

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Проектирование и строительство дорог

УДК [UDC] 652.122

DOI 10.17816/transsyst20206261-69

© А. А. Лычковский¹, С. Я. Луцкий¹, А. Я. Ландсман²,
Н. В. Навроцкая¹

¹Российский университет транспорта (МИИТ)

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
(Москва, Россия)

ДИАГНОСТИКА МОРОЗНОГО ВЛАГОНАКОПЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СООРУЖЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Обоснованы актуальность и содержание технологического регулирования производственных процессов при непрерывном контроле изменений грунтовых характеристик на участках высокотемпературной мерзлоты в связи с крайне неустойчивым состоянием земляного полотна в ходе работ.

Цель: Формирование технико-технологической системы, функционирующей на принципах прямой и обратной связи между характеристиками геотехнических сооружений и параметрами строительной техники с целью наиболее эффективного и качественного производства работ.

Методы: Предложены способы технологического регулирования с целью снижения влажности грунтов на стадии морозного влагонакопления в основании возводимой насыпи.

Заключение: Показана целесообразность применения для мониторинга состояния земляного полотна опто-волоконного кабеля, как непрерывного по длине трассы датчика, способного регистрировать изменение свойств грунта во время строительства железных дорог.

Ключевые слова: земляное полотно, технологическое регулирование опто-волоконный кабель, строительство железных дорог, интенсивная технология.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Road Design and Construction

© A. A. Lychkovskiy¹, S. Y. Lutskiy¹, A. Y. Landsman²,
N. V. Navrotskaya¹

¹ Russian university of transport (МИИТ)

² Moscow automobile and road construction state technical university (MADI)
(Moscow, Russia)

DIAGNOSTICS OF FROST WATER ACCUMULATION AND TECHNOLOGICAL REGULATION OF THE CONSTRUCTION OF THE ROADBED

The relevance and content of technological regulation of production processes with continuous monitoring of changes in soil characteristics in areas of high-temperature permafrost due to the extremely unstable state of the roadbed during the work are substantiated.

Aim: Formation of a technical and technological system that operates on the principles of direct and feedback between the characteristics of geotechnical structures and the parameters of construction equipment for the most efficient and high-quality production of works.

Methods: Methods of technological regulation for the purpose of reducing soil moisture at the stage of freezing water accumulation at the base of the mound being built are proposed.

Conclusion: The expediency of using opto-fiber cable for monitoring the state of the roadbed as a continuous sensor along the length of the route that can register changes in soil properties during the construction of Railways is shown.

Keywords: roadbed, technological regulation of fiber-optic cable, railway construction, intensive technology.

ВВЕДЕНИЕ

Задача повышения несущей способности основания геотехнических сооружений на мерзлоте актуальна, она соответствует «Транспортной стратегии РФ до 2030 г.», программам строительства северных магистралей, на протяжении которых по мере создания нового природно-технического комплекса (ПТК) меняются по трассе и во времени гидрогеологические, климатические и социальные условия производства [1]. Повышение среднегодовой температуры на большей части территории России активизирует негативные техногенные процессы в ПТК [2]. Большинство случаев деформаций и разрушения земляного полотна связано с изменением геокриологических условий и потерей несущей способности мерзлых оснований в результате техногенных воздействий, начиная со строительной стадии. В ходе основных работ на многолетнемерзлых грунтах и болотах следует возводить

противодеформационные сооружения земляного полотна, обеспечить эффективную защиту насыпей от воздействия деструктивных экзогенных процессов и, в целом, повышение несущей способности земляного полотна. Рассмотрим способы профилактики и защиты основания возводимой насыпи на опасной стадии морозного влагонакопления и морозного пучения.

МЕТОДИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Прочность основания земляного полотна на высокотемпературной мерзлоте предлагается повысить в период морозного влагонакопления за счет технологии дренажа и регулируемого отжатия миграционной воды виброкатком в промерзающем грунте. Концепция заключается в устройстве дренажной системы и организации виброуплотнения основания непосредственно после завершения процесса миграции влаги к зоне промерзания для снижения влажности [3].

Организация технологического регулирования должна быть параметрически связана с характеристиками процесса приращения влажности в промерзающей зоне основания за счет миграции влаги из нижних зон [4]. В этом сложном процессе непрерывно изменяются характеристики:

- Температурный импульс для начала влагонакопления;
- Глубина промерзания;
- Критическая влажность пучения грунта;
- Скорость движения влаги;
- Соотношения между температурой и содержанием незамерзшей воды в зоне промерзания;
- Влагопроводимость талого и мерзлого грунта.

Для регистрации характеристик грунтов в ходе работ предлагается организовать технологический мониторинг в режиме реального времени на основе современных средств – опто-волоконного кабеля (ВОК) и геофизических методов исследования.

Для технологического регулирования процессов упрочнения переувлажненных грунтов предлагается применение разработанной в РУТ (МИИТ) комплексной технологии возведения земляного полотна, включающей этапы:

- 1) Устройство дренажной системы в верхнем слое основания;
- 2) Организация виброуплотнения грунтов и отжатия воды в дренажную систему.

Первый этап данной комплексной технологии – устройство дренажа в виде дренажных прорезей (ширина до 1,5 м, глубина до 1 м, крупный песок с коэффициентом фильтрации свыше 4 м/сут) и защитного

песчаного слоя с геотекстилем [5]. Прорези в слабых водонасыщенных грунтах обеспечивают ускорение консолидации основания за счет сокращения пути фильтрации и отвода воды. Работы по устройству дренажной системы следует завершить до промерзания деятельного слоя, чтобы использовать процессы миграции воды в защитный слой и отжатие по дренажным прорезям [6].

Второй этап – виброуплотнение грунтов в интенсивном режиме с применением виброкатка, отжатие воды и пошаговое ежедневное повышение технологической нагрузки при мониторинге состояния грунтов и нагрузок. Выбор типа виброкатка и режима его работы должен быть выполнен с учетом ограничения:

$$[P_6(c, \varphi, w) - P_{п}] \geq [P_k + P_3], \quad (1)$$

где P_6 - безопасная нагрузка, не вызывающая появления предельного состояния грунта по сдвигу, зависит от состояния грунта в технологическом цикле; P_k - регулируемая нагрузка виброкатка, зависящая от веса вальца, скорости движения и амплитуды вибрации; P_3 - нагрузка от песчаного защитного слоя; $P_{п}$ - поровое давление [2].

Отжатие воды происходит наиболее эффективно во время промерзания грунта. В этом заключается главная особенность и вместе с тем сложность – выбор оптимального времени начала уплотнения грунтов в интенсивном режиме. Глубина промерзания рассчитывается по формуле:

$$d_{fn} = d_0 \sqrt{\Sigma |T_m|}, \quad (2)$$

где d_0 – глубина промерзания при $\Sigma |T_m| = 1$, зависящая от вида грунта; $\Sigma |T_m|$ – сумма абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур за зиму в данном районе [7].

Во время промерзания грунта, как только отрицательные температуры достигнут половины глубины промерзания грунта, следует начинать интенсивное уплотнение грунта с отжатием воды в дренаж [8].

Мониторинг процессов промерзания и регулирования вибронагрузок в период строительства предлагается вести с применением современных средств диагностики – ВОК и режимных термометрических сетей, которые устраивают по проектной документации (ПД) для стадии эксплуатации земляного полотна. Для контроля хода температур и температурного поля глубину заложения ВОК целесообразно установить равной половине деятельного слоя. Это позволит определить фактическую степень пучинистости грунта и контролировать вибронагрузки.

Опыт разработки технологического регламента строительства участков Северного широтного хода (СШХ) показал наличие таликовых

зон, которые состоят, как правило, из грунтов с низкой несущей способностью в основании земляного полотна [9]. Предложенная модификация комплексной технологии в сочетании с ВОК создает предпосылки для прогнозирования и устранения потенциально-опасных мест, профилактике пучения грунтов и соответственно для стабилизации основания [10]. Эти преимущества приводят к ускорению консолидации, сокращению сроков строительства и, соответственно, – к экономической эффективности комплексной технологии упрочнения грунтов.

Оценку эффективности применения новой технологии и ускорения ввода дороги в эксплуатацию следует выполнять по критерию «чистый дисконтированный доход». В качестве условия для сравнения вариантов следует принять данные проектной документации о наличии на трассе строящейся дороги потенциально опасного участка земляного полотна с наличием талика. В расчетах важно учесть доход от досрочного ввода дороги и экономические затраты: Y – ущерб в связи с необходимостью дополнительных работ по исправлению деформаций в основании земляного полотна; Z_t – общие расходы по реализации проекта; Z_{um} – дополнительные затраты на интенсивную технологию, в том числе на виброуплотнение. Срокообразующими характеристиками реализации проекта являются: T_c – продолжительность работ по упрочнению слабого слоя; $Tc1$, $Tc2$ – сроки ввода объекта - контрактный и с сокращением ΔT .

Постоянный контроль температуры грунта на всем протяжении трассы, где есть слабые водонасыщенные грунты, позволяет с большей точностью определять время начала и скорость промерзания грунта, что в свою очередь позволит использовать процесс миграции воды с большей эффективностью.

Принцип работы кабеля ВОК заключается в определении влияния физических воздействий на характеристики светопрозрачности в волокне. В результате затухания световых колебаний в кварцевых стекловолокнах из-за рассеивания расположение внешнего физического эффекта (в том числе изменение напряжений) определяется таким образом, что оптоволокно может быть использовано в качестве линейного сенсора. [11].

ВОК применяется во взаимосвязи с лабораторными исследованиями для контроля изменения плотности грунтов под вибронагрузками:

$$\rho_{opt} = \rho_{cr}(1 + W_{cr}), \quad (3)$$

где ρ_{cr} - критическая плотность частиц грунта, при которой пучение грунта будет отсутствовать; W_{cr} – критическая влажность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивная технология упрочнения слабых и просадочных грунтов повышает стабильность основания в процессе строительства дорог в условиях криолитозоны. Предложенная модификация интенсивной технологии стадией отжатия миграционной влаги в период морозного влагонакопления за счет дренажной системы и виброуплотнения в режиме технологического регулирования в сочетании с применением ВОК позволяет стабилизировать основание и увеличить несущую способность грунтов для развития дорог Арктики [12, 13].

Применение ВОК позволяет повысить точность и оперативность определения температуры грунта по сравнению с термометрическими средствами, для которых устраивают инженерно-геологические и целевые термометрические скважины, пробуренные колонковым способом без промывки на малых оборотах бурового инструмента или ручным буровым комплектом с измерением температуры с помощью гирлянд термометров или встроенных термодатчиков [14].

Применение опто-волоконного кабеля сопровождает интенсивную технологию упрочнения грунтов в основании земляного полотна не только непрерывным контролем за изменениями температуры грунта, но и позволяет более точно определять температуру грунта в любой точке на всем протяжении, где расположен опто-волоконный кабель, в то время как термометрические скважины дают данные по температуре только в тех местах, где расположены скважины.

После строительства кабель ВОК входит в состав технической базы мониторинга безопасности состояния железнодорожного земляного полотна в процессе эксплуатации, в частности, для планирования работ по содержанию пути и профилактике опасных процессов при развитии транспортной инфраструктуры в экстремальных условиях Заполярья [15].

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Приказ Президента РФ № 296 от 27.06.2014: «Определить сухопутные территории Арктической зоны Российской Федерации». [Prikaz Prezidenta RF № 296 ot 27.06.2014: "Opredelit' suhoputnye territorii Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii" (In Russ.)]. Доступно по: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377>. Ссылка активна на: 11.03.2020.

2. Тулайков Н.М. К вопросу о влиянии климата на характер почв. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 979 с. [Tulaykov NM. K voprosu o vliyaniy klimata na harakter pochv. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2012. 979 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.gde-kniga.ru/books/k-voprosu-o-vliyaniy-klimata-na-harakter-pochv-n-m-tulaykov-9785458607841-6e8baa25-3167-4f21-aa8c-994ce5385421>. Ссылка активна на: 11.03.2020.
3. Рекомендации по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях. – М.: Тимр, 2005. – 96 с. [Rekomendacii po intensivnoj tekhnologii i monitoringu stroitel'stva zemlyanykh sooruzhenij na slabykh osnovaniyakh. Moscow: Timr; 2005. 96 p. (In Russ.)].
4. Луцкий С.Я., Сакун Б.В. Теория и практика транспортного строительства. – М.: Первая образцовая типография, 2018. – 304с. [Lutskiy SY, Sakun BV. *Teoriya i praktika transportnogo stroitel'stva*. Moscow: Pervaya obrazcovaya tipografiya, 2018. 304 p. (In Russ.)].
5. Kempfert H-G, Stadel M, Zaeske D. *Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen*. Bautechnik. 1997;74(12):8-2.
6. Liu JK, Peng L. Experimental Study on the Unconfined Compression of a Thawing Soil. *Cold Regions Science and Technology*. 2009;58:92-96. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.03.008
7. Виноградов В.В., Никонов А.М., Яковлева Т.Г. и др. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. трансп. / Под ред. В.В. Виноградова и А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003. – 486 с. [Vinogradov VV, Nikonov `AM, Yakovleva TG, et al. *Raschyoty i proektirovanie zheleznodorozhnogo puti: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zh.-d. transp.* Vinogradov VV, Nikonov AM, editors. Moscow: Marshrut; 2003. 486 p. (In Russ.)].
8. Хрипков К.Н. Конструктивно-технологические решения по сооружению земляного полотна в таликовых зонах распространения многолетнемерзлых грунтов: дис. канд. техн. наук. – М.; 2015. – 212 с. [Hripkov KN. *Konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya po sooruzheniyu zemlyanogo polotna v talikovykh zonah rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh gruntov*. Moscow; 2015. 212 p. (In Russ.)].
9. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 72 с. [Recommendations for accounting and prevention of deformations and forces of frost heaving of soils. PNIIS. Moscow: Stroizdat; 1986. 72 p. (In Russ.)]. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data1/50/50944/>. Ссылка активна на: 11.03.2020.
10. Неугодников А.П., Ахлебенин М.Ю., Егоров Ф.А., Быковский В.А. Строительный мониторинг на базе волоконно-оптических датчиков. Опыт и результаты применения для высотных зданий / Междунар. симп. «Проблемы современного бетона и железобетона». – Минск, 2009. [Neugodnikov AP, Akhlebinin MY, Egorov FA, Bykovskiy VA. *Stroitelnyy monitoring na baze volokonno-opticheskikh datchikov. Opyt i rezul'taty primeneniya dlya vysotnykh zdaniy*. In Mezhd. Simp. "Modern Problems of Concrete and Reinforced Concrete" Minsk, 2009. (In Russ.)].
11. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с. [Udd E. *Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyy kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. Moscow: Tekhnosfera, 2008, 520 p. (In Russ.)]. Доступно по: <http://bookre.org/reader?file=718954>. Ссылка активна на: 11.03.2020.
12. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.,

2012. – 123 с. [SP 25.13330.2012. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh. Moscow; 2012. 123 p. (In Russ.)].
13. ВСН-61-89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты. Минтрансстрой СССР. – М.: ЦНИИС, 1990. – 208 с. [VSN-61-89. Izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo zheleznykh dorog v rajonah vечноj merzloty. Mintransstroj USSR. Moscow: CNIIS, 1990. 208 p. (In Russ.)].
14. ГОСТ 25358-2012 Грунты. метод полевого определения температуры (Переиздание). – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с. [GOST 25358-2012 Grunty. metod polevogo opredeleniya temperatury (Pereizdanie). Moscow: Standartinform, 2019. 19 p. (In Russ.)].
15. Томышев К.А., Баган В.А., Астапенко В.А. Распределенные волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности // Труды МФТИ. – 2012. – Т. 4. – № 2. – С. 64–72. [Tomyshev KA, Bagan VA, Astapenko VA. Raspredelennye volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya primeneniya v neftegazovoj promyshlennosti. *Trudy MFTI*. 2012;4(2):64-72. (In Russ.)]. Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelyonnye-volokonno-opticheskie-datchiki-davleniya-dlya-primeneniya-v-neftegazovoy-promyshlennosti/viewer>. Ссылка активна на: 13.03.2020.

Сведения об авторах:

Лычковский Александр Александрович, аспирант;
eLibrary SPIN: 2671-9305; ORCID: 0000-0002-2663-0508;
E-mail: Alexander_L12@mail.ru

Луцкий Святослав Яковлевич, д. т. н., профессор;
eLibrary SPIN: 2475-5149; ORCID: 0000-0002-0124-6497;
E-mail: lsy40@mail.ru

Ландсман Анатолий Яковлевич, д. э. н., профессор;
eLibrary SPIN: 9901-5851;
E-mail: map@sdm.ru

Навроцкая Надежда Вадимовна, аспирант;
ORCID: 0000-0002-2246-7977;
E-mail: nadyanawrocki@mail.ru

Information about the authors:

Alexander A. Lychkovskiy, postgraduate;
eLibrary SPIN: 2671-9305; ORCID:0000-0002-2663-0508;
E-mail: Alexander_L12@mail.ru

Svyatoslav Ya. Lutskiy, Dr. of engineering, professor;
eLibrary SPIN: 2475-5149; ORCID: 0000-0002-0124-6497;
E-mail: lsy40@mail.ru

Anatoliy Ya. Landsman, Dr. of economics, professor; head of the department of the Moscow automobile and road construction state technical university (MADI);
eLibrary SPIN: 9901-5851;
E-mail: map@sdm.ru

Nadezhda V. Navrotskaya, postgraduate;
ORCID: 0000-0002-2246-7977;
E-mail: nadyanawrocki@mail.ru

Цитировать:

Лычковский А.А., Луцкий С.Я., Ландсман А.Я., Навроцкая Н.В. Диагностика морозного влагонакопления и технологическое регулирование сооружения земляного полотна // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 2. – С. 61–69. doi: 10.17816/transsyst20206261-69

To cite this article:

Lychkovskiy AA, Lutskiy SY, Landsman AY, Navrotskaya NV. Diagnostics of Frost Water Accumulation and Technological Regulation of the Construction of the Roadbed. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(2):61-69. doi: 10.17816/transsyst20206261-69