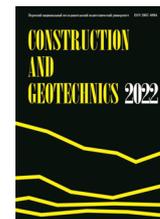




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 1, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.08

УДК 692.113 692.115

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕНОСТЕКЛА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕГРАДИРУЮЩИХ ГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

Н.С. Никифорова¹, А.В. Коннов²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 29 ноября 2022
Одобрена: 23 января 2023
Принята к публикации:
6 февраля 2023

Ключевые слова:

многолетнемерзлые грунты, пеностекло, тепловой режим основания, потепление климата, криолитозона, теплотехнический расчет.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию применения пеностекла для предотвращения деградации многолетнемерзлых грунтов по причине потепления климата. В программном комплексе Frost 3D для условий Норильска моделировалось без учета теплового влияния здания устройство пеностекла для теплоизоляции основания, сложенного суглинистыми грунтами, преобразованного с помощью столбов из щебня и пеностекла. Кроме того, исследовалось утепление грунтов преобразованного столбами основания в проветриваемом подполье нового (в Якутске) и существующего (в Норильске) зданий, построенных по I принципу строительства на многолетнемерзлых грунтах. Прогноз распределения температуры в грунтовом мерзлом основании без учета теплового влияния здания показал, что в условиях потепления климата устройство теплоизоляции основания с применением пеностекла позволяет уменьшить толщину сезонно-талого слоя на 0,3...0,4 м и снизить температуру многолетнемерзлых грунтов. Пеностекло может применяться для теплоизоляции оснований из слабых грунтов, преобразованных с помощью столбов из щебня, а также в перспективе как материал для самих столбов. Для нового здания на преобразованном столбами из щебня основании укрытие поверхности проветриваемого подполья теплоизолирующим материалом из пеностекла в теплый период позволило значительно уменьшить толщину сезонно-талого слоя (на 0,9 м). Проведенное численное моделирование показало эффективность применения пеностекла для предотвращения деградации многолетнемерзлых грунтов по причине потепления климата. Пеностекло является перспективным материалом для разработки технологических мероприятий, обеспечивающих работоспособность оснований и фундаментов зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах в условиях изменения климата.

© ПНИПУ

© **Никифорова Надежда Сергеевна** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, e-mail: n.s.nikiforova@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0611-4354

Коннов Артем Владимирович – кандидат технических наук, e-mail: artem.konnov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7394-2774

Nadezhda S. Nikiforova – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor, e-mail: n.s.nikiforova@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0611-4354

Artem V. Konnov – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: artem.konnov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7394-2774

THE USE OF FOAM GLASS TO PROTECT THE DEGRADING PERMAFROST SOILS

N.S. Nikiforova¹, A.V. Konnov²

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

²Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of architecture and construction sciences, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 29 November 2022
Approved: 23 January 2023
Accepted for publication:
06 February 2023

Keywords:

permafrost soils, foam glass,
thermal regime of the base,
climate warming, cryolithozone,
thermal calculation.

ABSTRACT

The article is devoted to the study of the use of foam glass to prevent the degradation of permafrost soils due to climate warming. In the Frost 3D software, for the conditions of Norilsk, a foam glass device for thermal insulation of a base composed of clayey soils, as well as transformed with the help of crushed stone or foam glass columns, was modeled without taking into account the thermal influence of the building. In addition, the insulation of the soils of the base transformed by columns in the ventilated underground of a new (in Yakutsk) and existing (in Norilsk) buildings designed according to the I principle of construction on permafrost soils was investigated. The forecast of the temperature distribution in the ground frozen base without taking into account the thermal influence of the building showed that in conditions of climate warming, the installation of thermal insulation of the base with the use of foam glass allows to reduce the thickness of the seasonally thawed layer by 0.3...0.4 m and reduce the temperature of permafrost. Foam glass can be used for thermal insulation of weak soil bases transformed with the help of crushed stone columns, as well as, in the future, as a material for the columns themselves. For a new building on a base transformed by crushed stone columns, covering the surface of the ventilated underground with a heat-insulating foam glass material during the warm season made it possible to significantly reduce the thickness of the seasonally thawed layer (by 0.9 m). The numerical simulation has shown the effectiveness of the use of foam glass to prevent the degradation of permafrost soils due to climate warming. Foam glass is a promising material for the development of technological measures that ensure the operability of the bases and foundations of buildings and structures at permafrost in the conditions of climate change.

© PNRPU

Введение

Деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ) вследствие потепления климата посвящены исследования В.А. Ильичева, Н.С. Никифоровой, А.В. Коннова [1–3]. Вопросам применения теплоизоляционных материалов для предотвращения деградации ММГ посвящены работы А.Г. Алексева, В.Е. Конаша, Л.Н. Хрусталева [4], И.В. Бессонова [5, 6] и др.

В настоящее время в России в качестве теплоизоляционного материала применяется пеностекло – гранулированное и блочное. Закрытая пористость и неорганический состав пеностекла обуславливают его физико-механические и теплофизические свойства: водо- и паронепроницаемость, негорючесть, устойчивость к коррозии, усадке и гниению, морозоустойчивость и долговечность [7].

Благодаря своим свойствам пеностекло является перспективным материалом, объемы использования которого растут. Прогнозируется, что пеностекольный щебень за период 2020–2022 гг. займет более 2 % общего рынка теплоизоляционных материалов [5].

Активно ведутся разработки технологий производства пеностекла с использованием природного сырья, альтернативного стеклобою. Наиболее подходящими для изготовления пеностекла являются кремнистые и алюмосиликатные породы [7].

Перспективы производства пеностекла в России подробно рассмотрены в статьях В.И. Кирко, А.А. Григоряна, Л.К. Казанцевой и др., где отмечается возможность использования для его производства песка и промышленных отходов [8], перлита [9], цеолита или туфов [10].

В монографии А.Е. Местникова и Т.С. Антипкиной [11] изложены результаты выполненных научно-исследовательских работ по комплексному использованию цеолитов в строительстве. Исследования показали, что цеолитовые породы являются сырьем для производства блочного и гранулированного пеностекла низкой плотности (Д250...Д400), низкой теплопроводности и достаточной прочности, в том числе для применения его в самонесущих ограждающих конструкциях.

Д.В. Васильева с соавторами [12] сообщает о разработке инновационного проекта по организации производства гранулированного пеностекла – пеноцеолита из цеолитосодержащих пород Сунтарского месторождения в Якутии. Выбор цеолита обусловлен доступностью, огромным запасом природного сырья (более 11 465 тыс. т) и низкой энергоемкостью его обработки.

В Норильске наибольший интерес в качестве сырья для производства пеностекольного щебня представляет стеклогранулят, получаемый в процессе изготовления минеральной ваты на заводе строительных материалов и конструкций Норильского обеспечивающего комплекса (НОК), туфоаргелиты Кайерканского месторождения, а также промышленный и бытовой стеклобой.

Метод проведения исследования

В целях выявления эффективности применения пеностекла для предотвращения деградации многолетнемерзлых грунтов по причине потепления климата был осуществлен прогноз распределения температуры в грунтовом основании. Прогноз осуществлялся численным методом при помощи программного комплекса (ПК) для тепловых расчетов грунтов Frost 3D.

В ПК Frost 3D для условий Норильска моделировалось без учета теплового влияния здания устройство пеностекла для теплоизоляции основания, сложенного суглинистыми грунтами, а также преобразованного с помощью столбов из щебня и пеностекла. Кроме того, исследовалось утепление грунтов преобразованного столбами основания в проветриваемом подполье нового (в Якутске) и существующего (в Норильске) зданий, построенных по I принципу строительства на ММГ.

Производились численные расчеты изменения распределения температуры в массиве грунта глубиной 20–30 м. Температура воздуха была задана по архивным метеорологическим данным, размещенным на портале «Погода и климат» [13]. Происходящий в связи с потеплением климата прирост среднегодовой температуры воздуха был установлен авторами для Норильска по архивным метеоданным (0,06 °С), а также назначался по региональной климатической модели будущих изменений климата на территории России Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) [14–16]. Скорость ветра и высота снежного покрова задавались по данным многолетних наблюдений. Расчет теплопроводности снегового покрова в ПК Frost 3D выполнялся по формуле Г.15 приложения Г СП 25.13330.2020.

В ходе исследования рассматривался однородный грунтовый массив, сложенный в случае с Норильском, где распространены преимущественно суглинистые и глинистые грунты [17, 18], суглинком, для Якутска – суглинками и супесями, принятыми по результатам инженерно-геологических изысканий на объекте в Октябрьском округе Якутска.

Для начальной итерации моделирования задавалось тепловое распределение по глубине грунта по данным изысканий (в районе Норильска [19]), а в случае их отсутствия – полученное в результате расчета модели в естественных условиях при условии сохранения энергетического баланса.

Результаты моделирования теплового режима теплоизолированного основания

Рассматривалось устройство из пеностекла на поверхности грунта теплоизоляционного слоя толщиной 0,15 м размером $b = 2,8 \times 2,8$ м, который убирается в зимний период. Коэффициент теплообмена на поверхности грунта при наличии пеностекла $0,4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$. Для Норильска в связи с потеплением климата был задан приrost среднегодовой температуры воздуха $0,06 \text{ °C}$.

Моделирование теплового режима грунтового массива показало, что через 20 лет после устройства пеностекла для теплоизоляции основания толщина сезонно-талого слоя (СТС) в месте его устройства и на расстоянии от него 0,6 м ($\sim 0,2b$) уменьшится на величину до 0,3 м по сравнению с открытой поверхностью грунта. Толщина СТС в месте устройства пеностекла 0,9 м, без устройства теплоизоляции (на открытой поверхности грунта) – 1,2 м. Температура ММГ до глубины 6 м под утеплителем понижается в среднем на $0,5 \text{ °C}$ (рис. 1). В месте устройства теплоизоляции наблюдается меньшая скорость увеличения СТС из-за потепления климата, равная 0,5 см/год, чем на незащищенной поверхности – 1 см/год.

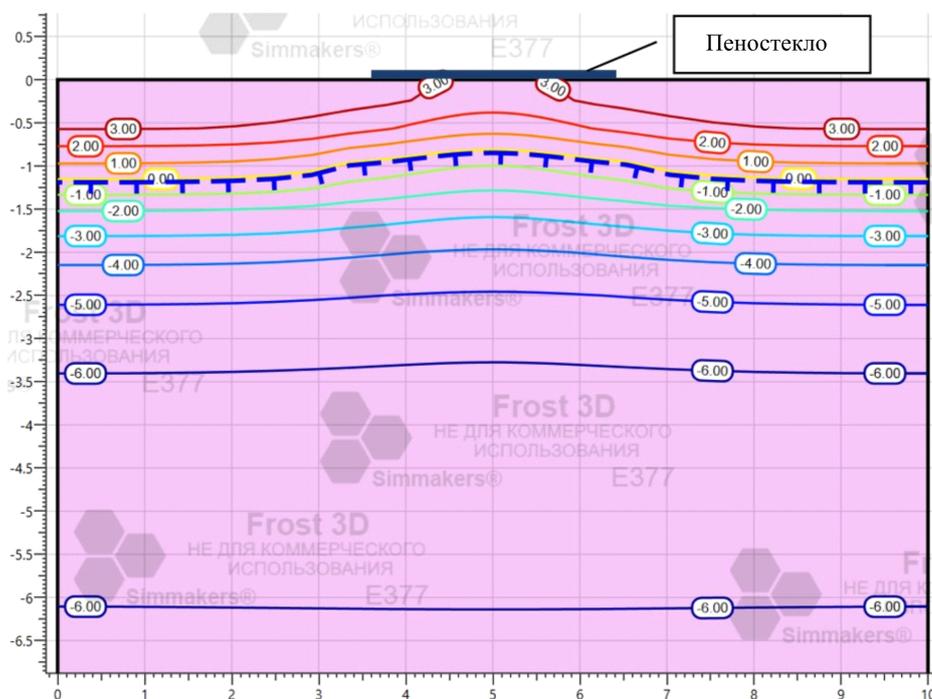


Рис. 1. Распределение температуры на сентябрь без учета теплового влияния здания через 20 лет после устройства пеностекла для теплоизоляции основания

Fig. 1. Temperature distribution in September without considering the thermal influence of the building 20 years after the installation of foam glass for thermal insulation of the base

В исследованиях В.А. Ильичева, Н.С. Никифоровой, А.В. Коннова [20] изучалось влияние преобразования грунтов криолитозоны устройством столбов из щебня на их температурный режим. Путем численного моделирования в прогнозе на 30 лет (с 2022 г.) было выявлено понижение температуры преобразованного основания и нижележащего многолетнемерзлого грунта в холодный период и повышение в теплый период, получено увеличение толщины СТС. Для предотвращения роста глубины залегания ММГ предлагалось устройство песчаной насыпи.

Для снижения прогрева преобразованного основания в теплый период вместо насыпи может быть использован слой теплоизолирующего материала. При наличии технологической возможности демонтажа в холодное время повышается эффективность применения пеностекла.

Моделировалось устройство пеностекла для теплоизоляции преобразованного основания с помощью столбов из щебня различной длины: 1, 2 и 3 м. Задавался теплоизоляционный слой толщиной 0,15 м размером $b = 2,8 \times 2,8$ м, который убирался в зимний период. Тепловое влияние здания не учитывалось. Коэффициент теплообмена на поверхности грунта при наличии пеностекла $0,4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$.

Было установлено, что использование пеностекла позволило снизить до 1 °C возрастание в теплый период температуры грунта в районе щебеночных столбов, происходящее за счет высокой теплопроводности их материала. При устройстве данного технологического мероприятия удалось избежать происходящего из-за столбов увеличения толщины СТС. Напротив, произошло ее уменьшение (рис. 2) на 0,4 м по сравнению с толщиной СТС вне преобразованного основания.

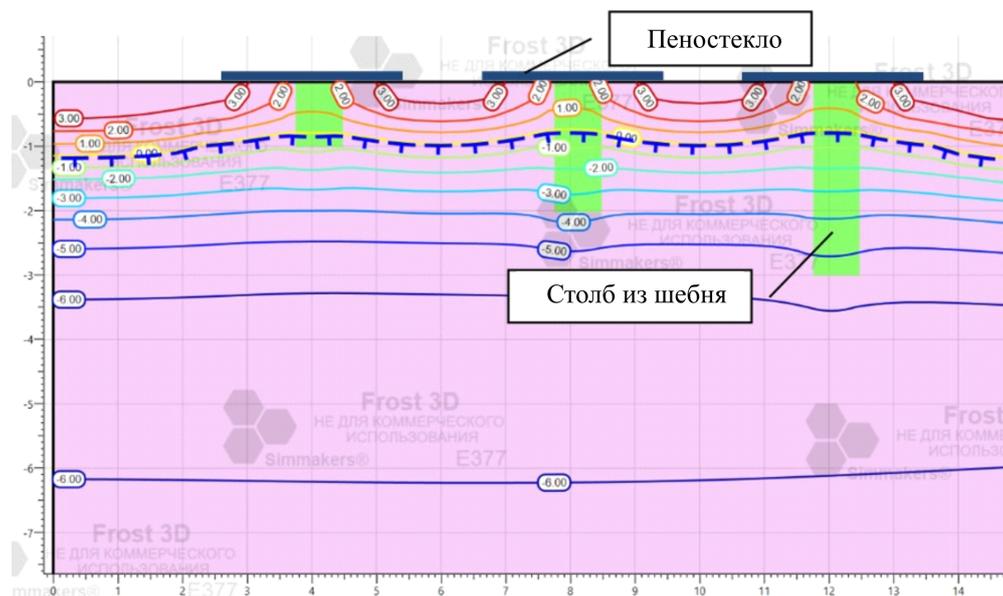


Рис. 2. Распределение температуры на сентябрь без учета теплового влияния здания через 20 лет после устройства пеностекла для теплоизоляции преобразованного столбами из щебня основания
Fig. 2. Temperature distribution in September without considering the thermal influence of the building 20 years after the installation of foam glass for thermal insulation of the soil base transformed by crushed stone columns

Устройство столбов из щебня меньшего диаметра возможно в проветриваемых подпольях зданий, построенных по I принципу строительства на ММГ. Моделировалось устройство плит из пеностекла размерами $1,2 \times 1,2$ м и толщиной 0,15 м в проветриваемом

подполье существующего здания. В летний период столбы из щебня ($d = 0,3$ м, длиной 5 м) закрывались плитами из пеностекла, чтобы предотвратить увеличение температуры ММГ и толщины СТС, вызванного потеплением климата и снижение несущей способности свай [3]. Столбы располагались вокруг сваи (длина 15 м, $d = 0,35 \times 0,35$) под серединой здания (рис. 3). Моделировался температурный режим закрытого подполья с продухами, которые не закрывались на летний период (случай 1 – нарушение условий эксплуатации) или закрывались на летний период (случай 2). Температурный прогноз был выполнен с учетом потепления климата на период 20 лет после устройства столбов.

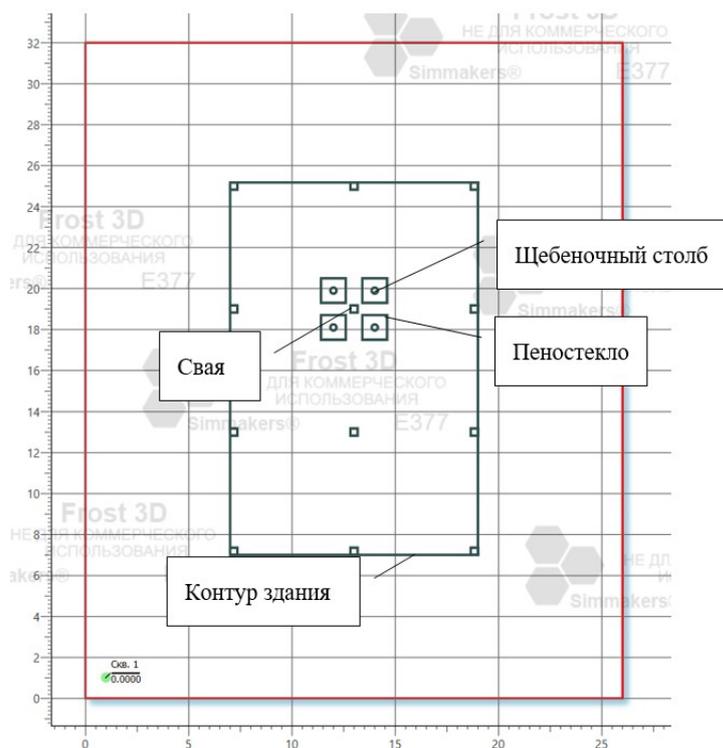


Рис. 3. Расчетная схема – вид сверху
Fig. 3. Calculation scheme – top view

Расчеты показали, что в обоих случаях устройство щебеночных столбов не позволяет предотвратить повышение температуры ММГ и увеличение толщины СТС, вызванных потеплением климата, и, как следствие, снижение несущей способности свай. Теплоизоляция основания оказывает влияние на температурное распределение в основании на глубину до 0,5 м, снижая в летний период температуру грунта на 1...2 °С (рис. 4). Для увеличения эффекта необходимо увеличить площадь теплоизоляции основания.

Для климатических условий Якутска изучалось применение теплоизоляции преобразованного с помощью столбов из щебня основания с учетом теплового влияния здания. В связи с потеплением климата прогнозируемое изменение температуры воздуха задавалось согласно региональной климатической модели ГГО [14–16]. Прирост температуры в год составил: в зимний период $\Delta = 0,08$ °С, в летний период $\Delta = 0,03$ °С.

При моделировании был рассмотрен случай укрытия поверхности открытого проветриваемого подполья теплоизолирующим материалом из пеностекла в теплый период. Была получена толщина 1,2 м для СТС в преобразованном основании. Заделка столбов в ММГ составила 1 м (рис. 5). По сравнению с приведенным в предыдущих исследованиях авто-

ров температурным распределением в преобразованном основании и окружающем массиве грунта [20] полученное температурное распределение показывает, что при применении теплоизолирующего материала толщина СТС уменьшается на 0,9 м.

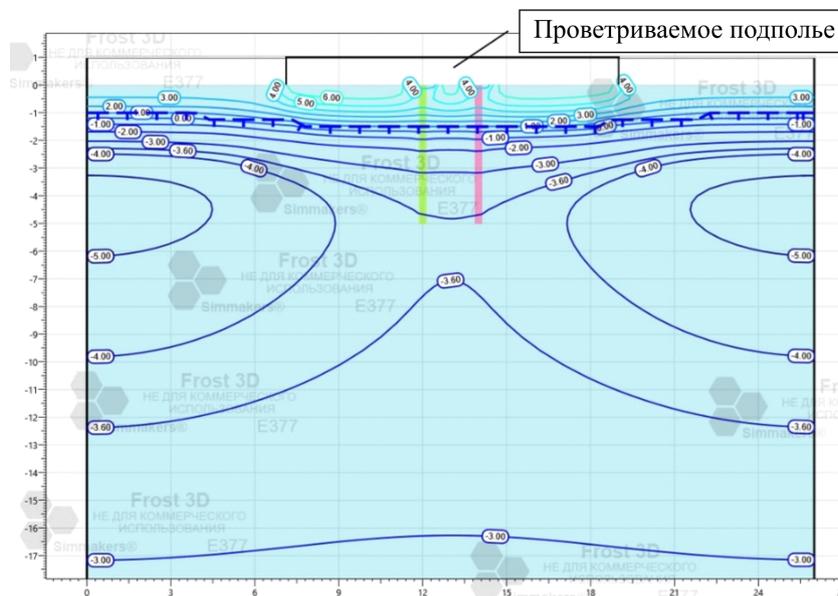


Рис. 4. Распределение температуры на сентябрь через 20 лет (случай 1) с устройством щебеночных столбов и плит из пеностекла

Fig. 4. Temperature distribution in September after 20 years (case 1) with the device of crushed stone columns and foam glass slabs

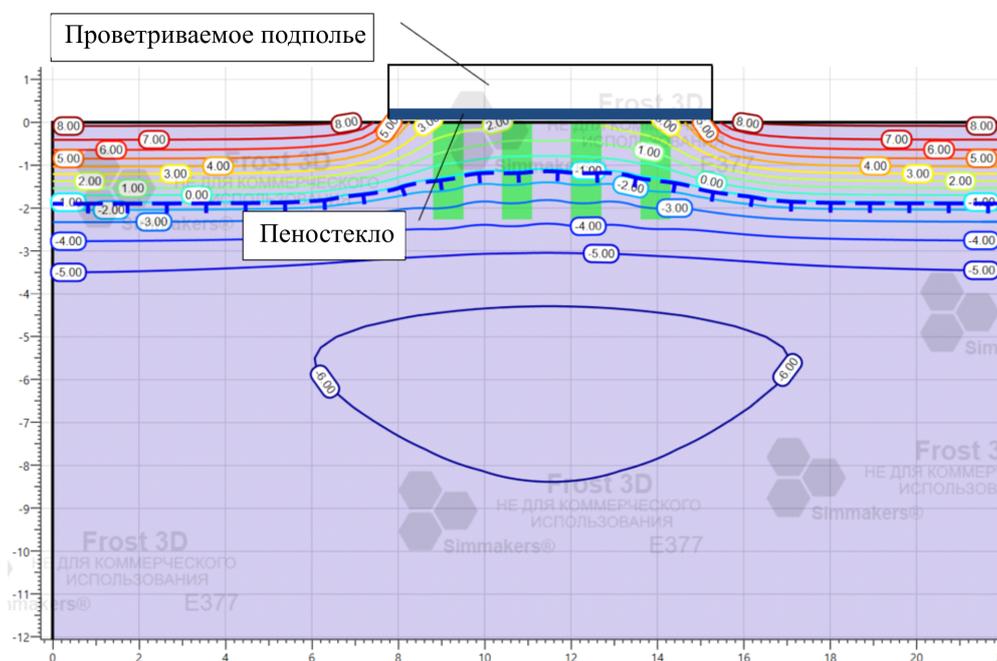


Рис. 5. Распределение температуры на сентябрь с учетом теплового влияния здания через 30 лет после устройства покрытия из пеностекла для теплоизоляции преобразованного столбами из щебня основания

Fig. 5. Temperature distribution in September considering the thermal influence of the building 30 years after the installation of a foam glass layer for thermal insulation of the soil base transformed by crushed stone columns

Пеностекольный щебень является одним из самых прочных теплоизоляционных материалов. Под руководством И.В. Бессонова в НИИСФ РААСН лабораторией «Стройфизика-тест» были проведены испытания пеностекольного щебня по определению его прочности при различной степени уплотнения. Было установлено, что максимальная степень уплотнения пеностекольного щебня насыпной плотностью 140 кг/м^3 и фракцией 30–60 мм составляет 50 %. При сдавливании в цилиндре щебня с указанной степенью уплотнения получено значение прочности 1,58 МПа (при 10%-ной деформации материала) [6].

Прочностные и теплофизические характеристики пеностекольного щебня позволяют рассмотреть его использование в криолитозоне в качестве альтернативы обычному щебню, используемому для преобразования оснований зданий и сооружений.

При моделировании было проведено сравнение влияния столбов из щебня и из пеностекла на температурный режим окружающего грунтового массива без учета теплового влияния здания. В ПК Frost 3D моделировались столбы диаметром 0,7, длиной 1,8 м. Приrost среднегодовой температуры воздуха по причине потепления климата для Норильска задавался согласно региональной модели ГГО [14–16] и в зимний период составил $0,12 \text{ }^\circ\text{C}$, в летний период $-0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

Моделирование теплового режима грунтового массива показало, что через 30 лет после преобразования основания столбами в случае использования в качестве заполнителя пеностекольного щебня толщина СТС не увеличится и температура ММГ останется прежней (рис. 6).

Использование в качестве материала столбов пеностекольного щебня минимизирует температурное влияние преобразованного основания на окружающий массив грунта. Технология устройства столбов из пеностекла и уплотнение окружающего грунта являются предметом дальнейших исследований.

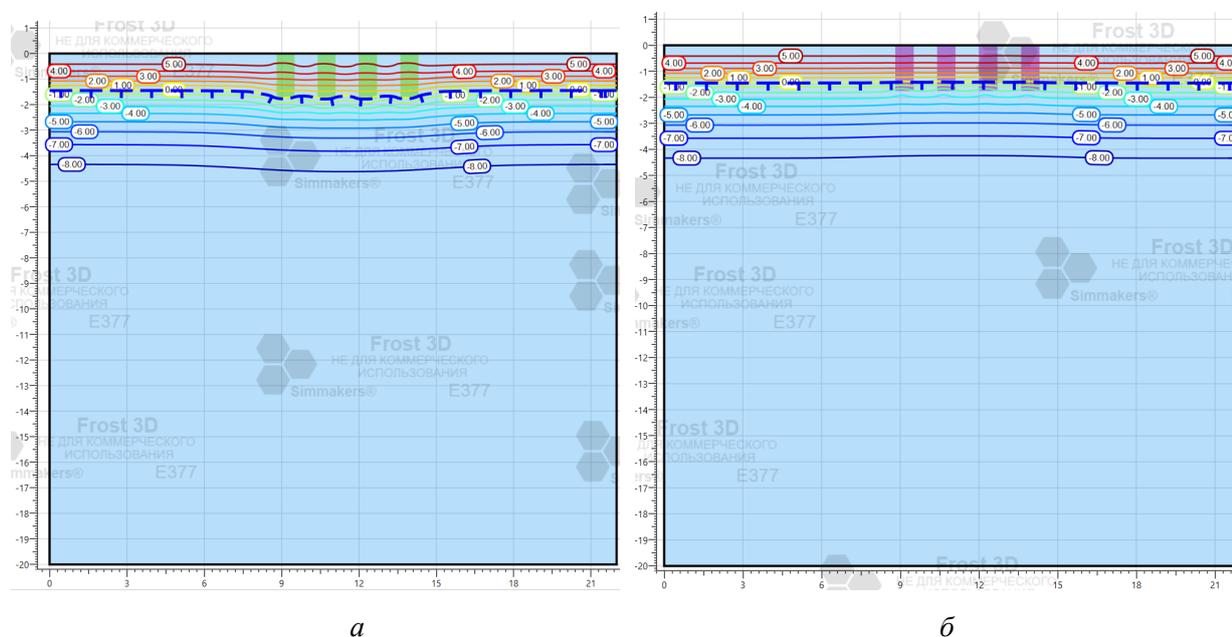


Рис. 6. Распределение температуры на сентябрь без учета теплового влияния здания через 30 лет после преобразования основания: *a* – столбами из щебня; *б* – столбами из пеностекла
Fig. 6. Temperature distribution in September without considering the thermal influence of the building 30 years after the transformation of the base with: *a* – crushed stone; *б* – foam glass columns

Заключение

1. Прогноз распределения температуры в грунтовом мерзлом основании численным методом при помощи ПК Frost 3D без учета теплового влияния здания показал, что в условиях потепления климата устройство теплоизоляции основания с применением пеностекла позволяет уменьшить толщину сезонно-талого слоя на 0,3...0,4 м и снизить температуру многолетнемерзлого грунта. В месте устройства теплоизоляции наблюдается меньшая скорость увеличения СТС, из-за потепления климата равная 0,5 см/год, чем на незащищенной поверхности (1 см/год).

2. Пеностекло может применяться для теплоизоляции оснований из слабых грунтов, преобразованных с помощью столбов из щебня. Это позволяет избежать происходящего из-за столбов увеличения толщины СТС и снижает температуру грунта до 1 °С в летний период. Использование в качестве материала столбов пеностекольного щебня минимизирует температурное влияние преобразованного основания на окружающий массив грунта.

3. Применение пеностекла в условиях теплового влияния существующего здания в проветриваемом подполье на участках вблизи свай для предотвращения увеличения температуры ММГ и толщины СТС показало незначительное влияние на температурный режим основания. Необходимо увеличить площадь теплоизоляции основания. Для нового здания на преобразованном столбами из щебня основании укрытие поверхности проветриваемого подполья теплоизолирующим материалом из пеностекла в теплый период позволило значительно уменьшить толщину СТС (на 0,9 м).

4. Проведенное численное моделирование показало эффективность применения пеностекла для предотвращения деградации многолетнемерзлых грунтов по причине потепления климата. При наличии в криолитозоне региональной производственной базы для производства пеностекла его можно рассматривать как перспективный материал для разработки технологических мероприятий, обеспечивающих работоспособность оснований и фундаментов зданий и сооружений на ММГ в условиях потепления климата.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.3.02>

2. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – № 18 (1). – P. 141–150. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-141-150

3. 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: 10.31659/0044-4472-2021-6-18-24

4. Алексеев А.Г., Конаш В.Е., Хрусталева Л.Н. Применение фундаментов малоэтажных сооружений на теплоизолированных песчаных подсыпках в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2018. – № 2. – С. 36–40.
5. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах / И.В. Бессонов, А.Д. Жуков, Е.Ю. Боброва, И.С. Говряков, Э.А. Горбунова // Транспортное строительство. – 2022. – № 1. – С. 14–17.
6. Исследования теплоизоляционных свойств щебня из пеностекла в основаниях автомобильных дорог в многолетнемерзлых и пучинистых грунтах / И.В. Бессонов, А.Д. Жуков, Е.Ю. Боброва, И.С. Говряков, Э.А. Горбунова // Транспортное строительство. – 2022. – № 2. – С. 12–15.
7. Казанцева Л.К., Стороженко Г.И. Особые свойства пеностекла из природного сырья // Строительные материалы. – 2013. – № 9. – С. 34–38.
8. Перспективы использования промышленных отходов в производстве пеностекла / В.И. Кирко, М.М. Колосова, А.А. Мазалова, Г.Е. Нагибин, О.В. Помилуйков, О.А. Резинкина // Пеностекло – стекло мира. – 2013. – № 3–4. – С. 77–79.
9. Способ получения пеностекла: пат. СССР / Григорян А.А., Мелконян Г.С., Саркисян А.А. – № 1571015; опубл. 15.06.90. Б.И. № 22.
10. Казанцева Л.К., Соболева В.С. Особенности изготовления пеностекла из цеолит-щелочной шихты // Стекло и керамика. – 2013. – № 8. – С. 3–7.
11. Местников А.Е., Антипкина Т.С. Строительные материалы и технологии для Севера и Арктики: монография. – М.: АСВ, 2021. – 218 с.
12. Vasileva D.V., Fedorov V.I., Mestnikov A.E. Physical and mechanical properties of granulated foam glass – Foam zeolite and light concrete based on it // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2015. – P. 020109. DOI: 10.1063/1.5055182
13. Справочно-информационный портал «Погода и климат» [Электронный ресурс]. Архив погоды по метеостанциям России: сайт. – URL: <http://pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru> (дата обращения: 03.11.2022).
14. Школьник И.М., Ефимов С.В. Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии // Труды ГГО. – 2015. – Вып. 576. – С. 201–211.
15. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 1: Постановка задачи и численные эксперименты / В.М. Катцов [и др.] // Труды ГГО. – 2016. – Вып. 583. – С. 7–29.
16. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 2: Оценки климатических воздействий / В.М. Катцов [и др.] // Труды ГГО. – 2019. – Вып. 593. – С. 6–52.
17. Демидюк Л.М. Состав и криогенное строение пород // Геокриология СССР. Средняя Сибирь. – М.: Недра, 1989. – С. 176–180.
18. Гребенец В.И., Исаков В.А. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск – Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. – 2016. – Т. XX, № 2. – С. 69–77.
19. Active-layer Monitoring at a New CALM Site, Taimyr Peninsula, Russia / F.N. Zepalov [et al] // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost. Fairbanks, Alaska. – 2008. – Vol. 2. – P. 2037–2042.

20. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Влияние преобразования грунтов криолитозоны на их температурное состояние в основании здания // Жилищное строительство. – 2022. – № 9. – С. 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-12-17

References

1. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Piles bearing capacity in permafrost soils under climate change. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, no. 3, pp. 14-24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02

2. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2022, no.18 (1), pp. 141-150. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-141-150

3. Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Prognoz izmeneniia temperaturnogo sostoianiia osnovaniia zdaniia v usloviakh potepleniia klimata [Forecast of changes in the temperature state of the building base in climate warming]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*, 2021, no. 6, pp. 18-24. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-6-18-24

4. Alekseev A.G., Konash V.E., Khrustalev L.N. Use of low-rise building foundations on heat-insulated sand pads in permafrost regions. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2018, no. 55 (2), pp. 134-138.

5. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. Analiz konstruktivnykh reshenii v zavisimosti ot tipa izoliatsionnykh materialov v dorozhnykh pokrytiakh v mnogoletnemerzlykh gruntakh [Analysis of design solutions depending on the type of insulating materials in road pavements in permafrost soils]. *Transport construction*, 2022, no. 1, pp. 14-17.

6. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. Issledovaniia teploizoliatsionnykh svoistv shchebniia iz penostekla v osnovaniakh avtomobil'nykh dorog v mnogoletnemerzlykh i puchinystrykh gruntakh [Investigations of thermal insulating properties of foam-glass crushed stone in the road foundations in permafrost and heaving soils]. *Transport construction*, 2022, no. 2, pp. 12-15.

7. Kazantseva L.K., Storozhenko G.I. Osobyie svoistva penostekla iz prirodnogo syr'ia [Special properties of foam glass from natural raw materials]. *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*, 2013, no. 9, pp. 34-38.

8. Kirko V.I., Kolosova M.M., Mazalova A.A., Nagibin G.E., Pomiluikov O.V., Rezinikina O.A. Perspektivy ispol'zovaniia promyshlennykh otkhodov v proizvodstve penostekla [Prospects for the use of industrial waste in the production of foam glass]. *Foam glass – glass of the world*, 2013, no. 3-4, pp. 77-79.

9. Grigorian A.A., Melkonian G.S., Sarkisian A.A. Sposob polucheniia penostekla [Method of obtaining foam glass]. Patent USSR no. 1571015 (1990).

10. Kazantseva L.K., Soboleva V.S. Osobennosti izgotovleniia penostekla iz tseolit-shchelochnoi shikhty [Features of manufacturing foam glass from zeolite alkaline charge]. *Glass and ceramics*, 2013, no. 8, pp. 3-7.

11. Mestnikov A.E., Antipkina T.S. Stroitel'nye materialy i tekhnologii dlia Severa i Arktiki [Construction materials and technologies for the North and the Arctic]. Moscow, ASV, 2021, 218 p.

12. Vasileva D.V., Fedorov V.I., Mestnikov A.E. Physical and mechanical properties of granulated foam glass – Foam zeolite and light concrete based on it. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2015, pp. 020109. DOI: 10.1063/1.5055182

13. Reference and information portal "Weather and climate". Weather archive for weather stations in Russia, available at: <http://pogodaiklimat.ru/archive.php?id=ru> (accessed 03 November 2022).

14. Shkolnik I.M., Efimov S.V. Regional'naia model' novogo pokoleniia dlia territorii severnoi Evrazii [A new generation regional climate model for Northern Eurasia]. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*, 2015, vol. 576, pp. 201-211.

15. Kattsov V.M. [et al.]. Razvitie tekhnologii veroiatnostnogo prognozirovaniia regional'nogo klimata na territorii Rossii i postroenie na ee osnove stsenarnykh prognozov izmeneniia klimaticheskikh vozdeistvii na sektory ekonomiki. Chast'1: Postanovka zadachi i chislennye eksperimenty [Development of the technology of probabilistic forecasting of the regional climate on the territory of Russia and the construction of scenario forecasts of changes in climate impacts on economic sectors on its basis. Part 1: Problem statement and numerical experiments]. *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A.I. Voeikova*, 2016, iss. 583, pp. 7-29.

16. Kattsov V.M. [et al.]. Razvitie tekhnologii veroiatnostnogo prognozirovaniia regional'nogo klimata na territorii Rossii i postroenie na ee osnove stsenarnykh prognozov izmeneniia klimaticheskikh vozdeistvii na sektory ekonomiki. Chast' 2: Otsenki klimaticheskikh vozdeistvii [Development of a technique for regional climate probabilistic projections over the territory of Russia aimed at building scenarios of climate impacts on economy sectors. Part 2: Climate impact projections]. *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A.I. Voeikova*, 2019, iss. 593, pp. 6-52.

17. Demidiuk L.M. Sostav i kriogennoe stroenie porod [Composition and cryogenic structure of the rock] In *Geocryology of the USSR. Middle Siberia*. Moscow, Nedra, 1989, pp. 176-180.

18. Grebenets V.I., Isakov V.A. Deformatsii avtomobil'nykh i zheleznykh dorog na uchastke Noril'sk-Talnakh i metody bor'by s nimi [Deformations of roads and railways within the Norilsk-Talnakh transportation corridor and the stabilization methods]. *Kriosfera zemli*, 2016, vol. XX, no. 2, pp. 69-77.

19. Zepalov F.N. [et al.]. Active-layer Monitoring at a New CALM Site, Taimyr Peninsula, Russia. *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost*, 2008, Vol. 2, pp. 2037-2042.

20. Ilyichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Vliianie preobrazovaniia gruntov kriolitozony na ikh temperaturnoe sostoianie v osnovanii zdaniia [The effect of the transformation of cryolithozone soils on their temperature state at the base of the building]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2022. no. 9, pp. 12-17. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-12-17