Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2019, №4, Том 6 / 2019, No 4, Vol 6 <https://t-s.today/issue-4-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/10SATS419.pdf>

DOI: 10.15862/10SATS419 (<http://dx.doi.org/10.15862/10SATS419>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Шепитько Т.В., Артюшенко И.А. Влияние вертикальных столбов из щебня на криогенные процессы грунтов основания земляного полотна // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №4, <https://t-s.today/PDF/10SATS419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS419

For citation:

Shepitko T.V., Artyushenko I.A. (2019). The influence of vertical columns of crushed stone on the cryogenic processes of the soil base of the subgrade. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/10SATS419

УДК 624.139.62

ГРНТИ 67.29.63

Шепитько Таисия Васильевна

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия
Институт пути, строительства и сооружений
Директор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: shepitko-tv@mail.ru

Артюшенко Игорь Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия
Аспирант кафедры «Проектирование и строительство железных дорог»
E-mail: tywka351@mail.ru

**Влияние вертикальных столбов
из щебня на криогенные процессы грунтов
основания земляного полотна**

Аннотация. В настоящее время развитие путей сообщения на Севере, приобретает все большую значимость для экономики Российской Федерации. Согласно стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 года, строительство железнодорожной магистрали «Северный широтный ход» позволит осуществить разгрузку Транссибирской магистрали, получить транспортные подходы к газовым и нефтяным месторождениям Ямало-Ненецкого Автономного округа, а позже и Красноярского края, обеспечить связь с портами Северного морского пути.

Сложность строительства в данных регионах обуславливается несколькими причинами: наличие слабых грунтов в основаниях сооружений, непредсказуемость поведения мерзлых грунтов при промерзании-оттаивании, сложные природно-климатические условия, отсутствие транспортной инфраструктуры.

Для обеспечения стабильности и устойчивости земляного полотна на участке «Северного широтного хода» новой железнодорожной линии «Обская-Салехард» ПК 01+50 – ПК 06+50 авторами предложено решение произвести усиление грунтов основания вертикальными столбами из щебня.

Данная технология улучшения используется на Севере впервые, но отлично зарекомендовала себя на участках со слабыми основаниями.

Участок «Северного широтного хода» новой железнодорожной линии «Обская-Салехард» ПК 01+50 – ПК 06+50 выполняется по II принципу проектирования с допущением оттаивания многолетнемерзлых грунтов. В данной статье выполнено и проанализировано моделирование теплофизических процессов как с применением данной технологии, так и без нее. Сделаны выводы о целесообразности применения данной технологии в условиях криолитозоны.

Результаты, изложенные в статье, являются частью диссертационного исследования Артюшенко И.А. «Усиление основания земляного полотна вертикальными столбами из щебня на участках с многолетнемерзлыми грунтами».

Ключевые слова: земляное полотно; Северный широтный ход; многолетнемерзлые грунты; вертикальные столбы из щебня; устойчивость насыпи; железная дорога; автомобильная дорога

Введение

Правильное проектирование объектов в районах Крайнего Севера во многом обеспечивается качественными геологическими изысканиями, по результатам которых проводят разносторонние исследования образцов грунта и определяют их основные физико-механические и теплофизические свойства.

Сложность строительства в районах Севера обуславливается наличием многолетнемерзлых грунтов в основаниях сооружений. Из-за недостаточной теплоизоляции возникают неблагоприятные геокриологические процессы, такие как термокарст, термоэрозия, пучение грунтов, которые в свою очередь негативно сказываются на устойчивости земляного полотна. Во избежание данных процессов необходимо на стадии проектирования грамотно выбрать конструктивно-технологические решения [1; 2].

Мерзлые грунты очень чувствительны к изменению температуры окружающей среды и внешним воздействиям. Так, например, в механике мерзлых известны факторы, что с понижением температуры окружающей среды, происходит увеличение отрицательных температур грунтов, тем самым происходит увеличение их прочности [3].

Различные геокриологические процессы, происходящие в грунтах основания земляного полотна, влияют на стабильность и устойчивость сооружения, способствуют возникновению деформаций земляного полотна и верхнего строения пути (дорожной одежды) [4].

Согласно Рекомендациям по определению теплофизических свойств, к основным теплофизическим характеристикам грунтов относятся теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности¹.

Теплоемкость – способность грунта поглощать тепло при нагревании и удерживать его, а при охлаждении тепло выделять. Теплоемкость грунта делится на удельную и объемную. Объемная теплоемкость на практике встречается гораздо чаще удельной. Получают значение объемной теплоемкости (Дж/(м³·°C)) путем умножения ее удельной величины на показания плотности грунта.

¹ Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожностроительных материалов и грунтов. – Москва: Федеральное дорожное агентство Росавтодор, 2015. – 73 с.

Теплопроводность – способность грунта пропускать тепло при разных температурных условиях. Значение теплопроводности (коэффициент) ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$) можно получить путем пропорции между величиной удельного теплового потока и градиентом температуры в грунте. Процесс теплопередачи осуществляется за счет кондуктивной теплопроводности, излучения и переноса влаги.

Температуропроводность – скорость изменения температуры грунта, её выравнивание. Коэффициент температуропроводности ($\text{м}^2/\text{с}$) является значением скорости прогрева грунта. Находится он отношением теплопроводности к объемной теплоемкости.

Стабильность и устойчивость земляного полотна в регионах распространения многолетнемёрзлых грунтов должны быть обеспечены в течение всего предстоящего железной дороге жизненного цикла, начиная со стадии проектирования и геологических изысканий, в ходе которых появляются данные о теплофизических и физико-механических процессах, происходящих в грунтах [5].

Целью исследования является анализ эффективности использования вертикальных столбов из щебня в криолитозоне и их влияния на геотемпературный режим грунтов основания. Для достижения указанной цели использовались общенаучные методы, моделирование и сравнительный анализ.

1. Описание технологии усиление грунтов основания вертикальными столбами из щебня

Технология усиления грунтов основания вертикальными столбами из щебня (Stone Column) является одной из наиболее распространенных методов улучшения прочностных свойств грунтов в мире.

Исторически технология использовалась для уплотнения сыпучих грунтов, но за последние 35 лет все чаще используется для усиления слабых грунтов [6].

Группа компаний «ГЕОИЗОЛ», совместно с компанией Betterground одной из первых в России внедрила технологию укрепления грунтов вертикальными столбами из щебня. Положительный опыт ее применения получен на строительстве скоростной трассы М11, намывной территории Крестовского острова, усиление оснований на подходах к мостовому сооружению со стороны полуострова Тамань.

Процесс устройства вертикальных столбов из щебня представлен на рис. 1.

Рисунок 1. Технологический процесс устройства вертикальных столбов из щебня [7]:

1 – виброколонна погружается с помощью вибрации и подачи воздуха (иногда с минимальной подачей воды для прохождения плотных слоев); 2 – щебень вводится через специальный привод вдоль вибропогружателя под давлением сжатого воздуха; 3 – виброколонна совершает попеременные движения вверх и вниз для уплотнения щебня и формирования тела столба (при этом также уплотняется и улучшается окружающий грунтовый массив)

Столбы из щебня снижают деформативность оснований, обеспечивают их общую устойчивость, увеличивают несущую способность, уменьшают осадку в 2–6 раз, обеспечивают дренирование грунтов, улучшают грунты оснований при строительстве в сейсмически опасных районах. Во время землетрясений они способны предотвратить резкое снижение физико-механических характеристик грунта, исключая потерю общей устойчивости основания.

В районах распространения многолетнемерзлых грунтов технология устройства вертикальных столбов не использовалась.

2. Описание объекта исследования и его свойств

В качестве объекта моделирования взят участок «Северного широтного хода» новой железнодорожной линии «Обская-Салехард» ПК 01+50 – ПК 06+50.

Данный объект представляет собой склон водораздельной поверхности ледниково-морского генезиса (m, gm II–III), полого наклонный в сторону ручья Вындыда. Высотные отметки равномерно понижаются к ручью. Уклон поверхности в среднем составляет 3–5 °С. Геологическое строение разреза: до глубины 6 метров вскрывается суглинок мягкопластичный и суглинок текучепластичный, ниже на глубине 7 метров вскрывается мерзлая супесь. Мощность сезонно-мерзлого слоя 1,5–2 м, сезонно-талого слоя 2,9–3,0 м. В пределах участка предполагается насыпь высотой 6 метров.

При проектировании вертикальных столбов из щебня для получения экономически выгодного и наиболее надежного варианта, был выбран шаг расстановки грунтовых столбов из щебня в шахматном порядке (рис. 2) [8].

Рисунок 2. Шаг расстановки вертикальных столбов из щебня и их площадь влияния [8]

3. Анализ результатов, полученных при расчете с применением технологии усиления грунтов основания вертикальными столбами из щебня и без неё

В статье [9] было рассмотрено влияние вертикальных столбов из щебня на прочностные характеристики грунтов основания. Проведенный расчет устойчивости сооружения на участке «Северного широтного хода» новой железнодорожной линии «Обская-Салехард» ПК 01+50 – ПК 06+50 показал, что опасные участки теоретической поверхности обрушения откосов насыпи стабилизировались, коэффициент устойчивости возрос до 1,852. Полученный результат подтвердил техническую эффективность использования вертикальных столбов из щебня для

усиления насыпей, сооружаемых с допущением оттаивания на основаниях, сложенных многолетнемёрзлыми грунтами.

Теплогидротехнические расчеты необходимы для оценки прогноза динамики температурно-прочностного режима грунтов основания на период строительства и эксплуатации сооружения [10; 11].

Задача моделирования температурного поля решается энтальпийным конечно-разностным методом или методом конечных элементов по явной двухслойной схеме. Суть схемы сводится к определению энтальпии и температуры на временном шаге 1 (эль) и дальнейшем расчете этих параметров на шаге времени 1+1 (эль плюс один). Алгоритм этого расчета представлен в нормативном документе РСН 67-87^[2].

Для выполнения задачи по определению влияния технологии вертикальных столбов из щебня на температурный режим грунтов был взят программный комплекс Permafrost 3D, созданный для выполнения трехмерных нестационарных теплотехнических расчетов взаимодействия грунтов и инженерных сооружений с учетом фазовых переходов и фильтрационных свойств грунтов.

Принято, что насыпь земляного полотна отсыпается в середине сентября. Данная ситуация смоделирована без учета теплоизоляции и других температуро-поддерживающих технологий, так как задача исследования состоит в том, чтобы проверить влияние вертикальных столбов из щебня на температурное поле как самой насыпи, так и грунтов основания.

Расчетная область выбрана размером 60 м по горизонтали и 40 м по вертикали. Данный практический опыт показал, что это оптимальная область, которая захватывает все изменения температурного поля насыпи и прилегающих грунтов. Фрагмент разбивки расчетной области на блоки и представление грунтов и конструкций приведен на рис. 3.

Рисунок 3. Фрагмент разбивки расчетной области на блоки в программном комплексе Permafrost 3D (разработано автором): 1 – песок средней крупности (материал насыпи); 2 – суглинок мягкопластичный (при оттаивании текучий); 3 – суглинок текучепластичный; 4 – супесь мерзлая; 5 – гибкий ростверк из щебня; 6 – Вертикальные столбы из щебня фракции 20–40 мм

² РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномёрзлых грунтов численными методами. – РСФСР: Госстрой, 1988. – 73 с.

Принято, что сооружение вертикальных столбов из щебня происходит в середине сентября. Из-за большой фильтрации щебня, во избежание образования карстовых озер, рекомендуется после отжатия влаги из грунтов основания, произвести мероприятия по гидроизоляции вертикальных столбов из щебня.

Для сравнения возьмём два месяца 10 года, это сентябрь и февраль, так более наглядно виден эффект от технологии армирования грунтов основания вертикальными столбами из щебня.

По результатам моделирования на сентябрь 10 года видно (см. рис. 4 – сентябрь 10 года без усиления), что у неармированного объекта граница нулевых амплитуд находится на глубине 5 м под насыпью, когда как у армированного на глубине 4 м (рис. 5). Помимо границ нулевых амплитуд, намораживание видно и под основной площадкой насыпи, где в случае с армированным объектом формируется мерзлое ядро, когда как у неармированного объекта оно крайне мало.

Рисунок 4. Распределение температурного поля на сентябрь десятого года расчетного периода без применения технологии армирования грунтов основания вертикальными столбами из щебня (разработано автором)

В феврале 10 года в расчете без применения формируется в теле насыпи и под подошвой большое талое ядро с температурой от 1,05 до 1,63 °С, которое в дальнейшем может сказаться на эксплуатации сооружения и на его устойчивости (рис. 6).

Рисунок 5. Распределение температурного поля на сентябрь десятого года расчетного периода с применением технологии армирования грунтов основания вертикальными столбами из щебня (разработано автором)

Рисунок 6. Распределение температурного поля на февраль десятого года расчетного периода без применения технологии армирования грунтов основания вертикальными столбами из щебня (разработано автором)

В случае с использованием технологии армирования вертикальными столбами из щебня, талое ядро на февраль 10 года уменьшается в разы и температуры в данном ядре тоже уменьшаются и колеблются в диапазоне 0,97–1,15 °С, это видно на рис. 7. Граница нулевых амплитуд в зоне усиления вертикальными столбами из щебня поднимается.

Рисунок 7. Распределение температурного поля на февраль десятого года расчетного периода с применением технологии армирования грунтов основания вертикальными столбами из щебня (разработано автором)

Из этого можно сделать вывод, что столбы из щебня поднимают границу нулевых амплитуд в зоне их действия и создают вокруг себя охлаждение и замораживание грунта, тем самым служат проводниками температур.

Вывод

Выполнив моделирование теплофизических процессов участка Северного широтного хода» новой железнодорожной линии «Обская-Салехард» ПК 01+50 – ПК 06+50, был сделан вывод, что без применения армирования вертикальными столбами из щебня за 10 лет граница нулевых амплитуд опускается, вследствие чего происходит увеличение талой зоны и деградация многолетних мерзлых грунтов. В случае с использованием технологии армирования вертикальными столбами из щебня, граница нулевых амплитуд в зоне их действия поднимается – соответственно идёт уменьшение талой зоны. Зимнее промерзание грунта в теле насыпи и в основании происходит намного быстрее, об этом свидетельствует уменьшение в разы талого ядра в теле насыпи и талой зоны в основании, так же в разы уменьшаются и температуры грунтов в зоне действия вертикальных столбов из щебня.

Таким образом, помимо увеличения несущей способности грунтов основания и увеличения их прочностных характеристик, вертикальные столбы из щебня содействуют

поднятию границы нулевых амплитуд в зоне их действия, уменьшают талую зону и создают вокруг себя охлаждение и замораживание грунта, тем самым служат проводниками температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах / А.Ф. Антонов, Ю.Я. Велли, В.В. Гальперин и др.; Под ред. Ю.Я. Велли. – Ленинград: Стройиздат, 1977. – 552 с.
2. Строительство путей сообщения на Севере. Научно-практическое издание / Луцкий С.Я., Шепитько Т.В., Токарев П.М., Дудников А.Н. – М.: ЛАТМЭС, 2009. – 286 с.
3. Цытович, Н.А. Механика мёрзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 446 с.
4. Роман, Л.Т. Механика мерзлых грунтов / Л.Т. Роман. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. – 426 с.
5. Шепитько, Т.В. Интенсивная технология при сооружении земляного полотна в криолитозоне / Шепитько Т.В., Луцкий С.Я., Артющенко И.А. // Мир транспорта, 2018. – 16(1). – С. 58–64.
6. McCabe, B.A. Ground improvement using the vibro-stone column technique / McCabe B.A., McNeill J.A., Black J.A. // Institution of Engineers in Ireland, 2007. – P. 1–13.
7. Деген, У. Использование щебеночных и песчаных свай для усиления слабых грунтов основания транспортных сооружений / Деген У., Долгов, П.Г. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – Москва, 05–06 апреля 2017. – С. 73–74.
8. Heinz J. Priebe. Design of vibro replacement / Ground Engineering, 1995. – № 72. – 16 p.
9. Шепитько, Т.В. Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне / Шепитько Т.В., Артющенко И.А., Долгов П.Г. // Мир транспорта, 2019. – 17(4). – С. 68–78.
10. Хрусталева, Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне / Л.Н. Хрусталева. – М.: МГУ, 2005. – 544 с.
11. Jiankun, Liu. Numerical studies for the thermal regime of a roadbed with insulation on permafrost / Jiankun Liu, Yahu Tian // Cold Regions Science and Technology. 2002. – №35. – P. 1–13.

Shepitko Taisiya Vasil'evna

Russian university of transport, Moscow, Russia
E-mail: shepitko-tv@mail.ru

Artyushenko Igor Aleksandrovich

Russian university of transport, Moscow, Russia
E-mail: tywka351@mail.ru

The influence of vertical columns of crushed stone on the cryogenic processes of the soil base of the subgrade

Abstract. Currently, the development of communications in the North is becoming increasingly important for the economy of the Russian Federation. According to the strategy for the development of railway transport until 2030, the construction of the Northern latitudinal passage railway will allow unloading the Trans-Siberian Railway, get transport approaches to the gas and oil fields of the Yamalo-Nenets Autonomous District, and later the Krasnoyarsk Territory, and provide communication with the ports of the Northern Sea Route.

The complexity of construction in these regions is due to several reasons: the presence of weak soils in the foundations of structures, the unpredictability of the behavior of frozen soils during freezing-thawing, difficult climatic conditions, and the lack of transport infrastructure.

To ensure the stability and sustainability of the subgrade on the Northern latitudinal passage section of the new Obskaya-Salekhard railway line PK 01+50 – PK 06+50, the authors proposed a decision to reinforce the foundation soils with vertical columns of crushed stone.

This improvement technology is used in the North for the first time, but it has proven itself in areas with weak foundations.

The Northern latitudinal passage section of the new Obskaya-Salekhard railway line PK 01+50 – PK 06+50 is carried out according to the II design principle with the assumption of permafrost thawing. This article has performed and analyzed the modeling of thermophysical processes both with the use of this technology and without it. Conclusions are drawn on the appropriateness of using this technology in the permafrost zone.

The results presented in the article are part of the dissertation research I. Artyushenko "Reinforcement of the subgrade base with vertical columns of crushed stone in areas with permafrost soils".

Keywords: subgrade; Northern latitudinal passage; permafrost soils; vertical columns of crushed stone; embankment stability; railway; highway

REFERENCES

1. Antonov A.F., Velli Yu.Ya., Gal'perin V.V. and etc. (1977). Spravochnik po stroitel'stvu na vechnomerzlykh gruntakh. [*Permafrost Construction Handbook.*] Leningrad: Sroizdat, p. 552.
2. Lutskiy S.Ya., Shepit'ko T.V., Tokarev P.M., Dudnikov A.N. (2009). Stroitel'stvo putey soobshcheniya na Severe. Nauchno-prakticheskoe izdanie. [*Construction of railways in the North. Scientific and practical publication.*] Moscow: LATMES, p. 286.
3. Tsytovich N.A. (1973). Mekhanika myorzlykh gruntov. [*Frozen soil mechanics.*] Moscow: Higher school, p. 446.
4. Roman L.T. (2002). Mekhanika myorzlykh gruntov. [*Frozen soil mechanics.*] Moscow: International Academic Publishing Company "Science/Interperiodica", p. 426.
5. Shepit'ko T.V., Lutskiy S.Ya., Artyushenko I.A. (2018). Intensive technology in the construction of the subgrade in the permafrost zone. *World of Transport*, 16(1), pp. 58–64 (in Russian).
6. McCabe B.A., McNeill J.A., Black J.A. (2007). Ground improvement using the vibro-stone column technique. *Institution of Engineers in Ireland*, pp. 1–13.
7. Degen U., Dolgov P.G. (2017). Ispol'zovanie shchebenochnykh i peschanykh svay dlya usileniya slabykh gruntov osnovaniya transportnykh sooruzheniy. [*Use of crushed stone and sand piles to strengthen weak soils of the base of transport facilities.*] Moscow, pp. 73–74.
8. Heinz J. Priebe (1995). Design of vibro replacement. *Ground Engineering*, 72, p. 16.
9. Shepit'ko T.V., Artyushenko I.A., Dolgov P.G. (2019). Base soil reinforcement with vertical columns of crushed stone in cryolithozone. *Transport World*, 17(4), pp. 68–78 (in Russian).
10. Khrustalev L.N. (2005). Osnovy geotekhniki v kriolitozone. [*Fundamentals of geotechnics in cryolithozone.*] Moscow: Moscow State University, p. 544.
11. Jiankun Liu, Yahu Tian (2002). Numerical studies for the thermal regime of a roadbed with insulation on permafrost. *Cold Regions Science and Technology*, 35, pp. 1–13.