

УДК 69

DOI 10.21661/r-464080

*С.Я. Луцкий, И.А. Артюшенко*

## **АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОСАДОЧНОГО ОСНОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**

*Аннотация:* в статье представлен анализ теории и практики расчета несущей способности земляного полотна в условиях вечномерзлых грунтов на примере Северно-Широтного Хода. Показаны расчеты коэффициентов стабильности и надежности земляного полотна в сложных природных условиях.

*Ключевые слова:* стабильность, устойчивость, вечная мерзлота, земляное полотно, интенсивная технология.

*S.Ya. Lutsky, I.A. Artyushenko*

## **ANALYSIS OF THE BEARING CAPACITY OF THE SUBSIDENCE BASE OF THE ROADBED ON THE PERMAFROST SOIL**

*Abstract:* the article presents an analysis of the theory and practice of calculating the bearing capacity of the roadbed in conditions of permafrost soils using the example of the North-Latitudinal Railway. Calculations of the stability coefficient and the safety factor of the roadbed in difficult natural conditions are shown.

*Keywords:* stability, sustainability, permafrost, roadbed, intensive technology.

Актуальность темы обусловлена ростом строительства объектов в зоне распространения мерзлых грунтов, связано это с уникальными природными условиями в данной местности. Обеспечение устойчивости на просадочных основаниях является одной из мало изученных проблем безопасности эксплуатации сооружения. В теории основное внимание ученых занимающихся данной проблемой направлено на совершенствование конструкции и эксплуатационной надежности земляных сооружений. В сложных природных условиях строительства объектов путей сообщений на севере особенно важен выбор технологических решений, обеспечивающих надежность сооружений.

**Цель:** анализ несущей способности основания земляного полотна на участках с многолетнемерзлыми грунтами и выбор инженерного решения для повышения основных характеристик грунтов основания.

*Постановка задачи.* В данной статье мы рассмотрим участок перегона Ивлевский – Тальников железнодорожной линии Салехард – Надым, где преобладают многолетнемерзлые грунты и глинистые грунты с повышенной влажностью.

Проектирование земляного полотна выполнено в соответствии с действующими нормативными документами СТН Ц-01–95, СП 32–104–98, используя типовые поперечные профили, разработанные в составе проектной документации «Строительство новой железнодорожной линии «Салехард – Надым», выполненной ООО «Транспроект».

Минимальная ширина земляного полотна из дренирующих грунтов на прямых участках пути принята в соответствии с табл. 9 СТН Ц-01–95 шириной 6,60 м (защитный слой из дренирующего грунта) [7].

В зависимости от инженерно-криологических условий ширина насыпи уточняется. На таких участках насыпь сооружается с запасом на осадку и оттаявание как самого тела земляного полотна, так и его основания.

На основании предварительных инженерно-криологических данных, от 50% до 60% протяженности вариантов трассы расположены на участках с наличием высокотемпературной мерзлоты с островным характером распространения.

Для отсыпки земляного полотна возможно использование следующих грунтов:

- на сухих местах – песок пылеватый. Защитный слой (гравийно-галечниковый грунт) в верхней части ЗП предусматривается толщиной 1,0 М. Под низ защитного слоя укладывается нетканый геотекстиль. Заложение откосов насыпи 1:1,75;
- на участках подтопления, болотах и в выемках: песок средней крупности.

Защитный слой (гравийно-галечниковый грунт) в верхней части ЗП предусматриваем толщиной 0,20 м. Под низ защитного слоя укладывается нетканый геотекстиль. Заложение откосов насыпи 1:1,2.

Для уменьшения эксплуатационных затрат и безаварийной работы земляного полотна и верхнего строения пути выполнены следующие конструктивные решения:

– создание защитного подбалластного слоя (верхний защитный слой) из подобранных гранулометрического состава с применением полимерных и геосинтетических материалов, обеспечивающих требуемую прочность грунтов основной площадки, снижение деформативности пути. Данный слой выполняет функцию несущего элемента;

– создание защитного слоя из непучинистых грунтов для исключения процессов пучения (нижний защитный слой) грунтов тела земляного полотна, сложенного пылеватыми и глинистыми грунтами. Данный слой выполняет функцию ограничение процессов пучения грунтов тела насыпи и основания;

– усиление земляного полотна бермами по устойчивости на участках со слабыми и неустойчивыми грунтами в основании земляного полотна. Для уменьшения объемов земляных работ на отдельных участках совместно с бермами по устойчивости предусмотрено усиление тела насыпи высокопрочным геотекстилем, укладываемым в основание земляного полотна.

На участках с высокотемпературной мерзлотой для уменьшения термокарстовых процессов в основании насыпи предусматривается обжатие мохово-растительного слоя толщиной 0,20 м. На остальных участках предусмотрена срезка мохово-растительного слоя (0,20 м).

Укрепление откосов выполняется травопосевом (районированными семенами) по торфо-песчаной смесью толщиной 0,20 м.

Исходный вид земляного полотна предложен в проектной документации, но в данной статье мы рассмотрим не усиление земляного полотна за счет отсыпки

берм, а усиление грунтов основания за счет применения интенсивной технологии, так как это менее трудоемкая, более скоро временная и относительно дешевая технология.

### *Анализ деформативности оснований и устойчивости насыпей*

Таблица 1

#### Физико-механические характеристики грунтов основания

Описание инженерно-геологического элемента	Показатель	Влажность естественная $W_e$ , д.е.	Плотность			Пластичность			Показатель текучести $I_L$ (д.е.)	Модуль деформации $E$ , МПа	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , град
			частич грунта $P_s$ (г/см <sup>3</sup> )	влажн. грунта $P_r$ (г/см <sup>3</sup> )	сухого грунта, $P_d$ (г/см <sup>3</sup> )	на гр. текуч. $W_L$ (д.е.)	на гр. раскат. $W_p$ (д.е.)	число пласт $I_p$ (д.е.)				
Сугли- нок мяг- кокла- стичный	нормативное значение	0,300	2,69	2,03	1,85	0,34	0,19	0,15	1,28	10,00	0,018	17

Необходимо произвести расчеты по формулам из учебного пособия «Расчеты и проектирование железнодорожного пути» под редакцией д-ра тех. наук, проф. Виноградова В. В [5].

Расчет нагрузок деятельного слоя и насыпи, соответственно:

$$P_{\text{д.с.}} = \gamma_{\text{д.с.}} \times h_{\text{д.с.}} = 19,4 \times 1,06 = 20,564 \text{ кН/м}^2,$$

где  $\gamma_{\text{д.с.}}$  – удельный вес деятельного слоя;

$h_{\text{д.с.}}$  – мощность деятельного слоя.

$$P_{\text{нас}} = \gamma_{\text{нас}} \times h_{\text{нас}} = 18,5 \times 3,4 = 64,6 \text{ кН/м}^2,$$

где  $\gamma_{\text{нас}}$  – удельный вес насыпи;

$h_{\text{нас}}$  – мощность насыпи.

$$P_{\text{кр}}^{\text{д.с.}} = \frac{\pi(\gamma h + C_{\text{д.с.}} \times \operatorname{ctg} \varphi_{\text{д.с.}})}{\operatorname{ctg} \varphi_{\text{д.с.}} + \varphi_{\text{д.с.}} - \frac{\pi}{2}} + \gamma h = \frac{3.14 \times 18 \times 3.27}{3.27 + 0.296 - 1.57} = 73.312 \text{ кН/м}^2,$$

где  $C_{\text{д.с.}}$  – сцепление деятельного слоя;

$\varphi_{\text{д.с.}}$  – угол внутреннего трения деятельного слоя.

Примечание: так как мы рассматриваем точку в самой вершине деятельного слоя, то  $h_{\text{д.с.}}=0$ , а, исследовательно, и произведение  $\gamma h = 0$ , поэтому они и пропадут в расчете критической нагрузки на деятельный слой.

$$\begin{aligned} P_{\text{кр}}^{\text{T}} &= \frac{\pi(\gamma h + C_{\text{т}} \times \operatorname{ctg} \varphi_{\text{т}})}{\operatorname{ctg} \varphi_{\text{т}} + \varphi_{\text{т}} - \frac{\pi}{2}} + \gamma h = \frac{3,14 \times (19,4 \times 1,06 + 11 \times 5,14)}{5,14 + 0,192 - 1,57} \\ &= 64,386 \text{ кН/м}^2 \end{aligned}$$

Примечание: для вычисления  $\operatorname{ctg}$  необходимо брать угол  $\varphi$  в градусах, а для арифметических операций необходимо угол переводить в радианы.

Расчет эксплуатационных нагрузок на деятельный слой и талик, соответственно [5]:

$$P_{\mathfrak{D}}^{\text{д.с.}} = P_{\text{тр}} + P_{\text{ВСП}} + P_{\text{нас}} = 18,7 + 1,84 + 64,6 = 86,14 \text{ кН/м}^2$$

$$P_{\mathfrak{D}}^{\text{T}} = P_{\text{тр}} + P_{\text{ВСП}} + P_{\text{нас}} + P_{\text{д.с.}} = 17,93 + 1,312 + 64,6 + 31,43 = 115,27 \text{ кН/м}^2$$

Расчет нагрузок от подвижного состава и от ВСП производится по формуле [5]:

$$\sigma_{\text{всп/тр}} = I_{\text{всп/тр}} \times P_{\text{всп/тр}}$$

где  $\sigma_{\text{всп/тр}}$  – напряжение от ВСП/подвижного состава ( $\text{kH/m}^2$ );  $P_{\text{всп/тр}}$  – нагрузка от ВСП/ подвижного состава, действующие на основание насыпи ( $\text{kH/m}^2$ );  $I_{\text{всп/тр}}$  – табулированное (вспомогательное) число, зависящее от ширины прикладываемой нагрузки  $b_{\text{всп/тр}}$  (м) и глубины расположения слоя основания  $y_{\text{всп/тр}}$ . (м).

Значения  $I_{\text{всп/тр}}$  мы получаем при помощи интерполяции значений приложения 5 данного учебного пособия, отталкиваясь от значений отношения  $\frac{y_{\text{всп/тр}}}{b_{\text{всп/тр}}}$ .

Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2

*Значения напряжений от внешних эксплуатационных нагрузок по глубине*

$Y_{\text{всп/тр}}$ , м	Точки сеч-я	$Y_{\text{тр}}/b_{\text{тр}}$	$Y_{\text{всп}}/b_{\text{всп}}$	$I_{\text{тр}}$	$I_{\text{всп}}$	$\sigma_{\text{тр}}, \text{kH}/\text{m}^2$	$\sigma_{\text{всп}},\text{ kH/m}^2$
0	1	0	0	1	1	110	16
3,4	2	2,236842	0,94444444	0,170	0,090	18,7	1,84

3,79	3	2,493421	1,05277777	0,163	0,082	17,93	1,312
5,29	4	3,480263	1,46944444	0,112	0,080	12,32	1,28
9,89	5	6,506578	2,74722222	0,100	0,077	11	1,232
Pвсп	16		Нагрузка от ВСП				
Pп	110		нагрузка от подвижного состава				
bп	1,52		ширина нагрузки от подвижного состава (ширина колеи в РФ 1520 мм или 1,52 м)				
bвсп	3,6		ширина нагрузки от верхнего строения пути (из проекта)				

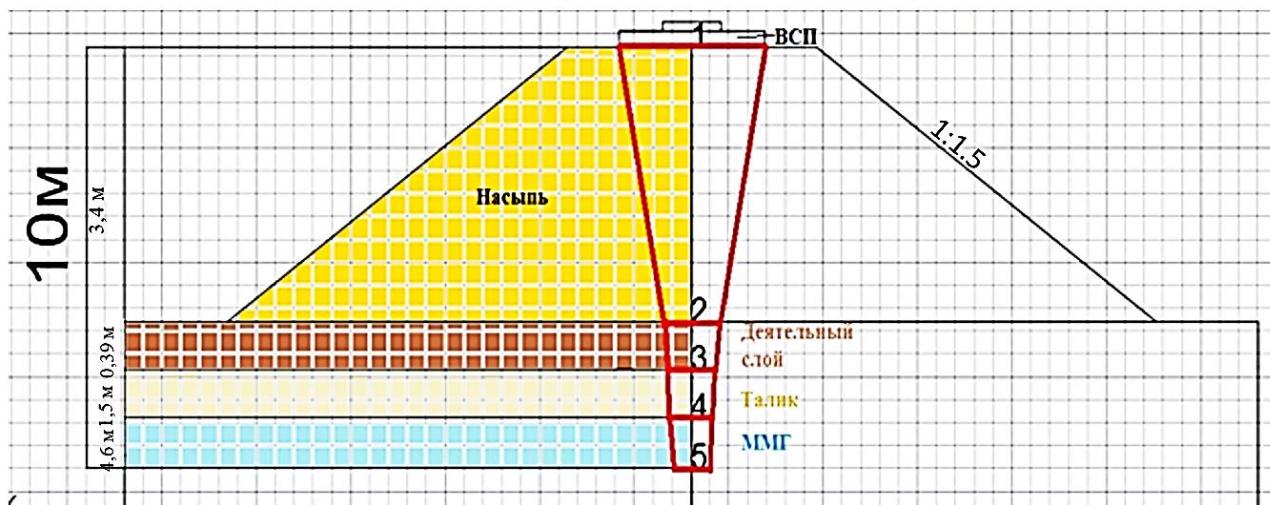


Рис. 1. Эпюра напряжений от ВСП

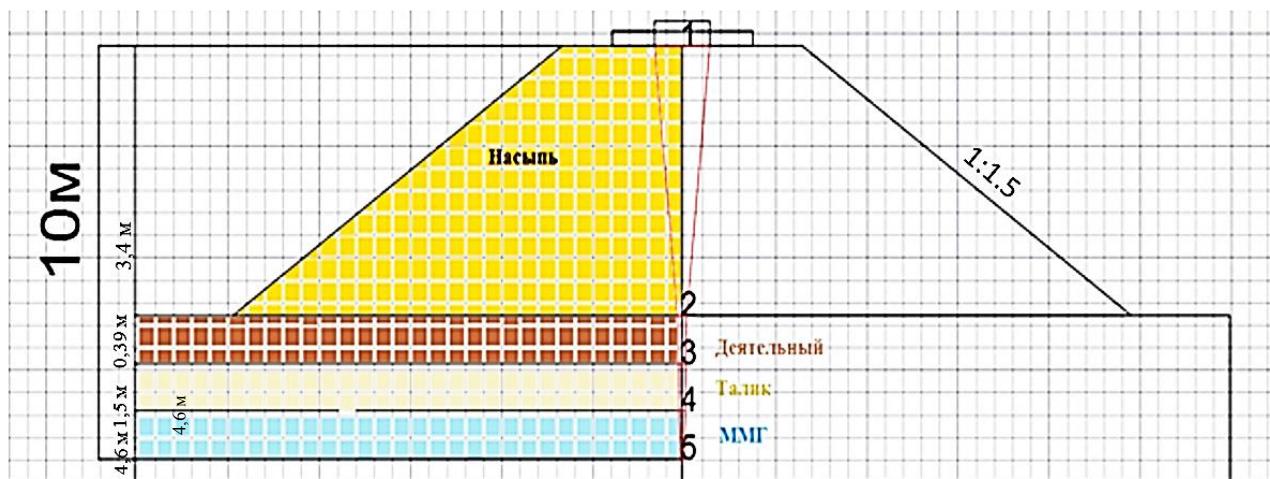


Рис. 2. Эпюра напряжений от транспортной нагрузки

*Расчет коэффициентов безопасности:*

Коэффициент безопасности деятельного слоя [3]:

$$K_{\text{без}}^{\text{Д.С.}} = \frac{P_{\text{кр}}^{\text{Д.С.}}}{P_3^{\text{Д.С.}}} = \frac{73,312}{86,14} = 0,851,$$

где  $K_{без}^{\partial.c.}$  – коэффициент безопасности деятельного слоя,  $P_{kp}^{\partial.c.}$  – критическая нагрузка, воспринимаемая деятельным слоем ( $\kappa H / m^2$ ),  $P_{\exists}^{\partial.c.}$  – эксплуатационная нагрузка, действующая на деятельный слой ( $\kappa H / m^2$ ).

Коэффициент безопасности талика [3]:

$$K_{без}^T = \frac{P_{kp}^T}{P_{\exists}^T} = \frac{64,386}{115,27} = 0,55,$$

где  $K_{без}^m$  – коэффициент безопасности талика;  $P_{kp}^m$  – критическая нагрузка, воспринимаемая таликом ( $\kappa H / m^2$ );  $P_{\exists}^m$  – эксплуатационная нагрузка, действующая на талик ( $\kappa H / m^2$ ).

После расчета вручную мы проверяем ту же насыпь в программных комплексах «GEO5» и «Plaxis».

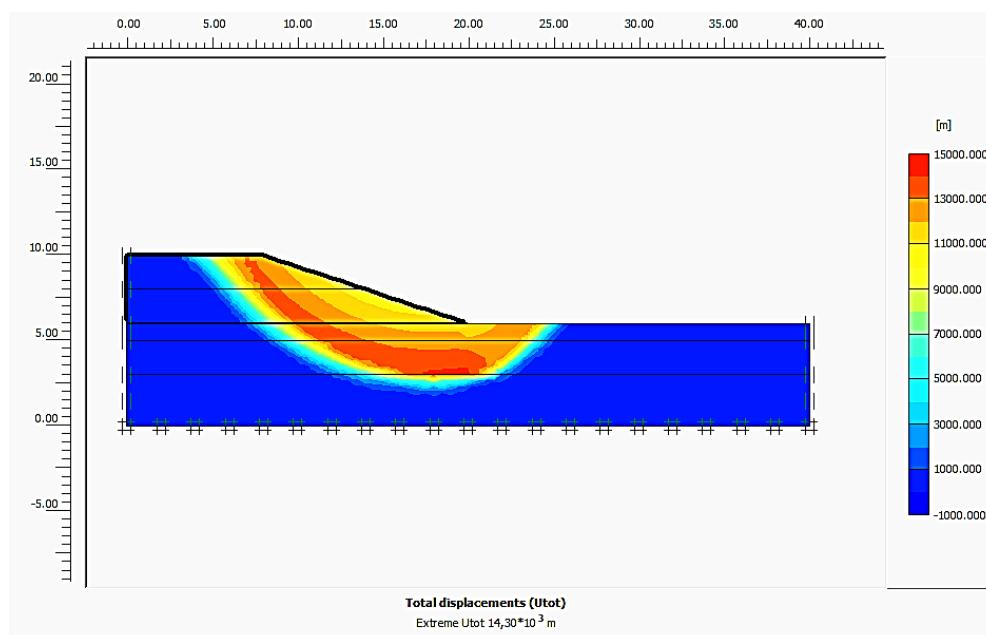


Рис. 3. Расчет смещения земляного полотна в программном комплексе Plaxis

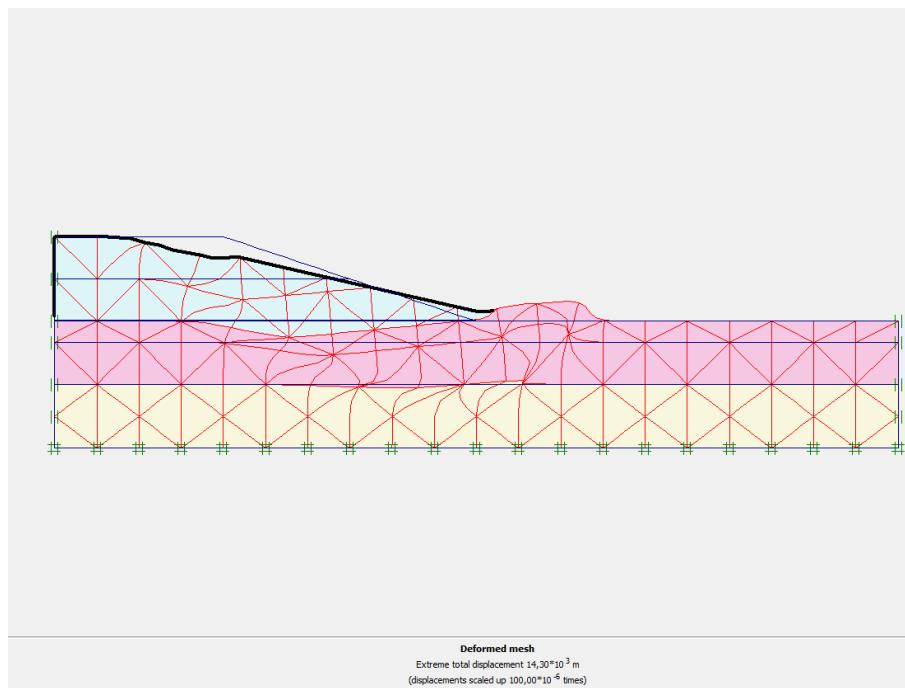


Рис. 4. Деформированное состояние насыпи показанное в программном комплексе Plaxis

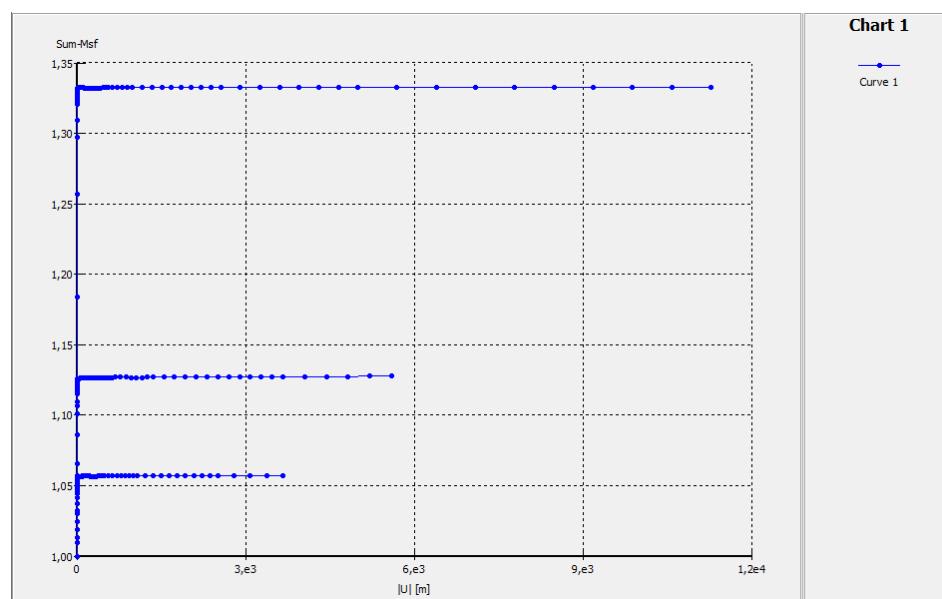


Рис. 5. Изменение коэффициента стабильности со временем после процесса консолидации

## Calculation information

Step Info	
Step	346 of 346
Plastic STEP	Extrapolation factor Relative stiffness
<b>Multipliers</b>	
Prescribed displacements	Incremental multipliers Mdisp: 0,000
Load system A	$\Sigma$ -Mdisp: 1,000 MloadA: 0,000
Load system B	$\Sigma$ -MloadA: 1,000 MloadB: 0,000
Soil weight	$\Sigma$ -MloadB: 1,000 Mweight: 0,000
Acceleration	$\Sigma$ -Mweight: 1,000 Maccel: 0,000
Strength reduction factor	$\Sigma$ -Maccel: 0,000 Msf: 0,000
Time	$\Sigma$ -Msf: 1,333 Increment: 0,000
Dynamic time	End time: 733,067 Increment: 0,000
Total multipliers	
	End time: 0,000

Print

OK

Рис. 6. Расчет коэффициента стабильности в программном комплексе Plaxis

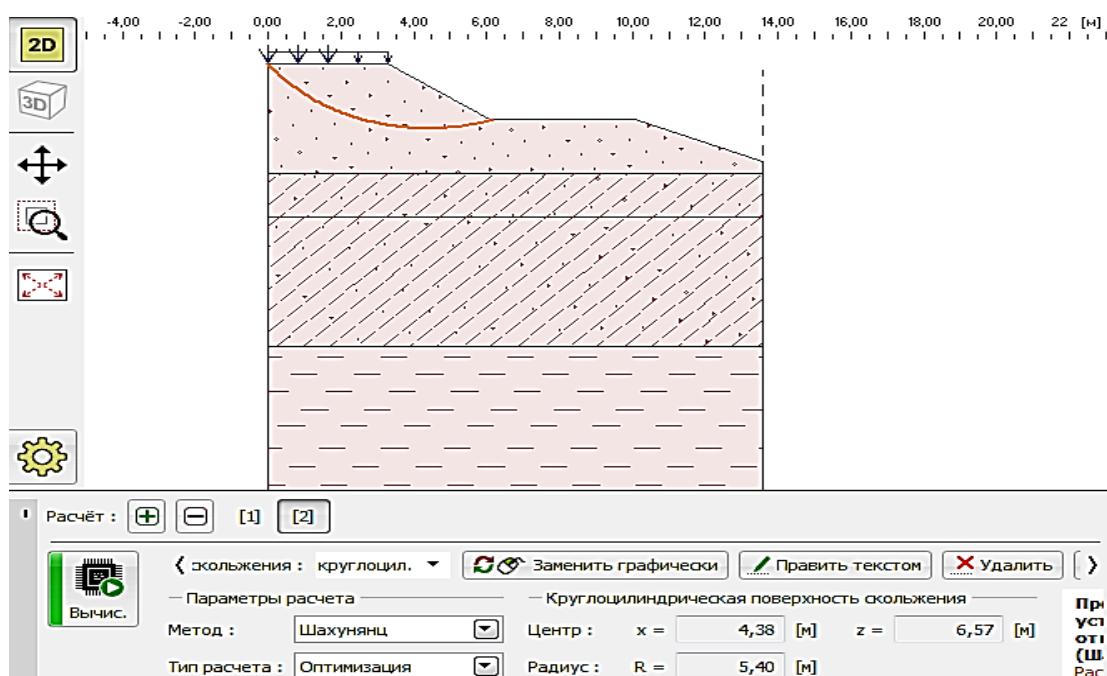


Рис. 7. Расчет коэффициента устойчивости в программном комплексе GEO5

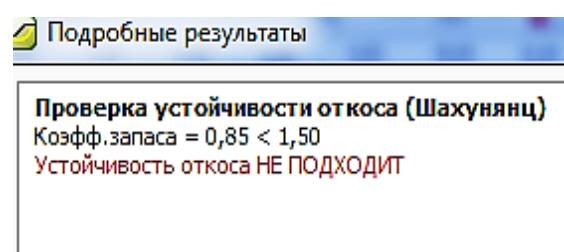


Рис. 8. Расчет Коэффициента устойчивости в программе GEO5

**Вывод.** Проведя данные расчеты, отталкиваясь от показателей коэффициентов безопасности, можем сделать вывод, что данное основание не является безопасным для возведения и эксплуатации насыпи на данном участке. Следовательно, требуется упрочнение грунтов основания методом применения интенсивной технологии.

### ***Список литературы***

1. Ведомственные строительные нормы ВСН 61–89 «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты» (утв. Приказом Министерства транспортного строительства СССР от 20.07.1989 N MO 437).
2. Ведомственные строительные нормы ВСН 84–89 «Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты» (утв. письмом Министерства транспортного строительства от 13 марта 1989 г. N АВ-110)
3. Луцкий С.Я. Рекомендации по интенсивной технологии и мониторингу строительства земляных сооружений на слабых основаниях / Под общ. редакцией С.Я. Луцкого – М.: Тимр, 2005. – 96 с.
4. Луцкий С.Я. Строительство путей сообщения на Севере / С.Я. Луцкий, Т.В. Шепитько [и др.]. – М.: ЛАТМЭС, 2009. – 286 с.
5. Расчёты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. трансп. / В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева [и др.]; под ред. В.В. Виноградова, А.М. Никонова. – М.: Маршрут, 2003. – 486 с.
6. Свод правил СП 25.13330.2012 «СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88 (утв. приказом Министерства регионального развития РФ от 29 декабря 2011 г. №622).
7. СТН Ц-01–95. Строительно-технические нормы Министерства путей сообщения Российской Федерации. Железные дороги колеи 1520 мм. – М., 1995.

**Луцкий Святослав Яковлевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Проектирование и строительство железных дорог» ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Россия, Москва.

**Lutsky Svyatoslav Yakovlevich** – doctor of technical sciences, professor of “Design and construction of Railways” Department at the Russian University of Transport, Russia, Moscow.

**Артюшенко Игорь Александрович** – аспирант кафедры «Проектирование и строительство железных дорог» ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Россия, Москва.

**Artyushenko Igor Alexandrovich** – postgraduate of the “Design and construction of Railways” Department at the Russian University of Transport, Russia, Moscow.

---