УДК 625.12:691.4:624.131.537
https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-68-78

Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне

Таисия ШЕПИТЬКО

Игорь АРТЮШЕНКО

Павел ДОЛГОВ

Шепитько Таисия Васильевна *— Российский университет транспорта, Москва, Россия.*
Артюшенко Игорь Александрович *— Российский университет транспорта, Москва, Россия.*
Долгов Павел Геннадьевич *— ООО «Геотехническое обоснование», Санкт-Петербург, Россия*.*

Стабилизация многолетнемёрзлых грунтов основания земляного полотна, сооружаемого с допущением оттаивания, за счёт улучшения их прочностных характеристик требует разработки и выбора рациональных конструктивно-технологических решений.

Целью исследования является анализ эффективности использования вертикальных столбов из щебня в криолитозоне и их влияния на прочностные характеристики грунтов основания. В исследовании использовались общенаучные методы, моделирование и сравнительный анализ.

Предлагается метод улучшения прочностных свойств грунтов основания земляного полотна на участке Обская–Салехард Северного широтного хода за счёт армирования вертикальными столбами из щебня, что повышает устойчивость сооружения.

Обосновывается принципиальная технологическая схема сооружения земляного полотна, которая включает в себя следующие основные этапы: подготовительный этап, 1 стадия – устройство вертикальных столбов из щебня и щебёночной подушки, 2 стадия – дополнительное уплотнение виброкатком в случае несоответствия устойчивости несущей способности и осадки основания нормам эксплуатации.

Выполнено моделирование исследуемого объекта транспортной инфраструктуры как без использования технологии армирования вертикальными столбами из щебня, так и с её применением. Рассчитан коэффициент устойчивости и получена теоретическая поверхность обрушения насыпи с использованием программных комплексов Midas GTS NX и Plaxis 2D. Проверка устойчивости данного сооружения велась как в плоской, так и в трёхмерной постановке.

Показана эффективность использования вертикальных столбов из щебня для усиления насыпей, сооружаемых на многолетнемёрзлых грунтах.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, земляное полотно, Северный широтный ход, многолетнемёрзлые грунты, вертикальные столбы из щебня, устойчивость насыпи, строительство.

---

*Информация об авторах:
Шепитько Таисия Васильевна – доктор технических наук, профессор, директор Института пути, строительства и сооружений Российского университета транспорта, Москва, Россия, shepitko-tv@mail.ru.
Артюшенко Игорь Александрович – аспирант кафедры проектирования и строительства железных дорог Российского университета транспорта, Москва, Россия, tywka351@mail.ru.
Долгов Павел Геннадьевич – генеральный директор ООО «Геотехническое обоснование», Санкт-Петербург, Россия, dolgov@geotechfem.com.

Статья поступила в редакцию 18.04.2019, принята к публикации 11.08.2019.

For the English text of the article please see p. 74.

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве транспортных объектов для обеспечения их надежности необходимо учитывать природно-климатические, гидрологические и мерзлотные процессы [1; 2], игнорирование которых неблагоприятно сказывается не только на ходе строительства, но и на дальнейшей эксплуатации объекта.

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

Для обоснованного выбора рациональных конструктивно-технологических решений необходимо проанализировать и учесть при проектировании инженерно-геологические и природно-климатические факторы района строительства.

В соответствии с этим для участков с многолетнемёрзлыми грунтами разработана принципиальная схема технологии сооружения земляного полотна, возводимого с допущением оттаивания, с применением армирования вертикальными столбами из щебня.

Вертикальные столбы из щебня являются одним из методов стабилизации слабых грунтов, применяемым для повышения прочности и надежности земляного полотна, уплотнения грунтового массива и уменьшения влажности грунтов [3, с. 17].

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ТЕХНОЛОГИИ АРМИРОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СТОЛБАМИ ИЗ ЩЕБНЯ

Предложенная принципиальная схема (рис. 1) имеет блочную структуру, объединяющую стадии реализации данной технологии.

Рис. 1. Принципиальная схема сооружения земляного полотна с допущением оттаивания грунтов на многолетнемёрзлых основаниях с применением армирования вертикальными столбами из щебня: ММГ – многолетнемёрзлые грунты; $К_{уст}$ – коэффициент устойчивости откосов насыпи.

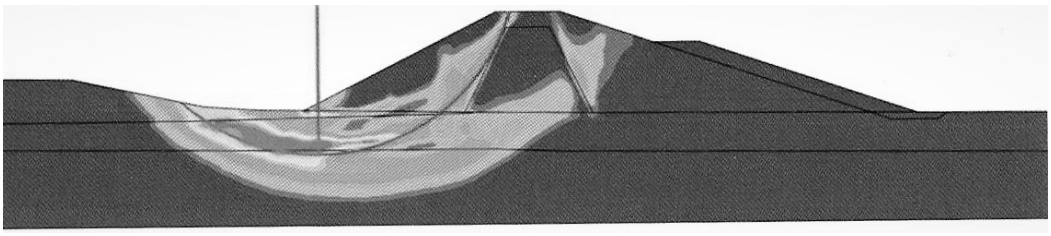

Рис. 2. Криволинейная поверхность возможного смещения [7].

В подготовительный период необходимо предусмотреть возможное влияние негативных факторов на будущее основание земляного полотна и предпринять меры по их ликвидации. Для этого проводится прогнозирование теплотехнических и физико-механических процессов и технологическое регулирование параметров, которые его допускают. Это скорость консолидации и оттаивания, величина относительной осадки, глубина промерзания и оттаивания, влажность грунтов, теплопроводность слоёв и др. На подготовительном этапе также определяется несущая способность деятельного слоя в основании под насыпью под действующей эксплуатационной нагрузкой.

I стадия предлагаемой технологии включает устройство щебёночных свай и щебёночной подушки в основании насыпи для улучшения прочностных характеристик грунтов. Функционирование щебёночных свай как вертикальных дрен определяется на основе закономерностей процессов в слабом слое [4, с. 12].

На II стадии принципиальной технологической схемы реализуется упрочнение грунтов основания путем дополнительного уплотнения виброкатками, если требуемые несущая способность основания и устойчивость насыпи не были достигнуты на предыдущих стадиях.

На каждой из стадий предложенной технологической схемой (рис. 1) предусматривается уточнение соответствия устойчивости, несущей способности и осадки основания нормативным требованиям. Следует уточнить, что в ходе строительства необходим постоянный мониторинг физико-механических и теплофизических характеристик грунтов основания.

ТЕОРИЯ РАСЧЕТА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

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

Этот участок представляет собой склон водораздельной поверхности ледниково-морского генезиса (m, gm II–III), полого наклонный в сторону ручья Вындяда. Высотные отметки равномерно понижаются к ручью. Уклон поверхности в среднем составляет 3–5°. Геологическое строение разреза: до глубины 6 м вскрываются мягкопластичный и текучепластичный суглинки, ниже, на глубине 7 м вскрывается мёрзлая супесь. Мощность сезонно-мёрзлого слоя 1,5–2 м, сезонно-талого – 2,9–3,0 м. В пределах рассматриваемого участка запроектирована насыпь высотой 6 метров [5, с. 16].

В ходе исследования произведен расчёт коэффициента устойчивости и получена теоретическая поверхность обрушения данной насыпи. Расчёт произведен методом круглоцилиндрической поверхности проф. Г. М. Шахунянца [6, с. 37].

Проверка устойчивости производится исходя из рассмотрения криволинейной поверхности возможного смещения. Такой приём распространён при выполнении расчётов на возможность смещения грунта насыпи и вовлечения в деформацию грунта основания (рис. 2) [6, с. 37].

Исходя из того, что криволинейная поверхность возможного смещения представляет поверхность круглого цилиндра, расчёт на устойчивость сводят к рассмотре-

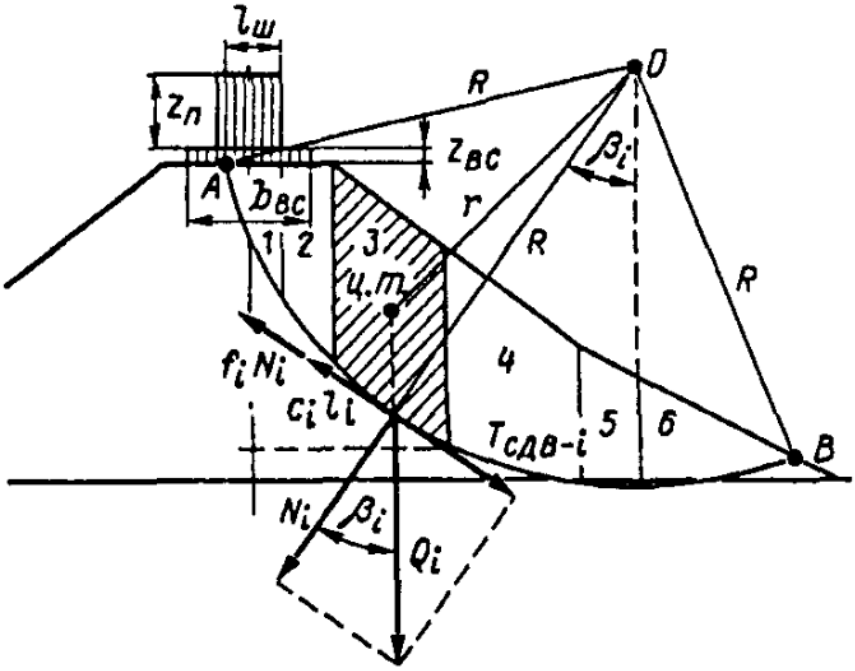

Рис. 3. Схема определения $K_{уст}$ насыпи методом круглоцилиндрических поверхностей Г. М. Шахунянца: Q_i – сила, действующая на поверхность возможного смещения, складывающаяся из веса отсека и нагрузки на него, которая раскладывается на нормальную $N_i = Q_i\cos\alpha_i$ и тангенциальную $T_i = Q_i\sin\alpha_i$; f_iN_i – силы трения; c_il_i – силы сцепления.

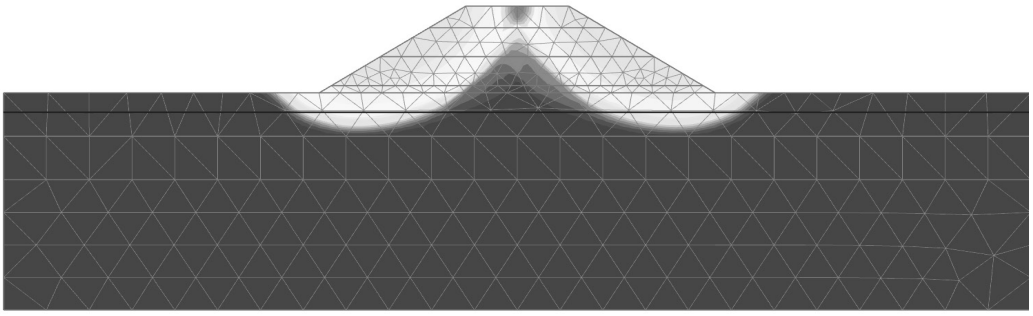

Рис. 4. Теоретическая поверхность обрушения по результатам расчёта устойчивости насыпи на ПК 01+50-ПК 06+50 участка Обская–Салехард новой железнодорожной линии Северный широтный ход, смоделированная в программном комплексе Plaxis 2D (минимальное значение коэффициента устойчивости – 0,953).

нию условий возможности изменения массы грунта при его перемещении по этой поверхности относительно оси круглого цилиндра. Коэффициент устойчивости $K_{уст}$ массива определяют при этом как отношения моментов сил относительно этой оси О (рис. 3), сопротивляющихся смещению, к моменту сил относительно той же оси, стремящихся его сместить.

Коэффициент устойчивости $K_{уст}$ определяют по формуле:

$$K_{уст} = \frac{\sum f_i N_i + \sum c_i l_i + \sum T_{iуд}}{\sum T_{iсдв}}, \qquad (1)$$

где $T_{iуд}$ – тангенциальная составляющая, сопротивляющаяся сдвигу массива грунта;

$T_{iсдв}$ – тангенциальная составляющая, стремящаяся сдвинуть грунтовый массив.

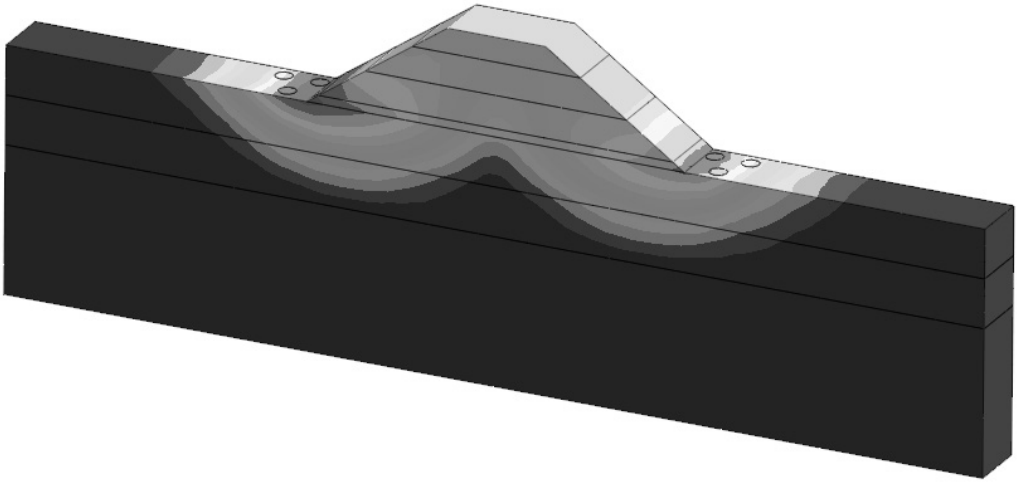

Рис. 5. Теоретическая поверхность обрушения по результатам расчёта устойчивости насыпи на ПК 01+50-ПК 06+50 участка Обская–Салехард новой железнодорожной линии Северный широтный ход, смоделированная в программном комплексе Midas GTS NX в трёхмерном пространстве (минимальное значение коэффициента устойчивости – 1,077).

Тангенциальная составляющая сопротивления сдвигу определяется по формуле:

$$\sum T_{iуд} = \sum f_i N_i + \sum c_i l_i, \quad (2)$$

где $f_i N_i$ – силы трения;

$c_i l_i$ – силы сцепления.

Полученное значение $K_{уст}$ сравнивают с допускаемым значением коэффициента устойчивости, нормирование которого приводится в СП 238.132600.2015 [8, с. 70]. Если значение $K_{уст}$ меньше нормативной величины k, следует применить технологические решения по улучшению прочностных характеристик основания земляного полотна.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ НАСЫПИ

В качестве инструмента аналитического исследования в работе использовались программные комплексы Midas GTS NX и Plaxis 2D [9; 10]. Проверка на устойчивость исследуемой шестиметровой насыпи выполнена в плоской и трёхмерной постановке. В ре-

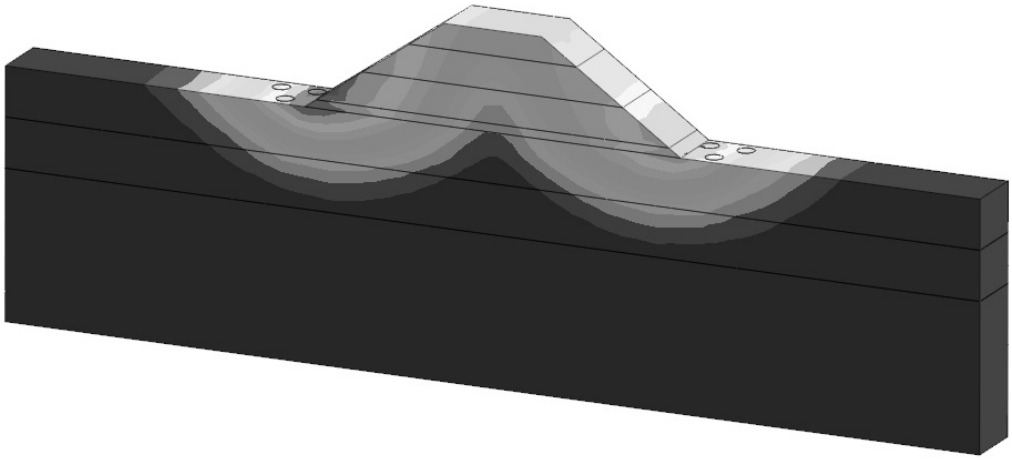

Рис. 6. Теоретическая поверхность обрушения по результатам расчёта устойчивости насыпи на ПК 01+50-ПК 06+50 участка Обская–Салехард новой железнодорожной линии Северный широтный ход (минимальное значение коэффициента устойчивости – 1,852).

зультате расчётов получено, что коэффициент устойчивости составляет, соответственно, $K_{уст} = 0{,}953$ и $K_{уст} = 1{,}077$ (рис. 4, 5).

В соответствии с требованиями «Инструкции по содержанию земляного полотна железных дорог» [11, с. 13], при соответствии геометрических параметров земляного полотна типовым поперечным профилям, расчётный коэффициент устойчивости откосов земляного полотна должен быть не менее 1,2.

Выполненный расчёт показывает необходимость улучшения свойств грунтов основания. В качестве варианта такого улучшения принят вариант их армирования вертикальными столбами из щебня, которые предназначены для улучшения слабых грунтов основания под зданиями и сооружениями. При этом ствол скважины формируется методом виброфлотации, послойное заполнение скважины щебнем и трамбовка его осуществляются с помощью виброфлотатора под воздействием вибрации и собственного веса снаряда с использованием сжатого воздуха или комбинации воздуха с водой. Следующий этап – подача щебня в бункер виброфлотатора с помощью погрузчика, затем по трубопроводу – на забой скважины. За счёт возвратно-поступательных движений формируется тело сваи с заданными расчётными параметрами, которые зависят от физико-механических свойств грунтов, обеспечивая требуемую несущую способность или фильтрационные свойства.

Для проектирования вертикальных столбов из щебня и гибкого ростверка использован гранитный щебень фракции 20–40 мм.

Использование вертикальных столбов из щебня (материала с высокой прочностью на сдвиг) создаёт боковое сопротивление в грунте. Благодаря использованию вертикальных столбов из щебня происходит улучшение прочностных характеристик грунтов основания, что уменьшает осадку фундаментов и увеличивает несущую способность грунта [12, с. 757].

Так же как и до усиления грунтов основания, после виброфлотации выполнен расчёт коэффициента устойчивости исследуемой насыпи по методу круглоцилидрических поверхностей проф. Г. М. Шахунянца. Результаты расчёта приведены на рис. 6.

Получено, что минимальное значение коэффициента устойчивости составило $K_{уст} = 1{,}852$, что существенно больше, по сравнению со значением коэффициента устойчивости насыпи без усиления основания (1,077 – Midas GTS NX; 0,953 – Plaxis 2D). Из сопоставления представленных рис. 4–6 видно, как изменяется поверхность обрушения – опасные участки откосов исследуемой насыпи стабилизируются и приходят в норму.

ВЫВОД

Анализ работы насыпи на ПК 01+50-ПК 06+50 участка Обская–Салехард новой железнодорожной линии Северный широтный ход, усиленной вертикальными столбами из щебня, показал, что опасные участки теоретической поверхности обрушения откосов насыпи стабилизировались, коэффициент устойчивости возрос до 1,852. Полученный результат подтверждает техническую эффективность использования вертикальных столбов из щебня для усиления насыпей, сооружаемых с допущением оттаивания на основаниях, сложенных многолетнемёрзлыми грунтами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роман Л. Т. Механика мёрзлых грунтов. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. – 426 с.
2. Цытович Н. А. Механика мёрзлых грунтов – М.: Высшая школа, 1973. – 446 с.
3. Pivarč J. Stone columns – determination of the soil improvement factor // Slovak journal of civil engineering. – Vol. XIX, 2011. – № 3. – pp. 17–21.
4. Priebe H. J. Design of vibro replacement / Ground Engineering, 1995. – Dec. – pp. 31–37.
5. Положительное заключение государственной экспертизы № 89-1-4-0465-12. Проектная документация и результаты инженерных изысканий (строительство новой железнодорожной линии Обская–Салехард). – Салехард, 2012. – 91 с.
6. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчёта: Учеб. пособие. – М.: Трансжелдориздат, 1953. – 828 с.
7. Выполненные проекты компаний с применением Midas GTS NX. Новый уровень геотехнических расчетов. – Москва, 2017. – 73 с.
8. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. – Москва, 2015. – 71 с.
9. Пособие по расчётам Midas GTS NX. – М., 2015. – 306 с.
10. Plaxis 2D. Руководство пользователя. – СПб: «НИПИнформатика», 2012. – 182 с.
11. ЦП 544. Инструкция по содержанию земляного полотна железнодорожного пути. – М.: Транспорт, 2010. [Электронный ресурс]: https://epk-rzd.ru/wp-content/uploads/2015/09/CP-544.pdf. Доступ 22.04.2019.
12. Salahi A., Niroumand, H., Kassim K. Evaluation of stone columns versus liquefaction phenomenon / Scientific World Journal. – 2015. – № 20. – pp. 739–759.