

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 4. С. 243–255.

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (4): 243–255.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.765

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-243-255

EDN: YVGDPO

АНАЛИЗ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ИСКЛЮЧЕНИЮ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ КУЛТУК – МОНДЫ В РЕСПУБЛИКЕ БУРЯТИЯ

Сергей Семенович Шабуров, Елена Викторовна Волкова

*Иркутский национальный исследовательский
технический университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Обеспечение прочности и устойчивости земляного полотна и инженерных сооружений в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов и глубокого сезонного промерзания грунтов остается одной из сложных научно-технических и технологических проблем строительства и реконструкции дорог в северных районах. Особенно важен вопрос распространения просадок земляного полотна при устройстве, дальнейшей эксплуатации и содержании автомобильных дорог. Основные причины разрушения дорожных конструкций связаны как с глобальным потеплением климата, так и со сложными геологическими и гидрогеологическими условиями региона.

Для предотвращения развития деформаций дорожной конструкции необходимо предусматривать ряд специальных инженерных мероприятий по недопущению оттаивания многолетнемерзлых грунтов или укреплению надмерзлотных слоев оснований.

Цель работы. Изучение методов устранения деформаций земляного полотна автомобильных дорог на территории распространения многолетнемерзлых грунтов и выбор основного метода ликвидации просадок на проблемном участке автомобильной дороги.

Результаты. Рассмотрено несколько вариантов решения вопроса ликвидации просадок на участке федеральной трассы Култук – Монды в Республике Бурятия.

Проанализирована возможность реконструкции земляного полотна разными методами термостабилизации: горизонтальной (пологонаклонной) системой термостабилизации совместно с наклонными термостабилизаторами, временными вертикальными термостабилизаторами для предпостроечного промораживания грунтов основания и гибридной системой термостабилизации (горизонтальный и вертикальный термостабилизатор в одном изделии). Кроме того, предложен метод стабилизации основания автомобильной дороги путем устройства грунтоцементных свай.

Отмечены основные преимущества рассмотренных вариантов, выявлены их недостатки и проведена оценка по стоимостным показателям. Оценена эффективность применения разных методов восстановления конструкции земляного полотна с целью обеспечения устойчивости основания автомобильной дороги. В качестве основного метода, как наиболее эффективного для рассматриваемого участка автомобильной дороги, предложен метод ликвидации просадок путем стабилизации основания земляного полотна устройством грунтоцементных свай.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, вечная мерзлота, строительство и содержание автомобильных дорог, дорожные конструкции, деформации земляного полотна, ремонт автомобильных дорог

Для цитирования: Шабуров С.С., Волкова Е.В. Анализ предложений по исключению развития деформаций земляного полотна эксплуатируемой автомобильной дороги Култук – Монды в Республике Бурятия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 243–255. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-243-255. EDN: YVGDPQ

ORIGINAL ARTICLE

ROAD SITE INSPECTION AND MEASURES
TO AVOID FURTHER DEFORMATION

Sergey S. Shaburov, Elena V. Volkova

National Research Irkutsk Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Strength and stability of the roadbed and engineering structures in permafrost conditions and deep seasonal freezing of soils always remain complex scientific, technical and technological problem in construction and reconstruction of roads in northern regions. Particularly important is the spread of subgrade subsidence during construction and further operation and maintenance of roads in these regions. The road destruction is mostly caused by both global warming and geological and hydrogeological conditions.

To prevent the deformation development, it is necessary to provide a number of special engineering measures to prevent thawing of permafrost soils or strengthen supra-permafrost layers of foundations. The purpose of the work is to study methods for eliminating deformation of the road bed in permafrost and choosing the main method for eliminating subsidence of the road.

The article discusses several ways to solve the problem of eliminating subsidence on of the federal highway. Options for reconstruction of the roadbed are considered. These are different methods of thermal stabilization, i.e., horizontal (sloping) thermal stabilization system with inclined thermal stabilizers, temporary vertical thermal stabilizers for pre-construction freezing of foundation soils, and hybrid thermal stabilization system (horizontal and vertical thermal stabilizer in one product). A method is proposed for stabilizing the road base by installing soil-cement piles. The main advantages of and disadvantages the methods are noted and cost assessment is made. A conclusion is drawn on the effectiveness of different methods to restore the subgrade structure in order to ensure the road base stability. The main method is elimination of subsidence by stabilizing the road base with installation of soil-cement piles.

Keywords: permafrost soil, road construction and maintenance, deformation, road repair

For citation: Shaburov S.S., Volkova E.V. Road Site Inspection and Measures to Avoid Further Deformation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (4): 243–255. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-243-255. EDN: YVGDPQ

Введение

При строительстве автомобильной дороги Култук – Монды км 72+500 – км 83+000 в Республике Бурятия на участке ПК 30+00 – ПК 36+50 после возведения насыпи началось развитие просадок¹. Данный участок дороги проложен по правобережной части долины р. Иркут и входит в зону островного распространения многолетней мерзлоты.

¹ Расходы на ликвидацию грунтовых разрывов на сети автомобильных дорог федерального значения. Строительство автомобильной дороги Култук – Монды км 72+500 – км 83+000, Республика Бурятия.

Многолетнемерзлые грунты залегают на глубине, значительно превышающей глубину промерзания сезонно-мерзлых грунтов, которая, согласно данным проекта (метеостанция Тунка), составляет для суглинков и глин 2,29 м, для супесей и песков пылеватых – 2,79 м, для песков крупных и гравелистых – 2,98 м и для крупнообломочных грунтов – 3,38 м. Учитывая наличие в основании земляного полотна текучих и пластичных грунтов, а также заболоченность местности на отдельных участках и затрудненный сток поверхностных вод, разработчики проекта достаточно обоснованно предусмотрели обеспечение устойчивости основания путем возведения земляного полотна с боковыми пригрузочными бермами [8, 10]. При этом расчетная осадка насыпи земляного полотна на участке ПК 31+50 – ПК 34+50 составила 0,30 м, на участке ПК 34+50 – ПК 36+72 – 0,25 м.

По материалам проектной документации отмечено, что инженерно-геологические условия участка строительства автомобильной дороги на ПК 30+00 – ПК 36+50 не оказывают влияния на состояние многолетнемерзлых грунтов. Поэтому, согласно п. 8.2.8 СП 313.1325800.2017, земляное полотно было запроектировано по нормам II дорожно-климатической зоны, и специальных мероприятий по недопущению оттаивания многолетнемерзлых грунтов в проекте предусмотрено не было.

Обследование земляного полотна автомобильной дороги

Култук – Монды на участке км 72+500 – км 83+000 в Республике Бурятия и назначение мероприятий по решению проблемы ликвидации просадок

Выполненные объемы земляных работ по сооружению земляного полотна (ПК 30+00 – ПК 36+50) на ноябрь 2017 г. составили 413 501 м³, мощность насыпных грунтов – 19,3 м (до низа рабочего слоя земляного полотна). Впоследствии (в период с 15.12.2017 г. по 21.03.2018 г.) на участке ПК 30+50 – ПК 33+50 была выявлена деформация земляного полотна в виде просадки насыпи на глубину 2,678 м с образованием локальных трещин, обусловленных провалами, сползанием и оседанием откосных частей.

По техническому заданию ФКУ «Южный Байкал» для детального обследования и назначения мероприятий, исключающих развитие дальнейших деформаций земляного полотна, была привлечена проектная организация АО «Иркутскгипродорнии», которая выполнила инженерно-геологические работы на участке ПК 30+50 – ПК 33+50 строительства автомобильной дороги Култук – Монды км 72+500 – км 83+000, Республика Бурятия.

При проведении обследования земляного полотна на участке ПК 30+00 – ПК 36+50, выполненного АО «Иркутскгипродорнии», выявлено следующее:

1. На основе результатов мониторинга состояния земляного полотна на участке строительства автомобильной дороги Култук – Монды ПК 31+00 – ПК 35+50 (табл. 1) установлено, что оно находится в нестабильном состоянии. Происходит увеличение просадки. Наибольшая глубина просадки в интервале 5,45–6,01 м отмечена на участке ПК 31+00 – ПК 33+00, что значительно превысило расчетные значения осадки, указанные в проекте (0,25–0,30 м).

2. Залегание многолетнемерзлых грунтов (ММГ) однородное, верхняя граница (ВГ) ММГ под осью насыпи проходит на глубине 6,8 м, по подошве

насыпи – 7,2 м. Залегание ММГ за пределами земляного полотна неоднородное, положение ВГ ММГ варьируется от 8,0 м (справа от подошвы насыпи) до 10,8 м (слева от подошвы насыпи). Многолетнемерзлые грунты пластичномерзлые и твердомерзлые, льдистые и слабольдистые [3].

Таблица 1

**Результаты мониторинга состояния земляного полотна
автомобильной дороги Култук – Монды км 72+500 – км 83+000
в Республике Бурятия (участок строительства ПК 31+00 – ПК 35+50)**

Table 1

**Results of roadbed monitoring on Kultuk – Mondy route 72+500 km – 83+000 km
in the Republic of Buryatia (construction site PK 31+00 – PK 35+50)**

Место измерения, ПК + м	Отметки по оси земляного полотна (м), установленные по датам				Расчетная ве- личина про- садки, м
	23.11.2017 г.	15.12.2017 г.	20.03.2018 г.	11.04.2018 г.	
31+00	759,68	756,102	754,586	754,16	5,52
31+50	757,42	754,118	752,000	751,41	6,01
32+00	755,30	752,044	750,064	749,72	5,58
32+50	753,31	749,856	748,292	747,86	5,45
33+00	751,46	748,166	746,208	745,80	5,66
33+50	747,66	746,304	744,749	744,42	3,24
34+00	745,74	744,434	743,356	743,18	2,56
34+50	743,56	–	–	741,67	1,89
35+00	740,56	–	–	739,45	1,11
35+50	738,91	–	–	738,01	0,90

3. В результате бурения в основании насыпи вскрыты слабые и высоко-температурные многолетнемерзлые грунты, представленные следующим составом (сверху вниз):

- супеси пылеватые текучие;
- линза многолетнемерзлых супесей льдистых с примесью органики, с корнями деревьев и мелких растительных остатков;
- таликовая зона – сложена песками пылеватыми средней плотности водонасыщенными, супесями пылеватыми текучими с примесью органики;
- в основании таликовой зоны вскрыт прослой погребенного льда;
- основание разреза слагают супеси пылеватые льдистые просадочные с примесью органики, супеси пылеватые слабольдистые малопросадочные с примесью органики и пески пылеватые льдистые просадочные.

4. Практически все грунты разреза, находящиеся в талом состоянии, текучие (водонасыщенные). Исключение составляют супеси.

5. Неоднородность водно-теплового режима грунтов, залегающих в основании земляного полотна, выраженная в их более интенсивном промерзании у подошвы насыпи в местах прижимных берм, по сравнению с центральной частью насыпи, привела к тому, что прочность основания стала неравномерной.

Фотография и чертёж поперечного профиля деформации насыпи на момент исследования представлены на рис. 1.

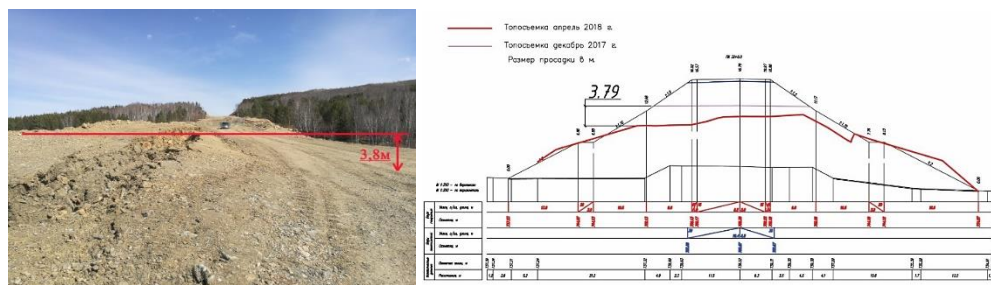


Рис. 1. Деформация насыпи на момент исследования (2018 г.)
Fig. 1. Deformation of embankment (2018)

Вариант 1. Устройство горизонтальной (пологонаклонной) системы термостабилизации совместно с наклонными термостабилизаторами [1].

На рис. 2 представлен первый вариант решения проблемы ликвидации просадок на рассматриваемом участке автомобильной дороги.

Основные недостатки варианта 1:

1. Необходимость полного демонтажа насыпи.
2. Горизонтальные термостабилизаторы с большой долей вероятности не проморозят талое основание насыпи за один зимний сезон.

3. Ограниченная длина наклонных термостабилизаторов (не более 18,4 м в грунте) недостаточна для полноценного промораживания центральной части грунтового основания.

4. Техническое решение для обоснования его применимости требует выполнения прогнозных теплотехнических расчетов.

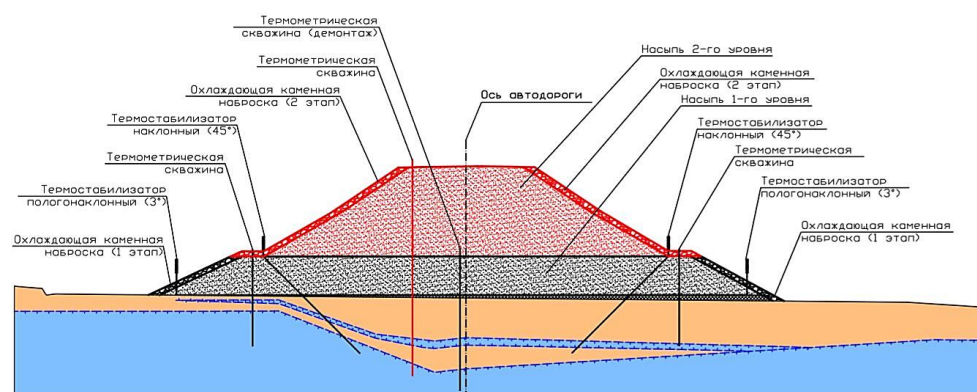


Рис. 2. Устройство горизонтальной (пологонаклонной) системы термостабилизации совместно с наклонными термостабилизаторами

Fig. 2. Device of horizontal (semi-inclined) thermal stabilization system in conjunction with inclined thermal stabilizers

Вариант 2. Устройство временных вертикальных термостабилизаторов для предпостроечного промораживания грунтов основания.

Работы выполняются в два этапа. Первый этап включает снятие насыпи до высоты отсутствия деформаций грунта (8–9 м, уточняется при проектировании) и монтаж вертикальных термостабилизаторов (длина подземной части 18,4 м), на участок 300 м – 4681 шт. Далее производят устройство термометрических скважин (12 м – 6 шт. и 20 м – 3 шт. в грунте, залегающем в основании земляного полотна) и охлаждающей каменной наброски из фракционного камня. Работы этого этапа должны быть закончены до начала зимнего сезона (начало – середина октября).

Второй этап данного проекта реконструкции начинают с демонтажа (срезки) термостабилизаторов (3322 шт.) и засыпки термометрических скважин длиной 20 м. Далее формируется насыпь до проектных отметок и устраиваются термометрические скважины (глубиной 28 м – 3 шт. в грунте, залегающем в основании земляного полотна) и охлаждающие каменные наброски из фракционного камня.

На рис. 3 представлен второй вариант решения проблемы ликвидации просадок на рассматриваемом участке автомобильной дороги.

Основные недостатки варианта 2:

1. Большой объем термостабилизаторов.
2. Большое количество демонтируемых термостабилизаторов.
3. Техническое решение для обоснования его применимости требует выполнения прогнозных теплотехнических расчетов.

Однако имеется ряд преимуществ по сравнению с вариантом 1. Насыпь демонтируется не полностью, и наблюдается более эффективное промораживание грунтов основания (вероятно, будет достаточно одного зимнего сезона).

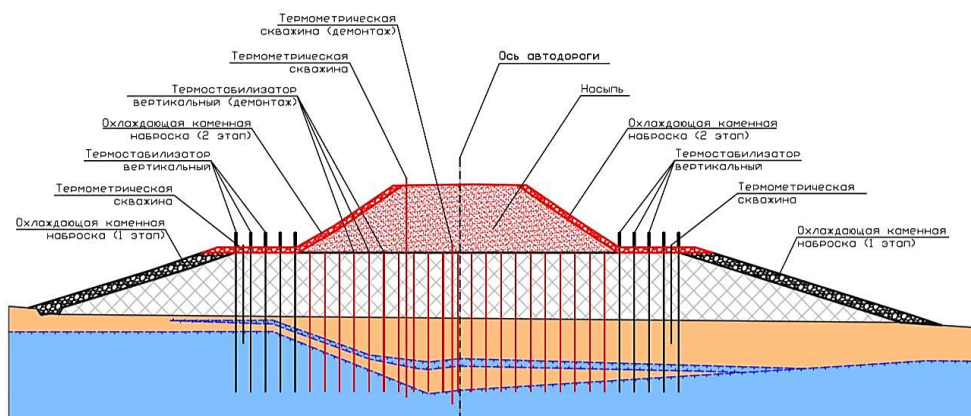


Рис. 3. Устройство временных вертикальных термостабилизаторов для предпостроечного промораживания грунтов основания

Fig. 3. Schematic of temporary vertical thermal stabilizers for pre-construction freezing of subgrade soils

Вариант 3. Устройство гибридной системы термостабилизации (горизонтальный и вертикальный термостабилизатор в одном изделии).

Работы выполняются в два этапа. Первый этап начинают со снятия насыпи до высоты отсутствия деформаций грунта (8–9 м, уточняется при проектировании). Далее производят монтаж гибридной системы термостабилизации (длина подземной горизонтальной части ~23 м, длина вертикальных термостабилизаторов – 18,4 м, на один горизонтальный сегмент рекомендуют устанавливать 12 вертикальных термостабилизаторов), на участок 300 м – 151 шт. Далее производят монтаж теплозащитного экрана из пенополистирола толщиной 200 мм. После этого устраивают термометрические скважины (12 м – 6 шт. и 20 м – 3 шт.) и охлаждающую каменную наброску из фракционного камня. Работы этого этапа также должны быть закончены до начала зимнего сезона (начало – середина октября).

Второй этап работ варианта 3 начинают с демонтажа (засыпки) термометрических скважин длиной 20 м и формируют насыпи до проектных отметок. Далее выполняют устройство термометрических скважин (28 м в грунте – 3 шт.) и охлаждающей каменной наброски из фракционного камня.

На рис. 4 представлен третий вариант решения проблемы ликвидации просадок на рассматриваемом участке автомобильной дороги.

Основные недостатки варианта 3:

1. Сложность в реализации проекта.
2. Требуется техническое решение обоснования применения метода.
3. Необходимо выполнение прогнозных теплотехнических расчетов.

Преимущества варианта 3:

1. Насыпь демонтируется не полностью.
2. Более эффективное промораживание грунтов основания по сравнению с вариантом 2 (вероятно, будет достаточно одного зимнего сезона).
3. Термостабилизаторы не демонтируются.

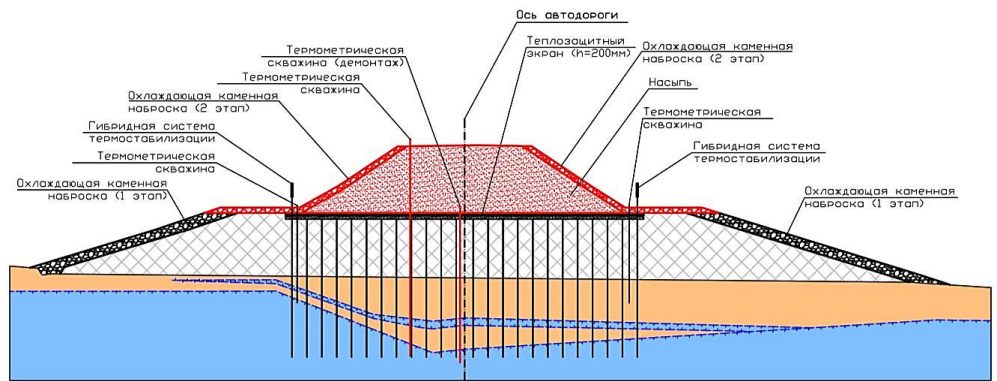


Рис. 4. Устройство гибридной системы термостабилизации (горизонтальный и вертикальный термостабилизаторы в одном изделии)

Fig. 4. Schematic of hybrid thermal stabilization system (horizontal and vertical thermal stabilizer in one product)

Авторами статьи проведено сравнение предложенных вариантов реконструкции земляного полотна на рассматриваемом участке автомобильной дороги. В табл. 2 представлены основные параметры по каждому рассмотренному варианту.

Таблица 2

Сравнение вариантов реконструкции земляного полотна

Table 2

Comparison of subgrade reconstruction methods

№ варианта	Преимущества	Недостатки	Стоимость, млн руб.
B1	—	1. Полный демонтаж насыпи 2. Горизонтальные термостабилизаторы не проморозят основание насыпи за один зимний сезон 3. Ограниченная длина наклонных термостабилизаторов недостаточна для полноценного промораживания центральной части грунтового основания 4. Необходимы обоснование применимости и прогнозные теплотехнические расчеты	200
B2	1. Насыпь демонтируется не полностью 2. Эффективное промораживание грунтов основания (один зимний сезон)	1. Большой объем термостабилизаторов 2. Большое количество демонтируемых термостабилизаторов 3. Необходимы обоснование применимости и прогнозные теплотехнические расчеты	250

Окончание табл. 2
End of table 2

№ варианта	Преимущества	Недостатки	Стоимость, млн руб.
ВЗ	1. Насыпь демонтируется не полностью 2. Более эффективное промораживание грунтов основания по сравнению с вариантом 2 (один зимний сезон) 3. Термостабилизаторы не демонтируются	1. Сложность в реализации 2. Необходимы обоснование применимости и прогнозные тепло-технические расчеты	230

Действенный метод термостабилизации грунтов, предложенный АО «Иркутскиипродорнии», не может быть признан эффективным при реконструкции земляного полотна по нескольким причинам:

- предложенные системы необходимы и эффективны при применении на мерзлоте с целью ее сохранения;
 - промораживание огромной толщины основания (более 7 м талых водонасыщенных грунтов) до уровня ММГ (не играющего никакой роли в осадке насыпи) невозможно в короткие сроки;
 - продолжительный, затратный и трудоемкий производственный процесс.
- На наш взгляд, целесообразно рассмотреть метод стабилизации основания устройством грунтоцементных свай [4, 6].

Достоинства метода устройства грунтоцементных свай:

- грунтоцементные сваи могут использоваться для укрепления и улучшения характеристик грунта, имеющего низкую несущую способность или подверженного деформации;
- грунтоцементные сваи могут помочь равномерно распределить нагрузку, особенно на участке с неоднородным грунтом или неровной поверхностью;
- грунтоцементные сваи могут использоваться для предотвращения оседания земляного полотна дороги под воздействием нагрузок от транспорта или при изменении гидрологических условий;
- в зонах с повышенной влажностью грунта грунтоцементные сваи могут помочь уменьшить влияние воды на грунт и, следовательно, улучшить его несущие свойства.

Положительный опыт применения грунтоцементных свай на слабых основаниях в Иркутской области был получен при строительстве участка федеральной автомобильной дороги М-53 «Байкал» Алзамай – Разгон (км 1251 – км 1261) в 2012 г. Мощность слабых глинистых грунтов основания изменяется от 7,0 до 16,0 м. Модуль деформации этих грунтов $E = 2\text{--}5$ МПа.

Предложенная конструкция укрепления основания представляет собой армированный массив из грунтоцементных колонн диаметром 750 мм с гибким ростерком (рис. 5). Колонны устраивают с шагом $3,0 \times 3,0$ м по треугольной сетке, длина колонн определяется мощностью слабых грунтов и составляет

7,0–8,0 м. Для укрепления основания насыпи было запроектировано и выполнено более 1000 грунтоцементных колонн общей длиной 12 000 м. Для обеспечения заданных проектом значений прочности на сжатие и модуля деформации грунтоцемента принят расход цемента 350 кг/м колонны [5, 7].

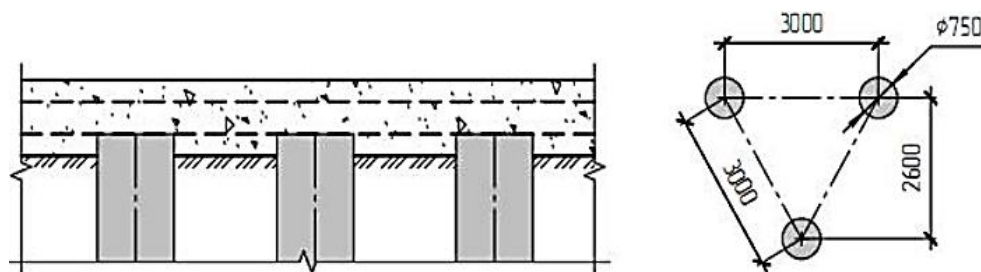


Рис. 5. Схема укрепления основания грунтоцементными колоннами

Fig. 5. Schematic of base strengthening with cement columns

Эксплуатация данного участка автомобильной дороги в течение 12 лет показала все преимущества принятого решения и примененных технологий. Просадки земляного полотна отсутствуют.

Аналогичное решение и технология исполнения были применены ФКУ Упрдор «Прибайкалье» при строительстве участка (ПК 124+000 – ПК 130+000) автомобильной дороги Р-255 «Сибирь» Новосибирск – Кемерово – Красноярск – Иркутск (на участке км 1524+474 – км 1537+880) в 2022 г. В основании насыпи залегают слабые грунты (текучие глины и суглинки мощностью 4–11,5 м). Высота насыпи составляет 9,47 м. Технология струйной цементации, или струйная геотехнология, позволяет получать грунтоцементный массив любой формы и размеров, который обладает достаточно высокими прочностными и деформационными характеристиками (рис. 6).



Рис. 6. Производство работ по технологии струйной цементации грунтов

Fig. 6. Production technology of jet cementation of soils

Безусловно, прежде чем принять решение об использовании грунтоцементных свай на участке ПК 30+00 – ПК 36+50, следует провести детальное

проектирование и инженерные расчеты, чтобы убедиться в их эффективности и соответствии требованиям безопасности и долговечности дорожного сооружения [2, 8, 9, 11]. Необходим грунтоцементный материал, получаемый в результате перемешивания грунта с цементным раствором методами струйной цементации или глубинного перемешивания до достижения грунтоцементной смесью требуемых прочностных и уплотнительных характеристик.

Проведение работ включает следующие этапы:

- срезка части насыпи на величину образовавшейся просадки на всем протяжении участка до –8 м;
- устройство грунтоцементных свай выбранного диаметра и длины через оставшуюся часть земляного полотна и основания на глубину до уровня ММГ;
- расчетное обоснование необходимости устройства гибкого ростверка по верху грунтоцементных свай из геотекстильного материала и георешетки.

Заключение

После детального обследования и выполнения инженерно-геологических работ можно сделать вывод, что предложенные проектной организацией АО «Иркутскгипродорнии» мероприятия, исключающие развитие дальнейших деформаций земляного полотна, не имеют практического применения для данного участка автомобильной дороги в конкретных условиях. Высокозатратные технологии вариантов использования термостабилизаторов различного состава и назначения носят обобщенный характер и требуют дополнительного глубокого расчетного обоснования, опытного опробования их применения.

Многолетний опыт эксплуатации федеральных автомобильных дорог «Амур» Чита – Хабаровск, «Лена» Большой Невер – Якутск свидетельствует о многочисленных ежегодно появляющихся просадках участков дорог. Многообразие вызывающих просадки причин: глубина и характер залегания вечномерзлых грунтов, физико-механические свойства надмерзлотных слоев оснований, водно-температурные режимы – требует в каждом конкретном случае обязательного сравнения вариантов различных технических решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бобученко И.И., Волкова Е.В. Метод стабилизации земляного полотна на участках распространения многолетнемерзлых грунтов // Взаимодействие науки, образования и производства : сборник трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2019. С. 17–27.
2. Дроздов В.В., Шабуров С.С. Причины возникновения деформаций автомобильных дорог и мероприятия по снижению их интенсивности с высокотемпературным типом вечной мерзлоты в основаниях земляного полотна на примере строительства автомобильной дороги «Амур» Чита – Хабаровск // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 2 (13). С. 33–45.
3. Кондратьев В.Г. Мероприятия по изменению режима теплообмена на поверхности земли и их влияние на распределение температуры в грунте // Нефтяное хозяйство. 2012. № 10. С. 122–125.
4. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. Москва : Стройиздат, 2010. 226 с.
5. Малинин А.Г., Гладков И.Л. Экспериментальные исследования диаметра грунтоцементных колонн в различных грунтовых условиях // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 3. С. 27–30.

6. Малинин А.Г., Гладков И.Л., Жемчугов А.А., Салмин И.А. Экспериментальные исследования деформативности грунтового основания, укрепленного грунтоцементными колоннами // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 29–32.
7. Малинин А.Г., Гладков И.Л., Жемчугов А.А. Укрепление слабых грунтов в основании насыпи автодороги при помощи струйной цементации // Транспортное строительство. 2013. № 1. С. 4–7.
8. Шабуров С.С., Волкова Е.В. Технологии и материалы для ремонта автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 2 (41). С. 248–255.
9. Feng W., Ma W., Sun Zh., et al. Radiation Effect Analysis of Awning Measure on the Embankment Slope Field Test in Cold Regions // Permafrost Engineering. Proceeding of the IX International Symposium, 3–7 September 2011, Mirny, Russia. Якутск, 2011. P. 319–325.
10. Wu Ziwang, et al. Roadbed Engineering in Permafrost Regions. Lanzhou University, 1988. 104 p.
11. Zarling J.P., Breley A.W. Thaw Stabilization of Roadway Embankments Constructed Over Permafrost. Report NO FHWA-AK-RD-81-20, 1986.

REFERENCES

1. Bobuchenko I.I., Volkova E.V. Method for Subgrade Stabilization in Permafrost Soils. In: Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Interaction of Science, Education and Production'. Irkutsk, 2019. Pp. 17–27. (In Russian)
2. Drozdov V.V., Shaburov S.S. Deformation of Highways and Measures to Reduce its Intensity with High-Temperature Permafrost in Subgrade Soil on Chita – Khabarovsk Route. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2015, 2 (13): 33–45. (In Russian)
3. Kondratyev V.G. Heat Exchange Changes on the Earth Surface and Their Impact on Temperature Distribution in Soil. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2012; (10): 122–125. (In Russian)
4. Malinin A.G. Jet Cementation of Soils. Moscow: Stroyizdat, 2010. 226 p. (In Russian)
5. Malinin A.G., Gladkov I.L. Soil-Cement Columns Diameter in Various Soil Conditions. *Osnovaniya, fundamente i mekhanika gruntov*. 2011; (3): 27–30. (In Russian)
6. Malinin A.G., Gladkov I.L., Zhemchugov A.A., Salmin I.A. Deformability of Soil Foundations Reinforced with Soil-Cement Columns. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2012; (9): 29–32. (In Russian)
7. Malinin A.G., Gladkov I.L., Zhemchugov A.A. Strengthening Soft Soils at the Road Base Using Jet Cementation. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2013; (1): 4–7. (In Russian)
8. Shaburov S.S., Volkova E.V. Technologies and Materials for Road Repair in Permafrost Soils. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2022; 12 (2 (41)): 248–255. (In Russian)
9. Feng W., Ma W., Sun Zh., et al. Radiation Effect Analysis of Awning Measure on the Embankment Slope Field Test in Cold Regions. Permafrost engineering. In: Proc. 9th Int. Symposium, 3–7 September 2011, Mirny, Russia. 2011. Pp. 319–325.
10. Wu Ziwang, et al. Roadbed Engineering in Permafrost Regions. Lanzhou University, 1988. 104 p.
11. Zarling J.P., Breley A.W. Thaw Stabilization of Roadway Embankments Constructed Over Permafrost. Report No. FHWA-AK-RD-81-20, 1986.

Сведения об авторах

Шабуров Сергей Семенович, канд. техн. наук, профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, sss1941@yandex.ru

Волкова Елена Викторовна, канд. географ. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, volkova_elena13@mail.ru

Authors Details

Sergey S. Shaburov, PhD, Professor National Research Irkutsk Technical University, 83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia, sss1941@yandex.ru

Elena V. Volkova, PhD, A/Professor National Research Irkutsk Technical University, 83, Lermontov Str., 664074, Irkutsk, Russia volkova_elena13@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.04.2024
Одобрена после рецензирования 15.05.2024
Принята к публикации 14.06.2024

Submitted for publication 18.04.2024
Approved after review 15.05.2024
Accepted for publication 14.06.2024