using the technology of jet grouting in the main mode and in the mode of high-pressure injection for the construction of artificial bases in thawed permafrost soils is substantiated.

Conclusions. The available experience shows that under certain engineering and geological conditions, jet grouting technology is an effective and reliable method for modifying soils and constructing artificial foundations.

Keywords: permafrost soils, jet grouting, soil-cement element, soil stabilization, thawed soil, stabilization in MMG, soil injection

For citation: Makovetskiy O.A., Rubtsova S.S., Samoylov D.I., Zuev S.S.

Geotechnical issues of construction in permanently frozen zones. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2026, no. 1(48), pp. 156–167. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-156-167](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-156-167)

Authors contribution statement

Makovetskiy O.A. – scientific management, methodological support, critical review and scientific editing of the text.

Samoylov D.I. – research concept, development of the program and test methods.

Zuev S.S. – preparation for conducting experimental work, expert assessment of the results.

Rubtsova S.S. – consultations on the regulatory and technical framework, critical review of the manuscript and clarification of the conclusions.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.01.2026

Revised 27.01.2026

Accepted 05.03.2026

Введение

На протяжении ряда лет основной целью совместной научной деятельности Пермского национального исследовательского политехнического университета и АО «Нью Граунд» является разработка экспериментально-теоретических основ, реализующих выполнение Федерального закона Российской Федерации Ф3-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», в котором обеспечение механической безопасности определяется как: «...отсутствие деформаций недопустимой величины строительных конструкций, основания здания или сооружения и геологических массивов прилегающих территорий». Для этого целесообразно смоделировать сценарии возникновения опасных природных и техногенных геологических процессов, учитывающих особенности взаимодействия элементов строительных конструкций между собой и с основанием, и предусмотреть работы по улучшению свойств грунтов основания.

Многолетнемерзлые грунты как основания надежны только при соблюдении их расчетных отрицательных температур. При повышении температуры (даже в области отрицательных значений температур) происходят существенные изменения свойств грунтов, что обуславливает нестабильность мерзлых пород. Глобальное потепление климата может привести к повышению температуры многолетнемерзлой толщи, увеличению глубины сезонного оттаивания грунтов, что, в свою очередь, снизит несущую способность оснований зданий и сооружений [1–4].

В соответствии со Стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2028 года, приоритетным регионом, с точки зрения экономического роста и стратегического влияния, является Арктическая зона Российской Федерации. Вечная мерзлота в Российской Федерации распространяется на 11 млн км² и составляет около 65 % территории страны.

Согласно последним оценочным докладам, темпы повышения арктических температур воздуха наиболее высокие; так, за период с 1991 по 2020 гг. линейный рост температуры в Северной полярной области составил около 2,64 °С, что негативно сказывается на промышленности и жилищных условиях распространения многолетнемерзлых грунтов [5].

По данным международной группы экспертов особенностью потепления климата является более быстрое изменение среднегодовой температуры планеты по сравнению с аналогичными циклами прошлых эпох. По северным районам России современный тренд повышения температуры воздуха составляет примерно 0,06 °С/год, что приводит к возникновению тренда потепления мерзлых грунтов (в интервале до глубины нулевых годовых амплитуд) в пределах 0,02...0,03 °С/год. Исследования изменения климата показали усиление интенсивности потепления за последнее десятилетие, что не может не сказаться на температуре многолетнемерзлых грунтов [6].

Помимо освоения новых территорий в настоящее время идет интенсивное обновление жилой застройки существующих северных городов, при которой, как правило, грунтовые условия площадок строительства оказываются значительно хуже, чем на вновь осваиваемых территориях. Как показывает анализ строительных площадок в черте г. Якутска, в основаниях, характеризующихся сложными мерзлотно-грунтовыми условиями, имеются локальные таликовые зоны, высокотемпературные и засоленные грунты, пласты подземных льдов, органические отходы и другие включения, которые

делают невозможным устройство оснований зданий и сооружений традиционными методами и применение известных типов фундаментов.

В настоящее время для обеспечения эксплуатационной надежности грунтовых оснований, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, используются следующие способы [7]:

1. Замена слабых грунтов непросадочными при оттаивании и непучинистыми при промерзании под нагрузкой грунтами.

2. Упрочнение грунтов оснований с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств – термостабилизаторов (жидкостных, парожидкостных).

3. Упрочнение грунтов путем инъектирования химических добавок – жидкого стекла, цемента и др.

4. Понижение температур верхнего несущего слоя грунтов с помощью вентилируемого подполья, вентилируемых каналов большого сечения, вентилируемых пространственных фундаментов.

Основная часть

Многолетнемерзлые грунты основания состоят из двух слоев: сезонно оттаивающего и многолетнемерзлого, которые являются, как правило, водонасыщенными и при оттаивании и промерзании могут давать большие осадки и выпучивания, ведущие за собой деформации зданий и сооружений. Предотвращение деформаций является основной задачей при возведении зданий и сооружений при строительстве на таких площадках [8].

Лед в порах грунта начинает таять при повышении температуры, которая уменьшает льдо-цементационные связи. При температуре, равной температуре оттаивания грунтовой влаги, сцепление между минеральными частицами скачкообразно падает до совершенно незначительных величин. При оттаивании мерзлых грунтов происходят два противоположных процесса: уплотнение за счет уменьшения пористости при отжати оттаявшей влаги и набухание частиц и агрегатов в набухающих глинистых грунтах.

Аналитическая расчетная оценка НДС в случае «промерзания–оттаивания» грунта затруднена даже при одномерном действии процессов [9]. Для двух-, трехмерных задач, особенно при совместном расчете системы «промерзающее (оттаивающее) основание–сооружение», необходимость применения численных методов является очевидной [10].

Совместная задача определения термо-напряженно-деформированного состояния основания.

Разработка расчетных моделей для теплотехнических расчетов предполагает моделирование системы с учетом пространственного положения, изменения литологии – учет всех инженерно-геологических скважин в пределах расчетной модели и напластования грунтов между ними, температур грунтов в трехмерном пространстве – задание температурного режима многолетнемерзлых и талых грунтов, динамики изменения теплового фона.

Результатом являются изменяющиеся во времени температурные поля от теплового воздействия здания (сооружения) и атмосферного влияния на грунт, по которым определяются значения ореолов оттаивания грунта в его основании (рис.1) [11].

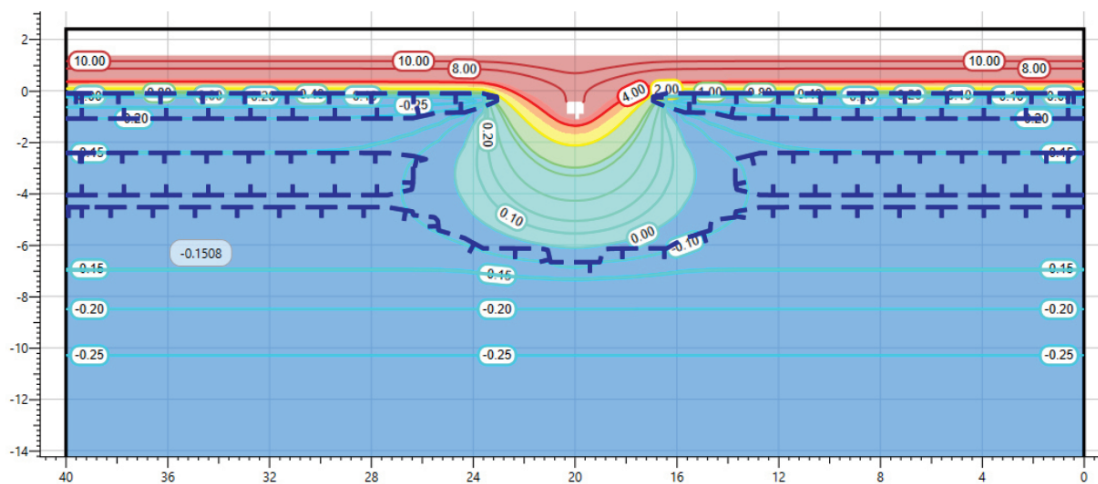


Рис.1. Температурное поле и ореол оттаивания от теплового воздействия [11]
Fig. 1. Temperature field and thawing halo from thermal exposure [11]

По данным о распространении ореолов оттаивания определяются расчетные значения осадок грунтов при их оттаивании. Далее, определяется максимальное значение ореола оттаивания, и соответственно, максимальные осадки грунта за период эксплуатации. Результаты расчетов осадки формируются в профили осадки – линейные графики максимальной осадки ММГ за период эксплуатации для всего расчетного участка. Следующий этап: численные значения профилей осадки используются в качестве дополнительной нагрузки при проведении статических и конструктивных расчетов.

Основными параметрами проектирования, по которым определяется уровень надежности системы «основание–здание», являются абсолютная величина развивающейся осадки и относительная разность осадок фундаментов здания. Рассмотрение уровня надежности грунтового основания по критерию предельно допустимых осадок возможно при увеличении модуля общих деформаций E , и одновременном уменьшении изменчивости этого показателя. Практически это ведет к искусственному улучшению оснований различными методами.

Модификация грунтовых оснований, сложенных многолетнемерзлыми грунтами

Разработка рациональных видов фундаментов и оснований для территорий со сложными природно-климатическими условиями и сложной транспортной схемой для доставки материалов, где затраты на устройство фундаментов отличаются от центральной части России высокой трудоемкостью и стоимостью является актуальной задачей.

В условиях возможного изменения физических и механических характеристик многолетнемерзлых грунтов во времени логично использовать конструктивные методы улучшения работы грунтов основания, такие как вертикальное армирование гибкими и жесткими цилиндрическими элементами, формируя геотехнические массивы.

Геотехнический массив – это слой грунта с модифицированными свойствами, создаваемый для улучшения условий работы подземной части здания или сооружения, предотвращающий или ограничивающий распространение некоего воздействия на среду.

Армирование земляного полотна вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами применяется при строительстве транспортных сооруже-

ний [12]. При устройстве жестких вертикальных армирующих элементов модификация грунтов выполняется с использованием технологии струйной цементации. Возможность применения струйной цементации в условиях многолетнемерзлых грунтов рассматривается в работах ряда авторов [13, 14].

АО «Нью Граунд» на протяжении последних десяти лет ведет опытно-исследовательские и производственные работы по использованию струйной цементации и высоконапорной инъекции в многолетнемерзлых грунтах [15].

В условиях монолитных многолетнемерзлых грунтов для формирования грунтоцементного элемента используется комплекс оборудования: для растепления вертикальной цилиндрической зоны грунта применяется установка подачи пара марки ППУ 1600/100 и буровая установка с комплексом струйной цементации (рис. 2а). Технологические параметры режима растепления определяются геологическими условиями площадки строительства. При этом в грунте формируется вертикальная цилиндрическая зона талого грунта диаметром до 1200 мм (рис. 2б).



Рис. 2а. Комплекс для выполнения струйной цементации в многолетнемерзлых грунтах
Fig. 2a. Complex for performing jet cementation in permafrost soils



Рис. 2б. Зона растепления грунта и положение датчиков температуры
Fig. 2b. Soil thawing zone and position of temperature sensors

В ходе опытно-исследовательских работ было выполнено измерение изменения температурного поля в ходе растепления. Измерение выполнялось по радиусу зоны растепления с шагом точек определения 100 мм, на глубине 1000 мм от поверхности. Определение температуры проводилось непосредственно после окончания процесса растепления – график представлен на рис. 3, и каждые шесть часов в течении двух суток.

Через 48 часов на периферии зоны растепления оставалась положительная температура грунта 1,5...2,5 градуса Цельсия.

Растепление грунта происходит в цилиндрической зоне, при этом ликвидируются ледовые связи в грунте, а затем в ходе процесса струйной цементации этого пространства формируются цементационные связи, грунтоцементные элементы. Условия кристаллизации цемента в растепленной зоне благоприятные, и формируется однородный грунтоцементный композит – грунтобетон [16].

Отобранные из тела грунтобетонного элемента керны имеют достаточно однородную структуру (рис. 4а) и в процессе лабораторных испытаний показывают высокие прочностные и деформационные характеристики – прочность на сжатие находится в диапазоне 6,0...8,0 МПа, секущий модуль деформации – 1800...2000 МПа.

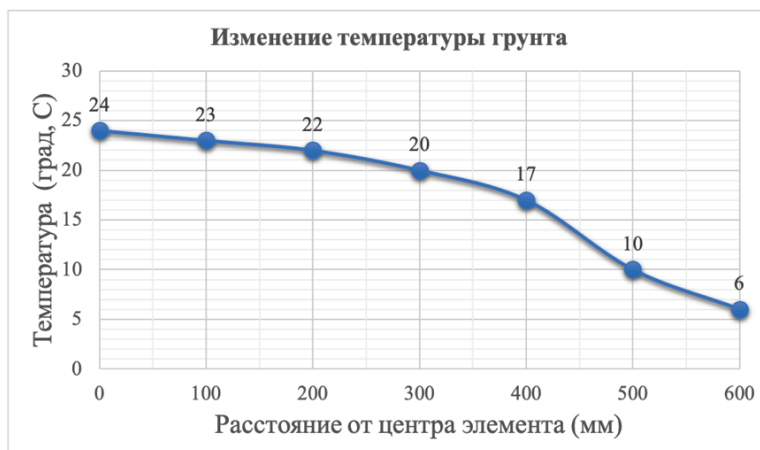


Рис. 3. График изменения температуры грунта в зависимости от расстояния до оси зоны
Fig. 3. Graph of soil temperature change depending on the distance to the zone axis

При использовании струйной цементации грунта в условиях крупнообломочных многолетнемерзлых грунтов имеются вполне закономерные особенности. Поскольку прослойки льда в этом случае имеют большую мощность, перегретый пар под высоким давлением проникает на большее расстояние и зона растепления может достигать диаметра 1,8...2,0 м. В этом случае струйная цементация работает в режиме высоконапорной инъекции, вынос обломочного материала на поверхность не происходит, цементная смесь отжимает воду из пространства между обломками и заполняя его, соединяет их в единый монолитный массив.

Отобранные из полученного монолита керны имеют структуру конгломерата, где крупные и мелкие обломочные частицы сцементированы заполнителем (рис. 4б) и в процессе лабораторных испытаний показывают высокие прочностные и деформационные характеристики – прочность на сжатие находится в диапазоне 4,0...6,0 МПа, секущий модуль деформации – 1200...1300 МПа, сравнимые с прочностью исходного многолетнемерзлого грунта.



Рис. 4а. Керны – струйная цементация
Fig. 4а. Cores – jet grouting



Рис. 4б. Керны – высоконапорная инъекция
Fig. 4б. Cores – high-pressure injection

Цилиндрический грунтобетонный элемент обладает прочностью, сравнимой с прочностью окружающего многолетнемерзлого грунта и может быть использован для вертикального армирования грунта или в качестве комбинированного свайного элемента.

При этом он имеет меньшую теплопроводность, чем железобетон, сравнимую с теплопроводностью окружающего грунта. АО «Нью Граунд» совместно с институтом строительной физики РААСН выполнялись исследования теплотехнических характеристик модифицированного грунта, получены корреляционные зависимости коэффициента теплопроводности материала в зависимости от исходных физических характеристик грунта [17]. Получение данных зависимостей позволяет ставить и решать задачи термонапряженного состояния вертикально армированных жестких грунтоцементными элементами грунтовых оснований, и анализировать их поведение в течение сроков службы [18].

В настоящее время на кафедре строительных конструкций и вычислительной механики ПНИПУ ведется разработка методики прогнозирования поведения системы «здание–фундамент–основание» с учетом возможной деградации многолетнемерзлых грунтов.

Стабилизация деградирующих оснований существующих зданий и сооружений

Отдельной задачей является разработка методов проектирования и производства работ по обеспечению сохранности технического состояния существующих зданий и сооружений в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов. Климатическое и техногенное тепловое влияние приводит к неравномерному растеплению кровли многолетнемерзлых грунтов в основании существующих зданий и сооружений, и, как следствие, к развитию неравномерных непроектных вертикальных перемещений конструкций. Развитие дополнительных внутренних усилий в конструктивных элементах приводит к развитию критических повреждений. В этом случае применение технологии струйной цементации также позволяет создавать сплошные и дискретные модифицированные зоны в талом и оттаивающем грунте, свойства которых после окончательного набора прочности цементным камнем не изменяются.

Опыт применения технологии струйной цементации при стабилизации непроектных осадок основания, сложенного многолетнемерзлыми грунтами

Как уже отмечалось выше, даже в случае оттаивания небольшого слоя грунта под сооружениями осадки (всегда неравномерные) способны вызывать развитие трещин в конструкциях. Выделяют две составляющие осадки оттаивающих грунтов: осадку от оттаивания и уплотнения собственным весом оттаявшего грунта и осадку, обусловленную дополнительным давлением на грунт от веса сооружения. Покажем развитие осадок оттаивания на одном из объектов.

Геологические условия площадки строительства. Район строительства расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов. Кровля многолетнемерзлых грунтов расположена уровне 2,0...3,0 м от естественной поверхности. При этом подошва многолетнемерзлых грунтов скважинами глубиной до 30,0 м не определена. По данным фондовых и архивных материалов, подошва и полная мощность многолетнемерзлой толщи составляет 250,0...300,0 м. Температурный режим многолетнемерзлой толщи составлял минус 4,0 градуса. Глубина нулевых годовых колебаний температуры составляла 7,0...12,0 м.

Глубина сезонного оттаивания составила 1,0...1,5 м в дисперсных и мелкообломочных грунтах, и до 4,0...4,5 м в крупнообломочных грунтах с концентрированным стоком грунтовых и поверхностных вод. Деформации плитных фундаментов начались сразу же

после их устройства. Первопричиной осадок фундаментов являются просадки грунтов из-за оттаивания многолетнемерзлых грунтов с различной льдистостью. Весеннее время года указывает на отсутствие теплого воздействия от окружающей среды (природно-климатического характера) т.к. в марте и апреле среднесуточные температуры имеют отрицательное значение, а отражающее альbedo снега еще велико. Причиной оттаивания многолетнемерзлых грунтов явились техногенные факторы.

При визуальном обследовании и сравнении данных геодезического контроля было выявлено, что в местах максимальных просадок фундаментов, полученных по данным измерений, равных 25,3...72,5 мм, грунты в основании фундаментов дали осадку на величину 250,0...450,0 мм. Расчеты глубины оттаивания показали, что она составляет от 2,0 до 4,0 м от подошвы возведенных фундаментов. Учитывая большую неоднородность грунтов и их свойств в плане и по глубине, было принято решение о модификации слоев грунта и устройстве искусственного основания.

На основании данных инженерно-геологических изысканий и геодезических наблюдений была разработана модель решения технической задачи [19] модификации оттаивающего слоя грунта в основании существующих фундаментов. На основании результатов опытно-исследовательских работ были определены технологические параметры струйной цементации грунта и разработана проектная документация на производство работ. Использование технологии струйной цементации грунта позволило восстановить прочностные и деформационные свойства оснований существующих фундаментов до их первоначальных характеристик, а иногда и превышающих их. При этом цементированная зона грунта не меняет своих характеристик при воздействии положительных температур, а за счет низкой теплопроводности способствует сохранению толщи многолетнемерзлых грунтов.

Последующий геодезический контроль показал, что после выполнения модификации оттаивающего слоя грунта было предотвращено дальнейшее развитие осадок фундаментов.

Заключение

Вопрос разработки эффективных конструктивно-технологических и организационных решений по усилению грунтового основания при проектировании и строительстве инженерных сооружений на Севере остается актуальным.

Развитие освоения территорий, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, строительство и эксплуатация инженерных сооружений в криолитозоне показывает, что до сих пор существует ряд нерешенных задач по обеспечению устойчивости и стабильности их оснований. Требуется отработка технологических и конструктивных решений, обеспечивающих высокую эксплуатационную надежность грунтовых оснований.

Одним из шагов в этом направлении является исследование условий применения струйной цементации грунта. Имеющийся опыт показал, что при определенных инженерно-геологических условиях она является эффективным и надежным способом модификации грунтов и устройства искусственных оснований.

Отдельным вопросом в этой проблеме является поведение всей системы «здание–фундамент–модифицированное основание» при выполнении работ по сохранению технического состояния зданий и сооружений в условиях природной и техногенной деградации многолетнемерзлых грунтов.

Решение такого рода задач является основанием для разработки и совершенствования нормативной документации по проектированию и выполнению работ строительства и реконструкции зданий и сооружений в зоне многолетнемерзлых грунтов.

Список литературы

1. Сахаров И.И., Кудрявцев С.А., Парамонов В.Н. Промерзающие мерзлые и оттаивающие грунты как основания зданий и сооружений. М.: АСВ. 2021. 364 с.
2. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Прогноз изменения температурного состояния основания здания в условиях потепления климата // *Жилищное строительство*. 2021. № 6. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-6-18-24>
3. Алексеев А.Г., Зорин Д.В. Прогнозирование температурного состояния мерзлых грунтов в связи с изменением климата // *Вестник НИЦ Строительство*. 2019. № 4 (23). С. 44–49.
4. Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю., Чеверев В.Г., Брушков А.В. Оценка изменения несущей способности мерзлых грунтов при возможном изменении температуры и оттаивании вечной мерзлоты в арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // *Вестник Московского университета*. Сер. 4. Геология. 2023. № 5. С. 105–116.
5. Мельников В.П. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга ТЭК / В.П. Мельников и др. // *Криосфера Земли*. 2022. Т. XXVI. № 4. С. 3–18.
6. IPCC Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. By T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge, United Kingdom and N.Y., N.Y., USA, Cambridge Univ. Press, 2013 b, pp. 1–30.
7. Местников В.В., Местникова И.В. Рациональные типы фундаментов для малоэтажного строительства в криолитозоне // *Наука и техника в Якутии*. 2019. № 2 (37). С. 8–11. <https://doi.org/10.24411/1728-516X-2019-10031>.
8. Смирнов В.В., Земенков Ю.Д. Проблемы обеспечения надежности эксплуатации сооружений в криолитозоне // *Инновации в науке*. 2013. № 25. С. 57–65. EDN RCOYLV.
9. Самарин О.Д. Обоснование упрощенного метода определения теплотерь через подземные части ограждений здания // *Вестник МГСУ*. 2016. № 1. С. 118–125.
10. Васильев В.И., Васильева М.В., Сирдитов И.К., Степанов С.П., Цеева А.Н. Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2017. № 1. С. 142–159. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-1-142-159>
11. Филимонов А.А., Строкова Л.А. Назначение начальных параметров и граничных условий при моделировании теплового состояния подземных трубопроводов в зоне распространения островных многолетнемерзлых грунтов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023. Т. 334. № 12. С. 109–124. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4345>. EDN QOLYSN.
12. Шепитько Т.В., Артюшенко И.А. Влияние вертикальных столбов из щебня на криогенные процессы грунтов основания земляного полотна // *Транспортные сооружения*. 2019. № 4. С. 8–19.
13. Алексеев А.Г., Зорин Д.В., Алексеенко В.А. Струйная цементация для устройства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 8. С. 27–32. <https://doi.org/10.33622/0869-7019/202108/27-32>.
14. Малинин А.Г., Салмин И.А., Колосов А.Г. Опытные работы по формированию грунтоцементных элементов в мерзлых грунтах // *Жилищное строительство*. 2023. № 9. С. 21–26.
15. Зуев С.С., Каменских Е.М., Маковецкий О.А. О возможности применения технологии струйной цементации грунта в зоне многолетнемерзлых грунтов // *Жилищное строительство*. 2022. № 9. С. 1–8.
16. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Сачков Ю.П. Структура и конструкционная прочность цементных композитов: Монография. М.: АСВ. 2017. 400 с.
17. Никифорова Н.С., Маковецкий О.А., Бессонов И.В., Коннов А.В. Экспериментальные исследования теплофизических свойств грунта, закрепленного методом струйной цементации // *Жилищное строительство*. 2023. № 9. С. 8–13.

18. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Температурный режим и напряженно-деформированное состояние многолетнемерзлого основания, преобразованного струйной цементацией // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2024. № 5. С. 27–31.
19. Бондаренко В.М., Федоров В.С. Модели при решении технических задач // *Перспективы развития строительного комплекса. Материалы VIII Международной научно-практической конференции*. Астрахань. 2014. С. 262–267.
20. Гурьев В.В., Гранев В.В., Дмитриев А.Н., Дорофеев В.М., Келасьев Н.Г., Лысов Д.А. Опыт применения автоматизированных станций мониторинга на уникальных строительных объектах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 12. С. 6–14. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.12.06-14.

References

1. Sakharov I.I., Kudryavcev S.A., Paramonov V.N. Frozen and thawing soils as foundations for buildings and structures. M.: ASV, 2021, 364 p.
2. Ilichev V.A., Nikiforova N.S. Konnov A.V. Forecast of changes in the temperature of the building's foundation in a warming climate. *Housing Construction*, 2021, no. 6, pp. 18–24. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-6-18-24>
3. Alekseev A.G., Zorin D.V. Predicting the temperature state of frozen soils in relation to climate change. *Vestnik NIC Stroitelstvo=Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019, no. 4 (23), pp. 44–49.
4. Falaleeva A.A., Shelkov Ya.Yu., Cheverev V.G., Brushkov A.V. Assessment of changes in the bearing capacity of frozen soils under possible temperature changes and permafrost thawing in the Arctic zone of the Russian Federation by the middle of the 21st century. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 2023, no. 5, pp. 105–116.
5. Melnikov V.P. i dr. Development of geocryological monitoring of natural and technical objects in the permafrost zone of the Russian Federation based on geotechnical monitoring systems for the fuel and energy complex. *Earth's Cryosphere*, 2022, vol. XXVI, no. 4, pp. 3–18.
6. IPCC Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis // Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. By T.F. Stocker, D. Qin, G-K. Plattner et al. Cambridge, United Kingdom and N.Y., N.Y., USA, Cambridge Univ. Press, 2013 b, pp. 1–30.
7. Mestnikov V.V., Mestnikova I.V. Rational types of foundations for low-rise construction in the permafrost zone. *Nauka i tekhnika v Yakutii*, 2019, no. 2 (37), pp. 8–11. <https://doi.org/10.24411/1728-516X-2019-10031>.
8. Smirnov V.V., Zemenkov Yu.D. Problems of ensuring the reliability of construction in the permafrost zone. *Innovatsii v nauke*, 2013, no. 25, pp. 57–65. EDN RCOYLV.
9. Samarin O.D. Justification of a simplified method for determining heat losses through the underground parts of building fences. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 1, pp. 118–125.
10. Vasilev V.I., Vasileva M.V., Sirditov I.K., Stepanov S.P., Tseeva A.N. Mathematical modeling of the temperature regime of foundation soils in permafrost conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2017, no. 1, pp. 142–159. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-1-142-159>
11. Filimonov A.A., Strokova L.A. Assignment of initial parameters and boundary conditions for modeling the thermal state of underground pipelines in the area of island permafrost. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 109–124. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4345>. EDN QOLYSN.
12. Shepitko T.V., Artyushenko I.A. Influence of vertical crushed stone pillars on the cryogenic processes of the subgrade soils. *Russian journal of transport engineering*, 2019, no. 4, pp. 8–19. <https://doi.org/10.15862/10SATS419>
13. Alekseev A.G., Zorin D.V., Alekseenko V.A. Jet grouting for foundation construction on permafrost soils. *Industrial and civil engineering*, 2021, no. 8, pp. 27–32. <https://doi.org/10.33622/0869-7019/202108/27-32>.
14. Malinin A.G., Salmin I.A., Kolosov A.G. Experimental work on the formation of soil-cement elements in frozen soils. *Housing Construction*, 2023, no. 9, pp. 21–26.
15. Zuev S.S., Kamenskikh E.M., Makovetskiy O.A. On the possibility of using jet grouting technology in permafrost zones. *Housing Construction*, 2022, no. 9, pp. 1–8.
16. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Sachkov Yu.P. Structure and structural strength of cement composites: Monograf. M.: ASV, 2017, 400 p.

17. Nikiforova N.S., Makovetskij O.A., Bessonov I.V., Konnov A.V. Temperature regime and stress-strain state of the permafrost base transformed by jet cementation. *Housing Construction*, 2023, no. 9, pp. 8–13.

18. Ilichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Temperature regime and stress-strain state of the permafrost base transformed by jet cementation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2024, no. 5, pp. 27–31.

19. Bondarenko V.M., Fedorov V.S. Models for solving technical problems. *Construction Industry Development Prospects. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Astrakhan, 2014, pp. 262–267.

20. Gurev V.V., Granev V.V., Dmitriev A.N., Dorofeev V.M., Kelasev N.G., Lysov D.A. Experience in using automated monitoring stations at unique construction sites. *Industrial and civil engineering*, 2021, no. 12, pp. 6–14. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.12.06-14>.

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Александрович Маковецкий, д-р техн. наук, доцент, советник РААСН, профессор кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального политехнического университета, Пермь.

e-mail: omakovetskiy@gmail.com*

Oleg A. Makovetskiy, Dr. of Engineering Sciences, Associate Professor, Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor of the Department of Building Structures and Computational Mechanics at the Perm National Polytechnic University, Perm.

e-mail: omakovetskiy@gmail.com

Дмитрий Иванович Самойлов, инженер, аспирант кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального политехнического университета, Пермь.

e-mail: dekstf@pstu.ru

Dmitry I. Samoilov, Engineer, Postgraduate Student of the Department of Building Structures and Computational Mechanics, Perm National Polytechnic University, Perm.

e-mail: dekstf@pstu.ru

Станислав Сергеевич Зуев, инженер, заместитель генерального директора АО «Нью Граунд», Пермь.

e-mail: s.zuev@new-ground.ru

Stanislav S. Zuev, Engineer, Deputy General Director of New Ground JSC, Perm.

e-mail: s.zuev@new-ground.ru

Светлана Сергеевна Рубцова, магистр, руководитель проектов АО «Нью Граунд», Пермь

e-mail: rubtsova@new-ground.ru*

Svetlana S. Rubtsova, Master's Degree, Project Manager at New Ground JSC, Perm

e-mail: rubtsova@new-ground.ru*

* автор, ответственный за переписку / Corresponding author