



## Численная оценка устойчивости и деформативности конструкции земляного полотна методом замены слабого грунта на слабых основаниях

Чунг Хиеу Ле<sup>1</sup> ✉, Суан Хунг Нго<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский университет транспорта (МИИТ), ул. Образцова, 9, стр. 9, Москва, 127994, Российская Федерация

<sup>2</sup> Ханойский горно-геологический университет, 18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиём, Ханой, 12400, Вьетнам

✉ [letrunghieu531996@gmail.com](mailto:letrunghieu531996@gmail.com)



**Аннотация.** Актуальным вопросом отрасли железнодорожного транспорта является повышение устойчивости и снижение деформативности конструкций земляного полотна в условиях строительства на слабых основаниях методом замены слабого грунта. В ходе исследования определялась ширина слабого грунта понизу, подлежащего замене, с учетом требований к показателям деформативности, обеспечивающим заданные геометрические параметры при устройстве земляного полотна в различных условиях грунтового основания. Численное моделирование осуществлялось на основе известных теоретических принципов и в соответствии с последовательностью этапов строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали на слабых основаниях с помощью геотехнического программного обеспечения Plaxis 2D. При рассмотрении и оценке различной толщины слоя слабого грунта, подлежащего замене, построен график зависимости деформации от главного напряжения в точке развития пластической деформации, определено значение стабильного запаса прочности. Проведенное исследование позволило предложить численный метод определения коэффициента устойчивости откосов. Анализ актуальных нормативных документов и методов расчета земляных конструкций на слабых грунтах подтвердил необходимость доработки существующих методов расчета.

**Ключевые слова:** численная оценка, прочность, деформативность, коэффициент устойчивости, устойчивость откоса, земляное полотно, слабые глинистые грунты, дорожное строительство, VSM, Plaxis 2D

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность АО «Мосгипротранс» (Москва, Российская Федерация) за предоставление исходных данных и помощь в проведении исследования.

**Для цитирования:** Ле Чунг Хиеу, Нго Суан Хунг. Численная оценка устойчивости и деформативности конструкции земляного полотна методом замены слабого грунта на слабых основаниях. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(3):74–85. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-3-74-85>

## Numerical evaluation of stability and deformability of earth embankment structure by replacing weak soil on weak foundations

Trung Hieu Le<sup>1</sup> ✉, Xuan Hung Ngo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian University of Transport (MIIT), 9, bldg. 9 Obratsova St., Moscow, 127994, Russian Federation

<sup>2</sup> Hanoi University of Mining and Geology, 18 Pho Vien, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, 12400, Vietnam

✉ [letrunghieu531996@gmail.com](mailto:letrunghieu531996@gmail.com)



**Abstract.** A pressing issue for the railway industry is to enhance the stability and reduce the deformability of earth embankment structures constructed on weak foundations using the method of replacing weak soil. The authors determined the width of the weak soil at the base, requiring replacement, taking into account the requirements for deformability indicators that ensure the specified geometric parameters of the earth embankment under various soil foundation conditions. The numerical modeling was based on established theoretical principles in accordance with the sequence of construction stages for a high-speed railway line on weak foundations using the geotechnical software Plaxis 2D. By considering and evaluating different thicknesses of the weak soil layer to be replaced, the authors constructed a graph of the dependence of deformation on the principal stress at the point of plastic deformation development, and determined the value of the stable safety factor. The research made it possible to propose a numerical method for determining the slope stability coefficient. Analysis of current regulatory documents and calculation methods for earth structures on weak soils has confirmed the need to refine existing calculation methods.

**Keywords:** numerical assessment, strength, deformability, stability coefficient, slope stability, earth embankment, weak clay soils, road construction, high-speed railway, Plaxis 2D

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to JSC "Mosgirotrans" (Moscow, Russian Federation) for providing the initial data and assistance in conducting the research.

**For citation:** Le Trung Hieu, Ngo Xuan Hung. Numerical evaluation of stability and deformability of earth embankment structure by replacing weak soil on weak foundations. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(3):74–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-3-74-85>



## 1. Введение

Высокоскоростное движение появилось в начале 1960-х годов в Японии [1], в СССР развитие высокоскоростного наземного транспорта началось в конце 1960 – начале 1970-х годов. На сегодняшний день высокоскоростные поезда в России эксплуатируются на действующих железнодорожных линиях. В соответствии с приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250<sup>1</sup>, скорость пассажирских поездов не должна превышать 140 км/ч. Согласно международной классификации, высокоскоростная железнодо-



Рис. 1. Основные элементы земляного полотна ВСМ [3]

Fig. 1. Main elements of a high-speed railway embankment [3]

<sup>1</sup> Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утверждены приказом Министерства транспорта России от 23 июня 2022 года № 250. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/351240235> (дата обращения: 07.05.2024).

рожная магистраль (ВСМ) обеспечивает движение поездов со скоростью более 250 км/ч, по действующим российским стандартам – свыше 200 км/ч. Это перспективный показатель скорости для таких дорог [2]. Высокоскоростной можно назвать такую железную дорогу, по которой пассажирские поезда следуют со скоростью от 200 до 400 км/ч на всем ее протяжении или на некоторых участках.

Следует отметить, что в настоящее время в России отсутствуют нормы и правила проектирования ВСМ, поэтому при проектировании ВСМ Россия учитывает зарубежный опыт и стремится найти самостоятельные решения. Кроме того, отсутствуют стандартные проекты и решения земляного полотна (основные элементы земляного полотна ВСМ изображены на рис. 1).

Согласно действующим нормам Российской Федерации, для оценки надежности основания дороги в зависимости от типа дороги предложено использовать расчетный коэффициент запаса [4]. Проблема расчета величины коэффициента запаса по устойчивости грунтового массива (склонов, оснований фундаментов) считается одной из важнейших задач геомеханики. Авторы [5, 6] подчеркивали, что решение этой проблемы может быть осуществлено посредством анализа напряженного состояния грунтового массива на основе линейной теории упругости и упругопластических задач.

В соответствии с предыдущими стандартами устойчивость откоса определяют путем сравнения значения расчетного коэффициента устойчивости  $K_s$  с нормативным коэффициентом устойчивости  $[K_s]$ , установленным в СП 32-104-98<sup>2</sup>. Однако данный стандарт не учитывает ухудшение свойств материала с течением времени, воздействие окружающей среды и т. п.

Согласно нормативным требованиям к проектированию земляного полотна на слабых грунтах<sup>3</sup>, коэффициент безопасности, который служит критерием устойчивости основания насыпи, вычисляется по формуле:

$$K_{\text{без}} = \frac{P_{\text{без}}}{P_{\text{рас}}},$$

где  $P_{\text{без}}$  – безопасная нагрузка, т. е. предельная нагрузка, отвечающая условию устойчивости;  
 $P_{\text{рас}}$  – расчетная (проектная) нагрузка.

Таким образом, устойчивость основания для ВСМ обеспечивается при условии  $K_{\text{без}} > 1.3$ .

С другой стороны, при расчете устойчивости откоса насыпи на слабом основании особым образом подбирают координаты центра вращения ( $O$ ) и радиус ( $R$ ). Их определяют так, чтобы центр ( $O$ ) находился в наиболее невыгодном положении. Это позволяет определить наименьшее из возможных значений коэффициента устойчивости  $K_s$  для данного откоса (рис. 2).

Еще одна сложность заключается в том, что устройство земляного полотна для ВСМ в районах с широким распространением слабых грунтов сопряжено со многими трудностями, которые могут привести к его деформации.

Например, в [7] авторы отмечают, что динамические нагрузки меняют свое положение и по сравнению со статической нагрузкой могут стать причиной значительных деформаций конструкции.

Земляное полотно является важной составляющей конструкции пути. Его влиянию на деформируемость дорог посвящено много работ [8–13]. Обобщив результаты проведенных исследований, необходимо выделить следующее:

<sup>2</sup> СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм = Design of earthwork for rail ways with 1520 mm TRACK. Дата введения 01.01.1999. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003314> (дата обращения: 03.03.2024).

<sup>3</sup> Методические указания по проектированию земляного полотна на слабых грунтах. Москва: Оргтрансстрой; 1968. 125 с.

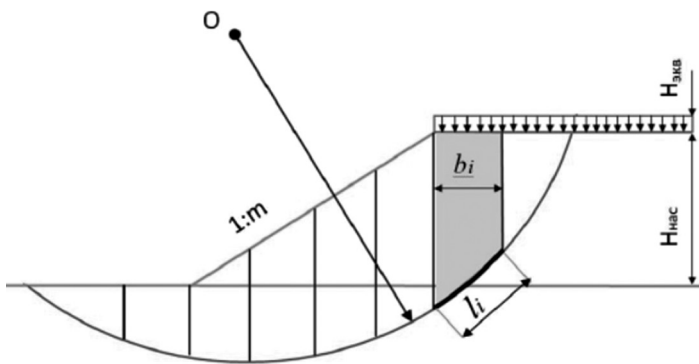


Рис. 2. Схема к расчету устойчивости откоса насыпи на слабом основании<sup>4</sup>  
 Fig. 2. Scheme for slope stability analysis of an embankment on a weak foundation<sup>4</sup>

- на образование деформаций дороги влияет множество факторов, один из них – модуль упругости грунта [8];
- за время многолетней эксплуатации железнодорожного пути происходят серьезные изменения, которые необходимо учитывать при проектировании земляного полотна<sup>5</sup>;
- земляное полотно ВСМ, рассчитанное по первой группе предельных состояний, согласно [11], должно гарантировать необходимую несущую способность и устойчивость откосов<sup>6</sup>;
- в ходе проектирования расчетный коэффициент устойчивости определяется методом предельного равновесия грунтового массива по круговой цилиндрической поверхности скольжения или другой заданной поверхности скольжения.

Учитывая тот факт, что создание современной транспортной инфраструктуры является одним из приоритетных направлений политики страны, необходимо продолжать исследования в сфере строительства ВСМ.

Слабые глинистые грунты обладают рядом уникальных характеристик, которые существенно затрудняют устройство фундаментов на естественных основаниях. Это обуславливает необходимость поиска новых методик расчета и их углубленного исследования [14].

На участках со слабыми грунтами для земляного полотна рекомендуется использовать насыпи. Характеристики грунтов, расположенных в верхней части насыпей, а также требуемое положение поверхности покрытия над расчетным уровнем поверхностных и грунтовых вод определяются согласно СП 24.13330.2021<sup>7</sup> с учетом типа местности и особенностей увлажнения.

Одним из решений, позволяющих использовать слабые грунты в основании насыпей, является метод замены слабого грунта с ограниченной глубиной, который позволяет обеспечить устойчивость и прочность земляного полотна железных дорог.

<sup>4</sup> ОДМ 218.4.4.002-2020 Методические рекомендации по использованию существующих насыпей из слабых и обводненных грунтов при реконструкции автомобильных дорог. Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/218.4.4.002-2020.pdf> (дата обращения: 10.04.2024).

<sup>5</sup> Справочная энциклопедия дорожника. Т. V. Проектирование автомобильных дорог / Под ред. д-ра техн. наук Г. А. Федотова, П. И. Поспелова. Москва: Транспорт; 1989. 438 с.

<sup>6</sup> СП 25.13330.2020 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах = Soil bases and foundations on permafrost soils. Дата введения 01.07.2021. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573659326> (дата обращения: 07.03.2024).

<sup>7</sup> СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты = Pile foundations. Дата введения 15.01.2022. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/728474148> (дата обращения: 07.03.2024).

В процессе проектирования и расчета насыпей на слабых грунтах необходимо предусмотреть дополнительные меры по обеспечению их несущей способности и ускорению осадки. Для этого требуется проведение детальных исследований устойчивости и прогнозирования осадки слабого фундамента и изучение различных методов, включая замену слабого грунта в основании насыпи. Также важно учитывать специфику проектируемой дороги и местные условия.

Разработка методов оценки устойчивости откосов земляного полотна на слабых грунтах посредством современных программных продуктов позволит повысить качество проектирования. Это, в свою очередь, приведет к повышению долговечности конструкций и, как следствие, повысит уровень безопасности на железнодорожных объектах.

Целью исследования являлось определение ширины замены слабого грунта понизу в различных условиях с учетом деформативности сжатой зоны земляного полотна, обеспечивающей заданные геометрические параметры текущего земляного полотна.

Исследование было направлено на решение следующих практических задач:

- повышение устойчивости конструкции земляного полотна за счет замены слабого грунта;
- увеличение радиуса кривой поверхности смещения.

## 2. Материалы и методы

На рис. 3 изображена схема конструкции земляного полотна, которое было построено на поверхности слабой толщи.

Для оценки деформативности земляного полотна был выбран поперечный профиль насыпи (рис. 4).

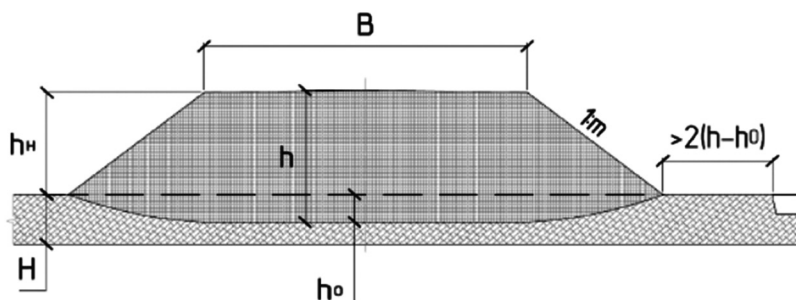


Рис. 3. Типовая схема земляного полотна, построенного на поверхности слабого грунта ( $B$  – ширина насыпи сверху;  $h_n$  – высота насыпи;  $h$  – толщина насыпи с учетом ее осадки;  $H$  – мощность слабого грунта) (схема из СП 32-104-98)

Fig. 3. Typical scheme of an earth embankment constructed on a weak soil surface ( $B$  – embankment width at the top;  $h_n$  – embankment height;  $h$  – embankment thickness considering its settlement;  $H$  – thickness of weak soil) (scheme from SP 32-104-98)



Рис. 4. Типовая конструкция замены слабого грунта (схема составлена авторами в AutoCAD)

Fig. 4. Typical design for replacing weak soil (scheme complied by the authors in AutoCAD)

В настоящем исследовании были рассмотрены два случая:

- насыпь находится над слоями слабого грунта мощностью не более 3 м;
- насыпь находится над слоями слабого грунта мощностью более 3 м.

Геометрические параметры насыпи, принятые для расчетного поперечного профиля, приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Геометрические параметры насыпи (расчетного поперечного профиля земляного полотна)  
Geometric parameters of the embankment (calculated cross-section of the earth embankment)

Высота насыпи $h_{н,}'$ , м	Крутизна откосов насыпи 1:m	Ширина основной площадки $b$ , м	Ширина конструкции безбалластного верхнего строения пути $b_{всн}'$ , м
2.85	1:1.75	15.9	3.2

В основании типовой конструкции земляного полотна выделены два слоя грунтов: суглинок мягкопластичный (слабый грунт) и суглинок легкий пылеватый твердый (прочное основание).

Физические и механические характеристики инженерно-геологических элементов (ИГЭ), в том числе тела насыпи, защитных слоев и грунтов основания приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Параметры ИГЭ для расчетов осадки земляного полотна  
Parameters of engineering-geological elements for earth embankment settlement calculations

Наименование грунта	Удельный вес грунта $\gamma_{пласг}'$ , кН/м <sup>3</sup>	Удельный вес водонасыщенного грунта $\gamma_{сат}'$ , кН/м <sup>3</sup>	Коэффициент фильтрации $K$ , м/сут	Модуль деформации $E$ , кН/м <sup>2</sup>	Коэффициент Пуассона $\nu$	Удельное сцепление $c$ , кН/м <sup>2</sup>	Угол внутреннего трения $\phi, ^\circ$	Коэффициент уплотнения $e$
ИГЭ бж4 Суглинок мягкопластичный	19.11	19.41	0.01	300	0.35	6	6	0.76
ИГЭ 21ж1 Суглинок легкий пылеватый твердый	17.84	20.1	0.0324	58 000	0.37	46.4	22	0.64
Насыпной грунт, ЩПГС (защитный слой № 1)	18.62	18.62	80	120 000	0.3	2	43	1.0
Насыпной грунт, песок средней крупности (защитный слой № 2)	17.64	18.31	50	80 000	0.3	3	40	1.0
Насыпной грунт, песок средней крупности (насыпь)	17.64	18.44	50	50 000	0.3	3	40	0.98

Примечание: расчетные характеристики грунтов тела насыпи (угол внутреннего трения, сцепление) рассчитываются на основании норм по СП 22.13330.2021

Для каждого случая было рассмотрено два варианта замены:

- **Вариант 1:** ширина замены грунта понизу определяется откосом с заложением 1:0.5 (в соответствии с консистенцией и типом грунта), отложенным от подошвы откоса до нижней границы слоя слабого грунта. Данное проектное решение выполнено на основании рис. 5.
- **Вариант 2:** ширина замены грунта задается распределением давления в ней под углом равным 45°. Откосы траншеи выполняются заложением 1:0.5 (в соответствии с консистенцией и типом грунта). Данное проектное решение выполнено на основании требований по замене слабых грунтов, указанных в работе [15].

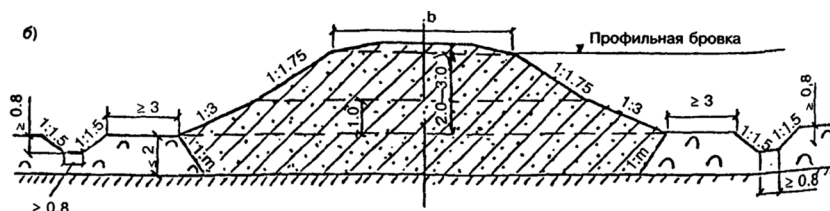


Рис. 5. Поперечные профили насыпей высотой до 3 м из мелких и пылеватых песков, песчанистых супесей: 1:m – крутизна откосов траншеи выторфовывания (от 1:0 до 1:0.5) (схема из СП 32.104.982)

Fig. 5. Cross-sections of embankments up to 3 m high, composed of fine and silty sands, sandy loams: 1:m – slope steepness of the peat excavation trench (from 1:0 to 1:0.5) (scheme from SP 32.104.982)

Для решения поставленных задач использовался метод конечных элементов. Математическое моделирование проводилось с использованием геотехнической программы Plaxis 2D. Численное моделирование расчета выполнялось в несколько этапов (рис. 6).



Рис. 6. Численное моделирование расчета этапов (схема составлена авторами)  
Fig. 6. Numerical modeling of calculation stages (diagram created by the authors)

Благодаря тому, что графовый метод позволяет быстро и точно находить численные решения линейных задач, можно предположить, что он будет также эффективен и при решении последовательности упругих задач. Для решения упругопластической задачи мы использовали график деформации, на котором представлены зоны упругой деформации и повторного нагружения (рис. 7).

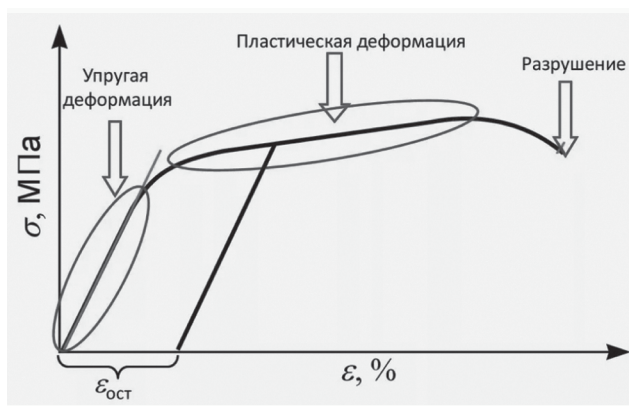


Рис. 7. График деформации [16]  
Fig. 7. Deformation graph [16]

### 3. Результаты и обсуждение

Проведенный численный расчет устойчивости откосов насыпи позволяет определить пластические деформации от главных напряжений на слабом основании. График зависимости наибольших деформаций  $\epsilon$  от главных напряжений  $\sigma$  в точке развития максимальных пластических деформаций представлен на рис. 8. Наглядно видно следующее:

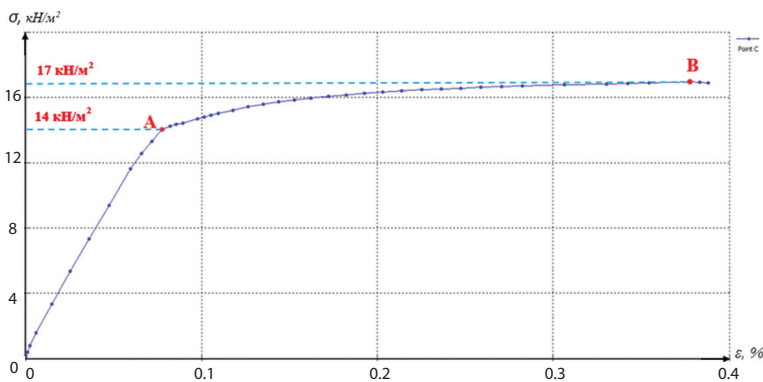


Рис. 8. Кривая зависимости деформаций от главных напряжений в точке развития пластических деформаций (график составлен авторами в Plaxis 2D)  
 Fig. 8. Curve of deformation dependence on principal stresses at the point of plastic deformation development (graph created by the authors in Plaxis 2D)

- слабый грунт под подошвой насыпи не способен сопротивляться нагрузке и переходит в пластическую фазу при напряжении  $14 \text{ кН/м}^2$  (точка А), рабочее напряжение не достигается, программа прекращает расчет;
- при напряжении  $17 \text{ кН/м}^2$  (точка В) грунт переходит в фазу разрушения, когда деформация продолжает расти при неизменном напряжении.

Таким образом, в ходе рассмотрения проблемы устойчивости откосов земляного полотна, расположенного на слабом основании, был разработан способ вычисления коэффициента устойчивости откосов. Деформированные схемы модели и вертикальные перемещения на этапе оценки устойчивости откосов по всем вариантам представлены на рис. 9–12.

Результаты экспериментальной задачи моделирования сведены в таблицу 3.

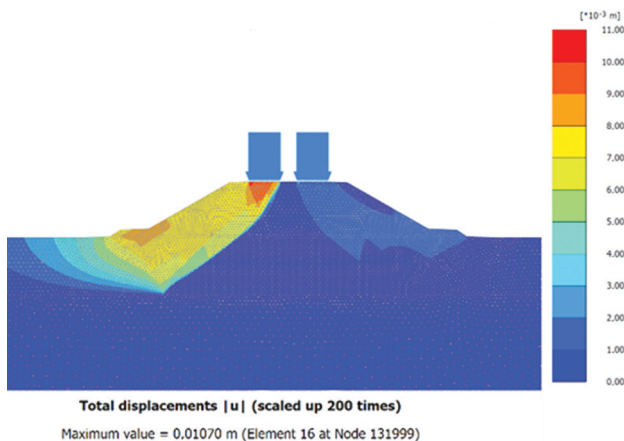


Рис. 9. Изолиния общих деформаций модели по варианту 1 с мощностью слабого грунта 3 м (модель составлена авторами в Plaxis 2D)  
 Fig. 9. Contour line of total deformations in the model for variant 1 with a weak soil thickness of 3 m (model created by the authors in Plaxis 2D)

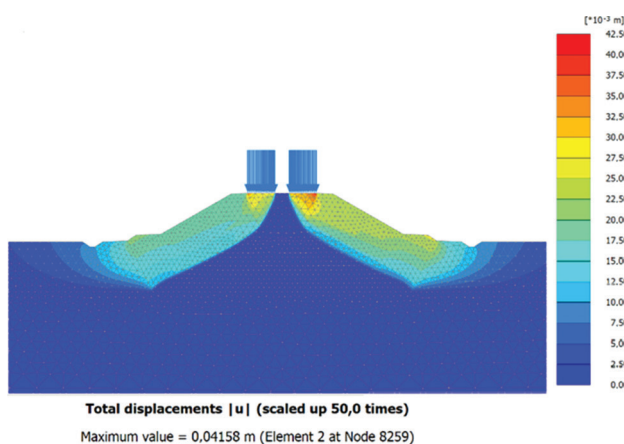


Рис. 10. Изолиния общих деформаций модели по варианту 2 с мощностью слабого грунта 3 м (модель составлена авторами в Plaxis 2D)  
 Fig. 10. Contour line of total deformations in the model for variant 2 with a weak soil thickness of 3 m (model created by the authors in Plaxis 2D)



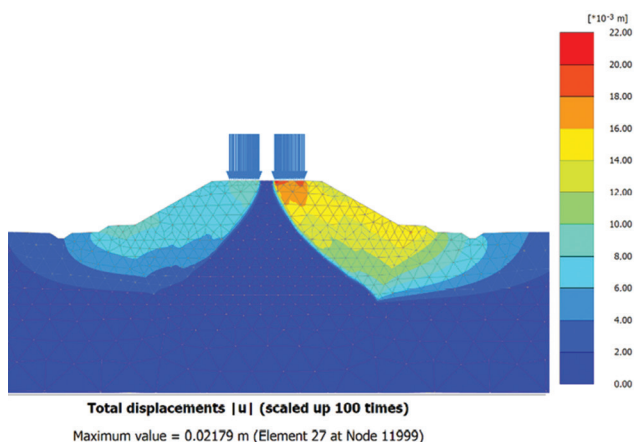


Рис. 11. Изолиния общих деформаций модели по варианту 1 с мощностью слабого грунта 4 м (модель составлена авторами в Plaxis 2D)  
Fig. 11. Contour line of total deformations in the model for variant 1 with a weak soil thickness of 4 m (model created by the authors in Plaxis 2D)

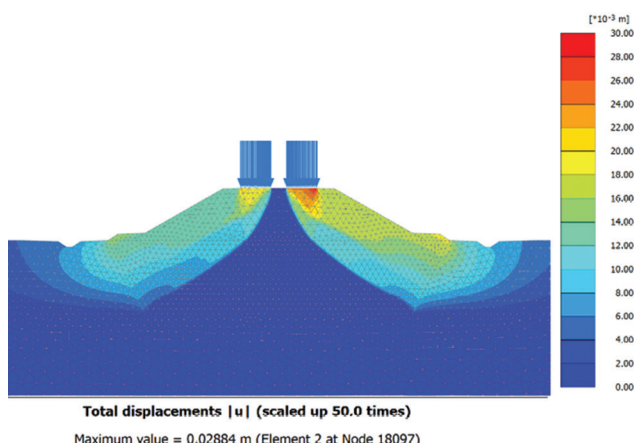


Рис. 12. Изолиния общих деформаций модели по варианту 2 с мощностью слабого грунта 4 м (модель составлена авторами в Plaxis 2D)  
Fig. 12. Contour line of total deformations in the model for variant 1 with a weak soil thickness of 4 m (model created by the authors in Plaxis 2D)

Таблица 3 / Table 3

Результаты расчета деформативности земляного полотна  
Results of earth embankment deformability calculation

Случай расчета		Значение деформации на этапе строительства $U_y$ , мм	Значение деформации на этапе эксплуатационного периода $U_y^*$ , мм	Общее значение деформаций на этапе оценки устойчивости откосов $U$ , мм	Расчетный коэффициент устойчивости откосов $\sum K_S$
Мощность слоя слабого грунта $H$ , м	Вариант				
3	1	27.64	9.014	10.7	1.053
	2	4.5	34.24	41.58	1.515
4	1	11.82	21.76	21.79	1.120
	2	5.072	25.51	28.84	1.408

Таким образом, по результатам численного моделирования и анализа данных, представленных в таблице 3, можно сделать следующие выводы:

1. Полученные результаты отражают зависимость расчетного коэффициента устойчивости откоса от мощности и ширины замены слабого грунта.
2. Анализ результатов расчетов показал существенное влияние ширины области замены слабого грунта основания насыпи на ее устойчивость. При недостаточной ширине области замены слабого грунта основания насыпи нарушаются заданные геометрические параметры насыпи и устойчивость в нижней части откосов насыпи.

3. Конструкция замены слабого грунта в основании земляного полотна по варианту 1 не обеспечивает необходимый запас устойчивости.
4. Значение расчетного коэффициента устойчивости при замене слабого грунта по варианту 2 находится в пределах 1.3–1.5, что соответствует нормам<sup>8</sup>.

#### 4. Заключение

На территории Российской Федерации широко распространены слабые грунты (они занимают более 60 % территории). С учетом принятой Стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 года неизбежно встанет вопрос проектирования и строительства железных дорог на участках со слабыми грунтами.

Авторами статьи проведен качественный анализ проблематики рассматриваемого вопроса, выявлен недостаток в теоретических основах расчета, обусловленный невозможностью учитывать изменяемые физико-механические характеристики грунтов в процессе эксплуатации сооружения.

Проведенное исследование показало, что метод замены слабого грунта при строительстве на слабых основаниях является эффективным. Повышение устойчивости откосов происходит за счет увеличения радиуса кривой поверхности смещения с минимальным коэффициентом устойчивости, так как в данном случае увеличено основание насыпи, и кривая поверхности скольжения пересекает в основном прочные насыпные грунты.

Применение современных программных продуктов для адаптации базовых методов оценки устойчивости земляного полотна, расположенного на слабых грунтах, способствует улучшению качества проектирования, повышению долговечности конструкций и, главное, безопасности на объектах железнодорожного транспорта.

В перспективе планируется рассмотреть влияние на коэффициент устойчивости высоты насыпи и уклона откоса насыпи, которые следует учитывать при разработке и расчете конструкции.

**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Author contributions.** The authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest. The study had no sponsorship.

#### Список литературы

1. Карасева А. А., Васильева М. А. Анализ мирового опыта развития высокоскоростного железнодорожного транспорта. *Молодой ученый*. 2016;6:114–117. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/110/26636/>.
2. Федоров В. П., Комаров Т. А. Анализ целесообразности строительства и эксплуатации высокоскоростных магистралей в России. В сб.: *Актуальные вопросы экономики транспорта высоких скоростей: сборник научных статей национальной научно-практической конференции. Т. 2*. Санкт-Петербург: Институт независимых социально-экономических исследований – оценка; 2020. С. 274–280. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44513403>.
3. Колос А. Ф., Петряев А. В., Колос И. В., Говоров В. В., Шехтман Е. И. Основополагающие требования к конструкции земляного полотна высокоскоростных железнодорожных линий. *Бюллетень результатов научных исследований*. 2018;1:36–48. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ywedxq>.

<sup>8</sup> ВСН04-71 Указания по расчету устойчивости земляных откосов. Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/885/4293829820.pdf> (дата обращения: 12.02.2024).

4. Горлов А. В. Инновационный подход к реконструкции земляного полотна. *Мир транспорта*. 2016;14(3):106–122. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2016-14-3-10>
5. Цытович Н. А., Тер-Мартirosян З. Г. *Основы прикладной геомеханики в строительстве*. Москва: Высшая школа; 1981. 320 с.
6. Desai C. S., Lightner J. G. Mixed finite element procedure for soil-structure interaction and construction sequences. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1985;21(5):801–824. <https://doi.org/10.1002/nme.1620210504>
7. Shahraki M., Sadaghiani M. R. S., Witt K. J., Meier T. 3D Modelling of Train Induced Moving Loads on an Embankment. *Plaxis Bulletin*. 2014:Autumn issue. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/279484965\\_3D\\_Modelling\\_of\\_Train\\_Induced\\_Moving\\_Loads\\_on\\_an\\_Embankment](https://www.researchgate.net/publication/279484965_3D_Modelling_of_Train_Induced_Moving_Loads_on_an_Embankment).
8. Колос А. Ф., Крюковский Д. В. Особенности колебательного процесса грунтов насыпей, опирающихся на торфяное основание, при движении поездов. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2013;2:120–126. Режим доступа: <http://izvestiapgups.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2013-2/10.20295-1815-588X-2013-2-120-126.pdf>.
9. Бондаренко И. А. Предложения по оценке деформативности железнодорожного пути. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2008;23:117–122. Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_23497715\\_60994088.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_23497715_60994088.pdf).
10. Лебедев А. В. Анализ состояния земляного полотна. *Путь и путевое хозяйство*. 2017;8:8–10.
11. Шапетько К. В. *Влияние неровностей продольного профиля на деформативность пути, безопасность движения и расход энергии на тягу поездов: дисс. канд. техн. наук*. Москва: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта; 2020. 185 с. Режим доступа: <https://www.disscat.com/content/vliyanie-nerovnostei-prodolnogo-profilya-na-deformativnost-puti-bezopasnost-dvizheniya-i-ras>.
12. Коссов В. С., Краснов О. Г., Никонова Н. М. О деформативности деятельной зоны земляного полотна при воздействии состава с повышенными осевыми нагрузками. *Мир транспорта*. 2018;16(4):32–50. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-4-3>
13. Уланов И. С., Горлов А. В. Оценка деформаций конструкции участка переходной жесткости земляного полотна и ИССО высокоскоростной магистрали. *Евразийский Союз Ученых*. 2019;3(60):46–55. Режим доступа: <https://euroasia-science.ru/wp-content/uploads/2019/04/46-55-Teplukhin-V.G.-Shabalin-D.N.pdf>.
14. Уланов И. С. Отечественные и зарубежные подходы при постановке задачи обеспечения стабильности земляного полотна на слабом основании. В сб.: *Транспортное строительство*. Москва: Перо; 2022. С. 328–340. Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_54473708\\_15685098.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_54473708_15685098.pdf).
15. Ухов С. Б., Семенов В. В., Знаменский В. В., Тер-Мартirosян З. Г., Чернышев С. Н. *Механика грунтов, основания и фундаменты*. Москва: АСВ; 1994. 566 с. Режим доступа: [https://vk.com/doc284718893\\_560626623?hash=zAreSXjsf15pZhX4hHiGv6szPx8ELyXzg9mXS3u9wec](https://vk.com/doc284718893_560626623?hash=zAreSXjsf15pZhX4hHiGv6szPx8ELyXzg9mXS3u9wec).
16. Шапиро Д. М., Ким М. С., Ким В. Х., Агарков А. В. *Решение задач механики грунтов аналитическими и численными методами*. Воронеж: Воронежский государственный технический университет; 2019. 85 с. Режим доступа: <https://www.iprbookshop.ru/epd-reader?publicationId=93288>.

#### References

1. Karaseva, A. A., Vasil'eva, M. A. (2016). Analysis of global experience in the development of high-speed railway transport. *Molodoy uchenyy*. 2016;6:114–117. (In Russ.) Available at: <https://moluch.ru/archive/110/26636/>.
2. Fedorov V. P., Komarov T. A. Analysis of the feasibility of construction and operation of high-speed highways in Russia. In: *Actual questions of economy of high-speed transport: collection of scientific articles of the national scientific-practical conference. Vol. 2*. St. Petersburg: Institut nezavisimyykh sotsial'no-ekonomicheskikh issledovaniy – otsenka; 2020. P. 274–280. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44513403>.
3. Kolos A. F., Petrayev A. V., Kolos I. V., Govorov V. V., Shekhtman E. I. Essential requirements for roadbed design of highspeed rail lines. *Bulletin of Scientific Research Result*. 2018;1:36–48. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/ywedqxq>.
4. Gorlov A. V. An innovative approach to the reconstruction of the subgrade. *World of Transport*. 2016;14(3):106–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2016-14-3-10>
5. Tsytovich N. A., Ter-Martirosyan Z. G. *Fundamentals of applied geomechanics in construction*. Moscow: Vysshaya shkola; 1981. (In Russ.)

6. Desai C. S., Lightner J. G. Mixed finite element procedure for soil-structure interaction and construction sequences. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1985;21(5):801–824. <https://doi.org/10.1002/nme.1620210504>
7. Shahraki M., Sadaghiani M. R. S., Witt K. J., Meier T. 3D Modelling of Train Induced Moving Loads on an Embankment. *Plaxis Bulletin*. 2014:Autumn issue. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/279484965\\_3D\\_Modelling\\_of\\_Train\\_Induced\\_Moving\\_Loads\\_on\\_an\\_Embankment](https://www.researchgate.net/publication/279484965_3D_Modelling_of_Train_Induced_Moving_Loads_on_an_Embankment).
8. Kolos A. F., Kryukovskiy D. V. Specific features of oscillating process of subgrade soils based on the peat foundation under train traffic. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2013;2:120–126. (In Russ.) Available at: <http://izvestiapgups.org/assets/files/10.20295-1815-588X-2013-2/10.20295-1815-588X-2013-2-120-126.pdf>.
9. Bondarenko I. O. Suggestions for the evaluating of railway deformation. *Science and Transport Progress*. 2008;23:117–122. (In Russ.) Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_23497715\\_60994088.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_23497715_60994088.pdf).
10. Lebedev A. V. Analysis of the earth bed condition. *Put and track facilities*. 2017;8:8–10. (In Russ.)
11. Shapetko K. V. *Influence of longitudinal profile irregularities on track deformability, traffic safety and energy consumption for traction of trains*. Moscow: Research Institute of Railway Transport; 2020. (In Russ.) Available at: <https://www.dissercat.com/content/vliyanie-nerovnostei-prodolnogo-profilya-na-deformativnost-puti-bezopasnost-dvizheniya-i-ras>.
12. Kossov V. S., Krasnov O. G., Nikonova N. M. On deformability of a roadbed active zone under the influence of a train with increased axial loads. *World of Transport and Transportation*. 2018;16(4):32–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2018-16-4-3>
13. Ulanov I. S., Gorlov A. V. Evaluation deformations of the transitional zone between embankment and bridge for highspeed railway. *Eurasian Union of Scientists*. 2019;3(60):46–55. (In Russ.) Available at: <https://euroasia-science.ru/wp-content/uploads/2019/04/46-55-Teplukhin-V.G.-Shabalin-D.N.pdf>.
14. Ulanov I. Domestic and foreign approaches in setting the task of ensuring the stability of the roadbed on a weak foundation. In: *Transportnoe stroitel'stvo*. 2022. P. 328–340. (In Russ.) Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_54473708\\_15685098.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_54473708_15685098.pdf).
15. Ukhov S. B., Semenov V. V., Znamenskiy V. V., Ter-Martirosyan Z. G., Chernyshev S. N. *Mechanics of soils, bases and foundations*. Moscow: ASV; 1994. (In Russ.) Available at: [https://vk.com/doc284718893\\_560626623?hash=zAreSXjsf15pZhX4hHiGv6szPx8ELyXzg9mXS3u9wec](https://vk.com/doc284718893_560626623?hash=zAreSXjsf15pZhX4hHiGv6szPx8ELyXzg9mXS3u9wec).
16. Shapiro D. M., Kim M. S., Kim V. Kh., Agarkov A. V. *Solving problems of soil mechanics by analytical and numerical methods*. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2019. (In Russ.) Available at: <https://www.iprbookshop.ru/epd-reader?publicationId=93288>.



### Информация об авторах

**Чунг Хиеу Ле**, аспирант кафедры автомобильных дорог, аэродромов, оснований и фундаментов, Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация, [letrunghieu531996@gmail.com](mailto:letrunghieu531996@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6346-8829>

**Суан Хунг Нго**, канд. техн. наук, преподаватель факультета гражданского строительства, Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам, [ngoquanhung@humg.edu.vn](mailto:ngoquanhung@humg.edu.vn), <https://orcid.org/0000-0003-2868-6342>

### Information about the authors

**Trung Hieu Le**, Postgraduate in the Department of Automobile Roads, Airfields, Bases and Foundations, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation, [letrunghieu531996@gmail.com](mailto:letrunghieu531996@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6346-8829>

**Xuan Hung Ngo**, Cand. Sci. (Engineering), Lecturer in the Faculty of Civil Engineering, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam, [ngoquanhung@humg.edu.vn](mailto:ngoquanhung@humg.edu.vn), <https://orcid.org/0000-0003-2868-6342>

Получена 27 апреля 2024 г., одобрена 26 июля 2024 г., принята к публикации 20 августа 2024 г.

Received 27 April 2024, Approved 26 July 2024, Accepted for publication 20 August 2024