

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.139:625.122

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-1-2>

Оценка влияния сезонно-действующих охлаждающих устройств на теплофизические процессы грунтов основания железнодорожной насыпи



Таисия ШЕПИТЬКО



Игорь АРТЮШЕНКО

Таисия Васильевна Шепитько¹,
Игорь Александрович Артюшенко²

^{1,2} Российский университет транспорта, Москва,
Россия.

✉ ² tywka351@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Строительство в районах Крайнего Севера характеризуется большим количеством естественных природных преград, наличием многолетнемёрзлых грунтов в основаниях сооружений, отсутствием инфраструктуры и экстремальными природно-климатическими условиями. Таким образом наиболее актуальной задачей как при проектировании и строительстве, так и при дальнейшей эксплуатации путей сообщения в районах Заполярья является обеспечение надёжности основания сооружения.

Для обеспечения надёжности сооружений, проектируемых на многолетнемёрзлых грунтах, необходимо проведение теплофизических расчётов и составление прогнозов влияния температурных процессов на грунты основания.

Территория распространения многолетнемёрзлых грунтов (ММГ) занимает большую часть России, поэтому расширение возможностей использования этих регионов для

развития сети путей сообщения является важной стратегической задачей для государства. На сегодняшний день, в соответствии со Стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года, приоритетным регионом, с точки зрения экономического роста и стратегического влияния, является Арктическая зона Российской Федерации.

В данной статье проанализировано влияние технологии сезонно-действующих охлаждающих устройств на грунты основания участка Салехард–Надым железнодорожной линии «Северный широтный ход» (ПК 2825+00 – ПК 2830+00). Показана эффективность работы сезонно-действующих охлаждающих устройств на многолетнемёрзлые грунты основания железнодорожной насыпи в совокупности с теплоизолирующим материалом. Сделан вывод о достоинствах и недостатках сезонно-действующих охлаждающих устройств.

Ключевые слова: транспорт, многолетнемёрзлые грунты, земляное полотно, криолитозона.

Для цитирования: Шепитько Т. В., Артюшенко И. А. Оценка влияния сезонно-действующих охлаждающих устройств на теплофизические процессы грунтов основания железнодорожной насыпи // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 1 (104). С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-1-2>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетнемёрзлые грунты (ММГ) распространены на значительной части территории России, в том числе в Арктической зоне Российской Федерации, которая является одним из приоритетных регионов с точки зрения пространственного развития, экономического роста, обеспечения перевозок, в том числе, по Северному морскому пути. При этом одним из важнейших элементов, обеспечивающих эффективность строительства и долговременный характер эксплуатации инфраструктурных объектов, является надёжность оснований сооружений. Для её обеспечения при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений в зоне распространения ММГ необходимо использовать современные технологии и методы мониторинга.

Целью исследования, основные результаты которого изложены в статье, является анализ влияния технологии сезонно-действующих охлаждающих устройств на грунты основания на примере участка Салехард–Надым железнодорожной линии «Северный широтный ход».

РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование теплофизических процессов при строительстве транспортных сооружений на многолетнемёрзлых грунтах

При проектировании сооружений на многолетнемёрзлых грунтах для обеспечения их надёжности необходимо провести теплофизические расчёты и проанализировать влияние температурного режима на основание

земляного полотна [1–3].

Для оценки теплового взаимодействия железнодорожной насыпи с грунтами основания на участке Салехард–Надым железнодорожной линии «Северный широтный ход» (СШХ) (ПК 2825+00–ПК 2830+00) были произведены теплофизические расчёты. Данные расчёты выполнены в программном комплексе «Frost 3D», имеющем сертификат соответствия, свидетельство о государственной регистрации программного продукта и отвечающем требованиям РСН 67-68¹, СП 25.13330.2020², СП 116.13330.2012³, СП 11-105-97 часть IV⁴.

В статье проанализировано влияние температурного режима на основание земляного полотна и эффективность работы сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ) на указанном участке линии СШХ.

¹ РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномёрзлых грунтов численными методами. – РФСР: Госстрой, 1988. – 73 с. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/901708505>. Доступ 09.02.2023.

² СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах СНиП 2.02.04-88: НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, 2021 г. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/573659326>. Доступ 09.02.2023.

³ СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. – Москва, 2012. – 65 с. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200095540>. Доступ 09.02.2023.

⁴ СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемёрзлых грунтов. – Москва, 2000. – 61 с. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200007407>. Доступ 09.02.2023.

Таблица 1

Инженерно-геологические элементы и теплофизические свойства грунтов, используемые при моделировании геокриологического прогноза

[выполнено авторами]

Наименование	Влажность, д.е.	Плотность сухого грунта, кг/м ³	Теплопроводность, λ Вт/(м•К)		Удельная теплоёмкость, °С кДж/(м ³ •К)		Температура начала замерзания
			Мёрзлые	Талые	Мёрзлые	Талые	
Суглинок	0,25	1600	1,68	1,51	2,35	3,15	-0,20
Верх насыпи	0,05	1900	1,51	1,45	2,18	2,35	-0,05
Песок	0,38	1220	1,79	1,57	2,14	3,13	-0,28
Насыпь	0,20	1400	1,86	1,57	1,89	2,48	-0,05



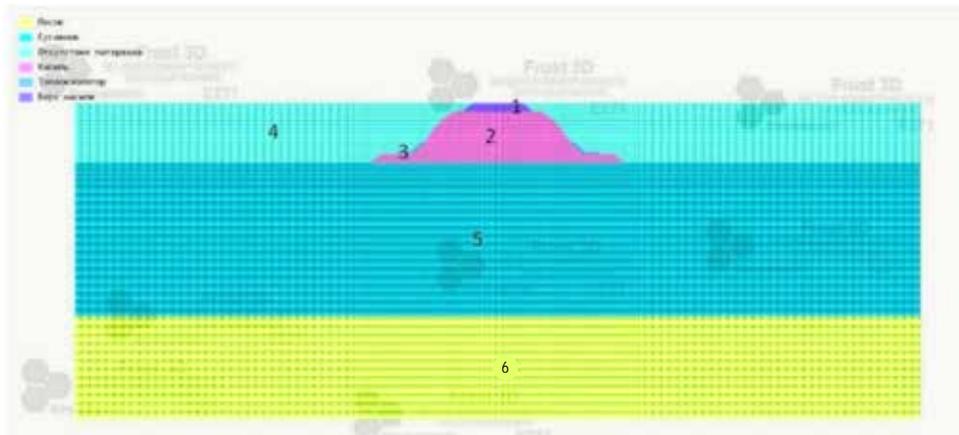


Рис. 1. Расчётная область ПК 2825 в программном комплексе «Frost 3D»: 1 – верх насыпи; 2 – насыпь; 3 – теплоизолятор; 4 – отсутствие материала; 5 – суэлинок; 6 – песок [выполнено авторами].

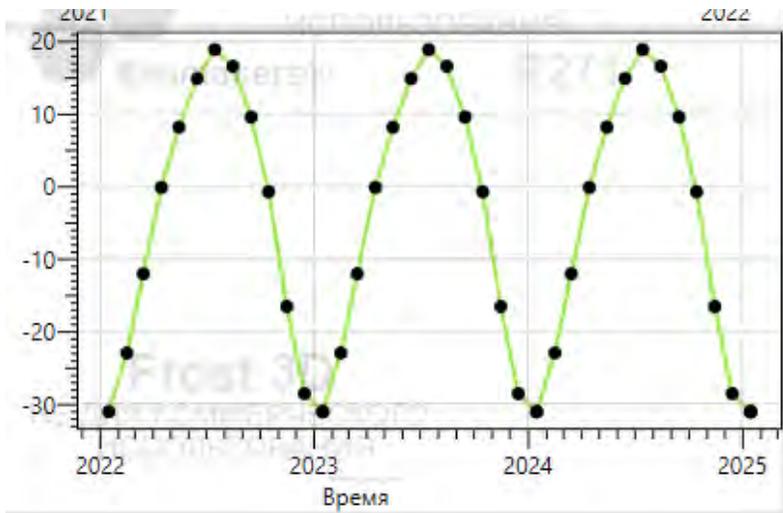


Рис. 2. График распределения температур по годам [выполнено авторами].

Для расчёта теплофизических свойств и последующего моделирования температурного режима грунтов использовались данные, полученные по результатам инженерно-геологических изысканий⁵ (табл. 1).

Расчётной областью был выбран поперечный разрез насыпи на ПК 2825+00, который представляет собой прямоугольную область 15 м по вертикали и 50 м по горизонтали. Такой размер расчётной области захватывает все прилегающие грунты основания и насыпи для последующих расчётов. На рис. 1 показана расчётная область с контурной разбивкой используемых грунтов.

Для моделирования теплофизических свойств были проведены расчёты по прогно-

зированию температур. При прогнозировании температур на каждой расчётной области можно заметить приблизительно одинаковые графики распределения температур по годам (рис. 2). Основой расчёта служит график распределения температур за последний известный год (рис. 3).

Значения данных о температуре за 2021 год представлены в табл. 2.

Расчётный период теплофизических свойств составил 15 лет (с 15.01.2022 г. по 15.01.2037 г.), который показал изменения температурных полей.

Теплофизические модели, полученные при моделировании в программном комплексе «Frost 3D», представлены на рис. 4 и 6. Сравнивая две модели, можно заметить, что первоначально в теле насыпи присутствовала

⁵ Рабочий проект. Строительство новой железнодорожной линии Обская–Салехард. ООО «Мостострой-12», 2012. – 278 с.

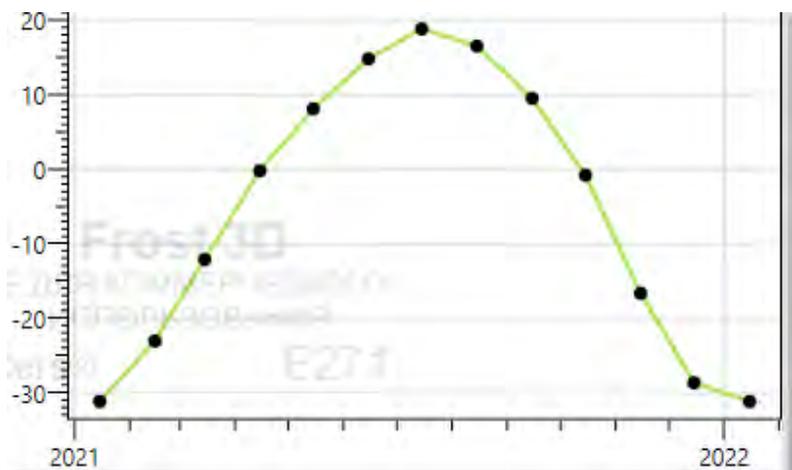


Рис. 3. График распределения температур за 2021 г. [выполнено авторами].

Таблица 2

Таблица распределения температур за 2021 год по месяцам [выполнено авторами]

Дата	15.01.2021	15.02.2021	15.03.2021	15.04.2021	15.05.2021	15.06.2021	15.07.2021	15.08.2021	15.09.2021	15.10.2021	15.11.2021	15.12.2021	15.01.2022
Градусы	-31,1	-23	-12,1	-0,2	8,1	14,8	18,8	16,5	9,5	-0,8	-16,6	-28,6	-31,1

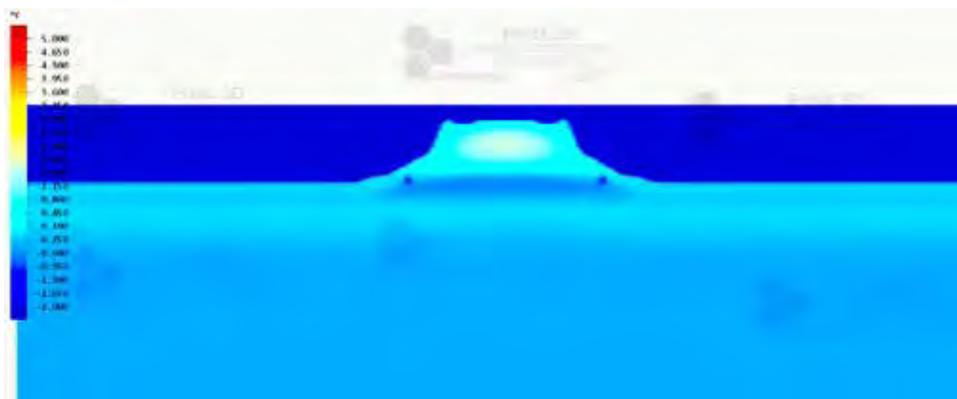


Рис. 4. Теплофизическая модель, построенная в «Frost 3D» за 15.01.2022 г. [выполнено авторами].

таялая зона, но со временем размеры её уменьшаются до минимального, а после промораживания тела насыпи таялая зона полностью отсутствует. Происходит промерзание в верхней части насыпи, что можно увидеть на графиках распределения температурных полей на рис. 5 и 7.

Грунты в криолитозоне подвергаются сезонному оттаиванию и промерзанию в деятельном слое. Деятельный слой – это верхняя часть толщи вечной мерзлоты, изменение которого, вслед за изменением теплообмена на поверхности, приводит к развитию опасных криогенных процессов [4; 5].

По результатам расчёта можно сделать следующие выводы.

При первоначальном расчёте за 2022 год была выявлена таялая зона в центре тела насыпи. Таких размеров таялая зона может вызвать просадки грунтов основания и стать причиной нарушения устойчивости насыпи. На модели за 2037 год таялая зона отсутствует, что является важным фактором для обеспечения устойчивости насыпи.

Благодаря полученным результатам, описанным в [6; 7], известно, что посткриогенная структура может возникнуть в течение нескольких лет, то есть, в результате





Рис. 5. График распределения температурных полей за 15.01.2022 г. [выполнено авторами].

прохождения циклов промерзания/оттаивания. Сооружение насыпи приводит к изменению температурного режима грунтов основания из-за нарушения естественного покрова, что хорошо видно по изменению температурных полей за 15 лет существования насыпи. Это приводит к уменьшению льдоцементных связей в мёрзлых грунтах, вследствие чего уменьшаются их прочностные характеристики, что приводит к увеличению деформаций основания земляного полотна [8].

Моделирование применения сезонно-действующих охлаждающих устройств (с использованием программного комплекса «Frost 3D»)

Программный комплекс «Frost 3D» имеет обширные возможности в расчётах термостабилизации грунта.

В исследованиях [9–11] раскрыта проблема термостабилизации температурного режима грунтов основания земляного полотна для сохранения грунтов основания в мёрзлом состоянии и предотвращения



Рис. 6. Теплофизическая модель, построенная в «Frost 3D» за 15.01.2023 г. [выполнено авторами].

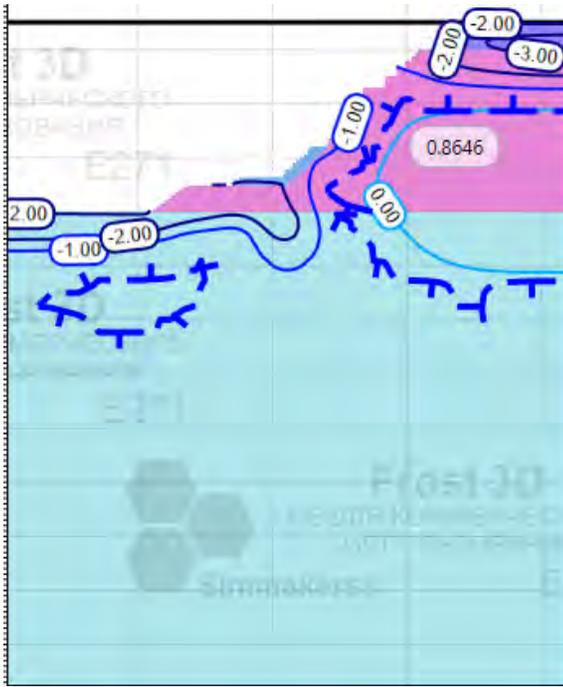


Рис. 7. График распределения температурных полей за 15.01.2023 г. [выполнено авторами].

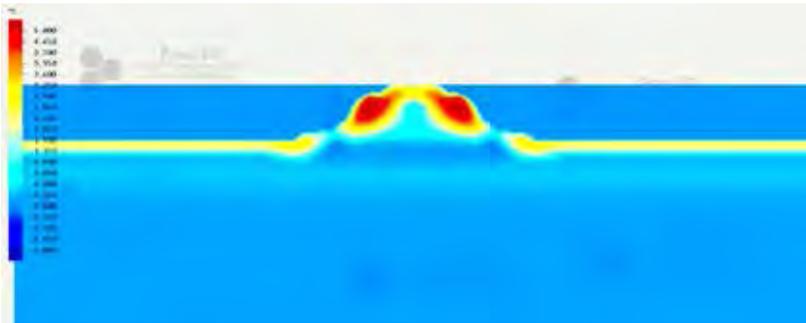


Рис. 8. Теплофизическая модель, построенная в «Frost 3D» с применением технологии CO₂ за 15.10.2022 г. [выполнено авторами].

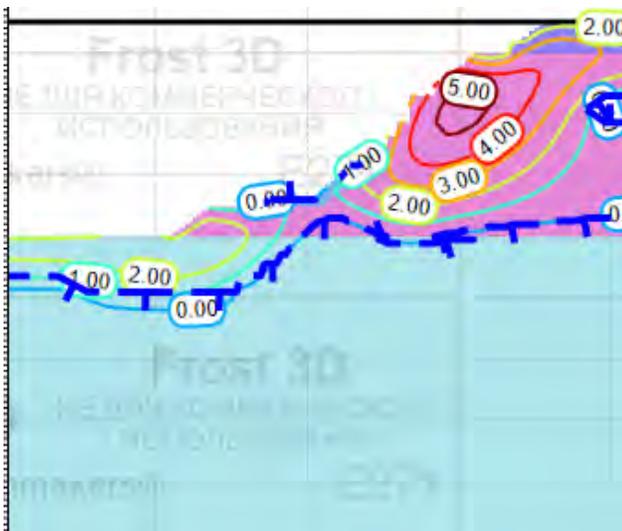


Рис. 9. График распределения температурных полей с применением технологии CO₂ за 15.10.2022 г. [выполнено авторами].



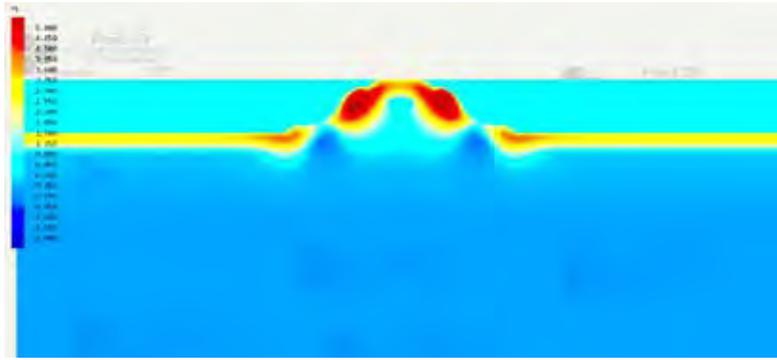


Рис. 10. Теплофизическая модель, построенная в «Frost 3D» с применением технологии СОУ за 15.10.2037 г. [выполнено авторами].

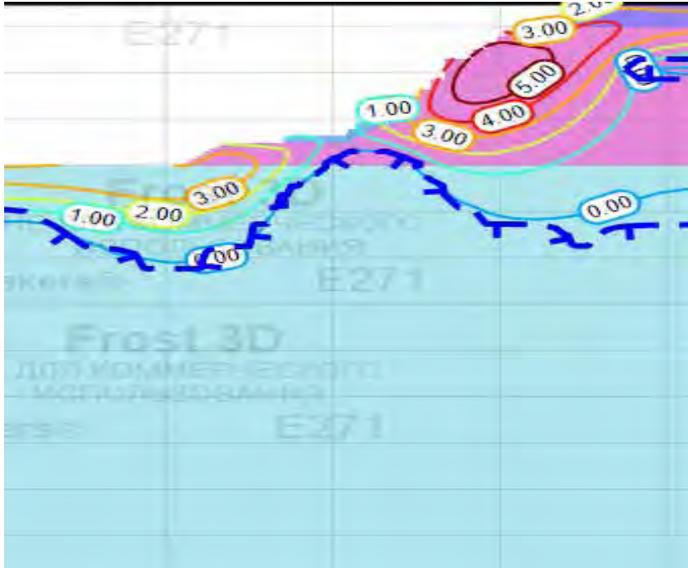


Рис. 11. График распределения температурных полей с применением технологии СОУ за 15.10.2037 г. [выполнено авторами].

образования деформаций в основании насыпи.

Одной из технологий по обеспечению термостабилизации многолетнемёрзлых грунтов является применение сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ), устанавливаемых вдоль полотна железной дороги.

В методике расчёта мест установки сезонно-действующих охлаждающих устройств приняты математические решения охлаждения и замораживания грунта вокруг охлаждающего устройства [12–14].

При решении задачи теплообмена между СОУ и грунтом рассматривается система дифференциальных уравнений (1) [15]:

$$\begin{cases} c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right)}{\partial r} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z}, & (1) \\ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = K_s(v) (T - T_v(\tau)) \end{cases}$$

где r, z – координаты цилиндрической системы координат;

τ – время;

$c(T)$ – эффективная объёмная теплоёмкость пород;

$\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности;

$K_s(v)$ – коэффициент теплопроводности испарителя.

Применение технологии СОУ при строительстве и эксплуатации насыпи оказывает положительный эффект на температурные показатели грунтов основания, а вместе с этим и на физико-механические характеристики данных грунтов. Для анализа эффективности СОУ сравним теплофизические модели без применения технологии и с ней (рис. 6, 8).

На рис. 6, как было описано выше, в центре насыпи присутствует таяя зона, влияющая на устойчивость насыпи. По срав-

нению с ним, на рис. 8 в самом опасном месяце (октябрь) талая зона прогрессирует в верхней площадке, на откосах и в основании насыпи. СОУ оказывает положительное влияние на грунты основания, уменьшая талую зону на границах откосов. На рис. 10 можно заметить, что благодаря влиянию СОУ и теплоизоляционного материала зона охлаждения растёт, способствуя повышению прочностных характеристик грунтов и устойчивости насыпи.

Сравнивая модели на рис. 9 и 11 можно увидеть, что в течение 15 лет будет отмечаться активное влияние положительных температур, но благодаря работе сезонно-действующих охлаждающих устройств и теплоизоляционных материалов талая зона будет распространяться не так активно, сохраняя зону промораживаемого грунта.

ВЫВОДЫ

На основе моделирования теплофизических процессов участка Салехард–Надым железнодорожной линии «Северный широтный ход» (ПК 2825+00 – ПК 2830+00) можно сделать следующий вывод: применение технологии сезонно-действующих охлаждающих устройств оказывает положительное влияние на грунты основания. Однако применение СОУ является эффективным только при использовании первого принципа строительства грунтовых сооружений – сохранения многолетнемёрзлых грунтов в мёрзлом состоянии.

Существенным недостатком работы СОУ является необходимость их обслуживания для обеспечения эффективной работы данных устройств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шепитько Т. В., Артюшенко И. А., Долгов П. Г. Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 4. – С. 68–78. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-68-78>.
2. Шепитько Т. В., Артюшенко И. А. Влияние вертикальных столбов из щебня на криогенные процессы грунтов основания земляного полотна // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2019. –

- Т. 6. – № 4. – 11 с. DOI: <http://dx.doi.org/10.15862/10SATS419>.
3. Железняк И. И. Надёжность мёрзлых оснований сооружений. – Новосибирск: Наука, 1990. – 174 с. ISBN 5-02-029655-4.
4. Гречищев С. Е., Чистотинов Л. В., Шур Ю. Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. – М.: Недра, 1980. – 383 с.
5. Луцкий С. Я., Роман Л. Т. Технологическое регулирование характеристик многолетнемёрзлых грунтов в основании дорог // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 3. – С. 26–30. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30558316> [платный доступ].
6. Цытович Н. А. Основания и фундаменты на мёрзлых грунтах. – Изд. АН СССР, 1958. – 168 с.
7. Кондратьев В. Г. Новые методы и технологии управления состоянием грунтов тела и основания земляного полотна дорог в криолитозоне // Журнал «Геотехника». – М.: ООО «Геомаркетинг», 2011. – № 2. – С. 28–40. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17649375> [ограниченный доступ].
8. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Парамонов В. Н. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечно-элементные расчёты). – СПб.: Геореконструкция, 2014. – 247 с. ISBN 978-5-9904956-3-0.
9. Ашпиз Е. С., Хрусталева Л. Н. Предотвращение деградации многолетнемёрзлых грунтов в основании насыпей железных дорог // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24. – № 5. – С. 45–50. DOI: [10.21782/KZ1560-7496-2020-5\(45-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(45-50)).
10. Jiankun, Liu; Yahu, Tian. Numerical studies for the thermal regime of a roadbed with insulation on permafrost. Cold Regions Science and Technology, 2002, No. 35, pp. 1–13. DOI: [10.1016/S0165-232X\(02\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00028-9).
11. Золотарь И. А., Пузаков Н. А., Сиденко В. М. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд. – М.: Транспорт, 1971. – 414 с.
12. Ибрагимов Э. В., Кроник Я. А., Куплинова Е. В. Экспериментальные исследования инновационных конструкций пологонаклонных конструкций термостабилизаторов грунта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4. – С. 208–220. [Электронный ресурс]: <https://www.elib.tomsk.ru/elib/data/2018/2018-1092/2018-1092.pdf>. Доступ 21.02.2023.
13. Ибрагимов Э. В., Кроник Я. А., Пустовойт Г. П. Опыт использования тепловых насосов в качестве систем термостабилизации грунта в криолитозоне // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 5. – С. 23–26. [Электронный ресурс]: <https://www.nporth.ru/nauchnaya-deyatelnost/publikacii/article/ibragimov.pdf>. Доступ 21.02.2023.
14. Долгих Г. М., Окунев В. Н. Системы замораживания и температурной стабилизации грунтов в зоне многолетнемёрзлых пород, применяемые ООО НПО «Фундаментстройаркос» // Материалы IX научно-технической конференции «Моделирование технологий замораживания искусственным холодом». – 2003. – С. 123–129.
15. Ковальков В. П., Проняева Т. И. Интенсификация замораживания грунтов в нефтегазовом строительстве. – М.: Информнефтегазстрой, 1981. – 51 с. ●

Информация об авторах:

Шепитько Таисия Васильевна – д.т.н., профессор, директор Института пути, строительства и сооружений Российского университета транспорта, Москва, Россия, shepitko-tv@mail.ru.

Артюшенко Игорь Александрович – к.т.н., доцент кафедры проектирования и строительства железных дорог Российского университета транспорта, Москва, Россия, tyuka351@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 22.02.2023, одобрена после рецензирования 03.03.2023, принята к публикации 13.03.2023.

