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

2020, №4, Том 7 / 2020, N 4, Vol. 7 <https://t-s.today/issue-4-2020.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS420.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS420 (<http://dx.doi.org/10.15862/05SATS420>)

Оценка устойчивости откосов системы «земляное полотно – дорожная одежда» с нарушенной структурой

¹Каменчуков А.В., ²Николаева Г.О., ¹Горшков Н.И., ¹Ловцов А.Д.

¹ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

²ФГБОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Каменчуков Алексей Викторович, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы оценки устойчивости нестандартных грунтово-геологических систем в сложных условиях. Выполнен аналитический обзор современных методов и средств оценки устойчивости откосов насыпи. Рассмотрены особенности работы насыпи в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Отдельное внимание отдано вопросу устойчивости насыпей на талом основании. Изучены особенности проектирования насыпей на многолетнемерзлых грунтах при сохранении или частичном оттаивании мерзлых грунтов. Представлены два варианта расчетных статических схем поверхностей скольжения: основание – земляное полотно и основание – земляное полотно – дорожная одежда. Представлены основные причины приводящие к потере устойчивости грунтовых откосов. На основе результатов полевых исследований определены физико-механические характеристики грунтов насыпи и основания земляного полотна, которые стали основой для математического моделирования и оценки устойчивости откосов насыпи. В программных комплексах GeoStab (демо) и Geo5 (учебная лицензия), на основе метода конечных элементов и результатов полевых исследований, построены

цифровые модели насыпей на слабом основании. Выполнен расчет устойчивости системы «основание – земляное полотно» под действием стандартной равномерно-распределенной нагрузки. Предложены два варианта усиления системы, для повышения ее устойчивости: армирование грунтовыми анкерами и геосинтетическими материалами. Так же проверена адекватность гипотезы о влиянии состояния покрытия дорожной одежды на устойчивость насыпи. Рассмотрены две модели системы и основание – земляное полотно – дорожная одежда: без трещин на полосе накати и с трещинами. Установлено что дефекты покрытия влияют на устойчивость системы только при наличии землетрясения средней силы и более сильных. Даны рекомендации по усилению откосов насыпей, работающих в сложных грунтово-геологических условиях.

Ключевые слова: автомобильная дорога; насыпь; дорожная одежда; деформация; физико-механические характеристики; напряженно-деформированное состояние; моделирование; устойчивость откосов

Slope stability estimation of the "earth bed – road dressing" system with disturbed structure

¹Aleksey V. Kamenchukov,
²Gamilia O. Nikolaeva, ¹Nikolay I. Gorshkov, ¹Alexander D. Lovtsov

¹Pacific National University, Khabarovsk, Russia

²North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Corresponding author: Aleksey V. Kamenchukov, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

Abstract. Off-standard soil-geological systems stability assessing issues under complex conditions is being discussed in this article. Modern methods and tools analytical review for assessing the embankment slope stability was performed here. Embankment work peculiarities in the areas of the permafrost soil spread were discussed in this paper. Special attention is paid to the embankments stability issue on a thawed foundation. The design features of the embankments on permafrost soils with the frozen soils preservation or partial thawing have been studied here. Two variations of sliding surface design-level static circuit are presented in this paper: base – earth bed and base – earth bed – road dressing. The main reasons that lead to the soil slopes stability loss of soil slopes are presented here. Based on the field research results, the embankment soil stress-related characteristics and the earth bed base were determined. Those results became the basis for embankment slope stability mathematical modeling and assessment. In software packages, GeoStab (demo) and Geo5 (educational license), based on the finite element method and the field research

results, digital embankment models were built on a weak foundation. The "earth bed – road dressing" system stability calculation under the standard uniformly distributed load has been performed. Two system strengthening options are proposed to increase its stability: reinforcement with soil anchors and geosynthetic materials. The hypothesis sufficiency about the influence of the pavement road dressing state on the embankment stability was also tested here. Two models of the system and the base – earth bed – road dressing are discussed: without cracks on the track and with cracks on the track. It has been elucidated that coating imperfection affects the system stability only in the presence of medium or larger strength earthquakes. Recommendations for strengthening the embankment slopes operating in difficult soil-geological conditions were given in this article.

Keywords: road; embankment; road dressing; deformation; stress-related characteristics; stress-strain state; designing; the stability of the slope

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

Оценка несущей способности оснований и откосов является важной научно-технической задачей проектирования автомобильных дорог и защитных инженерно-технических сооружений. Устойчивость грунтовых откосов и всех насыпи земляного полотна зависит от физико-механических свойств материалов, которые могут изменяться по действием многих природных и техногенных факторов: интенсивности осадков, влажности материала, сейсмической активности, статического нагрузки (веса насыпи и стоящих транспортных средств), неравномерного динамического воздействия транспортной нагрузки, уровня солнечной радиации и других факторов [1–3].

В настоящее время достигнута высокая степень развития этой области механики грунтов, как в теоретическом плане, так и в сфере математического моделирования [4–8]. Однако остается ряд принципиальных вопросов, решение которых необходимо для дальнейшего развития теории устойчивости и совершенствования практических методов расчета несущей способности грунтовых массивов [9–12].

Одной из таких проблем является обеспечение надежности работы системы «земляное полотно – дорожная одежда» на оттаивающем основании. Актуальной этой проблемы не вызывает сомнения как при проектировании новых автомобильной дороги, так и для уже эксплуатации и реконструкции существующих дорог на многолетнемерзлых грунтах. Важность этого направления в строительстве заключается в том, что большая часть России расположена на территории распространения многолетнемерзлых грунтов, и такие вопросы, как безопасность движения, расширение сети автомобильных и железных дорог, освоение новых районов в сложных геокриологических условиях являются важной стратегической задачей государства¹.

Особенные проблемы устойчивости откосов

Unusual slope stability problems

Автомобильные дороги на многолетнемерзлых грунтах являются уникальными инженерно-техническими сооружениями, работающими в неоднозначных природно-климатических условиях, поэтому все типовые проектные решения необходимо адаптировать под конкретные условия

¹ Вавринюк Т.С. Оценка устойчивости и деформативности земляного полотна железных дорог в условиях распространения мерзлоты. Автореф. дис. канд. техн. наук / МГУПС (МИИТ). – Москва. – 2013. – 24 с.

местности. В инженерных сооружениях, возведённых на многолетнемерзлых грунтах без принятия специальных средств и технологий, возникают недопустимые деформации, которые приводят к быстрому разрушению или к возникновению аварийных состояний [6; 13; 14].

Как известно из опыта отечественных и зарубежных исследований многолетнемерзлые грунты обладают внутренними жесткими льдо-цементными связями, которые при сохранении отрицательной температуры грунтов являются достаточно прочными природными образованиями [15].

Однако при накоплении положительных температур воздуха и грунта структурные льдо-цементные связи быстро разрушаются, грунт переувлажняется талой водой и превращается в разжиженную массу, не способную воспринимать и адекватно перераспределять нагрузку от сооружений, в результате возникают тепловые просадки бывших многолетнемерзлых грунтов (термокарст).

При проектировании земляного полотна автомобильной дороги на многолетнемерзлых грунтах руководствуются следующими принципами:

Сохранение вечномерзлых грунтов в основании земляного полотна в течение всего периода эксплуатации дороги (расчетное состояние грунта основания – мерзлое). Проектирование ведут на особо сложных по мерзлотно-грунтовым условиям участках (3-й тип местности) с низкотемпературной вечной мерзлотой на глинистых сильнопросадочных грунтах с влажностью выше предела текучести. Оттаивание грунта основания не допускается, так как может привести к недопустимым деформациям земляного полотна и разрушению дорожной одежды. Земляное полотно конструируют в насыпях из нецементированных обломочных грунтов с обязательным сохранением в неразрушенном состоянии мохорастительного покрова в основании насыпи и на всей дорожной полосе.

Частичное оттаивание мерзлых грунтов на величину обеспечивающую устойчивость земляного полотна с учетом допустимой осадки покрытия (расчетное состояние грунта основания – мерзлое). Проектирование ведут на сложных по мерзлотно-грунтовым условиям участка (2-й тип местности) с низкотемпературной вечной мерзлотой. При проектировании автомобильных дорог по принципу ограничения глубины оттаивания грунтов основания, исходя из допустимых деформаций, земляное полотно конструируют в соответствии с поперечными профилями. Допускается возводить земляное полотно из местных глинистых грунтов с закладкой сосредоточенных или притрассовых резервов. При этом

запрещается убирать или разрушать мохорастительный покров в основании насыпи.

Как показывает анализ, одной из причин возникновения деформаций откосов земляного полотна являются неточности в проектировании, вызванные применением расчетных методик, не полностью учитывающих особенности процессов теплового и механического взаимодействия земляного полотна и оттаивающего основания [16; 17].

Оценка устойчивости откосов и поверхностей выполняется методом расчета кругло-цилиндрических поверхностей скольжения [1; 2; 18; 19]. Все методы предельного равновесия допускают, что массив грунта над поверхностью скольжения делится на блоки (разделяющие плоскости между блоками всегда вертикальны). На блоки действуют сжимающие E и нормальные X силы, возникающие между блоками, сдвигающие N и нормальные T силы, возникающие внутри блока, а также вес грунта W внутри блока. Принципиальная схема оценки устойчивости откоса насыпи представлена на рисунке 1.

Рисунок 1. Статическая схема участка
поверхности скольжения (разработана автором)

Figure 1. Static sliding surface area diagram (developed by the author)

Схема 1 учитывает только нагрузку от собственного веса насыпи земляного полотна и не учитывает действие статической или динамической нагрузки F от транспортного средства. Так же схема представлена для однородного массива грунтов, что в реальных условиях так же не соответствует действительности. Кроме этого, на эксплуатируемых дорогах состояние грунта земляного полотна и материалов дорожной одежды является не однородным. Часто в верхних слоях покрытия и основания дорожной одежды присутствуют дефекты и деформации, например трещины, которые не позволяют рассматривать верхний слой конструкции как бесконечное полупространство, деля его на несколько элементов

имеющих только весьма условную (не жесткую) связь друг с другом по смежной границе. Модернизированная схема системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда» представлена на рисунке 2.

1 – трещина в покрытии дорожной одежды; 2 покрытие дорожной одежды; 3 – граница низа основания дорожной одежды; 4 – граница основания земляного полотна

1 – the crack in the road dressing; 2 road dressing surfacing; 3 – border-line of the bottom of the road dressing base; 4 – border-line of the subgrade base

Рисунок 2. Реальная сема участка поверхности скольжения при статическом нагружении системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда» (разработана автором)

Figure 2. The real sliding surface area diagram with the system "base – earth bed – road dressing" static loading (developed by the author)

Для снижения количества и протяженности деформаций необходимо решение задачи по оценки длительной устойчивости и деформативности земляного полотна, как при строительстве новых дорог, так и при реконструкции существующего земляного полотна. При этом внутри расчетной методики должен быть заложен механизм, который позволит моделировать напряженно-деформированного состояния системы «земляное полотно – дорожная одежда» опирающейся на грунтовый массив с целью оценки устойчивости и деформативности сооружения, учитывая не только консолидационные процессы, происходящие в оттаивающем основании, но и особенности распределения транспортной нагрузки в конструкции, имеющей поверхностные или внутренние деформации.

Методология получения исходных данных для математической модели

Methodology for obtaining initial data for a mathematical model

Расчет устойчивости насыпи относится к первой группе предельных состояний. Поэтому устойчивость определяется напряженно-деформированным состоянием и прочностью грунтов насыпи. Объемное состояние грунтового массива характеризуется прочностными и физико-механическими характеристиками – модулем деформируемости, удельным весом, удельным сцеплением и углом внутреннего трения [2; 10; 20; 21].

Причинами, приводящими к нарушению устойчивости массивов грунта в откосах, являются:

- утяжеление откоса вследствие увлажнения грунта, т. е. уменьшение удельного сцепления c и угла внутреннего трения ϕ и увеличение удельного веса γ ;
- увеличение крутизны откосов;
- увеличение нагрузки на насыпь;
- уменьшение величины прочностных характеристик грунта тела откоса, вследствие увлажнения поверхностными и грунтовыми или других обстоятельств;
- сейсмическое или динамическое воздействие.

Плотность оказывает влияние на прочность и устойчивость грунтов при одновременных воздействиях на них нагрузок и погодноклиматических факторов. Существуют минимальные значения плотности, которые применительно к типу возведенного на грунтах инженерного сооружения, обеспечивают его удовлетворительную устойчивость грунтов [6; 10; 13]. Эти минимальные значения зависят от климатических условий, типа местности, расположения слоя грунта в насыпи, температурно-влажностных условий окружающей среды и влажности грунта [22].

Рекогносцировочное обследование автомобильной дороги «Виллой» на участке 1015–1035 км выполнялось с целью выявления конструктивных и эксплуатационных особенностей работы системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда», уточнения инженерно-геологических и гидрологических условий, а также определения характера многолетнемерзлых грунтов основания дороги. Уточнение геологических и гидрологических условий выполнялось по скважинам, с последующим определением влажности и вида грунта в лаборатории кафедры

Автомобильные дороги и аэродромы "Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова".

Для проведения исследований грунтов были отобраны грунты в пределах глубины слоя сезонного оттаивания. С целью установления закономерностей устойчивости откосов насыпи при проведении настоящих исследований выполнялось определение физического состояния грунтов.

Результаты исследований гранулометрического состава и физических свойств грунтов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 / Table 1
Определение физико-механических характеристик грунта
Determination of the soil stress-related characteristics

№ No.	По ГОСТ 25100 грунт относится According to GOST 25100, the soil is	Оптимальная влажность, % Optimum humidity, %	Максимальная плотность, кг/м ³ Maximum density, kg/m ³
Грунт №1 Soil No. 1	Супесь пластичная Soft sandy loam	12,46	2,05
Грунт №2 Soil No. 2	Смесь мелкого песка и щебня A fine sand and gravel mixture	12,1	2,14
Грунт №3 Soil No. 3	Песок мелкий Fine sand	11,49	2,06
Грунт №4 Soil No. 4	Песок мелкий Fine sand	12,66	2,35

Разработано автором / Developed by the author

Таблица 2 / Table 2
Результаты исследования гранулометрического состава и название грунтов
The granulometric composition and the name of the soils study results

№ No.	Название образца Sample name	Гранулометрический состав, %, при размере частиц, мм Granulometric composition, %, at particle size, mm								Наименование грунта по ГОСТ 25100-95 Soil name according to GOST 25100-95
		10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1	
1	Грунт №1 Soil No. 1	0,3	0,67	44,92	0,64	8,51	0,42	36,35	8,19	Супесь пластичная Soft sandy loam
2	Грунт №2 Soil No. 2	20,68	3,78	6,54	1,89	5,99	30,87	24,69	5,56	Смесь щебня, мелкого песка и дробленого кирпича A crushed stone, fine sand, and crushed bricks mixture
3	Грунт №3 Soil No. 3	0,32	2,40	2,49	6,68	9,11	47,36	25,69	5,95	Песок мелкий Fine sand
4	Грунт №4 Soil No. 4	0	0,04	0,01	0,28	0,96	49,51	42,32	5,19	Песок мелкий Fine sand

Разработано автором / Developed by the author

Математическое моделирование системы «основание – земляное полотно»

Mathematical modeling of the system "base – earth bed"

Для решения поставленных задач выполнялись теоретические исследования и численное моделирование. Для разработки методики оценки устойчивости откосов насыпи выполнено исследование численным моделированием процесса напряженно-деформированного состояния по методу конечных элементов с применением программных комплексов *GeoStab* (демо) и *Geo5* (учебная лицензия) использующий метод конечных элементов и результаты экспериментальных исследований.

В качестве расчетной модели использовалась насыпь с углом откоса $\alpha = 36^\circ$, нагрузкой $P = 5 \text{ кН/м}^2$ и грунтами, характеристики которых приведены в таблице 2. Все расчеты проводились численным методом, в программном комплексе *Geo5*. Диапазон изменения удельного веса грунта насыпи (песок мелкий) – $\gamma = 16,5 - 18,5 \text{ кН/м}^3$ с шагом 1 кН/м^3 .

Выполнены три серии расчетов для создания линий скольжения и вычисления на них величины расчетного значения коэффициента запаса устойчивости на насыпь ($h = 5,0 \text{ м}$, $b = 10 \text{ м}$, заложении откосов $1:m = 1:1,5$, $R = 14,16 \text{ м}$).

Таблица 3 / Table 3

Физико-механические характеристики грунтов

Soils stress-related characteristics

№ No.	Наименование грунта Soil name	Удельный вес грунта при природной влажности γ , кН/м ³ Actual soil weight at a natural water content γ , kN/m ³	Удельное сцепление грунта при природной влажности, с, кПа Specific soil cohesion at a natural water content, c, kPa	Угол внутреннего трения при природной влажности, ϕ , град Internal friction angle at a natural water content, ϕ , deg	Удельный вес грунта при полном водонасыщении, γ_{sat} , кН/м ³ Actual soil weight at full water saturation, γ_{sat} , kN/m ³
1	Песок мелкий Fine sand	15,0	3,0	28,0	31,0
2	Супесь пластичная Soft sandy loam	18,0	10,0	15,0	20,3

Разработано автором / Developed by the author

Радиус поверхности скольжения определен программой *GeoStab* как критический и составляет $R = 14,16 \text{ м}$. На основе действующих норм проектирования допустимый коэффициент устойчивости откосов насыпи K_u составляет 1,25. Расчет устойчивости представлен на рисунке 3.

Рисунок 3. Результаты оценки устойчивости системы «основание – земляное полотно» ($h = 5,0$ м, $b = 10$ м, $1:m = 1:1,5$) при последовательном моделировании ее возведения (разработано автором)

Figure 3. System "base – earth bed" stability assessing results ($h = 5.0$ m, $b = 10$ m, $1:m = 1:1.5$) in the sequential modeling of its construction (developed by the author)

Расчет коэффициента устойчивости методом Morgenштерна-Прайса, моменты:

$$K_y = \Sigma M_{\text{реакт } i} / \Sigma M_{\text{акт } i} \quad (1)$$

$$K_y = 5729,2 / 5844,5 = 0,980$$

Расчет коэффициента устойчивости методом Morgenштерна-Прайса, силы:

$$K_y = \Sigma F_{x \text{ реакт } i} / \Sigma F_{x \text{ акт } i} \quad (2)$$

$$K_y = 358,0 / 365,2 = 0,980$$

Так как коэффициент устойчивости откоса не соответствует требованиям «ОДМ 218.2.078-2016 Методические рекомендации по выбору конструкции укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог общего пользования», в программе есть методы укрепления откосов, например, использование анкеров для повышения коэффициента устойчивости откосов.

Для получения необходимого коэффициента устойчивости откоса в программе ввел 4 постоянных анкера. Характеристики анкеров

представлены в таблице 4, а результаты моделирования в программе *Geo5* представлены на рисунке 4.

Таблица 4 / Table 4

Параметры анкеров
Anchor parameters

№	Диаметр корня, мм Root diameter, mm	Угол наклона, град Tilt angle, degrees	Свободная длина, м Free length, m	Длина корня, м Root length, m	Усилие, кН Force, kN
1	300	155	2	2	120
2	300	155	2	2	120
3	300	25	2	2	120
4	300	25	2	2	120

Разработано автором / Developed by the author

Рисунок 4. Расположение анкеров на земляном полотне (разработано автором)

Figure 4. Anchors location on the roadbed (developed by the author)

Таблица 5 / Table 5

Вычисленные значения коэффициента устойчивости
Stability coefficient calculated values

Наименование грунта Soil name	Удельный вес, γ_i , кН/м ³ Actual weight, γ_i , kN/m ³	Коэффициент устойчивости, K_u Stability coefficient, K_u	Коэффициент устойчивости с применением постоянных анкеров, K_u Stability coefficient using permanent anchors, K_u	Процент изменения, % Percentage of change, %
Песок мелкий Fine sand	20	0,993	1,312	28
	17	1,012	1,454	30
Супесь пластичная Soft sandy loam	20	0,98	1,517	35
	17	1,024	1,598	36

Разработано автором / Developed by the author

Как видно из таблицы 5, расчеты показали, что применение постоянных анкеров в песок мелкий в качестве армирования увеличивает коэффициент устойчивости на 28 %, а в супесь пластичную – увеличит коэффициент устойчивости на 35 %, что отвечает «ОДМ 218.2.078-2016 Методические рекомендации по выбору конструкции укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог общего пользования». Уменьшение удельного веса приводит к повышению коэффициента общей устойчивости примерно на 1–2 %, что не оказывает большого влияния на общую устойчивость грунта насыпи (таблица 6).

Таблица 6 / Table 6
Вычисленные значения коэффициента устойчивости

Stability coefficient calculated values

№ No.	Удельный вес, γ_i , кН/м ³ Actual weight, γ_i , kN/m ³	Коэффициент устойчивости, K_y Stability coefficient, K_u	Коэффициент устойчивости с применением геосинтетического материала, K_y Stability coefficient using geosynthetic material, K_u	Процент изменения, % Percentage of change, %
Песок мелкий Fine sand	20	1,047	1,603	53
	17	1,098	1,685	54
Суглинок пылеватый Silty loam	20	1,215	1,918	57
	17	1,240	1,992	60

Разработано автором / Developed by the author

Коэффициент устойчивости армированной насыпи при понижении удельного веса по сравнению с неармированной насыпью увеличился на 30 %. Условие устойчивости у супеси пластичной и песка мелкого не выполняется и для неармированной, и для армированной насыпи. Поэтому, если стоит задача повысить коэффициент устойчивости, то не рекомендуется понижать плотность грунта, так как не значительно влияет (2 %) на устойчивость насыпи.

Как видно из таблицы 6, расчеты показали, что применение геосинтетического материала в песок мелкий в качестве армирующего слоя увеличивает коэффициент устойчивости на 53 %, а в суглинок пылеватый – увеличит коэффициент устойчивости на 57 %. Уменьшение удельного веса приводит к повышению коэффициента общей устойчивости примерно на 3 %, что не оказывает большого влияния на общую устойчивость грунта насыпи.

Коэффициент устойчивости армированной насыпи при понижении удельного веса по сравнению с неармированной насыпью увеличился на 46 %. Условие устойчивости у суглинка пылеватого выполняется и для неармированной, и для армированной насыпи, а у песка пылеватого в неармированном состоянии – не выполняется. Поэтому, если стоит задача повысить коэффициент устойчивости, то не рекомендуется понижать

плотность грунта, так как это не значительно влияет (3 %) на устойчивость насыпи.

Математическое моделирование системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда»

Mathematical modeling of the system "base – earth bed – road dressing"

Авторами была выдвинута и проверена гипотеза о том, что наличие дефектов на покрытии (продольных трещин) влияет на устойчивость системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда».

С целью проверки гипотезы модель «основание – земляное полотно» было дополнена двумя эквивалентными слоями дорожной одежды: основание из щебеночно-гравийной смеси толщиной 70 см; покрытие из асфальтобетона толщиной 20 см. Трещины в покрытии дорожной одежды глубиной 40 см, располагаются на крайней полосе наката (1 м от кромки покрытия). Характеристики слоев представлены в таблице 7.

Таблица 7 / Table 7

Физико-механические характеристики материалов эквивалентных слоев дорожной одежды

Stress-related characteristics of the road dressing equivalent layers materials

№	Наименование грунта Soil name	Удельный вес грунта при природной влажности, γ , кН/м ³ Actual soil weight at a natural water content γ , kN/m ³	Удельное сцепление грунта при природной влажности, c , кПа Specific soil cohesion at a natural water content, c , kPa	Угол внутреннего трения при природной влажности, ϕ , град Internal friction angle at a natural water content, ϕ , deg	Удельный вес грунта при полном водонасыщении, γ_{sat} , кН/м ³ Actual soil weight at full water saturation, γ_{sat} , kN/m ³
1	Асфальтобетон Asphalt concrete	23,2	1000	15,0	23,5
2	Щебеночно- гравийная смесь Rubble-gravel mixture	21,0	3	41,5	22,5

Разработано автором / Developed by the author

Схемы расчета устойчивости откоса по Бишопу для системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда» с трещинами в покрытии (на крайней полосе наката) и без них представлены на рисунке 5. Результаты расчетов приведены в таблице 8.

Как видно из данных, представленных на рисунке 7, устойчивость откосов насыпи при расчетной равномерно-распределенной нагрузкой $P = 5 \text{ кН/м}^2$ практически не меняется и не зависит от наличия (отсутствия) дефектов на покрытии дорожной одежды.

а – без дефектов покрытия дорожной одежды; б – со сквозной трещиной в покрытии дорожной одежды

a – no defects in the road dressing surface; b – with a through the crack in the road dressing surface

Рисунок 5. Результаты расчета устойчивости системы
«основание – земляное полотно – дорожная одежда» (разработано автором)

Figure 5. The results of calculating the stability
of the system "base – earth bed – road dressing" (developed by the author)

Дополнительно был выполнен расчет устойчивости системы при землетрясении амплитудой 7 баллов по шкале MCS с фактором горизонтального ускорения $K_h = 0.0150$ и фактором вертикального ускорения $K_v = 0,005$.

а – без дефектов покрытия дорожной одежды; б – со сквозной трещиной в покрытии дорожной одежды

a – no defects in the road dressing surface; b – with a through the crack in the road dressing surface

Рисунок 6. Результаты расчета устойчивости системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда» при землетрясении амплитудой 7 баллов по шкале MCS (разработано автором)

Figure 6. The system "base – earth bed – road dressing" stability calculating results in a 7 points amplitude earthquake on the MCS scale (developed by the author)

Схемы расчета устойчивости откоса по Бишопу для системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда» с трещинами в покрытии и без них представлены на рисунке 6. Результаты расчетов приведены в таблице 8.

Таблица 8 / Table 8

**Результаты оценки устойчивости системы
«основание – земляное полотно – дорожная одежда»**

The system "base – earth bed – road dressing" stability calculating results

№ No.	Радиус, м Radius, m	Коэффициент устойчивости, K_u Stability coefficient, K_u	Коэффициент устойчивости при землетрясении 7 баллов, K_u Earthquake stability coefficient 7 points, K_u	Процент изменения, % Percentage of change, %
Без трещины No crack	<u>9,32</u>	1,27	1,24	- 1
	9,32			
С трещиной With a crack	<u>9,18</u>	1,27	1,24	- 1
	12,62			

Примечание: Радиус в числителе – без землетрясения; в знаменателе – при землетрясении 7 баллов (разработано автором) / Note: Radius in the numerator – no earthquake; in the denominator – for an earthquake of 7 points (developed by the author)

Как видно из данных, представленных в таблице 8 и на рисунке 6, устойчивость откосов насыпи при расчетной равномерно-распределенной нагрузкой $P = 5 \text{ кН/м}^2$ и наличии (отсутствии) землетрясения амплитудой 7 баллов практически не изменяется для системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда» без дефектов покрытия. Однако при наличии сквозной трещины в покрытии дорожной одежды глубиной 40 см, расположенной на крайней полосе наката (1 м от кромки покрытия), критическая (оптимальная) поверхность скольжения смещается от кромки проезжей части к месту расположения трещины. Это факт делает потенциально опасным передвижение или стоянку транспортных средств на участках дорог с дефектами во время землетрясений, так как разрушение (оползание) откосов насыпи возможно непосредственно под транспортным средством.

Конструктивные решения по улучшению устойчивости откосов, представленные в таблицах 5 и 6, так же хорошо подходят для усиления системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда» в независимости от наличия (отсутствия) дефектов покрытия и позволяют обеспечить коэффициент устойчивости для анкерного усиления не менее $K_u = 1,55$ и при укреплении геосинтетическими материалами – не менее $K_u = 1,68$.

Заключение

Conclusion

Вопросы оценки устойчивости насыпей на слабых основаниях всегда являются актуальными для дорожного строительства. Применение средства и методы математического моделирования позволяет на стадии

проектирования учесть множество разнообразных факторов и исключить наиболее часто возникающие ситуации влияющие на устойчивость системы «основание – земляное полотно – дорожная одежда».

Оценка устойчивости откосов систем «основание – земляное полотно» и «основание – земляное полотно – дорожная одежда» показали, что при высоких насыпях (5 м и более) расположенных на слабых талых грунтах необходимо предусматривать мероприятия по комплексному усилению откосов с применением анкерных систем или геосинтетических материалов.

Армирование является наиболее эффективным способом усиления откосов и повышения устойчивости насыпей на слабом основании. Укрепленные материалы и грунты обладают лучшими физико-механическими характеристиками по сравнению с неукрепленными материалами. Использование армирующих конструкций и материалов при возведении земляного полотна увеличивает срок службы и значительно повышает надежность работы насыпи автомобильной дороги как в стандартных условиях работы, так и при среднем уровне сейсмической активности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ревуженко А.Ф.** Механика упруго-пластических сред и нестандартный анализ / А.Ф. Ревуженко. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 426 с.
2. **Хуан Я.Х.** Устойчивость земляных откосов / Я.Х. Хуан. – Перевод с англ. В.С. Забавина; Под ред. В.Г. Мельника. – М.: Стройиздат, 1988. – 235 с.
3. **Desai C.S.** Some aspects of constitute models for geologic media / C.S. Desai // Third International Conference of Numerical Methods in Geomechanics / Ахен: Balkema, 1979. – С. 299–308.
4. **Горшков Н.И.** Особенности оценки устойчивости грунтовых сооружений на основе расчетов МКЭ / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сборник статей научно-технической конференции / СПб.: СПбГАСУ, 2012. – С. 93–105.
5. **Горшков Н.И.** Сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений (выемки и насыпи) на основе МКЭ / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – № 5. – С. 4–11. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17088352> (дата обращения: 09.09.2020).
6. **Федоренко Е.В.** Метод оценки устойчивости путем снижения прочностных характеристик / Е.В. Федоренко // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 6. – С. 24–26. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21051996> (дата обращения: 12.09.2020).

7. **Bellezza, I.** Elastic-Plastic Analysis of Passive Rigid Piles in Cohesionless Soils / I. Bellezza, L. Caferri, M. Di Sante, E. Fratolocchi, F. Mazzieri // Proceedings – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / Сеул: 19th ICSMGE Secretariat, 2017. – С. 2723–2726. – URL: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/45/06-technical-committee-18-tc212-08.pdf> (дата обращения: 12.09.2020).
8. **Deng Dong-ping** Stability Analysis of a Layered Slope with Failure Mechanism of a Composite Slip Surface / Deng Dong-ping, Li Liang, Zhao Lian-heng. – DOI [10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001417](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001417) // International Journal of Geomechanics. – 2019. – Т 19, № 6. – С. 4019050. – URL: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0001417> (дата обращения: 01.09.2020).
9. **Кудрявцев С.А.** Разработка конструкций для укрепления оползневого массива грунта на участке автомобильной дороги «Амур» с использованием современных геосинтетических материалов / С.А. Кудрявцев, Т.Ю. Вальцева, Е.Д. Гончарова. – DOI <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2016.4.11> // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т 7, № 4. – С. 111–122. – URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/788> (дата обращения: 02.09.2020).
10. **Мальцева Т.В.** Математическая теория водонасыщенного грунта / Т.В. Мальцева. – Тюмень: Вектор Бук, 2012. – 240 с.
11. **Balashova Y.** Ensuring the sustainability of the motorway subgrade in the zones of underground mining operations / Y. Balashova, V. Demianenko, N. Tkach, H. Karasev. – DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301041> // E3S Web of Conferences. – 2019. – Т 123. – С. 01041. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/49/e3sconf_usme2019_01041/e3sconf_usme2019_01041.html (дата обращения: 18.09.2020).
12. **Zhang Y.** Analysis and Influence of Salt Content on Stability of Saline Soil Subgrade Slope / Y. Zhang, Z. Qu, L. Yang. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012072> // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 384. – С. 12072. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/384/1/012072> (дата обращения: 20.09.2020).
13. **Варламов С.П.** Тепловое состояние грунтов в зоне влияния железной дороги в Центральной Якутии / С.П. Варламов. – DOI <https://doi.org/10.25587/SVFU.2019.13.27555> // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К.Аммосова. Серия "Науки о Земле". – 2019. – № 1. – С. 36–47. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37198805> (дата обращения: 21.09.2020).
14. **Чжан Р.В.** Геокриологический мониторинг низко- и средненапорных грунтовых плотин в криолитозоне в связи с изменением климата / Р.В. Чжан // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/en/article/view?id=11144> (дата обращения: 17.09.2020).
15. **De Guzman E.M.** Settlement of embankments on peat foundations: Two case studies / E.M. De Guzman, M. Alfaro // Proceedings – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / Сеул: 19th ICSMGE Secretariat, 2017. – С. 1349–1352. – URL: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/45/06-technical-committee-08-tc202-06.pdf> (дата обращения: 22.09.2020).

16. **Zhang O.** Parametric Influences of Stability and Settlement Pattern of Embankment on Slope Foundation / O. Zhang, G. Yang, Y. Zhao, H. Lu, L. Hou. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/560/1/012047> // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – № 560. – С. 12047. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/560/1/012047> (дата обращения: 21.09.2020).
17. **Фоменко И.К.** Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов / И.К. Фоменко // Инженерная геология. – 2012. – № 6. – С. 44–53. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18357845> (дата обращения: 12.10.2020).
18. **Duncan J.M.** Development of Failure around Excavated Slopes / J.M. Duncan, P. Dunlop // Journal of Soil Mechanics & Foundations Division. – 1970. – № SM2. – С. 471–494.
19. **Mei H.** Experimental research on the dynamic response characteristics of the transition subgrade induced by heavy-haul train passage / H. Mei, W. Leng, R. Nie, R. Tu, Y. Li, J. Dong. – DOI <https://doi.org/10.1177/0954409718822924> // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2019. – Т 233, № 9. – С. 974–987. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954409718822924> (дата обращения: 14.10.2020).
20. **Sun Z.** Study on Deformation Evolution of Loess Cutting Slope in Expressway / Z. Sun, Z. Zhao, J. Zhang, K. Yuan, X. Xue. – DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062006> // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 392. – С. 62006. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/392/6/062006> (дата обращения: 14.10.2020).

Сведения об авторах:

Каменчук Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7997-3195>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207104736>

Николаева Гамилия Олеговна – старший преподаватель кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы», ФГБОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск, Россия, e-mail: gamiliya@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-8803>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1091343

Горшков Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 000179@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7493-4541>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1001960

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205436903>

Ловцов Александр Дмитриевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 000260@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5050-466X>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=369459

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57204210499>

Статья получена: 19.11.2020. Принята к публикации: 06.01.2021. Опубликовано онлайн: 20.01.2021.

Грант Президента РФ договор № 075-15-2020-286 (внутренний номер МК-511.2020.8)

REFERENCES

1. Revuzhenko A.F. [Mechanics of elastic-plastic media and non-standard analysis]. Novosibirsk: Novosibirsk University Publishing House; 2000. (In Russ.).
2. Khuan Ya.Kh. [Stability of earthen slopes]. Moscow: Stroyizdat; 1988. (In Russ.).
3. Desai C.S. Some aspects of constitute models for geologic media. In: *Third International Conference of Numerical Methods in Geomechanics, 2–6 April 1979*. Aachen: Balkema; 1979. p. 299–308.
4. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. [Features of the assessment of the stability of soil structures based on FEM calculations]. In: *[Numerical calculation methods in practical geotechnics: collection of articles of scientific and technical conference]*. Saint Petersburg: SPbGASU; 2012. p. 93–105. (In Russ.).
5. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. The comparative estimate of mode of deformation of ground structures (cutting and embankment) on the basis of finite element method. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2011; (5): 4–11. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17088352> (accessed 9th September 2020). (In Russ.).
6. Fedorenko Ye.V. Methods of calculation of stability by reducing strength. *Transport of the Russian Federation. A magazine of science, economy and practice*. 2013; (6): 24–26. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21051996> (accessed 12th September 2020). (In Russ.).
7. Bellezza, I., Caferri, L., Di Sante, M., Fratolocchi, E. & Mazzieri, F. Elastic-Plastic Analysis of Passive Rigid Piles in Cohesionless Soils. In: *Proceedings – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Seoul: 19th ICSMGE Secretariat; 2017. p. 2723–2726. Available at: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/45/06-technical-committee-18-tc212-08.pdf> (accessed 12th September 2020). (In Eng.).
8. Deng Dong-ping, Li Liang, Zhao Lian-heng Stability Analysis of a Layered Slope with Failure Mechanism of a Composite Slip Surface. *International Journal of Geomechanics*. 2019; 19(6): 4019050. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001417](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001417).
9. Kudriavtsev S.A., Val'tseva T.I., Goncharova E.D. The development of structures for strengthening of sliding slopes from highway “Amur” with using of modern geosynthetic materials. *Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2016; 7(4): 111–122. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2016.4.11>.
10. Mal'tseva T.V. [Mathematical theory of water-saturated soil]. Tyumen: Vector Book; 2012. (In Russ.).
11. Balashova Y., Demianenko V., Tkach N., Karasev H. Ensuring the sustainability of the motorway subgrade in the zones of underground mining operations. *E3S Web of Conferences*. 2019; 123: 01041. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301041>.
12. Zhang Y., Qu Z., Yang L. Analysis and Influence of Salt Content on Stability of Saline Soil Subgrade Slope. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; (384): 12072. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012072>.
13. Varlamov S.P. The Soil Thermal Properties in The Impact Zone of Railway in Central Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series "Earth Sciences"*. 2019; (1): 36–47. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25587/SVFU.2019.13.27555>.

14. Chzhan R.V. Geocryological Monitoring of Low-And Medium-Head Embankment Dams on Permafrost in Vie of Climatic Change. *Modern problems of science and education*. 2013; (6) Available at: <http://www.science-education.ru/en/article/view?id=11144> (accessed 17th September 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
15. De Guzman E.M., Alfaro M. Settlement of embankments on peat foundations: Two case studies. In: *Proceedings – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Seoul: 19th ICSMGE Secretariat; 2017. p. 1349–1352. Available at: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/45/06-technical-committee-08-tc202-06.pdf> (accessed 22nd September 2020). (In Eng.).
16. Zhang O., Yang G., Zhao Y., Lu H., Hou L. Parametric Influences of Stability and Settlement Pattern of Embankment on Slope Foundation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; (560): 12047. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/560/1/012047>.
17. Fomenko I.K. Current Trends in Slope Stability Calculations. *Engineering Geology*. 2012; (6): 44–53. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18357845> (accessed 12th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
18. Duncan J.M., Dunlop P. Development of Failure around Excavated Slopes. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division*. 1970; (SM2): 471–494. (In Eng.).
19. Mei H., Leng W., Nie R., Tu R., Li Y., Dong J. Experimental research on the dynamic response characteristics of the transition subgrade induced by heavy-haul train passage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019; 233(9): 974–987. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409718822924>.
20. Sun Z., Zhao Z., Zhang J., Yuan K., Xue X. Study on Deformation Evolution of Loess Cutting Slope in Expressway. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; (392): 62006. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062006>.

Information about the authors:

Aleksey V. Kamenchukov – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 006641@pnu.edu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7997-3195>
PIHII: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207104736>

Gamilia O. Nikolaeva – North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia, e-mail: gamiliya@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-8803>
PIHII: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1091343

Nikolay I. Gorshkov – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 000179@pnu.edu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7493-4541>
PIHII: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1001960
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205436903>

Alexander D. Lovtsov – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 000260@pnu.edu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5050-466X>
PIHII: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=369459
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57204210499>

Submitted: 19th November 2020. Revised: 6th January 2020. Published online: 20th January 2020.

Grant of the President of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2020-286 (internal number MK-511.2020.8)