

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2025, Том 12, № 2 / 2025, Vol. 12, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2025.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/04SATS225.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS225 (<https://doi.org/10.15862/04SATS225>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

УДК 625.122

Усиление грунтов на слабых основаниях при строительстве высокоскоростных железнодорожных магистралей

Артюшенко И.А., Романцова А.С.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Романцова Анастасия Сергеевна, e-mail: a.s.romantsova@yandex.ru

Аннотация. При проектировании, строительстве и дальнейшей эксплуатации путей сообщения на высокоскоростных железнодорожных магистралях наиболее актуальной задачей является обеспечение надежности основания сооружения.

Сложностью строительства в районах проектирования высокоскоростных магистралей является наличие слабых грунтов в основаниях сооружений, большим количеством естественных преград.

Развитие транспортной инфраструктуры, будь то железнодорожная или автомобильная сеть, требует взвешенного подхода к выбору конструктивных, технологических и организационных решений. Ключевым аспектом является экономическая целесообразность, достижение оптимальности или близкой к ней эффективности для каждого конкретного проекта, учитывая специфику инженерного сооружения и региона его размещения. Это означает глубокий анализ множества факторов, включая геологические условия, климатические особенности, инженерно-геологические изыскания и прогнозирование возможных деформаций оснований транспортных сооружений. Прогнозирование деформативности

грунтового основания является критически важным этапом.

Мероприятия по обеспечению устойчивости грунтового основания могут быть разнообразными. Это могут быть усиление грунтов методом глубокого уплотнения (например, виброуплотнение, вибропогружение), устройство свайных фундаментов различного типа (свайные поля, буронабивные сваи, винтовые сваи), использование геосинтетических материалов (геотекстиль, георешетки) для армирования грунта и повышения его несущей способности, а также применение различных методов химического закрепления грунтов.

В данной исследовательской статье авторами поднимается вопрос укрепления основания земляного полотна, сложенного слабыми грунтами вертикальными столбами из щебня на примере участка проектируемой (высокоскоростной железнодорожной магистрали — 1) Москва — Санкт-Петербург.

Ключевые слова: высокоскоростные магистрали; железная дорога; транспорт; земляное полотно; грунтовое основание; укрепление грунтового основания; вертикальные столбы из щебня

Soil reinforcement on weak foundations in the construction of high-speed railway lines

Igor A. Artyushenko, Anastasia S. Romantsova

Russian University of Transport, Moscow, Russia

Corresponding author: Anastasia S. Romantsova, e-mail: a.s.romantsova@yandex.ru

Abstract. When designing, constructing, and subsequently operating transportation routes on high-speed railway lines, the most critical task is ensuring the reliability of the structure's foundation. A major challenge in constructing high-speed rail lines in designated areas is the presence of weak soils in the foundations of structures, as well as a large number of natural obstacles.

The development of transport infrastructure, whether railway or road networks, requires a balanced approach to selecting structural, technological, and organizational solutions. A key aspect is economic feasibility-achieving optimal or near-optimal efficiency for each specific project, taking into account the specifics of the engineering structure and the region where it is located. This entails a thorough analysis of multiple factors, including geological conditions, climatic features, engineering-geological surveys, and the prediction of potential deformations in the foundations of transport

structures. Predicting the deformability of soil foundations is a critically important stage.

Measures to ensure the stability of the soil foundation can vary. These may include soil reinforcement through deep compaction methods (e.g., vibrocompaction, vibroflotation), the installation of various types of pile foundations (pile fields, bored piles, screw piles), the use of geosynthetic materials (geotextiles, geogrids) for soil reinforcement and increased bearing capacity, as well as various methods of chemical soil stabilization.

In this research article, the authors address the issue of reinforcing the subgrade foundation composed of weak soils using vertical crushed stone columns, using a section of the planned high-speed railway line 1 Moscow — St. Petersburg as an example.

Keywords: high-speed rail; railway; transportation; subgrade; soil foundation; soil reinforcement; vertical crushed stone columns

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В данной исследовательской статье поднимается проблематика проектирования насыпей на высокоскоростных магистралях на слабых основаниях, рассмотрен участок ВСЖМ-1 (высокоскоростная железнодорожная магистраль — 1) Москва — Санкт-Петербург.¹ Проанализировано исходное состояние грунтов на основе геологической разведки. Предложен вариант усиления земляного полотна вертикальными столбами из щебня. Были произведены расчеты на определение устойчивости методами профессора Шахунянца Г.М.² и коэффициента безопасности.³ Так же был произведен расчет при помощи ПК (программно-вычислительный комплекс) Midas GTS NX.⁴ Расчеты были произведены для двух состояний (до усиления вертикальными столбами из щебня и после).

Основная часть

Main part

Анализ продольного и поперечного профилей участка ПК (пикет) 4321+00 — 4322+00

Analysis of longitudinal and cross-sections of the section picket 4321+00 — 4322+00

При рассмотрении СТУ (специальные технические условия) ВСЖМ-1¹ был определен опасный участок. Для дальнейших проверок устойчивости, определения коэффициента безопасности и проработки организационно-технологических решений рассмотрим участок ПК 4321+00 — 4322+00.

После изучения продольного и поперечного профиля проанализированы физико-механические характеристики грунтов основания на опасном участке, анализ которых представлен в таблице 1.

¹ Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — СПб (ВСЖМ-1) — 2021.

² Шахунянец Г.М. Земляное полотно железных дорог. — М.: Трансжелдориздат, 1953. — 827 с.

Шахунянец Г.М. Железнодорожный путь. Издание третье переработанное и дополненное. — Учебник для студентов и аспирантов вузов железнодорожного транспорта. — Москва: Транспорт, 1987. — 479 с.

³ Виноградов, В.В. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие для студентов ВУЗов железнодорожного транспорта / В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева и др. — М.: Маршрут, 2003. — 486 с.

⁴ Пособие по расчетам Midas GTS NX. — Москва, 2015. — 306 с.

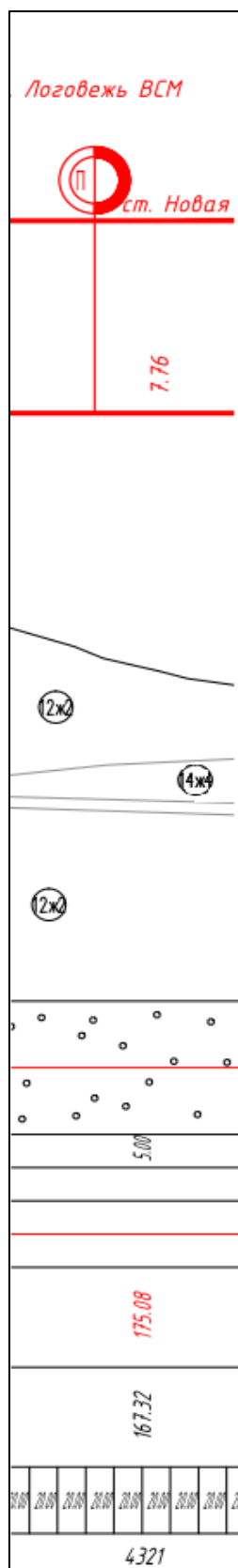


Рисунок 1. Продольный профиль участка
ПК4321+00 — 4322+00 ВСЖМ-1 Москва — Санкт-Петербург¹

Figure 1. Longitudinal profile of the section picket
4321+00 — picket 4322+00, high-speed railway line — 1 Moscow — St. Petersburg¹

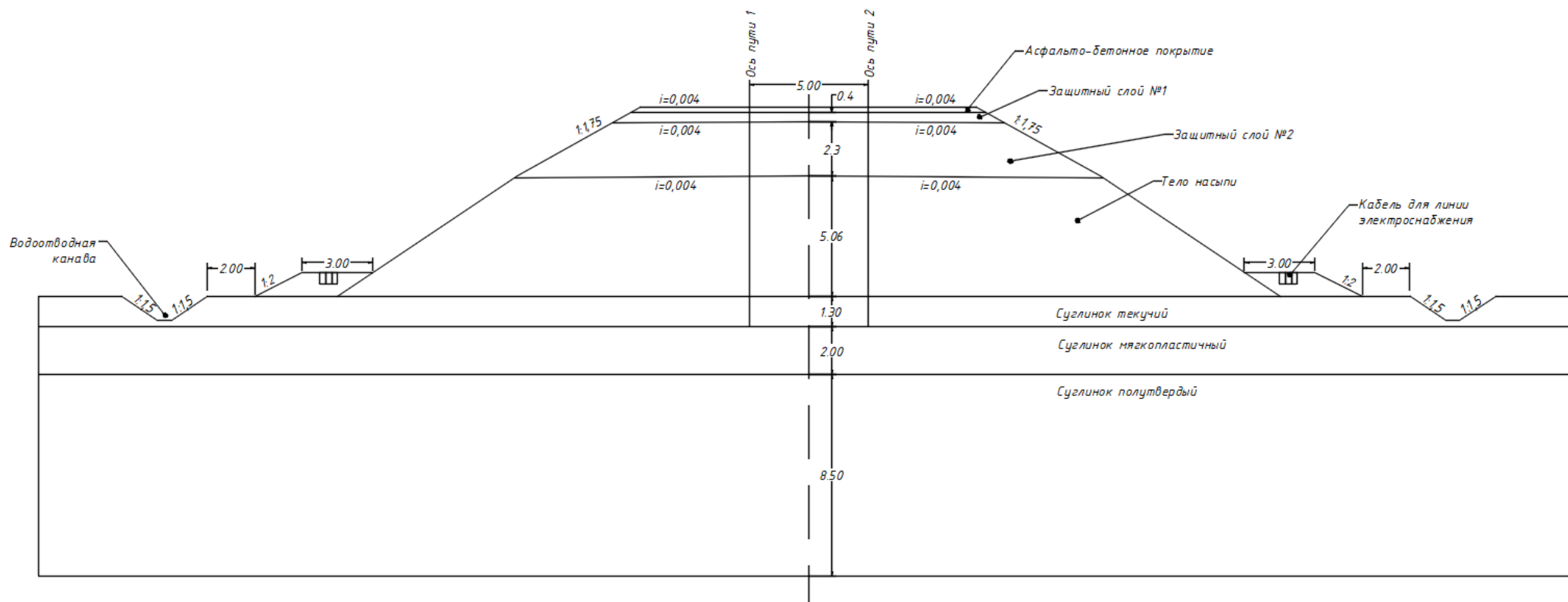


Рисунок 2. Поперечный профиль насыпи на участке
ПК4321+00 — 4322+00 ВСМ-1 Москва — Санкт-Петербург
(разработано авторами)

Figure 2. Cross-section of the embankment at the section
picket 4321+00 — picket 4322+00, high-speed railway line — 1 Moscow — St. Petersburg (developed by the authors)

Таблица 1 / Table 1

**Анализ физико-механических характеристик
грунтов основания на участке ПК4321+00 — 4322+00¹**

**Analysis of the physical and mechanical properties
of foundation soils at the section picket 4321+00 — picket 4322+00¹**

Характеристики / Characteristics			Наименование / Name			
Параметр <i>Parameter</i>	Обозначение <i>Notation</i>	Ед. изм. <i>Unit</i>	Суглинок текучий <i>Soft Clay</i>	Суглинок мягкопластичный <i>Soft-Plastic Clay</i>	Суглинок полутвердый <i>Stiff Clay</i>	Песок средней крупности (материал насыпи) <i>Medium- Coarse Sand (Embankment Material)</i>
Удельный вес грунта сухой <i>Dry unit weight of soil</i>	γ	кН/м ³ <i>kN/m³</i>	18,13	18,91	19,21	22
Удельный вес грунта обводненный <i>Saturated unit weight of soil</i>	$\gamma_{\text{обвод}}$	кН/м ³ <i>kN/m³</i>	18,70	19,25	20,22	20
Модуль деформации (Юнга) <i>Deformation modulus (Young's)</i>	E	кН/м ² <i>kN/m²</i>	6 000	11 200	24 000	26 000
Коэффициент Пуассона <i>Poisson's ratio</i>	ν	—	0,38	0,38	0,36	0,3
Сцепление <i>Cohesion</i>	C	кН/м ² <i>kN/m²</i>	3	5	26	2
Угол внутреннего трения <i>Angle of internal friction</i>	φ	Град <i>Degrees</i>	4	4	17	38

Изучив данные геологических изысканий, делаем вывод: представленные грунты основания являются специфичными [1]. Свойства грунтов (прочностные и деформационные) достаточно сильно изменяются под различными воздействиями, поэтому грунты вызывают опасения относительно безопасности в строительный и эксплуатационные периоды.

**Расчет устойчивости откосов насыпи по методу
профессора Г.М. Шахунянца участка ПК4321+00 — 4322+00**

**Slope stability analysis of the embankment using
prof. G.M. Shakhunyants' method (Section picket 4321+00 — picket 4322+00)**

На основе принятых размеров насыпи необходимо произвести проверку устойчивости откосов.

Устойчивость откосов земляного полотна, на котором оно расположено, должно проверяться при различных случаях индивидуального проектирования⁵ [4; 5].

Расчёт производится по методу профессора Г.М. Шахунянца.² Устойчивость откоса количественно оценивать с помощью коэффициента устойчивости k , который в общем виде представляет собой отношение факторов, сопротивляющихся смещению, к факторам, его вызывающим. Оценка устойчивости выполняется из условия равновесия массива смещающегося грунта (блока возможного смещения) с некоторым запасом, который и является коэффициентов устойчивости k .

Внешние нагрузки от веса верхнего строения пути $p_{вс}$, кПа и подвижного состава $p_{п}$, кПа приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Нагрузки, действующие на земляное полотно и их характеристики⁶

Loads acting on the subgrade and their characteristics⁶

Наименование <i>Name</i>	Воздействие <i>Impact</i>	P, кПа <i>P, kPa</i>	b, м <i>b, m</i>
От подвижного состава (путь 1) <i>From rolling stock (Track 1)</i>	Временное <i>Temporary</i>	100	4,5
От подвижного состава (путь 2) <i>From rolling stock (Track 2)</i>	Временное <i>Temporary</i>	100	4,5
От ВСП (верхнего строения пути) (путь 1) <i>From track superstructure (Track 1)</i>	Постоянное <i>Permanent</i>	10,60	4,5
От ВСП (верхнего строения пути) (путь 2) <i>From track superstructure (Track 2)</i>	Постоянное <i>Permanent</i>	10,60	4,5
От междупутья <i>From track spacing</i>	Постоянное <i>Permanent</i>	10,70	4,1

Коэффициент устойчивости по формуле Г.М. Шахунянца:²

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + N_i f_i + |T_{i-уд}|) \cdot \frac{\cos \varphi_i}{\cos (\alpha_i - \varphi_i)}}{\sum_{i=1}^n T_{i-сд} \cdot \frac{\cos \varphi_i}{\cos (\alpha_i - \varphi_i)} + D_0}, \quad (1)$$

где:

c_i — удельное сцепление грунта i -го отсека, кПа;

l_i — длина поверхности скольжения i -го отсека, м;

N_i — нормальная нагрузка i -го отсека, кН;

f_i — тангенс угла внутреннего трения i -го отсека;

φ_i — угол внутреннего трения i -го отсека, град;

⁵ Абелев, М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М.Ю. Абелев. — М.: Стройиздат, 1983. — 247 с.

⁶ Пузыревский, Н.П. Теория напряженности землистых грунтов. — СПб, 1929. — 95 с.

α_i — угол наклона поверхности скольжения i -го отсека к горизонту, град;

$T_{i-уд}$ — удерживающие тангенциальные составляющие силы веса i -го отсека, кН;

$T_{i-сд}$ — сдвигающие тангенциальные составляющие силы веса, кН.

$T_{i-сд}$ — сдвигающие тангенциальные составляющие силы веса, кН.

Принципиальная схема приведена на рисунке 3.

В результате расчёта (табл. 3) коэффициент устойчивости равен $k = 1,11$. По нормам СП 423.1325800.2019⁷ коэффициент устойчивости для насыпи проектируемой для ВСМЖ = 1ЮЗ.

Из сравнения $k = 1,11 < [k] = 1,30$ очевидно, что устойчивость откоса насыпи не обеспечена.

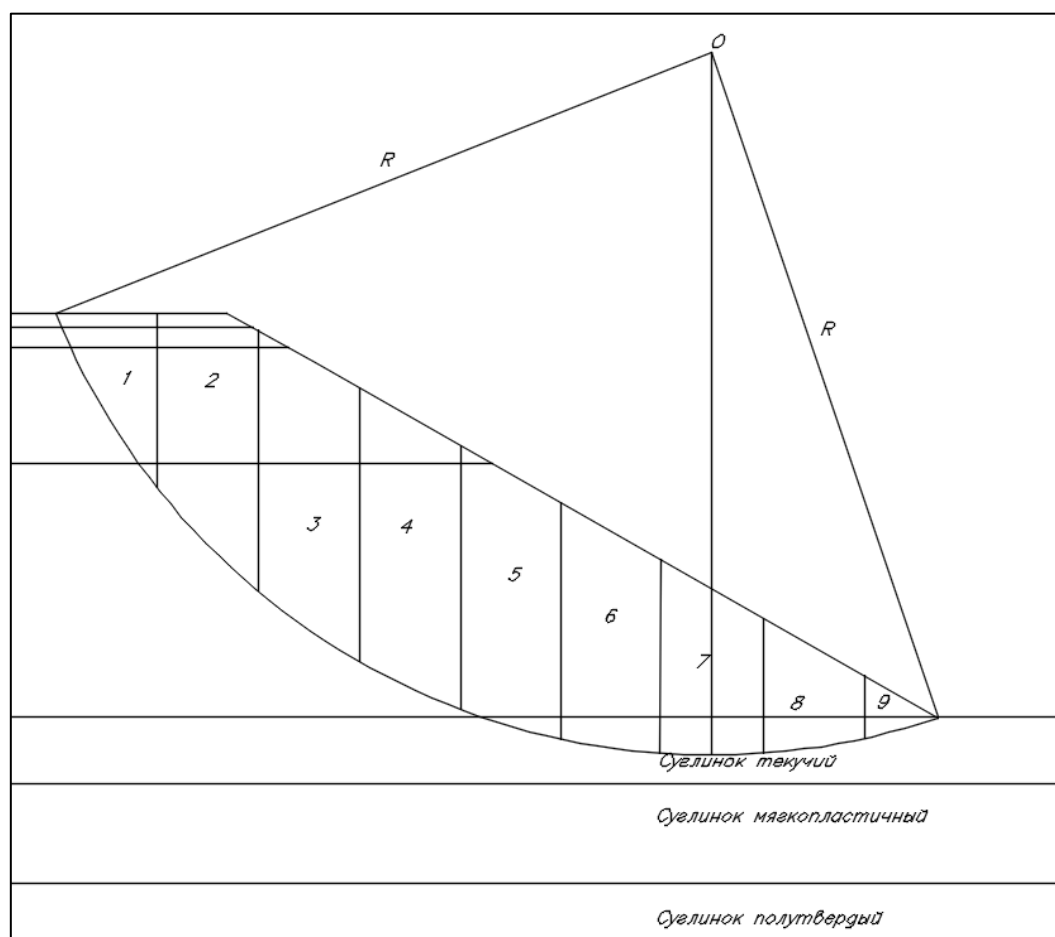


Рисунок 3. Расчетная схема устойчивости откосов насыпи (разработано авторами)

Figure 3. Calculation scheme for embankment slope stability (developed by the authors)

⁷ СП 423.1325800.2019. Свод правил. Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства.

Таблица 3 / Table 3

Расчет устойчивости на участке ПК4321+00 — 4322+00 ВСМ-1 Москва — Санкт-Петербург
Stability analysis at the section picket 4321+00 — picket 4322+00, high-speed railway line — 1 Moscow — St. Petersburg

№ расчетного блока <i>Block No.</i>	Площадь блока S , m^2 <i>Block area S, m^2</i>	Удельный вес грунта γ , kN/m^3 <i>Unit Weight γ, kN/m^3</i>	Вес блока, $p=S*\gamma*I$, kN <i>Block Weight $P = S*\gamma*I$, kN</i>	Угол α , град <i>Angle α, degrees</i>	$Sin\alpha$ <i>Sin α</i>	Сила сдвига $Q=p*Ssin\alpha$, kN <i>Shear Force $Q = P*Ssin\alpha$, kN</i>	$Cos\alpha$ <i>Cos α</i>	Угол внутреннего трения, φ , град <i>Friction Angle φ, degrees</i>	$Tg\varphi$ <i>Tan φ</i>	$T = p*Cos\alpha*Tg\varphi$, kN <i>Resistance $T = P*Cos\alpha*Tan\varphi$, kN</i>	Удельное сцепление, C , kPa <i>Cohesion C, kPa</i>	Длина дуги, l , m <i>Arc Length l, m</i>	Сила сцепления, $T = C*l$, kN <i>Cohesive Force $T = C*l$, kN</i>
1	3,75	22	82,5	61	0,8744	72,1	0,4853	38	0,7807	31,26	2	4	8
2	8,88	22	195,36	55	0,8189	160	0,574	37	0,753	84,44	2	3	6
3	10,61	22	233,42	44	0,6944	162	0,7196	37	0,753	126,5	2	2,5	5
4	10,67	22	234,74	35	0,5733	135	0,8193	36	0,7261	139,6	2	2,2	4,4
5	9,95	21,73	216,21	15	0,2587	55,9	0,966	30	0,577	120,5	2,5	2,1	5,25
6	12,75	21,44	273,36	13	0,2248	61,5	0,9744	22	0,4038	107,6	2,6	2	5,2
7	6,69	21,09	141,09	4	0,0697	9,84	0,9976	15	0,2678	37,69	2,8	2,1	5,88
8	3,92	20,74	81,301	-5	-0,087	-7,1	0,9962	10	0,1762	14,27	2,9	2	5,8
9	0,89	20,25	18,023	-12	-0,208	-3,7	0,9782	7	0,1227	2,163	3	1,5	4,5

Разработано авторами / Developed by the authors

Расчет коэффициента безопасности участка ПК4321+00 — 4322+00

Calculation of the safety factor for section picket 4321+00 — picket 4322+00

Для предотвращения возможности возникновения в грунтах деформаций пластических сдвигов, суммарные напряжения от поездной нагрузки, веса верхнего строения пути и собственного веса грунта, а также от строительных нагрузок, не должны превышать первую критическую нагрузку для данного грунта.

Целью расчета является определение действующих сжимающих напряжений по глубине основания, впоследствии необходимых для определения несущей способности грунта.

Существующая насыпь заменяется полупространством, загруженным полосовыми нагрузками, интенсивностью p_{bc} , кПа, и p_n , кПа.

В соответствии с этим в любой точке насыпи будут действовать сжимающие напряжения:³

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_{bc} + \sigma_\gamma + \sigma_m, \quad (2)$$

где:

σ_n — напряжения от поездных нагрузок p_n , кПа;

σ_{bc} — то же от веса верхнего строения пути p_{bc} , кПа;

σ_γ — то же от собственного веса грунтов насыпи, кПа;

σ_m — то же от нагрузки в междупутье, кПа.

Вертикальная составляющая нормальных напряжений σ_z в точке С, расположенной внутри полуплоскости от такой нагрузки, определяется по формуле:

$$\begin{cases} \sigma_z = P_z \cdot I_z \\ I_z = f\left(\frac{z}{b}; \frac{y}{b}\right), \end{cases} \quad (3)$$

где:

I_z — коэффициент затухания напряжения, определяется по таблице П.5.3.

Напряжения от собственного веса грунта насыпи или его основания σ_γ в полуплоскости определяют по формуле:

$$\sigma_\gamma = -\gamma \cdot h_i, \quad (4)$$

где:

γ — удельный вес грунта, кН/м³;

h_i — толщина слоя грунта, м.

Для приведения расчётов была разработана расчётная схема (приведена ниже, рисунок 4).

Точка 0:

$h_{нас} = 7,76$ м — мощность слоя;

$z = 7,76$ — глубина от основной площадки земляного полотна до точки;

$$\begin{aligned}\frac{z_0}{b_{\text{BC}}} &= \frac{7,76}{4,50} = 1,725; \frac{y}{b_{\text{BC}}} = 0; I_{\text{BC}0} = 0,242, \\ \sigma_{\text{BC}-0} &= (10,60 \cdot 0,242) \cdot 2 = 5,131 \text{ кПа}, \\ \frac{z_0}{b_{\text{П}}} &= \frac{7,76}{4,50} = 1,725; \frac{y}{b_{\text{П}}} = 0; I_{\text{П}} = 0,242, \\ \sigma_{\text{П}-0} &= (100 \cdot 0,242) \cdot 2 = 48,40 \text{ кПа}, \\ \frac{z_0}{b_{\text{М}}} &= \frac{7,76}{4,10} = 1,893; \frac{y}{b_{\text{М}}} = 0; I_{\text{М}} = 0,160, \\ \sigma_{\text{М}-0} &= 10,70 \cdot 0,160 = 1,712 \text{ кПа}, \\ \sigma_{\gamma-0} &= 23,20 \cdot 0,12 + 0,4 \cdot 17,00 + 2,3 \cdot 20 + 27,00 \cdot 5,06 = 192,21 \text{ кПа}, \\ \sigma_{\text{h}-0} &= 5,131 + 48,40 + 1,712 + 192,21 = 247,453 \text{ кПа}.\end{aligned}$$

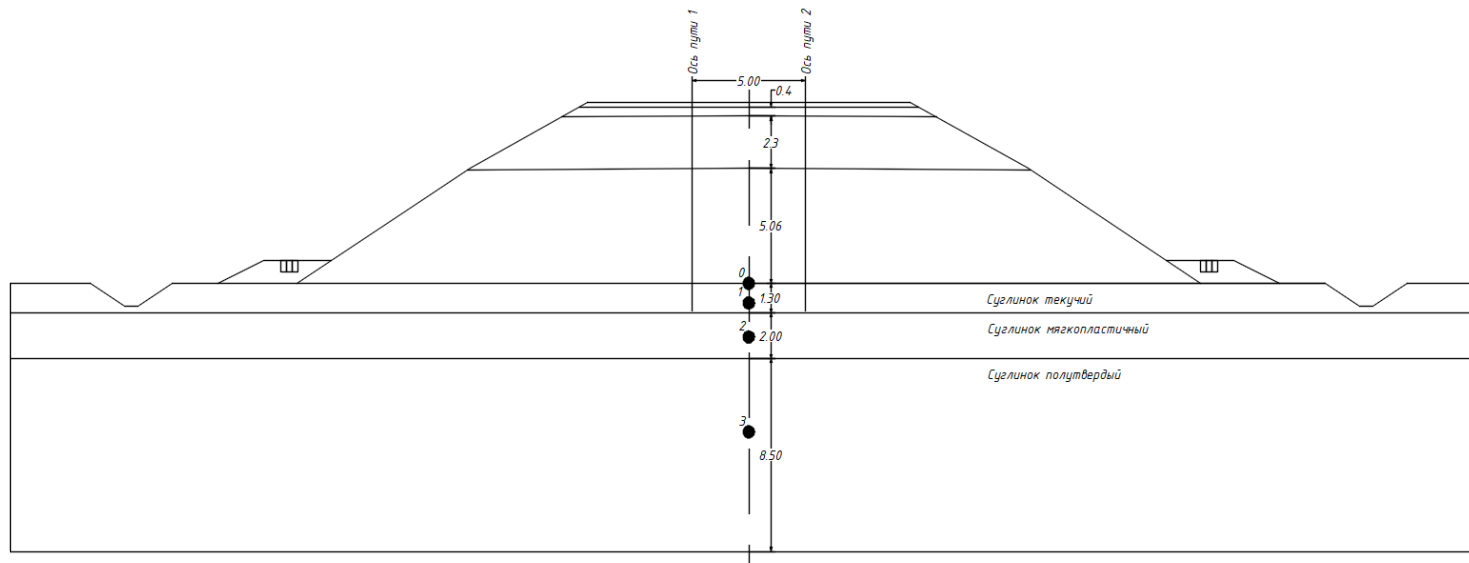


Рисунок 4. Расчетная схема для определения максимальных напряжений и критических сил (разработано авторами)

Figure 4. Calculation scheme for determining maximum stresses and critical forces (developed by the authors)

Точка 1:

$h = 0,65$ м — мощность слоя;

$z = 8,41$ — глубина от основной площадки земляного полотна до точки;

$$\frac{z_1}{b_{BC}} = \frac{8,41}{4,50} = 1,869; \frac{y}{b_{BC}} = 0; I_{BC1} = 0,229,$$

$$\sigma_{BC-1} = (10,60 \cdot 0,229) \cdot 2 = 4,855 \text{ кПа},$$

$$\frac{z_1}{b_{\Pi}} = \frac{8,41}{4,50} = 1,869; \frac{y}{b_{\Pi}} = 0; I_{\Pi} = 0,229,$$

$$\sigma_{\Pi-1} = (100 \cdot 0,229) \cdot 2 = 45,80 \text{ кПа},$$

$$\frac{z_1}{b_M} = \frac{8,41}{4,10} = 2,051; \frac{y}{b_M} = 0; I_M = 0,148,$$

$$\sigma_{M-1} = 10,70 \cdot 0,148 = 1,584 \text{ кПа},$$

$$\sigma_{\gamma-1} = 192,21 + 0,65 \cdot 27 = 209,76 \text{ кПа},$$

$$\sigma_{h-1} = 4,855 + 45,80 + 1,584 + 209,76 = 262,000 \text{ кПа}.$$

Точка 2:

$h = 1$ м — мощность слоя;

$z = 9,46$ — глубина от основной площадки земляного полотна до точки;

$$\frac{z_2}{b_{BC}} = \frac{9,46}{4,50} = 2,102; \frac{y}{b_{BC}} = 0; I_{BC2} = 0,210,$$

$$\sigma_{BC-2} = (10,60 \cdot 0,210) \cdot 2 = 4,452 \text{ кПа},$$

$$\frac{z_2}{b_{\Pi}} = \frac{9,46}{4,50} = 2,102; \frac{y}{b_{\Pi}} = 0; I_{\Pi} = 0,210,$$

$$\sigma_{\Pi-2} = (100 \cdot 0,210) \cdot 2 = 42,00 \text{ кПа},$$

$$\frac{z_2}{b_M} = \frac{9,46}{4,10} = 2,307; \frac{y}{b_M} = 0; I_M = 0,130,$$

$$\sigma_{M-0} = 10,70 \cdot 0,130 = 1,391 \text{ кПа},$$

$$\sigma_{\gamma-2} = 209,76 + 1 \cdot 16,67 = 226,43 \text{ кПа},$$

$$\sigma_{h-2} = 4,452 + 42,00 + 1,391 + 226,43 = 274,273 \text{ кПа}.$$

Точка 3:

$h = 4,25$ м — мощность слоя;

$z = 13,71$ — глубина от основной площадки земляного полотна до точки;

$$\frac{z_3}{b_{\text{BC}}} = \frac{13,71}{4,50} = 3,047; \frac{y}{b_{\text{BC}}} = 0; I_{\text{BC3}} = 0,148,$$

$$\sigma_{\text{BC-3}} = (10,60 \cdot 0,148) \cdot 2 = 3,138 \text{ кПа},$$

$$\frac{z_3}{b_{\text{П}}} = \frac{13,71}{4,50} = 3,047; \frac{y}{b_{\text{П}}} = 0; I_{\text{П}} = 0,148,$$

$$\sigma_{\text{П-3}} = (100 \cdot 0,148) \cdot 2 = 29,60 \text{ кПа},$$

$$\frac{z_3}{b_{\text{М}}} = \frac{13,71}{4,10} = 3,344; \frac{y}{b_{\text{М}}} = 0; I_{\text{М}} = 0,110,$$

$$\sigma_{\text{М-3}} = 10,70 \cdot 0,110 = 1,177 \text{ кПа},$$

$$\sigma_{\gamma-3} = 226,43 + 4,25 \cdot 27 = 341,18 \text{ кПа},$$

$$\sigma_{\text{h-3}} = 3,138 + 29,60 + 1,177 + 341,18 = 375,095 \text{ кПа}.$$

Методика определения критических нагрузок.

Для предотвращения возможности возникновения в грунтах на глубине h деформаций пластических сдвигов суммарные напряжения σ_h от поездной нагрузки, веса верхнего строения пути и собственного веса грунта не должны превышать критической для данного грунта нагрузки $P_{\text{кр}}$, которая определяется по формуле Пузыревского Н.П.:⁶

При условии, что $\sigma_h \leq P_{\text{кр}}$:

$$\sigma_h \leq P_{\text{кр}} = \frac{\pi \cdot (c_p \cdot \text{ctg} \varphi + \gamma_i \cdot h_i)}{\text{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma_i \cdot h_i, \quad (5)$$

где:

c_p — расчетное сцепление грунта в период оттаивания, кПа;

φ — угол внутреннего трения, град;

γ_i — удельный вес i -го слоя грунта, кН/м³;

h_i — глубина залегания расчетной точки, м.

Данные величины принимаются для своих участков согласно исходным данным.

Величина σ_h является полным напряжением, действующим на глубине h .

Прочностные характеристики грунта принимают минимально возможными с учетом снижения сцепления в период весеннего оттаивания.

Расчетное сопротивление грунта рассчитывается по формуле:

$$c_p = \frac{c}{K_c} - B \cdot f, \quad (6)$$

Значения коэффициента K_c представлены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Значения коэффициента K_c ⁶

Values of coefficient K_c ⁶

Грунт <i>Soil</i>	Значения коэффициента K_c при плотности сухого грунта ρ_d г/см ³ <i>Kc Value at dry density ρ_d, g/cm³</i>					
	1,50	1,55	1,60	1,65	1,75	1,87
Суглинок <i>Clay</i>	1,1	1,3	1,5	1,7	—	—
Супесь <i>Sandy Loam</i>	—	—	—	—	1,5	2,0

Определение величины критической нагрузки $P_{кр}(h)$:

Точка 0 — суглинок тугопластичный;

$h = 0$ м — глубина 0 м подошвы насыпи;

$$c_{p-0} = \frac{57}{1,7} - 70 \cdot 0,025 = 31,779 \text{ кПа},$$

$$\varphi_0 = 21,0^\circ = 0,36 \text{ рад.},$$

$$\gamma_0 = 26,558 \text{ кН/м}^3,$$

$$P_{кр0} = \frac{3,14 \cdot (31,779 \cdot 2,85 + 0)}{2,85 + 0,36 - 3,14/2} = 64,734 \text{ кПа}.$$

Точка 1 — суглинок тугопластичный;

$h = 0,65$ м;

$$P_{кр1} = \frac{3,14 \cdot (11,779 \cdot 2,85 + 0,65 \cdot 26,558)}{2,85 + 0,36 - 3,14/2} + 26,558 \cdot 0,65 = 114,685 \text{ кПа}.$$

Точка 2 — суглинок мягкопластичный;

$h = 2,3$ м,

$$c_p = \frac{c_T}{K_c} - B \cdot f,$$

$$c_{p-2} = \frac{20}{1,7} - 70 \cdot 0,074 = 6,58 \text{ кПа},$$

$$\varphi_2 = 15,0^\circ = 0,262 \text{ рад.},$$

$$\varphi_{sat2} \approx (0,75 \div 0,85)\varphi_2 \approx 0,262 \cdot 0,8 = 0,210 \text{ рад.},$$

$$\gamma_2 = 20,5 \text{ кН/м}^3,$$

$$P_{кр2} = \frac{3,14 \cdot (6,58 \cdot 4,83 + 2,3 \cdot 20,5)}{4,83 + 0,210 - 3,14/2} + 2,3 \cdot 20,5 = 118,628 \text{ кПа}.$$

Точка 3 — суглинок тугопластичный;

$h = 4,25$ м,

$$c_{p-3} = \frac{23}{1,7} - 70 \cdot 0,025 = 11,779 \text{ кПа},$$

$$\varphi_3 = 21,0^\circ = 0,36 \text{ рад.},$$

$$\gamma_3 = 26,558 \text{ кН/м}^3;$$

$$P_{кр3} = \frac{3,14 \cdot (11,779 \cdot 2,85 + 4,25 \cdot 26,558)}{2,85 + 0,36 - 3,14/2} + 26,558 \cdot 4,25 = 393,532 \text{ кПа}.$$

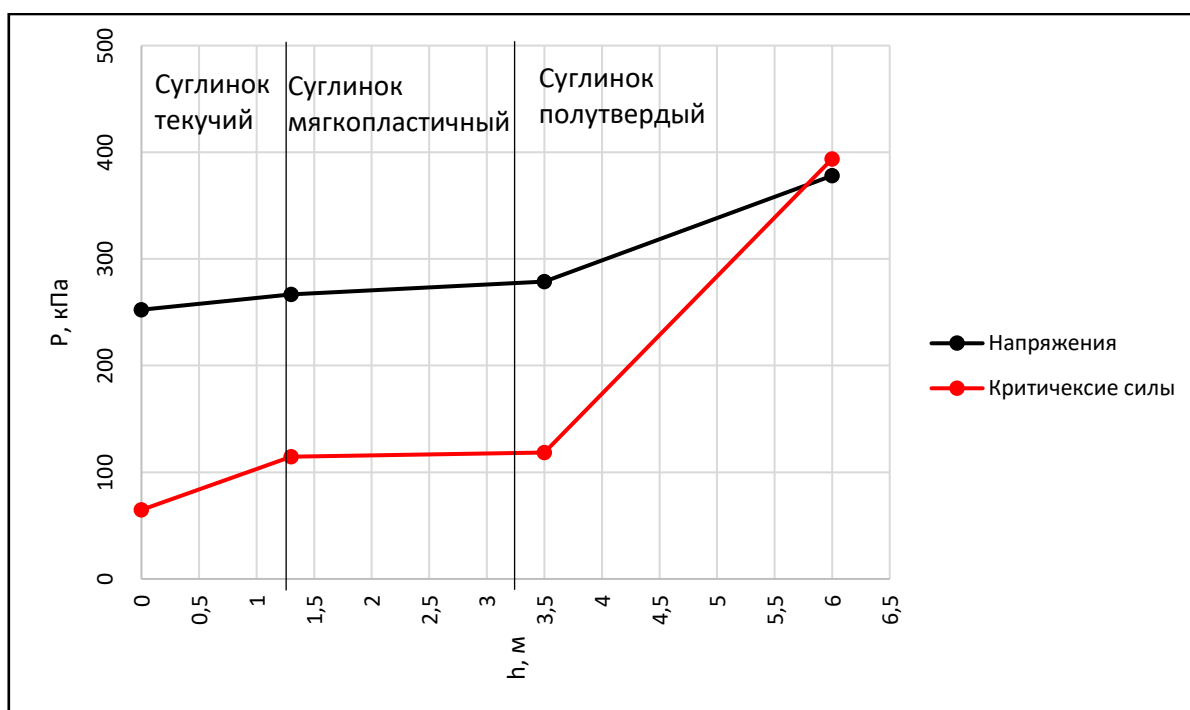


Рисунок 5. График зависимости $p_{кр}$ и σ_h от глубины залегания (разработано авторами)

Figure 5. Graph of $p_{кр}$ and σ_h versus depth (developed by the authors)

Анализируя график на рисунке 5 видно, что участки земляного полотна имеют в основании недостаточно прочные слои грунтов (суглинок текучий, суглинок мягкопластичный), которые при водонасыщении не соответствуют требованиям по нагрузке, подлежат вырезке и замене песчаным массивом.

Расчет устойчивости откосов насыпи при помощи Midas GTS NX участка ПК4321+00 — 4322+00

Slope stability analysis of the embankment using
Midas GTS NX (Section picket 4321+00 — picket 4322+00)

При расчете участка насыпи на слабом основании был использован программный вычислительный комплекс — Midas GTS NX.² В основе

программы Midas GTS NX лежит метод конечных элементов, который используется для решений задач геотехники. Данный программный комплекс позволяет запроектировать модели в 2D и 3D виде.

В данной исследовательской работе будут представлены модели, запроектированные в 2D.

На рисунке 6 будет представлена модель насыпи на участке ПК4321+00 — 4322+00. Также к этой модели будет произведен расчет SMR (метод снижения прочности), результат которого будет приведен на рисунке 7.

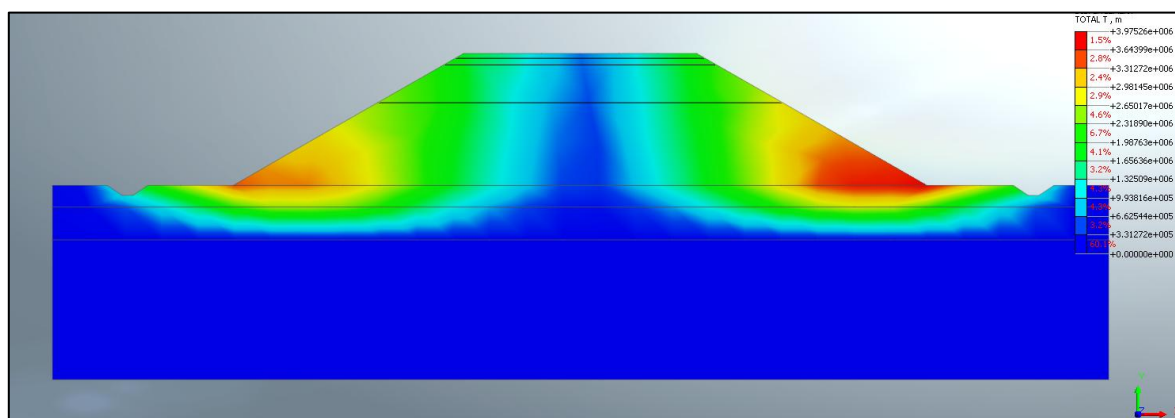


Рисунок 6. Напряжения в поперечном сечении насыпи (разработано авторами)

Figure 6. Stresses in the embankment cross-section (developed by the authors)

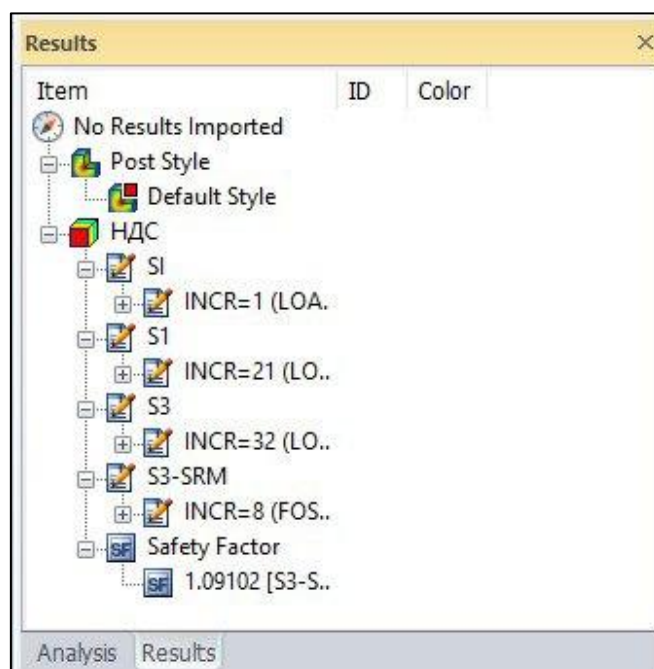


Рисунок 7. Результат расчета насыпи на слабом основании в исходном состоянии (разработано авторами)

Figure 7. Results of the embankment analysis on a weak foundation in its initial state (developed by the authors)

Вычислительная программа Midas GTS NX подтвердила аналитические расчеты (метод профессора Г.М. Шахунянца и расчет коэффициента безопасности). $K_{без} = 1,09$, что не соответствует требованиям к проектированию ВСМ, где коэффициент безопасности $K_{без} \geq 1,30$ [2; 3].

Делаем вывод о необходимости применения технологии усиления земляного полотна вертикальными столбами из щебня.

Анализ устойчивости слабого основания, укрепленного столбами из щебня на участке ПК4321+00 — 4322+00

**Analysis of the stability of a weak foundation reinforced
with crushed stone columns (section picket 4321+00 — picket 4322+00)**

Обзор на технологию усиления земляного полотна вертикальными столбами из щебня

Overview of subgrade reinforcement technology using vertical crushed stone columns

Данная технология разрабатывается для выполнения работ по уплотнению грунтового основания насыпи с дополнительным привнесением щебня на забой скважины при изготовлении щебеночного столба. Технология выполнения — нижняя подача щебня на забой скважины с применением установок на базе гусеничных кранов — установки типа ВС-1 и ВЕ-1 на базе экскаваторов, оснащенных виброуплотнителем В27 Vibroflot, производства компании Betterground.⁸

В качестве оборудования для сооружения вертикальных столбов из щебня взят кран Liebherr LR 1100⁹, оснащенный насадкой ВС-1. Щебень подается на установку с помощью телескопического колесного погрузчика. Подробнее данная технология описывается в данной статье [7].

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 — рисунок 8 [12].

При уплотнении грунтов основания автомобильной и железной дороги вертикальные столбы из щебня сооружаются в шахматном порядке с шагом 1 900*2 200 мм.

⁸ Betterground quality monitoring and control system [Электронный ресурс]: Betterground Inc. — URL: <https://www.betterground.com/en/quality-control> (дата обращения: 28.09.2019).

⁹ Техническое описание гидравлического гусеничного крана Liebherr LR 1100. — 32 с.

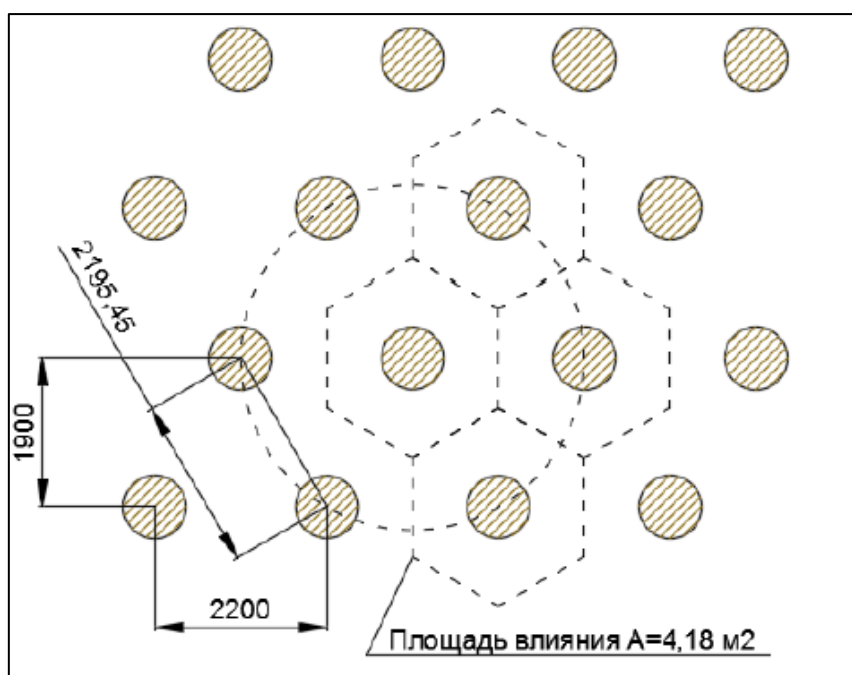


Рисунок 8. Шаг расстановки вертикальных столбов из щебня и их площадь влияния [8]

Figure 8. Spacing of crushed stone columns and their zone of influence [8]

Условный диаметр столба $\varnothing 500\text{--}700$ мм (вариации могут быть в соответствии с типом грунта и степенью их уплотнения)¹⁰ [9; 10], в совсем крайних случаях применяют сваи $\varnothing 1\,000$ мм. Глубина погружения столбов переменная, в соответствии с проектом определяется по геологическим изысканиям на глубину залегания плотных или скальных пород грунта.

Вертикальные столбы из щебня выполняются до достижения уплотненных либо скальных или мерзлых слоев грунта в зависимости от их наличия с заходом в них не более 0,5 м, что должно контролироваться в процессе производства работ.¹¹

Согласно методике, разработанной Heinz J. Priebe [11; 12], определение характеристик усиленного массива происходит в следующей последовательности.

1. Рассчитывается коэффициент активного давления K_{as} материала вертикального столба из щебня:

¹⁰ Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. — М.: Росавтодор, 2004.

Прокудин И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: Дисс. д-ра техн. наук. Л., 1983. — 455 с.

¹¹ ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — Москва: Стандартинформ, 2012. — 82 с.

ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. — М.: Стандартинформ, 2013. — 42 с.

ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. — Москва: Стандартинформ, 2018. — 16 с.

$$K_{aS} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_c}{2} \right), \quad (7)$$

где:

φ_c — угол внутреннего трения материала вертикальных столбов из щебня.

2. Рассчитывается коэффициент усиления n в зависимости от отношения площадей вертикальных столбов из щебня и усиленного массива:

$$n = 1 + \frac{A_c}{A_S} \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A_S}}{4K_{aS}(1 - \frac{A_c}{A_S})} - 1 \right], \quad (8)$$

где:

A_c — площадь вертикального столба из щебня;

A_S — площадь влияния вертикального столба из щебня;

K_{aS} — коэффициент активного давления материала вертикального столба из щебня.

3. Определяется пропорциональный параметр m :

$$m' = \frac{n-1}{n}, \quad (9)$$

где:

n — коэффициент усиления.

4. Определяются сцепление и тангенс угла внутреннего трения усиленного массива, на их основе рассчитывается угол внутреннего трения усиленного массива:

$$c' = (1 - m') \cdot C_S, \quad (10)$$

где:

c' — удельное сцепление усиленного массива;

C_S — удельное сцепление грунта;

m' — пропорциональный параметр.

$$\tan \varphi' = m' \cdot \tan \varphi_c + (1 - m') \cdot \tan \varphi_S, \quad (11)$$

где:

$\tan \varphi'$ — тангенс угла внутреннего трения усиленного массива;

m' — пропорциональный параметр;

$\tan \varphi_c$ — тангенс угла внутреннего трения материала вертикальных столбов из щебня;

$\tan \varphi_s$ — тангенс угла внутреннего трения грунта.

5. Определяется модуль деформации усиленного массива:

$$E_{\text{мас}} = \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{арм}}} \cdot E_{\text{арм}} + \left(1 - \frac{V_{\text{гр}}}{V_{\text{арм}}}\right) \cdot E_{\text{гр}}, \quad (12)$$

где:

$V_{\text{гр}}$ — объём усиливаемого массива грунта;

$V_{\text{арм}}$ — объём армирующих элементов;

$E_{\text{арм}}$, $E_{\text{гр}}$ — расчетные значения модуля деформации армирующих элементов (щебня) и модуля деформации грунта.

Таблица 5 / Table 5

Анализ грунтов основания участка ПК4321+00 — 4322+00 [3]

Analysis of foundation soils at section picket 4321+00 — picket 4322+00 [3]

Характеристики / Characteristics			Наименование / Name				
Параметр Parameter	Обозначение Notation	Ед. изм. Unit	Суглинок текучий (3ж6) Soft Clay (3ж6)	Суглинок мягкопластичный (3ж4) Soft-Plastic Clay (3ж4)	Суглинок полутвердый (11ж2) Stiff Clay (11ж2)	Песок средней крупности (материал насыпи) Medium- Coarse Sand (Embankment Material)	Щебень (материал для грунтовых столбов) Crushed Stone (Column Material)
Удельный вес грунта сухой Dry unit weight of soil	γ	кН/м ³ kN/m ³	18,13	18,91	19,21	22	19
Удельный вес грунта обводненный Saturated unit weight of soil	$\gamma_{\text{обвод}}$	кН/м ³ kN/m ³	18,70	19,25	20,22	20	19
Модуль деформации (Юнга) Deformation modulus (Young's modulus)	E	кН/м ² kN/m ²	6 000	11 200	24 000	26 000	38 000
Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	ν	-	0,38	0,38	0,36	0,3	0,3
Сцепление Cohesion	C	кН/м ² kN/m ²	3	5	26	2	1
Угол внутреннего трения Angle of internal friction	φ	град degrees	4	4	17	38	40

Применим технологию расчета на практике.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 5.¹²

Прочностные характеристики грунтов основания до усиления и после усиления грунтов основания вертикальными столбами из щебня с шагом расстановки 2,2×1,9 представлены в таблице 6, расчетная схема на рисунке 9.

Таблица 6 / Table 6

**Прочностные характеристики грунтов основания
до усиления и после усиления грунтов основания вертикальными
столбами из щебня (шаг расстановки 2,2×1,9) [7; 8]**

**Strength characteristics of foundation soils before and after
reinforcement with crushed stone columns (spacing 2,2×1,9) [7; 8]**

Тип грунта <i>Soil type</i>	Прочностные характеристики грунтов основания <i>Strength characteristics of foundation soils</i>			
	Удельное сцепление С до усиления основания, кПа <i>Cohesion C before reinforcement, kPa</i>	Удельное сцепление С после усиления основания, кПа <i>Cohesion C after reinforcement, kPa</i>	Угол φ внутреннего трения до усиления основания, град <i>Angle of internal friction φ before reinforcement, degrees</i>	Угол φ внутреннего трения после усиления основания, град <i>Angle of internal friction φ after reinforcement, degrees</i>
Суглинок текучий <i>Soft Clay</i>	3	1,23	4	27
Суглинок мягкопластичный <i>Soft-Plastic Clay</i>	5	2,05	4	27
Суглинок полутвердый <i>Stiff Clay</i>	26	10,66	17	32

Модуль деформации грунтов основания до усиления и после усиления грунтов основания вертикальными столбами из щебня с шагом расстановки 2,2×1,9 представлены в таблице 7.

Определим влияние вертикальных столбов из щебня на коэффициент безопасности $K_{\text{без}}$ и критическую нагрузку $P_{\text{кр}}$ на грунтовое основание с шагом расстановки столбов 2,2×1,9.

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi \cdot (c \cdot \cot \varphi + \gamma \cdot h)}{\cot \varphi + \varphi - \pi/2}, \quad (13)$$

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi \cdot (1,23 \cdot \cot 27 + 18,13 \cdot 1,3)}{\cot 27 + 0,49 - 1,57} = 191,80,$$

$$P_9 = 140 \text{ кН/м}^2, \quad (14)$$

¹² Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — СПб (ВСЖМ-1) — 2021.

Пузыревский, Н.П. Теория напряженности землестых грунтов. — СПб, 1929. — 95 с.

СП 423.1325800.2019. Свод правил. Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий. Правила проектирования и строительства.

где:

$P_{кр}$ — критическая нагрузка на поверхность основания в исходном (природном) состоянии;

$P_э$ — эксплуатационная нагрузка.

Коэффициент безопасности данного сооружения с усилением вертикальными столбами из щебня будет равен:

$$K_{без} = \frac{P_{кр}}{P_э} = \frac{191,80}{140} = 1,37. \quad (15)$$

Таким образом, коэффициент безопасности с усилением грунтового основания вертикальными столбами из щебня составил 1,37 ($K_{без} \geq 1,30$).

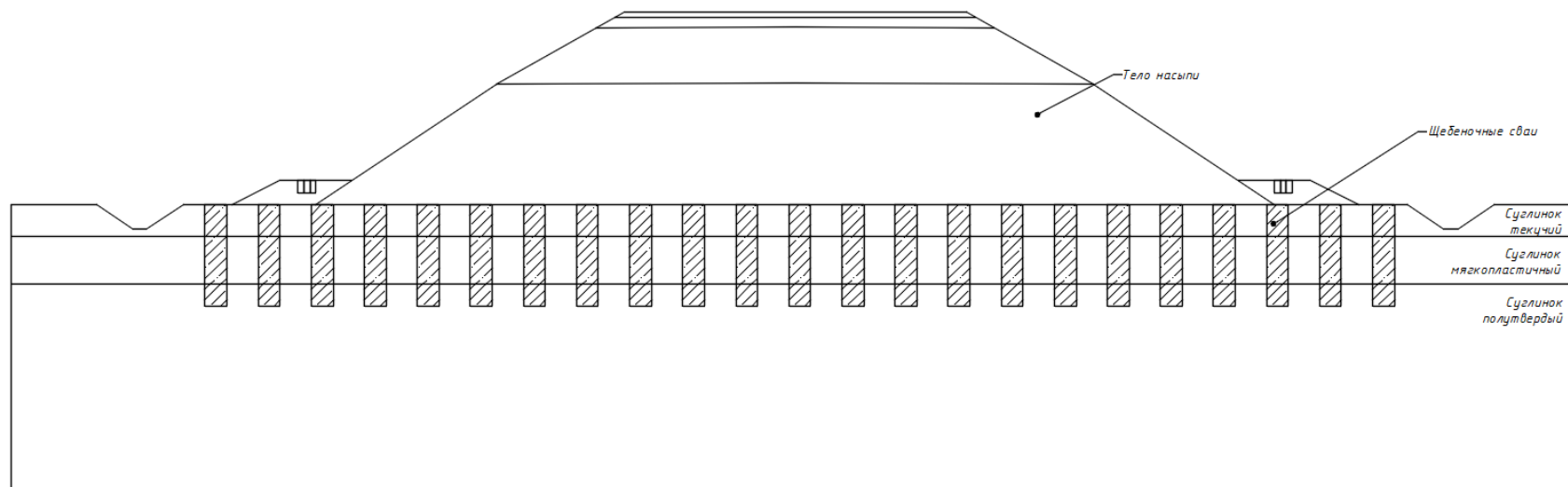


Рисунок 9. Поперечный профиль насыпи на участке ПК4321+00 — 4322+00 ВСМ-1 Москва — Санкт-Петербург с применением технологии усиления земляного полотна вертикальными столбами из щебня (разработано авторами)

Figure 9. Cross-section of the embankment at section picket 4321+00 — picket 4322+00, high-speed railway line — 1 Moscow — St. Petersburg, using crushed stone column reinforcement (developed by the authors)

Таблица 7 / Table 7

**Модуль деформации грунтов основания до усиления и после усиления
грунтов основания вертикальными столбами из щебня (шаг расстановки 2,2×1,9)**

**Deformation modulus of foundation soils before and
after reinforcement with crushed stone columns (spacing 2,2×1,9)**

Тип грунта <i>Soil type</i>	Модуль деформации Е до усиления грунтов основания, МПа <i>Deformation modulus E before reinforcement, MPa</i>	Модуль деформации Е после усиления грунтов основания, МПа <i>Deformation modulus E after reinforcement, MPa</i>
Суглинок текучий <i>Soft clay</i>	6	12,456
Суглинок мягкопластичный <i>Soft-plastic clay</i>	11,2	15,179
Суглинок полутвердый <i>Stiff clay</i>	24	24,082

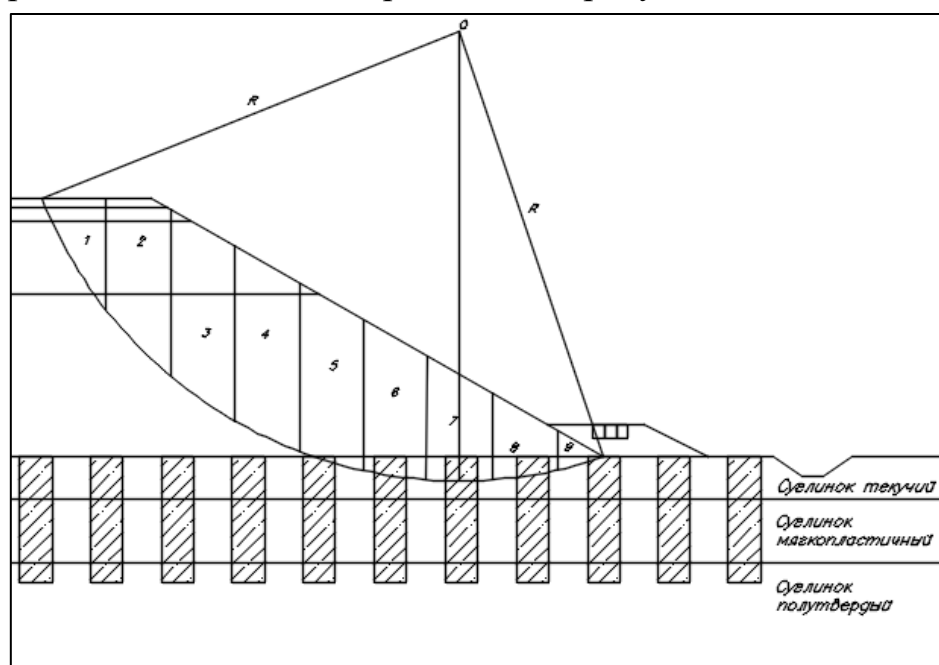
Разработано авторами / Developed by the authors

Расчет устойчивости откосов насыпи на укрепленном основании по методу проф. Г.М. Шахунянца участке ПК4321+00 — 4322+00

**Slope stability analysis of the embankment on reinforced foundation using
Prof. G.M. Shakhunyants' method (Section picket 4321+00 — picket 4322+00)**

Подробное описание методики расчета представлено было описано
выше данной исследовательской статьи.

Принципиальная схема приведена на рисунке 10.



**Рисунок 10. Расчетная схема устойчивости откосов
насыпи на укрепленном основании (разработано авторами)**

**Figure 10. Calculation scheme for slope stability
on a reinforced foundation (developed by the authors)**

В результате расчёта (табл. 8) коэффициент устойчивости равен $k = 1,37$.

Из сравнения $k = 1,37 \geq [k] = 1,30$ [13–15] очевидно, что устойчивость откоса насыпи обеспечена.

Таблица 8 / Table 8

Расчет устойчивости на укрепленном основании на участке ПК4321+00 — 4322+00 ВСМ-1 Москва — Санкт-Петербург

Stability analysis on reinforced foundation at section picket 4321+00 — picket 4322+00 HSR-1 Moscow — St. Petersburg

№ расчетного блока <i>Block number</i>	Площадь блока S , m^2 <i>Block area S, m^2</i>	Удельный вес грунта γ , kN/m^3 <i>Unit weight γ, kN/m^3</i>	Вес блока, $p = S \cdot \gamma$, kN <i>Block weight $P = S \cdot \gamma$, kN</i>	Угол α , град <i>Angle α, degrees</i>	$\sin \alpha$ <i>Sina</i>	Сила сдвига $Q = p \cdot \sin \alpha$, kN <i>Shear force $Q = P \sin \alpha$, kN</i>	$\cos \alpha$ <i>Cosa</i>	Угол внутреннего трения φ , град <i>Angle of internal friction φ, degrees</i>	$\tan \varphi$ <i>Tanφ</i>	$T = p \cdot \cos \alpha \cdot \tan \varphi$, kN <i>Resistance $T = P \cos \alpha \tan \varphi$, kN</i>	Удельное сцепление C , kPa <i>Cohesion C, kPa</i>	Длина дуги, l , m <i>Arc length l, m</i>	Сила сцепления, $T = c \cdot l$, kN <i>Cohesive force $T = Cl$, kN</i>
1	3,75	22	82,5	61	0,8744	72,135	0,4853	38	0,7807	31,258	2	4	8
2	8,88	22	195,36	55	0,8189	159,97	0,574	37	0,753	84,44	2	3	6
3	10,61	22	233,42	44	0,6944	162,08	0,7196	37	0,753	126,49	2	2,5	5
4	10,67	22	234,74	35	0,5733	134,58	0,8193	36	0,7261	139,64	2	2,2	4,4
5	9,95	21,73	216,21	15	0,2587	55,932	0,966	36	0,7261	151,64	2,5	2,1	5,25
6	12,75	21,44	273,36	13	0,2248	61,462	0,9744	33	0,649	172,87	2,6	2	5,2
7	6,69	21,09	141,09	2	0,0349	4,9215	0,9994	30	0,577	81,36	2,8	2,1	5,88
8	3,92	20,74	81,301	-5	-0,087	-7,082	0,9962	23	0,4242	34,36	2,9	2	5,8
9	0,89	20,25	18,023	-12	-0,208	-3,745	0,9782	17	0,3056	5,3868	3	1,5	4,5

Разработано авторами / Developed by the authors

Расчеты устойчивости откосов насыпи на укрепленном основании при помощи Midas GTS NX участке ПК4321+00 — 4322+00

Slope stability analysis of the embankment on reinforced
foundation using Midas GTS NX (Section picket 4321+00 — picket 4322+00)

На рисунке 10 будет представлена модель укрепленной насыпи на участке ПК4321+00 — 4322+00. Также произведен расчет $K_{уст}$ методом SMR (метод снижения прочности), результат которого приведен на рисунке 11.

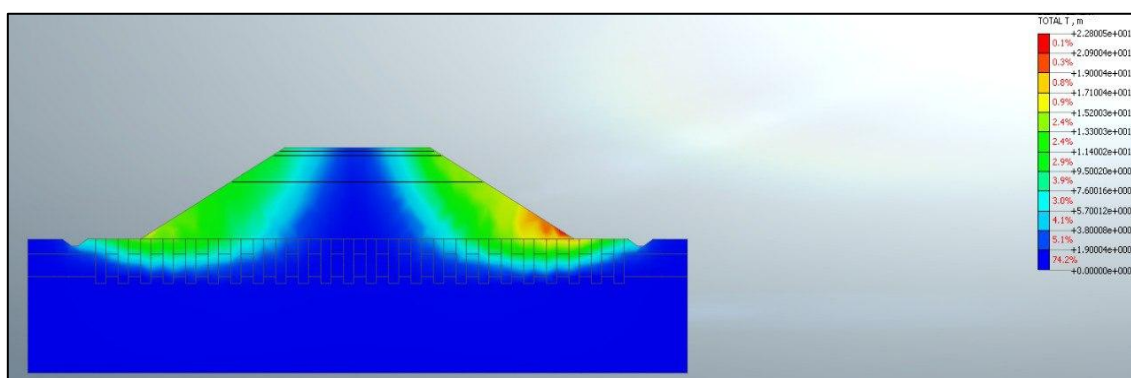


Рисунок 11. Напряжения в поперечном сечении насыпи (разработано авторами)

Figure 11. Stresses in the embankment cross-section (developed by the authors)

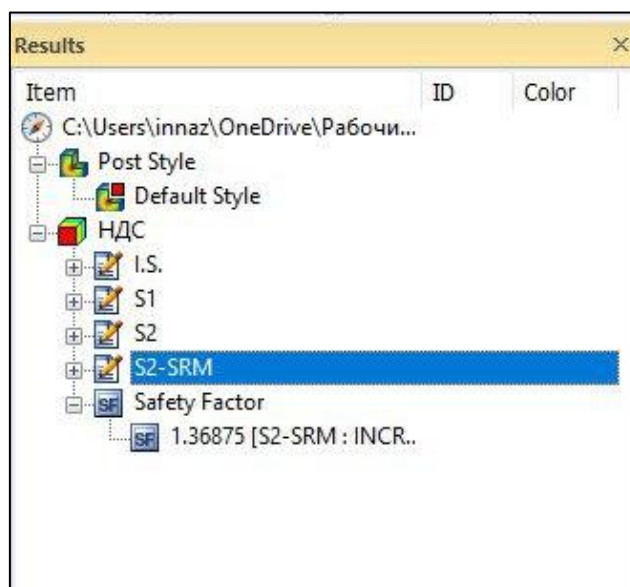


Рисунок 12. Результат расчета насыпи на слабом основании в исходном состоянии (разработано авторами)

Figure 12. Results of the embankment analysis
on a reinforced weak foundation (developed by the authors)

Программный комплекс Midas GTS NX подтвердил аналитические расчеты (метод проф. Г.М. Шахунянца и расчет коэффициента безопасности). $K_{без} = 1,36$, что соответствует требованиям к проектированию ВСМ [7; 8].

Технология усиления земляного полотна вертикальными столбами из щебня эффективна при усилении слабых оснований земляного полотна высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Вывод

Conclusion

В данной исследовательской статье поднимались вопросы об укреплении земляного полотна на слабых основаниях на примере участка высокоскоростной железнодорожной магистрали 1 (ВСЖМ-1) Москва — Санкт-Петербург. Было рассмотрено два состояния земляного полотна до укрепления вертикальными столбами из щебня и после. После произведения расчетов был сделан вывод, что данная технология возможна к применению на высокоскоростных магистралях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Евстифеев, Д.В.** Анализ экспериментальных данных по исследованию суглинка / Д.В. Евстифеева, Г.П. Дроздовский // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. — Брянск: БГИТА, 2004. — Вып. 9. — С. 179–181. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23839661>. EDN: [UBRTSJ](#). (Дата обращения: 01.02.2025).
2. **Луцкий, С.Я.** Геотехнический мониторинг и технологические режимы сооружения земляного полотна на слабых основаниях / С.Я. Луцкий, Т.В. Шепитько, Б.В. Сакун, А.А. Лычковский // Транспортное строительство. — 2022. — № 4. — С. 19–22. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50004147>. EDN: [AMQUKZ](#). (Дата обращения: 01.02.2025).
3. **Уланов, И.С.** Особенности проектирования безбалластного верхнего строения пути для высокоскоростных магистралей / И.С. Уланов // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахуняца, Москва, 05–06 апреля 2017 года. — Москва: Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2017. — С. 33–36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35052349>. EDN: [XPQQSD](#). (Дата обращения: 01.02.2025).
4. **Ашпиз, Е.С.** Мониторинг земляного полотна высокоскоростных магистралей / Е.С. Ашпиз // Путь и путевое хозяйство. — 2014. — № 12. — С. 16–18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22676959>. EDN: [TCGFZH](#). (Дата обращения: 01.02.2025).
5. **Ватин, Н.И.** Совместный расчет здания и фундамента мелкого заложения в SCAD / Н.И. Ватин, А.А. Мойся. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2007. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/1382.pdf/download/1382.pdf>. (Дата обращения: 01.02.2025).
6. **Вознесенский, Е.А.** Динамическая неустойчивость грунтов / Е.А. Вознесенский. — М.: Эдиториал УРСС, 1999. — 263 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50531293>. EDN: [AAZJYQ](#). (Дата обращения: 01.02.2025).
7. **Шепитько, Т.В.** Армирование грунтов основания вертикальными столбами из щебня в криолитозоне / Т.В. Шепитько, И.А. Артюшенко, П.Г. Долгов // Мир транспорта. — 2019. — Т. 17, № 4(83). — С. 68–78. URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/1707>. DOI: [10.30932/1992-3252-2019-17-68-78](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-68-78). EDN: [JZCNEW](#). (Дата обращения: 01.02.2025).
8. **Шепитько, Т.В.** Влияние конструктивно-технологических особенностей насыпи и шага расстановки вертикальных столбов из щебня на устойчивость сооружения / Т.В. Шепитько, И.А. Артюшенко, Е.А. Курчаткин // Наука и техника транспорта. — 2023. — № 3. — С. 11–17. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54959276>. EDN: [SKBEJK](#). (Дата обращения: 19.02.2025).

9. **Колос, А.Ф.** Исследование эффективности конструктивных решений земляного полотна автомобильных дорог при различной высоте насыпи на слабом основании / А.Ф. Колос, В.А. Черняева, О.В. Максимов // Международный журнал естественных наук. — 2024. — № 7-2(94). — С. 175–180. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68589244>. DOI: [10.24412/2500-1000-2024-7-2-175-180](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-7-2-175-180). EDN: [IVXZBS](https://www.edn.ru/IVXZBS). (Дата обращения: 19.02.2025).
10. **Прокудин, И.В.** Несущая способность земляного полотна при различных конструктивных решениях / И.В. Прокудин, И.С. Козлов // Шаг в будущее (неделя науки — 2007): матер. науч.-техн. конф. / ред.: В.В. Сапожников. — СПб.: ПГУПС, 2007. — С. 81. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004261789/. (Дата обращения: 19.02.2025).
11. **Priebe, H.J.** Design of vibro replacement / H.J. Priebe // Ground Engineering. — 1995. — 16 p. URL: https://www.academia.edu/3280273/The_design_of_vibro_replacement. (Дата обращения: 19.02.2025).
12. **Артюшенко, И.А.** Зависимость физико-механических характеристик и коэффициента безопасности грунтового массива от шага расстановки вертикальных столбов из щебня / И.А. Артюшенко // Транспортные сооружения. — 2020. — Т. 7, № 2. — С. 15. URL: <https://t-s.today/17SATS220.html>. DOI: [10.15862/17SATS220](https://doi.org/10.15862/17SATS220). EDN: [JOWRXE](https://www.edn.ru/JOWRXE). (Дата обращения: 19.02.2025).
13. **Alamgir, M.** Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusion / M. Alamgir, N. Miura, H. Proorooshasb, M. Madhav // Computers and Geotechnics. — 1996. — № 18. — С. 267–289. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0266352X95000348>. DOI: [10.1016/0266-352X\(95\)00034-8](https://doi.org/10.1016/0266-352X(95)00034-8). (Дата обращения: 19.02.2025).
14. **Ding, J.H.** Experimental study of dynamic characteristics on composite foundation with CFG long pile and rammed cement-soil short pile / J.H. Ding, Y. Cao, W. Wang, T. Zhao, J. Feng // Open Journal of Civil Engineering. — 2014. — № 4. — С. 1–12. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=43269>. DOI: [10.4236/ojce.2014.41001](https://doi.org/10.4236/ojce.2014.41001). (Дата обращения: 19.02.2025).
15. **Mortimore, S.** Design of soil reinforced slopes and structures / S. Mortimore, G. Horgan, D. Woods, S. Manceau, C. Macdiarmid // ICE Manual of Geotechnical Engineering. — 2nd ed. — Vol. II. — P. 1189–1214. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/full/10.1680/icemge.66830.1189>. DOI: [10.1680/icemge.66830.1189](https://doi.org/10.1680/icemge.66830.1189). (Дата обращения: 19.02.2025).

Сведения об авторах:

Артюшенко Игорь Александрович — кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: tywka351@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7749-9626>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=988867

Романцова Анастасия Сергеевна — аспирант, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: a.s.romantsova@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1285598

Статья получена: 10.04.2025. Принята к публикации: 15.06.2025. Опубликовано онлайн: 15.07.2025

REFERENCES

1. Evstifeev D.V., Drozdovsky G.P. [Analysis of experimental data on the study of loam parameters]. *Current Problems of the Forestry Complex*. 2004;(9):179–181. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23839661> (accessed 1st February 2025). (In Russ.).
2. Lutsky S.Y., Shepitko T.V., Sakun B.V., Lychkovsky A.A. Geotechnical monitoring and technological regimes of earth bed construction on weak foundations. *Transport Construction*. 2022;(4):19–22. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50004147> (accessed 1st February 2025). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Ulanov I.S. [Design features of ballastless track structures for high-speed highways]. In: [Modern problems of design, construction and operation of railway track: Proceedings of the XIV International scientific and technical conference. Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhunyants, Moscow, April 5–6, 2017]. Moscow: МИИТ; 2017:33–36. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35052349> (accessed 1st February 2025). (In Russ.).

4. Ashpiz E.S. [Monitoring of the roadbed of high-speed highways]. *Railway Track and Facilities*. 2014;(12):16–18. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22676959> (accessed 1st February 2025). (In Russ.).
5. Vatin N.I., Moysya A.A. [Joint calculation of a building and a shallow foundation in SCAD]. St. Petersburg: SPbSPU; 2007. Available from: <https://elib.spbstu.ru/dl/1382.pdf/download/1382.pdf> (accessed 1st February 2025). (In Russ.).
6. Voznesensky E.A. [Dynamic instability of soils]. Moscow: Editorial URSS; 1999. 263 p. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50531293> (accessed 1st February 2025). (In Russ.).
7. Shepitko T.V., Artyushenko I.A., Dolgov P.G. Base soil reinforcement with vertical crushed stone columns in cryolithozone. *World of Transport and Transportation*. 2019;17(4):68–78. DOI: [10.30932/1992-3252-2019-17-68-78](https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-68-78). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Shepitko T.V., Artyushenko I.A., Kurchatkin E.A. Impact of structural and technological features of embankment and spacing of vertical crushed stone columns on structure stability. *Science and Technology in Transport*. 2023;(3):11–17. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54959276> (accessed 19th February 2025). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Kolos A.F., Chernyaeva V.A., Maksimov O.V. Study of the effectiveness of design solutions for highway subgrades at different embankment heights on a weak foundation. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;(7-2):175–180. DOI: [10.24412/2500-1000-2024-7-2-175-180](https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-7-2-175-180). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Prokudin I.V., Kozlov I.S. [Bearing capacity of the roadbed with various design solutions]. In: [Step into the Future (Science Week-2007): Proceedings]. St. Petersburg: PGUPS; 2007:81. Available from: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004261789/ (accessed 19th February 2025). (In Russ.).
11. Priebe H.J. Design of vibro replacement. *Ground Engineering*. 1995:16 p. Available from: https://www.academia.edu/3280273/The_design_of_vibro_replacement (accessed 19th February 2025). (In Eng.).
12. Artyushenko I.A. Dependence of physico-mechanical characteristics and safety factor of the soil mass on the spacing of vertical pillars of crushed stone. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(2):15. DOI: [10.15862/17SATS220](https://doi.org/10.15862/17SATS220). (In Russ., abstract in Eng.).
13. Alamgir M., Miura N., Proorooshasb H., Madhav M. Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusion. *Computers and Geotechnics*. 1996;(18):267–289. DOI: [10.1016/0266-352X\(95\)00034-8](https://doi.org/10.1016/0266-352X(95)00034-8). (In Eng.).
14. Ding J.H., Cao Y., Wang W., Zhao T., Feng J. Experimental study of dynamic characteristics on composite foundation with CFG long pile and rammed cement-soil short pile. *Open Journal of Civil Engineering*. 2014;(4):1–12. DOI: [10.4236/ojce.2014.41001](https://doi.org/10.4236/ojce.2014.41001). (In Eng.).
15. Mortimore S., Horgan G., Woods D., Manceau S., Macdiarmid C. Design of soil reinforced slopes and structures. In: *ICE Manual of Geotechnical Engineering*. 2nd ed. Vol. II. p. 1189–1214. DOI: [10.1680/icemge.66830.1189](https://doi.org/10.1680/icemge.66830.1189). (In Eng.).

Information about the authors:

Igor A. Artyushenko — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: tywka351@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7749-9626>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=988867

Anastasia S. Romantsova — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: a.s.romantsova@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1285598

Submitted: 10th April 2025. Revised: 15th June 2025. Published online: 15th July 2025