

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.41:626.823

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-2-291-317

**Моделирование устойчивости откосов
насыпи магистрального канала**

**Виктория Федоровна Талалаева¹, Олег Андреевич Баев²,
Александр Юрьевич Гарбуз³**

^{1, 2, 3}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹vika-silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

²oleg-baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

³A.Y.Garbuz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1503-7300>

Аннотация. Цель: оценка устойчивости откосов участков насыпей магистрального канала с использованием упрощенной аналитической методики и результатов численного моделирования в программном комплексе GEO5. **Материалы и методы.** В работе рассмотрены пять характерных участков канала, различающихся геометрией насыпи, физико-механическими свойствами грунтов тела насыпи и защитной каменной наброски. Применена аналитическая методика, позволяющая получить решение для коэффициента устойчивости откосов. Для сравнения результатов выполнено численное моделирование в программном комплексе «GEO5 Устойчивость откоса» с определением коэффициента устойчивости по шести различным методам (Бишопа, Феллениуса – Петерсона, Спенсера и др.). **Результаты.** Аналитическим и численным методами установлено, что наибольший запас устойчивости характерен для третьего и четвертого участков ($K_{уст}$ до 1,95), тогда как откосы первого, второго и пятого находятся в состоянии, близком к предельному равновесию ($K_{уст} \approx 1,0–1,1$). Выявлено, что устройство на магистральных каналах каменной наброски без геотекстильного слоя приводит к снижению коэффициента устойчивости на всех участках, так как в этом случае наброска действует как дополнительная нагрузка, увеличивая сдвигающие силы, а не как армирующий элемент. Расхождение в результатах аналитического решения и численного моделирования не превысило 3 %, при этом метод Феллениуса – Петерсона показал наиболее низкие значения. **Выводы.** Упрощенная аналитическая методика подтвердила свою адекватность для предварительной оценки и выявления зон с недостаточной устойчивостью. Для обеспечения нормативного коэффициента устойчивости ($K_{уст} \geq 1,25$) на опасных участках каналов рекомендуется увеличить заложение откосов, скорректировать параметры наброски, применять геотекстильные материалы для армирования, что позволит компенсировать негативное влияние крутизны и веса защитного слоя, обеспечить совместную работу элементов конструкции и предотвратить разрушение откосов.

Ключевые слова: магистральный канал, грунтовая насыпь, устойчивость откоса, каменная наброска, геотекстиль, численное моделирование

Источник финансирования: субсидии на выполнение государственного задания № 082-00063-26 ПР за счет средств федерального бюджета.

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов

«Актуальные научные исследования в области мелиорации и гидротехники» (г. Новочеркасск, 28 мая 2026 г.).

Для цитирования: Талалаева В. Ф., Баев О. А., Гарбуз А. Ю. Моделирование устойчивости откосов насыпи магистрального канала // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 2. С. 291–317. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-291-317>.

HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

Modeling the earthfill slope stability of the main canal

Viktoria F. Talalaeva¹, Oleg A. Baev², Alexander Yu. Garbuz³

^{1, 2, 3}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹vika-silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

²oleg-baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

³A.Y.Garbuz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1503-7300>

Abstract. Purpose: to assess the stability of the earthfill slopes of the main canal sections using a simplified analytical methodology and the results of numerical modeling in the GEO5 software package. **Materials and methods.** The paper considers five typical canal sections, differing in the earthfill geometry, the physico-mechanical soil properties of the earthfill body and the protective rockfill. An analytical technique has been applied to obtain a solution for the slope stability coefficient. To compare the results, numerical modeling was performed in the GEO5 Slope Stability software package with the determination of the stability coefficient using six different methods (Bishop, Fellenius – Petterson, Spencer, etc.). **Results.** Analytical and numerical methods have established that the largest overstability is typical for the third and fourth sections (stability coefficient up to 1.95), while the slopes of the first, second and fifth are in a state close to the limit equilibrium (stability coefficient ≈ 1.0 – 1.1). It is revealed that the arrangement of a rockfill on the main canals without a geotextile layer leads to a decrease in the stability coefficient in all areas, since in this case the rockfill acts as an additional load, increasing shearing forces, and not as a reinforcing element. The discrepancy in the results of the analytical solution and numerical modeling did not exceed 3 %, while the Fellenius – Petterson method showed the lowest values. **Conclusions.** The simplified analytical methodology has confirmed its adequacy for a preliminary assessment and identification of areas with insufficient stability. To ensure a normative stability coefficient (stability coefficient ≥ 1.25) in dangerous sections of canals, it is recommended to increase the laying of slopes, adjust the rockfill parameters, use geotextile materials for reinforcement, which will compensate for the negative impact of the steepness and weight of the protective layer, ensure the joint operation of structural elements and prevent the destruction of slopes.

Keywords: main canal, earthfill, slope stability, rockfill, geotextile, numerical modeling

Funding source: subsidies for the implementation of State Assignment No. 082-00063-26 PR are from the federal budget.

Evaluation of the research results: the fundamental principles of the article were reported at the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists “Current Scientific Research in the Field of Land Reclamation and Hydraulic Engineering” (Novocherkassk, May 28, 2026).

For citation: Talalaeva V. F., Baev O. A., Garbuz A. Yu. Modeling the earthfill slope stability of the main canal. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(2): 291–317. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-291-317>.

Введение. Обеспечение устойчивости откосов насыпей гидротехнических сооружений является одной из ключевых задач. Особую актуальность эта проблема приобретает для протяженных линейных объектов, таких как магистральные и распределительные каналы в насыпях, где локальная потеря устойчивости может привести к катастрофическим последствиям и значительным экономическим потерям [1–3].

Так, согласно ГОСТ 27751-2014¹, ОДМ 218.2.068-2016² строительные объекты должны удовлетворять требованиям (критериям), соответствующим предельным состояниям. К первой группе предельных состояний относятся состояния, приводящие земляное полотно и его основание к полной непригодности для эксплуатации и вызванные потерей устойчивости откосов и несущей способности земляного полотна или же его основания [4].

Одной из наиболее распространенных конструкций при возведении каналов различного назначения (мелиоративных, водопроводящих, рыбоходных и др.) является грунтовая насыпь. Использование местных грунтов при строительстве насыпей экономически целесообразно, но сопряжено с рядом инженерно-геологических проблем, среди которых ключевое место занимает обеспечение длительной и надежной устойчивости откосов [5]. Устойчивость в основном определяется углом внутреннего трения и зависит от влажности и плотности грунта, а ее снижение проявляется в виде оползания, осыпания, размыва берм и дна каналов, что влечет за собой аварийные ситуации, потерю водных ресурсов, в т. ч. через противофильтрационные экраны, нарушение функционирования гидротехнического сооружения [6–8].

Устойчивость откоса грунтовой насыпи определяется балансом между

¹ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.

²Рекомендации по учету динамического воздействия от современных транспортных средств при расчетах прочности, устойчивости и деформативности земляного полотна: ОДМ 218.2.068-2016. М.: Росавтодор, 2019. 42 с.

сдвигающими и удерживающими силами, а для материалов насыпей, не обладающих структурным сцеплением, этот баланс крайне чувствителен к изменению внешних условий и внутренних параметров³. Процессы, оказывающие влияние на потерю устойчивости откосов каналов, с учетом данных В. Е. Левкевича, М. А. Бандурина, А. А. Ткачева, С. В. Сольского и др. [4, 9–11], можно систематизировать по ключевым группам (рисунок 1).



Рисунок 1 – Процессы, оказывающие влияние на устойчивость откосов каналов
Figure 1 – Processes affecting the canal slope stability

Потеря устойчивости откосов насыпей каналов редко обусловлена одним фактором, так как чаще наблюдается кумулятивный эффект, например, эрозия подошвы откоса снижает общую устойчивость, а сработка уровня воды инициирует последующее оползание.

³Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84: СП 39.13330.2012: утв. Минрегионом России 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. М.: Минрегион России, 2013. 60 с.

К наиболее распространенным факторам, влияющим на устойчивость насыпей каналов различного назначения, относятся следующие [7, 12, 13]:

- тип и свойства используемого в составе дамбы канала грунта (угол внутреннего трения и сцепления). Так, например, для сыпучих грунтов устойчивость обеспечивается при условии, что угол заложения откоса не превышает угол внутреннего трения;

- гранулометрический состав грунтов, который оказывает наибольшее влияние на устойчивость откоса к размыву и воздействию фильтрационных процессов на каналах;

- гидрологические факторы: уровень грунтовых вод, глубина воды в канале (оказывают повышенное влияние на поровое давление); дождевые осадки и поверхностный сток (вызывают эрозию откосов, особенно неукрепленных, что приводит к смыву грунта и образованию проранов); гидродинамическое давление (возникает при фильтрации воды через откос, что приводит к снижению его устойчивости, особенно наблюдается в зоне высачивания грунтовых вод) [8];

- конструктивные особенности канала: крутизна и высота откоса (для связных грунтов важно учитывать предельную высоту вертикального откоса), форма его поперечного сечения (наличие берм на участке канала и др.), меандрирование или наличие поворотных излучин (особенно на каналах рыбохозяйственного назначения);

- внешние нагрузки: статические, связанные с давлением водного потока, протекающего по каналу, а также зарастанием и заилением русла; препятствия водному потоку, водоподпорные, регулирующие и другие гидротехнические сооружения по трассе канала.

Поиск эффективных инженерных решений для противодействия перечисленным факторам привел к широкому внедрению геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве [6, 7].

Как отмечается в исследованиях S. Vyas, S. Garg, N. Hasilkar [14], эро-

зия грунта на откосах, вызванная высокими расходами и скоростями водного потока, является неизбежным процессом, который может приобретать прогрессирующий характер [14]. Для предотвращения размыва авторами предлагается использовать иглопробивной нетканый геотекстиль, укладываемый на подготовленный откос. Материал выполняет функцию фильтра, отводя избыточную воду и предотвращая вынос частиц грунта. Дополнительно для снижения воздействия потока и надежной фиксации русла применяются нетканые геотекстильные мешки, обладающие высокой стойкостью к истиранию [14].

Эффективность геотекстиля как ключевого инженерного инструмента берегозащиты подтверждается и в работе М. Ashis [15], в которой говорится, что материал одновременно пропускает воду, снижая поровое и гидростатическое давление, и предотвращает размыв грунта на откосах. При научно обоснованном применении такие материалы составляют альтернативу традиционным решениям, обеспечивая снижение фильтрации, улучшение дренажа, противоэрозионную защиту и дополнительное армирование.

В исследованиях D. T. Dassanayake, H. Oumeraci [16] отмечается, что расчет устойчивости берегозащитных конструкций, состоящих из геотекстильных материалов, требует принципиально иного подхода по сравнению с каменной наброской, поскольку традиционные расчетные зависимости не учитывают деформационные характеристики материала.

В то же время эффективность эксплуатации берегозащитных сооружений неразрывно связана с качеством проектирования и расчетного обоснования, а современный подход требует не только выбора материала, но и моделирования работы сооружения. Научные исследования T. V. Karambas и A. G. Sarmas [17] доказывают, что расчет устойчивости таких конструкций является основополагающим фактором их надежной работы. Авторы подчеркивают необходимость сочетания аналитических, численных и экспериментальных методов при проектировании и эксплуатации берегозащитных сооружений.

В современной практике для оценки устойчивости откосов применяются различные программные комплексы, реализующие как методы предельного равновесия, так и численное моделирование [18]. В программах Geo5, GeoStab, «ЛИРА ЭСПРИ» и «CREDO ОТКОС» реализованы методы круглоцилиндрических поверхностей скольжения и полигональных поверхностей. Данные подходы позволяют выполнять многовариантные расчеты с учетом изменения уровня грунтовых вод и сейсмических воздействий, однако их применение осложняется при моделировании сложных грунтов, в т. ч. водонасыщенных, которые характерны для каналов. Расчет коэффициента устойчивости в программном комплексе Plaxis базируется на методе конечных элементов (МКЭ), этот коэффициент определяется как отношение значений параметров прочности (угол внутреннего трения и удельное сцепление) грунтов в естественном сложении к соответствующим значениям этих параметров. Сравнительный анализ, выполненный И. В. Ивануш [18] на примере устойчивости склонов, показал, что для простых однородных откосов все программы дают сопоставимые результаты (расхождение в пределах погрешности), однако при наличии грунтов со сложным поведением применение МКЭ является необходимым условием получения надежных результатов.

Целью настоящего исследования является оценка устойчивости откосов участков насыпей магистрального канала с использованием упрощенной аналитической методики и результатов численного моделирования в программном комплексе GEO5.

Материалы и методы. Традиционно оценка устойчивости выполняется методами круглоцилиндрических поверхностей скольжения (например, методом Феллениуса, Бишопа) с применением численного интегрирования. Однако для предварительных расчетов, сравнительного анализа вариантов и чувствительного анализа параметров эффективны классические аналитические решения для определения коэффициента устойчивости откоса [19, 20].

В данной работе использована аналитическая методика оценки устойчивости откосов, которая позволяет получить решение для определения коэффициента устойчивости без применения численного моделирования. Отличие заключается в том, что данная методика, как правило, применяется для предварительной оценки, сравнительного анализа вариантов для дорожных насыпей, карьерных откосов и естественных склонов при условии их однородности⁴. Расчет выполняется в три этапа: сбор исходных данных (геометрических и прочностных характеристик), расчет коэффициента устойчивости, сравнение полученного значения с нормативным согласно ВСН 46-83⁵.

Численное моделирование устойчивости рассматриваемых откосов магистрального канала выполнялось в программном комплексе геотехнических расчетов «GEO5 Устойчивость откоса». Поверхность скольжения задавалась круглоцилиндрической, поиск наиболее опасного ее положения осуществлялся автоматически методом оптимизации по сетке узлов. Для сопоставительного анализа коэффициент устойчивости определялся по шести различным методам: Бишопа, Феллениуса – Петерсона, Спенсера, Ямбу, Morgenstern – Price и Шахунянца [18, 21].

При построении расчетных моделей задавались геометрические параметры поперечного сечения, физико-механические характеристики грунтов насыпи, материала наброски, а также граничные условия. Для проверки аналитической методики выбраны пять типичных участков магистрального канала (рисунок 2) с различной геометрией насыпи. Участки отличаются высотой насыпи и крутизной откосов, что позволяет изучить влияние этих параметров на коэффициент устойчивости.

⁴Руководство по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах / Гос. всеоюз. дор. НИИ. М.: Транспорт, 1978. 140 с.

⁵Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа: ВСН 46-83: утв. Минавтодором РСФСР 31.12.83: введ. в действие с 01.01.85. М.: Транспорт, 1984. 149 с.



Рисунок 2 – Расчетный участок магистрального канала (автор фото А. Ю. Гарбуз)

Figure 2 – Rated section of the main canal (photo by A. Yu. Garbuz)

Исходные данные о геометрических параметрах и физико-механических характеристиках материалов насыпи участков канала: объемный вес γ (кН/м³), угол внутреннего трения φ (градусы), сцепление c (кПа), приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Исходные данные для расчетного участка

В м

Table 1 – Initial data for the rated area

In m

Параметр	Участок				
	1	2	3	4	5
Насыпь					
- высота	2,980	3,180	2,170	2,555	2,470
- ширина по верху	8,195	7,795	7,525	8,705	9,070
- длина левого откоса	5,060	5,320	3,465	3,890	3,925
- длина правого откоса	4,575	5,275	4,005	3,805	4,260
Каменная наброска					
- толщина по левому откосу	0,240	0,15	0,560	0,600	0,200
- толщина по правому откосу	0,140	0,095	0,440	0,450	0,200
- толщина по гребню насыпи	0,240	0,260	0,480	0,500	–

Таблица 2 – Физико-механические характеристики материала

Table 2 – Physical-mechanical characteristics of the material

Номер участка	Основной материал тела насыпи			Защитный (армирующий) слой		
	γ , кН/м ³	φ , градусы	c , кПа	γ , кН/м ³	φ , градусы	c , кПа
1	18,87	19,70	15,70	16,00	40,0	0,0
2	19,37	19,90	16,30			
3	18,12	20,70	20,00			
4	21,37	23,50	28,00			
5	20,21	20,40	18,40			

Результаты и обсуждение. Анализ исходных данных о физико-механических характеристиках показывает, что, несмотря на использование однотипного материала насыпи, его параметры (объемный вес, угол внутреннего трения) варьируются от участка к участку, это отражает естественную неоднородность грунта.

На рисунке 3 дана схема к расчету устойчивости откосов участка канала с насыпью, где зеленым цветом обозначены граница каменной наброски и поверхность скольжения при заданных параметрах (геометрия и физико-механические свойства материалов), оранжевым цветом выделены граница грунтовой насыпи, ее откосов и поверхность скольжения при заданных параметрах.

Для первого участка канала выполним подробный пример расчета и определим параметры насыпи и откосов без наброски.

Высоту насыпи определим как:

$$H_{\text{п}} = H_{\text{общ}} - h_{\text{к.гр}} = 2,980 - 0,240 = 2,740 \text{ м.} \quad (1)$$

Крутизну откосов найдем по формулам:

- левый откос:

$$m_{\text{л}} = \frac{L_{\text{л}}}{H_{\text{п}}} = \frac{5,060}{2,740} \approx 1,847, \quad (2)$$

$$\beta_{\text{л}} = \arctan \frac{1}{m_{\text{л}}} \approx 28,41^\circ; \quad (3)$$

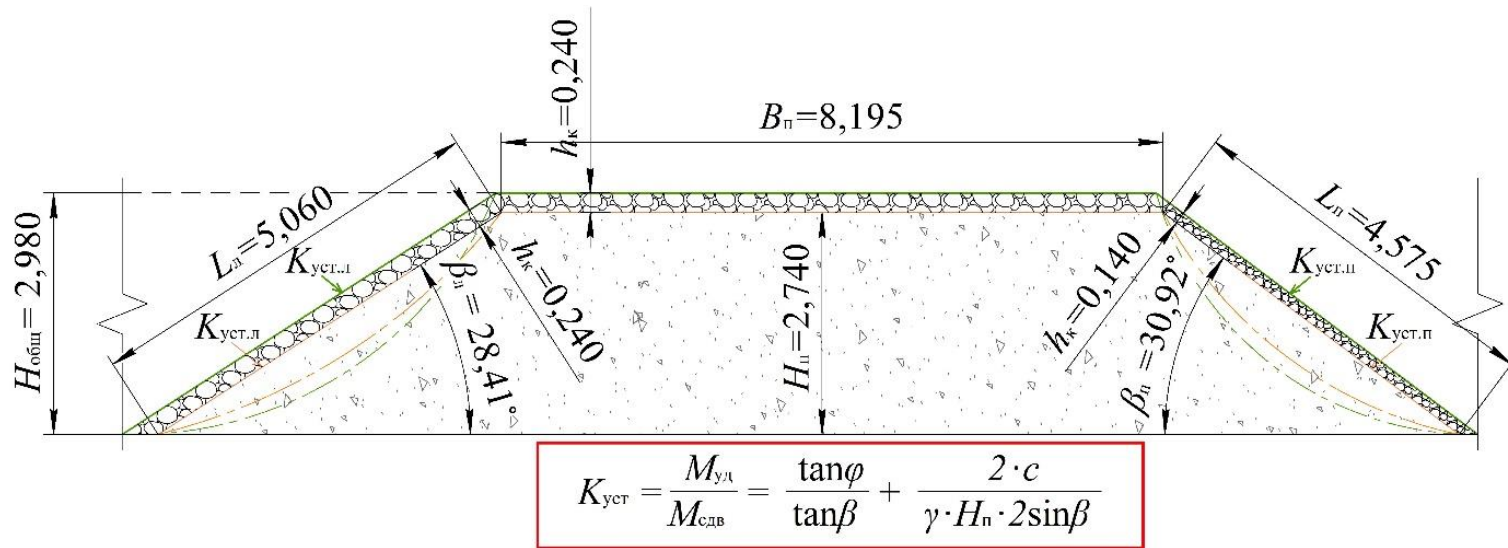
- правый откос:

$$m_{\text{п}} = \frac{L_{\text{п}}}{H_{\text{п}}} = \frac{4,575}{2,740} \approx 1,669,$$

$$\beta_{\text{п}} = \arctan \frac{1}{m_{\text{п}}} \approx 30,92^\circ.$$

Формула для определения устойчивости откоса имеет вид:

$$K_{\text{уст}} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} + \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H_{\text{п}} \cdot 2 \sin 2\beta}. \quad (4)$$



$H_{общ}$ – общая высота насыпи, м; $H_{п}$ – высота грунтовой части насыпи, м; $B_{п}$ – ширина насыпи по верху, м; $h_{к}$ – толщина каменной наброски, м; $L_{л}$, $L_{п}$ – длины левого и правого откосов, м; $K_{уст.л}$, $K_{уст.п}$ – коэффициенты устойчивости левого и правого откосов; $\beta_{л}$, $\beta_{п}$ – углы крутизны левого и правого откосов, °; $M_{уд}$, $M_{сдв}$ – удерживающий и сдвигающий моменты вращения

$H_{общ}$ is the total height of the earthfill, m; $H_{п}$ is the height of the ground part of the earthfill, m; $B_{п}$ is the width of the earthfill at the top, m; $h_{к}$ is the thickness of rockfill, m; $L_{л}$, $L_{п}$ are the lengths of the left and right slopes, m; $K_{уст.л}$, $K_{уст.п}$ – coefficients of stability of the left and right slopes; $\beta_{л}$, $\beta_{п}$ – angles of steepness of the left and right slopes, °; $M_{уд}$, $M_{сдв}$ – retaining and shifting rotation torques

Рисунок 3 – Расчетная схема к определению устойчивости откосов насыпи для первого участка

Figure 3 – Calculation scheme for determining the stability of earthfill slopes for the first section

Определим устойчивость левого откоса:

$$K_{уст.л} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta_{л}} + \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H_{п} \cdot \sin 2\beta_{л}} = \frac{\tan 19,70}{\tan 28,41} + \frac{2 \cdot 15,70}{18,87 \cdot 2,740 \cdot 2 \sin 2 \cdot 28,41} = 1,06.$$

Определим устойчивость правого откоса:

$$K_{уст.п} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta_{п}} + \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot H_{п} \cdot 2 \sin 2\beta_{п}} = \frac{\tan 19,70}{\tan 30,92} + \frac{2 \cdot 15,70}{18,87 \cdot 2,740 \cdot 2 \sin 2 \cdot 30,92} = 0,97.$$

Каменная наброска действует как пригрузка, увеличивая нормальные напряжения на поверхности скольжения. На гребне насыпи слой каменной наброски составил:

$$q_{гр} = \gamma_k \cdot h_{к.гр} = 16,0 \cdot 0,240 = 3,84 \text{ кПа.}$$

На откосе слой каменной наброски можно учесть как эквивалентную вертикальную нагрузку на горизонтальную проекцию. Тогда эквивалентный коэффициент наброски определим как:

$$\Delta\sigma = \gamma_k \cdot h_k \cdot \cos^2 \beta. \quad (5)$$

Для левого откоса $\Delta\sigma = 16,0 \cdot 0,240 \cdot \cos^2 28,41 = 3,12$.

Для правого откоса $\Delta\sigma = 16,0 \cdot 0,140 \cdot \cos^2 30,92 = 1,75$.

Коэффициент $\Delta\sigma$ суммируем с показателем насыпи, отсюда формула устойчивости откоса $K_{уст}$ приобретает вид:

$$K_{уст} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} + \frac{2 \cdot c}{(\gamma \cdot H_{п} + \Delta\sigma) \cdot 2 \sin 2\beta}. \quad (6)$$

Тогда устойчивость откосов с каменной наброской составит для левого откоса:

$$K_{уст} = \frac{\tan 19,70}{\tan 28,41} + \frac{2 \cdot 19,70}{(18,87 \cdot 2,740 + 3,12) \cdot 2 \sin 2 \cdot 28,41} = 1,03.$$

Для правого откоса:

$$K_{уст} = \frac{\tan 19,70}{\tan 30,92} + \frac{2 \cdot 19,70}{(18,87 \cdot 2,740 + 1,75) \cdot 2 \sin 2 \cdot 30,92} = 0,96.$$

Согласно проведенному расчету откосы первого участка находятся

в предельном равновесии, неустойчивы. Основной причиной неустойчивости является разность крутизны откосов при одинаковой величине высоты насыпи. Ввиду того, что каменная наброска создает дополнительную нагрузку, необходима укладка геотекстиля для предотвращения сползания армирующего материала и обеспечения необходимой устойчивости $K_{уст} \geq 1,25$.

Расчет для других участков выполнен по аналогичной методике, результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов устойчивости откосов насыпи
Table 3 – Results of stability calculations of earthfill slopes

Параметр	Участок				
	1	2	3	4	5
Крутизна откоса β (градусы)					
- левый	28,41	28,76	26,00	27,84	32,18
- правый	30,92	28,96	22,87	28,37	30,11
Коэффициент устойчивости откоса $K_{уст}$ (без наброски)					
- левый	1,06	1,03	1,67	1,65	1,03
- правый	0,97	1,02	1,89	1,62	1,10
Коэффициент устойчивости откоса $K_{уст}$ (с наброской)					
- левый	1,03	1,02	1,50	1,53	1,01
- правый	0,96	1,01	1,72	1,52	1,08

По результатам расчетов построены графики зависимости коэффициентов устойчивости откосов от их крутизны (рисунок 4).

Для более детального описания полученных графических данных были использованы полиномиальные уравнения. Качество аппроксимации, оцениваемое по коэффициенту детерминации (R^2), варьируется от умеренного до удовлетворительного уровня, однако ни одна из моделей не достигла уровня высокой точности ($R^2 > 0,85$). Правый откос показал более высокую степень соответствия полиномиальной модели, чем левый. Коэффициент R^2 составил 0,7765 для естественного состояния и 0,7527 с применением наброски. Это указывает на то, что зависимость устойчивости от крутизны для правого откоса носит более выраженный и закономерный характер, хорошо описываемый выбранным полиномом. Для левого откоса

характерна менее точная аппроксимация. Значения R^2 (0,6495 без наброски и 0,5983 с наброской) существенно ниже, чем для правого откоса. Это свидетельствует о том, что на устойчивость левого откоса влияют дополнительные факторы, не учтенные в модели (неоднородность грунта, локальные особенности). Во всех рассмотренных случаях применение наброски приводит к небольшому снижению R^2 на 0,0238 для правого и на 0,0512 для левого откоса, соответственно, это позволяет сделать вывод о том, что укрепление откоса может изменять характер зависимости устойчивости от крутизны.

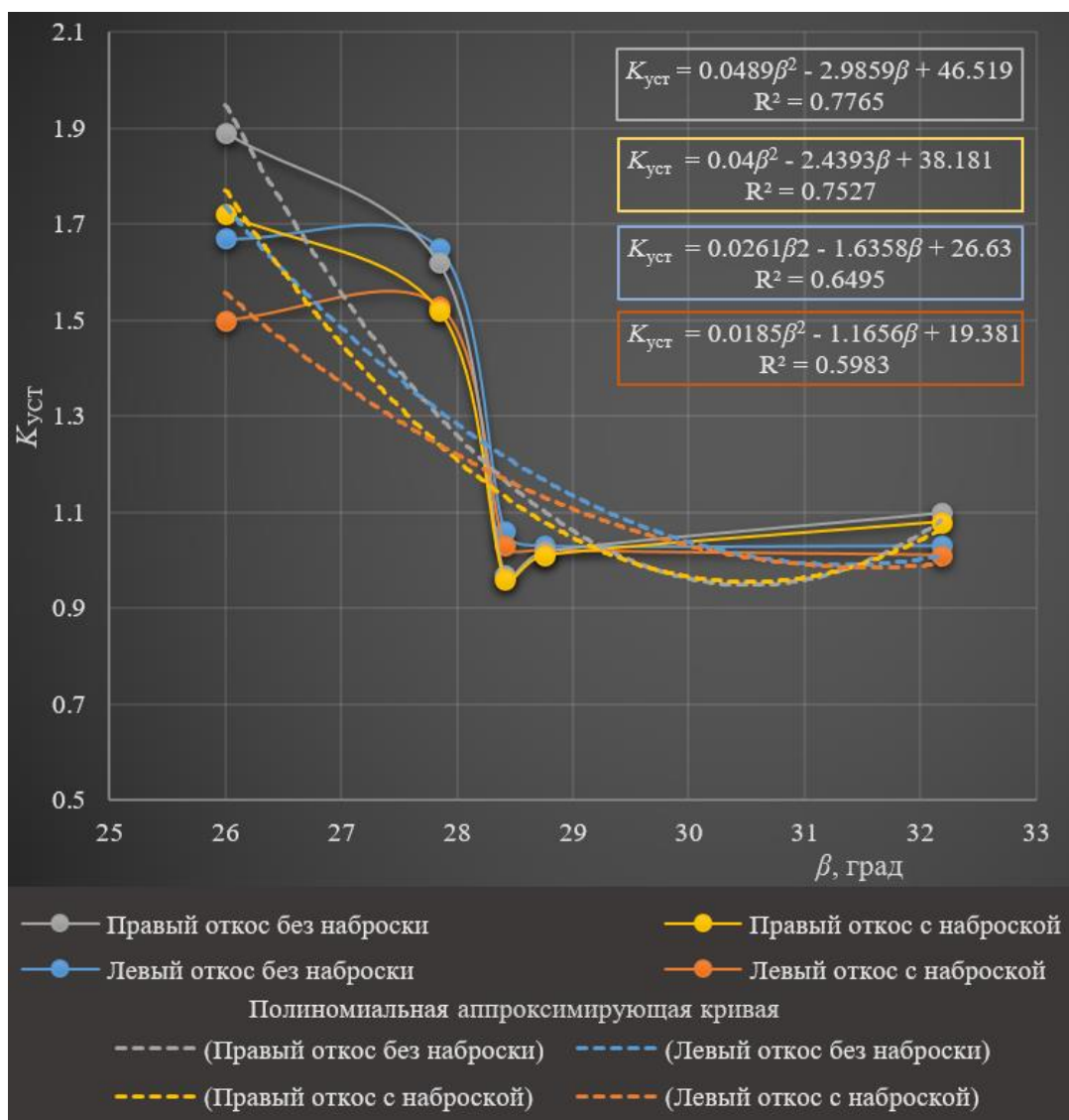


Рисунок 4 – Графики зависимости коэффициентов устойчивости откосов от их крутизны

Figure 4 – Graphs of the slope stability coefficients depending on their steepness

С целью подтверждения корректности проведенных аналитических расчетов, а также для оценки возможной погрешности и границ применимости упрощенного подхода было выполнено численное моделирование в программном комплексе «GEO5 Устойчивость откоса». Для каждого расчетного случая коэффициент устойчивости определялся по шести методам: Бишопа, Феллениуса – Петерсона, Спенсера, Янбу, Morgenstern – Price и Шахунянца.

Необходимо отметить, что, согласно рекомендациям программного комплекса «GEO5 Устойчивость откоса», коэффициент устойчивости должен составлять не менее 1,5. Для рассматриваемой насыпи канала принято нормативное значение $K_{уст} \geq 1,25$, следовательно, результаты в программном комплексе ниже 1,5 (но выше 1,25) мы считаем удовлетворительными.

На рисунке 5 приведены расчетная модель для первого участка канала и окно ввода исходных физико-механических характеристик грунта насыпи. Геометрическая модель, результаты поиска поверхности скольжения и проверка устойчивости для этого же участка представлены на рисунке 6 (без каменной наброски) и на рисунке 7 (с каменной наброской).

Аналогичные расчеты были выполнены и для других участков магистрального канала. Проведем анализ закономерности изменения устойчивости в зависимости от метода расчета, наличия каменной наброски, расположения откоса и номера участка. В таблицах 4 и 5 представлены значения $K_{уст}$ для левого и правого откосов на пяти участках, полученные шестью различными методами расчета в программном комплексе «GEO5 Устойчивость откоса».

На рассмотренных участках наблюдается значительный разброс значений $K_{уст}$. Так, наименьшие коэффициенты зафиксированы на первом, втором и пятом участках (в диапазоне 1,0–1,1), что указывает на состояние, близкое к предельному равновесию ($K_{уст} \approx 1,0$). Наибольшие значения достигаются на третьем и четвертом участках (до 1,95), что свидетельствует о высокой устойчивости откосов. Такая дифференциация объясняется различной геометрией откосов магистрального канала.

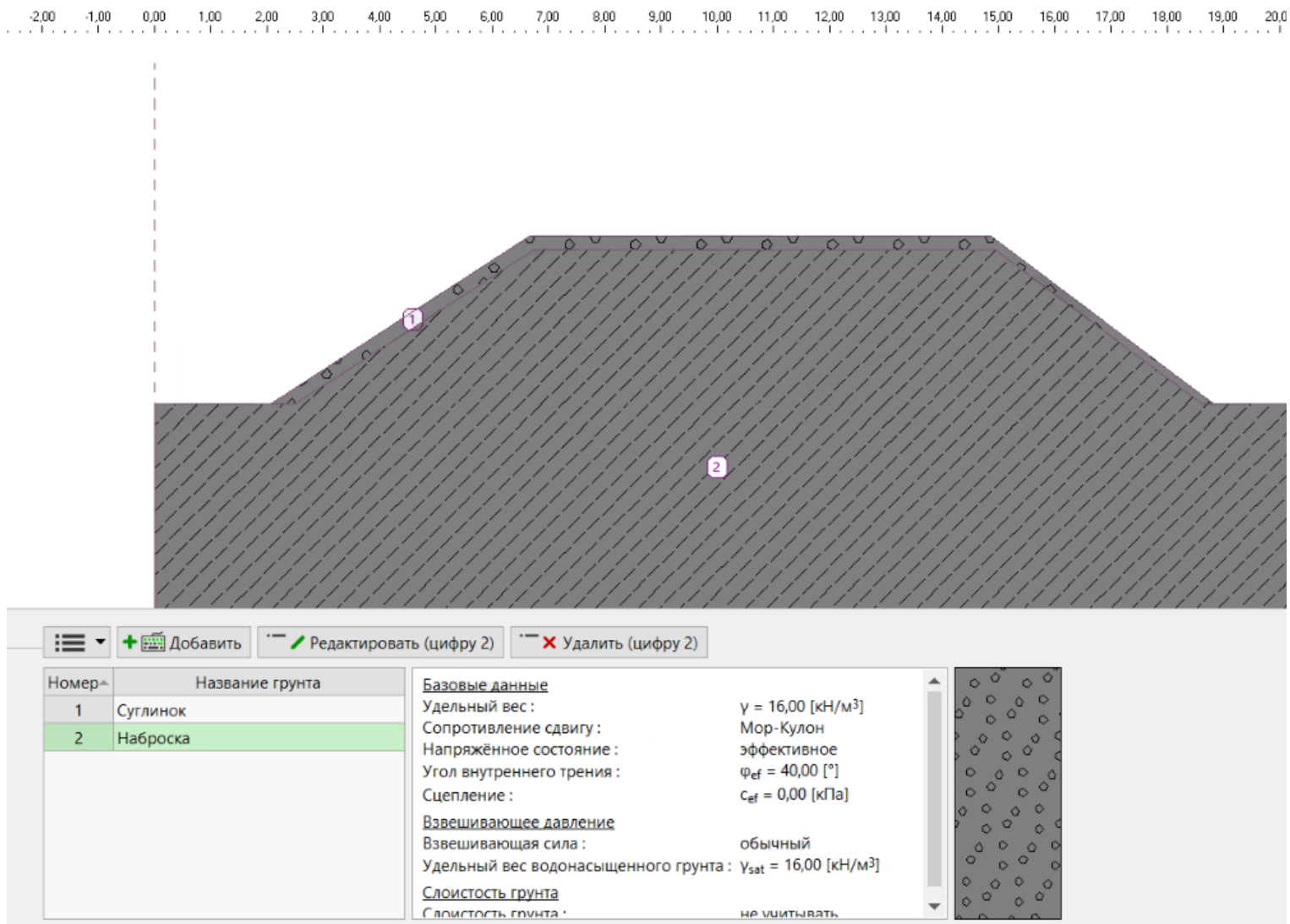


Рисунок 5 – Схема расчетного участка с исходными данными

Figure 5 – Diagram of the rated area with the input data

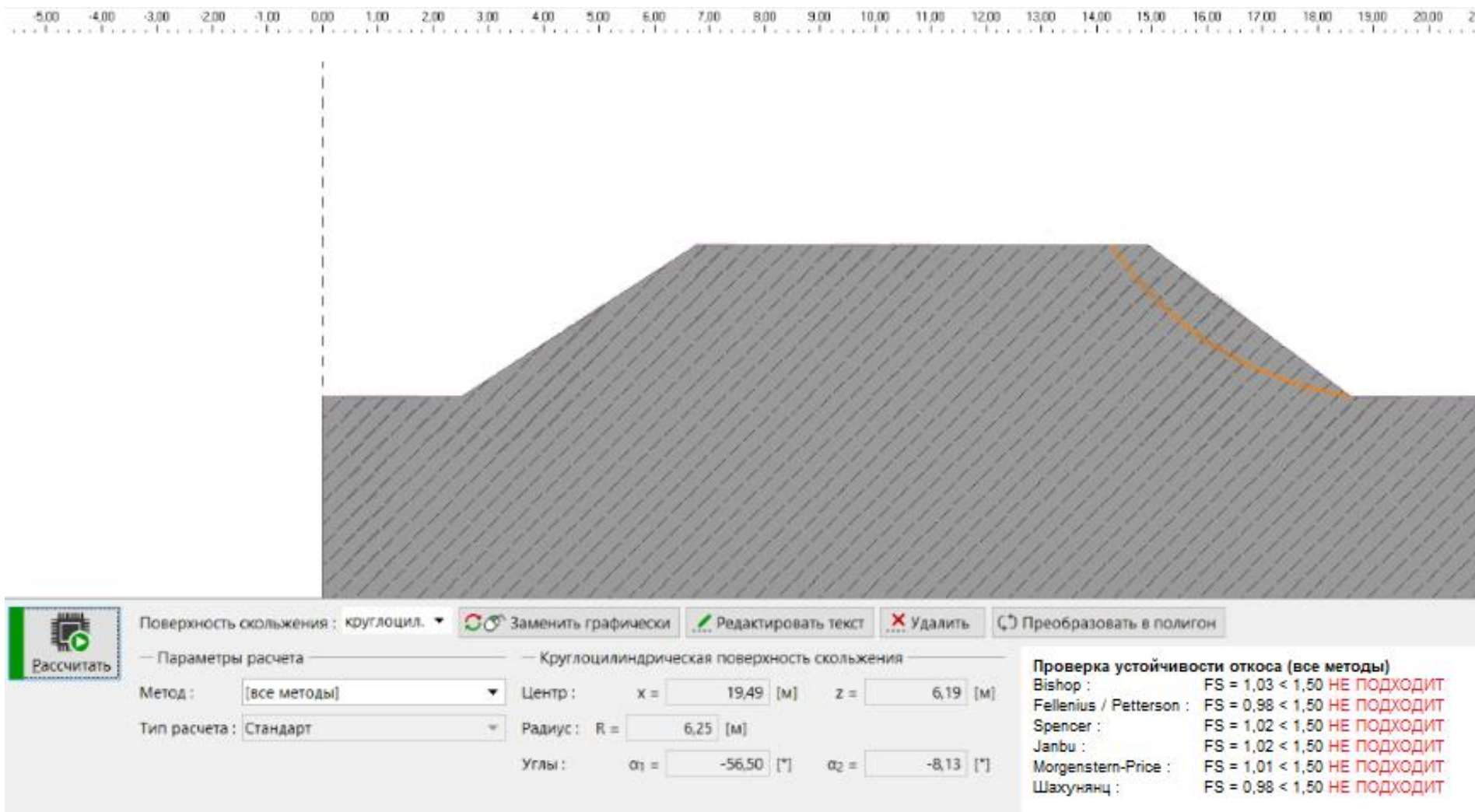


Рисунок 6 – Геометрическая модель и результаты проверки устойчивости правого откоса без наброски
Figure 6 – Geometric model and results of checking the stability of the right slope without a rockfill

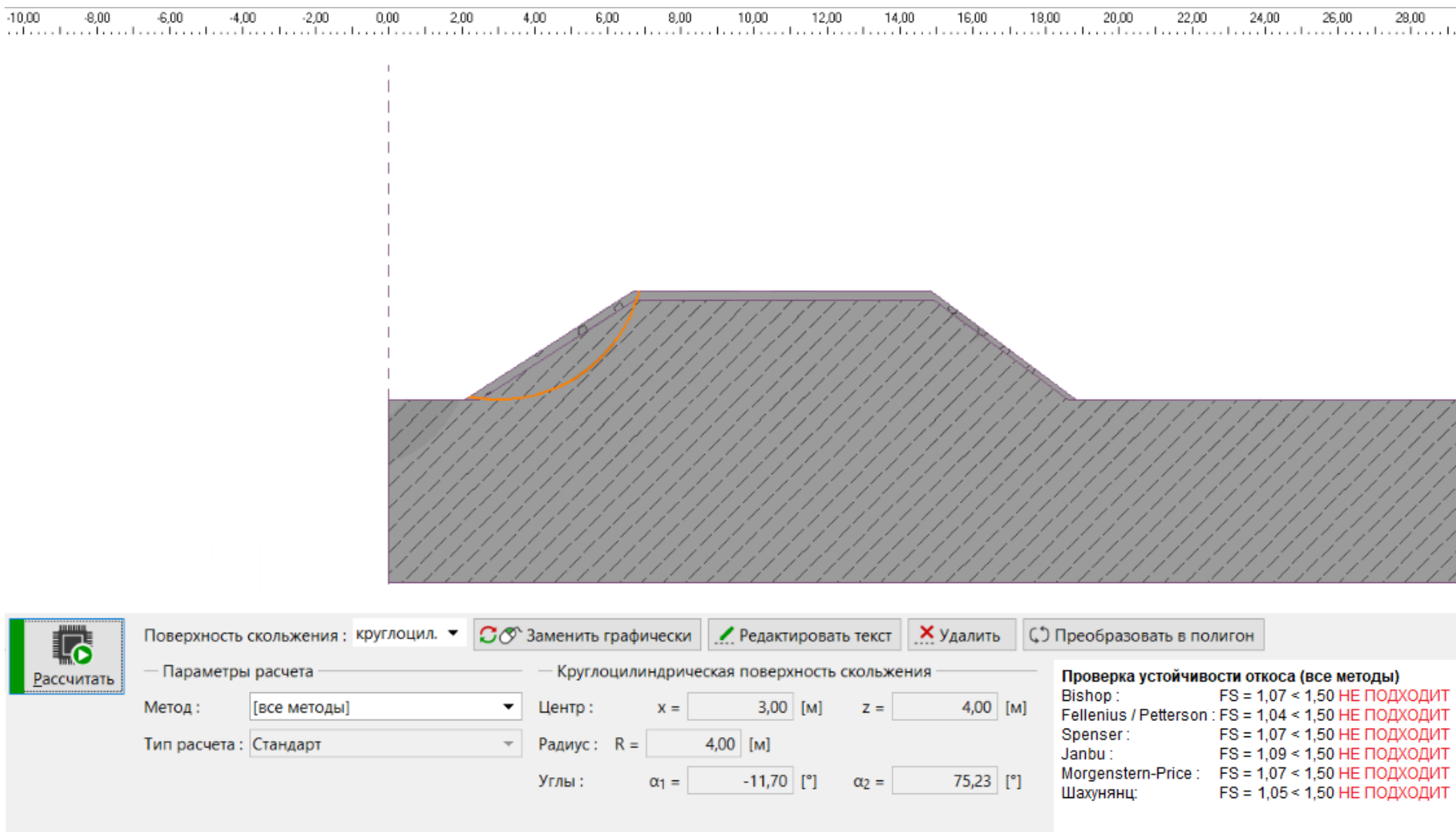


Рисунок 7 – Геометрическая модель и результаты проверки устойчивости левого откоса с наброской
Figure 7 – Geometric model and results of checking the stability of the left slope with a rockfill

Таблица 4 – Результаты проверки устойчивости участков канала без каменной наброски

Table 4 – Results of checking the stability of canal sections without a rockfill

Метод расчета	Участок без наброски									
	Левый откос					Правый откос				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Бишопа	1,11	1,07	1,73	1,70	1,05	1,03	1,07	1,95	1,68	1,15
Феллениуса – Петерсона	1,07	1,05	1,68	1,64	1,01	0,98	1,04	1,90	1,62	1,07
Спенсера	1,12	1,08	1,72	1,69	1,07	1,02	1,09	1,94	1,67	1,09
Янбу	1,12	1,09	1,71	1,70	1,07	1,02	1,07	1,94	1,66	1,09
Моргенштерна – Прайса	1,12	1,08	1,71	1,72	1,05	1,01	1,09	1,94	1,66	1,12
Шахунянца	1,09	1,05	1,69	1,69	1,04	0,98	1,09	1,89	1,65	1,10

Таблица 5 – Результаты проверки устойчивости участков канала с каменной наброской

Table 5 – Results of checking the stability of canal sections with a rockfill

Метод расчета	Участок с наброской									
	Левый откос					Правый откос				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Бишопа	1,07	1,07	1,54	1,59	1,05	1,01	1,05	1,78	1,57	1,12
Феллениуса – Петерсона	1,04	1,04	1,47	1,54	0,98	0,95	1,02	1,73	1,49	1,09
Спенсера	1,07	1,10	1,52	1,57	1,06	1,01	1,05	1,78	1,55	1,12
Янбу	1,09	1,10	1,52	1,57	1,07	1,01	1,07	1,78	1,55	1,13
Моргенштерна – Прайса	1,07	1,08	1,50	1,57	1,07	1,02	1,07	1,76	1,55	1,13
Шахунянца	1,05	1,02	1,45	1,55	1,00	0,98	1,02	1,71	1,50	1,1

Метод Феллениуса – Петерсона систематически показывает наименьшие значения $K_{уст}$ практически для всех участков и состояний. Например, на третьем участке без наброски для левого откоса $K_{уст} = 1,68$ (Феллениус – Петерсон) и 1,73–1,72 по другим методам. Методы Спенсера, Янбу и Моргенштерна – Прайса дают близкие и более высокие значения. Например, на четвертом участке без наброски для правого откоса с использованием этих методов получили результаты $K_{уст} = 1,67...1,68$ и 1,62 по методу Феллениуса – Петерсона. Это объясняется учетом межслоевых сил, что повышает расчетную устойчивость. Метод Бишопа занимает промежуточное положение. На третьем участке без наброски для левого откоса $K_{уст} = 1,73$ (Бишоп), он практически совпадает с $K_{уст} = 1,72$ (Спенсер). Метод Шахунянца дает значения, близкие к полученным по методу Феллениуса – Петерсона.

Анализ показал, что во всех рассмотренных случаях значения $K_{уст}$ с наброской ниже, чем без нее. Такое снижение коэффициента устойчивости объясняется тем, что наброска выполнялась без устройства геотекстильной прослойки. В данном случае наброска работает исключительно как дополнительная пригрузка откоса, увеличивая сдвигающие силы. Отсутствие геотекстиля (либо других геосинтетических материалов) не обеспечивает армирования поверхности откоса и не улучшает распределения напряжений, а также не предотвращает возможный выпор грунта из-под наброски. В результате вес наброски добавляет нагрузку, но не компенсируется повышением прочностных характеристик, что приводит к снижению общего коэффициента устойчивости. Для достижения укрепляющего эффекта рекомендуется создание геотекстильной прослойки, которая обеспечит совместную работу наброски и грунта и повысит сопротивление сдвигу.

Проведем сравнение результатов аналитического расчета и расчетов в программном комплексе «GEO5 Устойчивость откоса». Результаты демонстрируют единую картину распределения устойчивости по участкам: максимальные значения коэффициента $K_{уст}$ достигаются на третьем и четвертом участках (до 1,89 аналитически и до 1,95 в «GEO5 Устойчивость откоса»), тогда как наименьшие на первом, втором и пятом участках (близки к предельному равновесию). Также в обоих случаях фиксируется снижение устойчивости при устройстве наброски без геотекстиля (например, на третьем участке устойчивость левого откоса снижается с 1,67 до 1,50 при использовании аналитического метода и с 1,73 до 1,54 в программном комплексе).

Количественно результаты в «GEO5 Устойчивость откоса» несколько выше аналитических: для левого откоса третьего участка аналитическое значение равно 1,67, а в программном комплексе по различным методам – от 1,68 до 1,73. Наиболее близкими к аналитическим являются значения метода Феллениуса – Петерсона.

Расхождение в значениях коэффициента устойчивости между аналитическим решением и программным комплексом «GEO5 Устойчивость откоса» не превысило 3 %, что подтверждает корректность упрощенной методики и допустимость ее применения для оценки устойчивости грунтовых насыпей. Таким образом, аналитический расчет обеспечивает предварительную оценку, а численное моделирование позволяет получить диапазон значений, уточняющий реальный запас устойчивости.

Основываясь на проведенных расчетах и анализе полученных данных об устойчивости откосов насыпи для участков магистрального канала, сделаем следующие выводы и дадим рекомендации.

1 Для первого участка рекомендуется увеличить длину заложения правого откоса до 5,060 м для выравнивания запаса устойчивости с левым откосом либо увеличить толщину каменной наброски до 0,240 м и более, используя более тяжелый камень.

2 На втором участке на левом и правом откосах с каменной наброской и без устойчивость обеспечена с минимальным запасом, что требует постоянного мониторинга их технического состояния, особенно в период паводков и сработки уровня воды в канале.

3 Откосы третьего и четвертого участков имеют расчетный коэффициент устойчивости, превышающий нормативное минимально допустимое значение, установленное для данного класса гидротехнических сооружений ($K_{уст} \geq 1,25$). Запас прочности откосов достаточен в расчетных условиях эксплуатации.

4 Правый откос пятого участка канала находится в предельном равновесии. Основная причина – большая крутизна, чем у левого откоса, при одинаковой величине высоты насыпи. По правому откосу устойчивость обеспечена с минимальным запасом, а отсутствие наброски на гребне (при ее наличии на откосах) может значительно снизить эксплуатационную надежность

и общую эффективность конструкции. Рекомендуется выполнить защиту гребня на данном участке.

5 Для обеспечения долговременной эксплуатации насыпи и предотвращения повреждений откосов (особенно на проблемных участках) следует предусмотреть их армирование геотекстилем. Его применение с обязательным заведением материала на гребень откоса и надежной анкерровкой даст существенный прирост коэффициента устойчивости (ориентировочно плюс 0,05 – плюс 0,15). Это позволит довести показатель правого откоса первого участка до нормативных значений (1,3 и выше). Важная роль геотекстиля заключается в компенсации недостаточной крутизны откосов, распределении нагрузок и предотвращении выноса грунта, что значительно продлевает срок эксплуатации без ремонта.

Выводы

1 Выполнено сопоставление результатов расчета коэффициента устойчивости по упрощенной аналитической методике с данными численного моделирования в программном комплексе «GEO5 Устойчивость откоса» (по шести методам расчета). Установлено, что расхождение в значениях коэффициента устойчивости не превышает 3 %. Это подтверждает высокую достоверность и практическую пригодность предложенного аналитического решения для экспресс-оценки, сравнительного анализа вариантов и выявления потенциально опасных зон на ранних стадиях проектирования.

2 Выявлено существенное расхождение в запасе устойчивости вдоль трассы канала. Если откосы третьего и четвертого участков характеризуются избыточным запасом ($K_{уст} > 1,5$), то первый, второй и пятый участки находятся в критической зоне, близкой к предельному равновесию ($K_{уст} = 1,0–1,1$). Причиной этого является главным образом геометрическая разнотипность насыпи – превышение фактической крутизны откосов над прочностными характеристиками грунта.

3 Установлено, что устройство каменной наброски без сопутствующего армирования привело к повсеместному снижению коэффициента устойчивости (например, с 1,67 до 1,50 на третьем участке). Данный факт объясняется тем, что при отсутствии геотекстильной прослойки наброска работает исключительно как дополнительная пригрузка, увеличивающая сдвигающие усилия, но не компенсирующая их повышением прочностных характеристик. Для достижения нормативного коэффициента устойчивости ($K_{уст} \geq 1,25$) на проблемных участках необходимо применять комплексные решения, в т. ч. важным является устройство геотекстильной прослойки.

4 Для обеспечения долговременной и безаварийной эксплуатации сооружения даны рекомендации, такие как увеличение длины заложения откосов, корректировка толщины наброски, обязательное устройство защитного слоя на гребне насыпи (для предотвращения разрушения), армирование откосов геотекстилем с анкерровкой материала.

Список источников

1. Мирцхулава Ц. Е. О надежности крупных каналов. М.: Колос, 1981. 318 с.
2. Ресурсы агромелиоративных систем: науч.-практ. изд. / В. Н. Щедрин, А. Н. Бабичев, Ю. Е. Домашенко, Ю. М. Косиченко, В. Д. Гостищев, В. А. Монастырский, В. И. Ольгаренко, С. А. Манжина, О. А. Баев, И. П. Абраменко, М. В. Власов, Л. А. Воеводина, А. Ю. Гарбуз, М. А. Ляшков, Ю. Ю. Арискина; под. общ. ред. В. Н. Щедрина. М.: Росинформротех, 2021. 312 с. EDN: JXLZJB.
3. Бандурин М. А., Приходько И. А., Вербицкий А. Ю. Оценка параметров эксплуатации ливнеотводящих сооружений низконапорной плотины в условиях быстрой сработки уровня паводковых вод // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 4(394). С. 424–428. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_424. EDN: EYOUUQ.
4. Натурные исследования устойчивости участков берегов и русел судоходных рек и каналов Беларуси / В. Е. Левкевич, Г. И. Касперов, Д. С. Миканович, А. В. Бузук // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2021. С. 179–192. EDN: XDVFJM.
5. Баранов Е. В., Гурьев А. П., Ханов Н. В. Применение объемных полимерных георешеток в укреплении откосов подпорных грунтовых гидротехнических сооружений // Природообустройство. 2015. № 2. С. 45–48. EDN: UFEXGB.
6. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Математическое и физическое моделирование фильтрации через малые повреждения противофильтрационных устройств из полимерных геомембран // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2014. Т. 274. С. 60–73. EDN: TPUXHZ.
7. Сольский С. В., Быковская С. А. Анализ выбора способов стабилизации склонов и откосов в оползнеопасных условиях строительства // Известия Всероссийского

научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2018. Т. 290. С. 69–87. EDN: VRUZHE.

8. Ткачев А. А., Карельская Е. В., Макогонов А. В. Совершенствование креплений откосов оросительных каналов // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2020): материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию Победы в Велик. Отечеств. войне, г. Уфа, 22 апр. 2020 г. Уфа: УГАТУ, 2020. Т. 1. С. 40–43. EDN: ZWXСЮ.

9. Бандурин М. А. Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса работоспособности водопроводящих сооружений оросительных систем. 3-е изд., перераб. и доп. Новочеркасск: Лик, 2022. 230 с. EDN: SXBEVB.

10. Ткачев А. А., Карельская Е. В. Обоснование использования различных конструкций при проведении берегоукрепительных работ // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы Междунар. науч.-практ. интернет-конф., г. Новочеркасск, 13–20 июля 2020 г. Новочеркасск: Лик, 2020. С. 126–132. EDN: ESUDTT.

11. Сольский С. В., Назукина Ю. Е. Систематизация опасных инженерногеологических процессов на гидротехнических сооружениях // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2023. Т. 310. С. 47–61. EDN: WFEHRC.

12. Маслов Н. Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. 468 с.

13. Левкевич В. Е., Бузук А. В., Кобяк В. В. Причины нарушения устойчивости защитных сооружений на искусственных водных объектах // Мелиорация. 2009. № 1(61). С. 79–84. EDN: VDFVMR.

14. Vyas S., Garg S., Hasilkar N. Geosynthetic solutions for river and coastal protection works // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 569. DOI: 10.1051/e3sconf/202456903002. EDN: UWTTHF.

15. Ashis M. Application of geotextiles in coastal protection and coastal engineering works: An overview // International Research Journal of Environment Sciences. 2015. Vol. 4(4). P. 96–103.

16. Dassanayake D. T., Oumeraci H. Hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers (GSCS): Effect of engineering properties of GSCS // Coastal Engineering Proceedings. 2012. Vol. 2. P. 1–14. DOI: 10.9753/icce.v33.structures.55.

17. Karambas T. V., Samaras A. G. An integrated numerical model for the design of coastal protection structures // Journal of Marine Science and Engineering (JMSE). 2017. Vol. 5, iss. 50. P. 1–15. DOI: 10.3390/jmse5040050. EDN: YIIGUK.

18. Иванушь И. В. К вопросу расчета устойчивости откоса в различных программных комплексах // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2021. Т. 7, № 1. С. 276–285. EDN: VHUGCR.

19. Чубка П. Ю., Чубка Ю. Ш. Сравнение методов расчета устойчивости массивов грунтов // Вестник евразийской науки. 2021. Т. 13, № 5. EDN: CIVRJW.

20. Assessment of slope stability by the Fellenius slice method: Analytical and numerical approach / K. J. Agbelele, E. C. Houehanou, M. F. Ahlinhan, A. W. Ali, H. C. Aristide // World Journal of Advanced Research and Reviews. 2023. № 18(02). P. 1205–1214. DOI: 10.30574/wjarr.2023.18.2.0874. EDN: NEKORT.

21. Chowdhury R., Flentje P., Bhattacharya G. Ch. 9. Slope analysis methods // Geotechnical Slope Analysis. 1st ed. London: Springer, 2010. P. 211–249. DOI: 10.1201/9780203864203.

References

1. Mirtskhulava Ts.E., 1981. *O nadyozhnosti krupnykh kanalov* [On the Reliability of Large Channels]. Moscow, Kolos Publ., 318 p. (In Russian).
2. Shchedrin V.N., Babichev A.N., Domashenko Yu.E., Kosichenko Yu.M., Gostischev V.D., Monastyrsky V.A., Olgarenko V.I., Manzhina S.A., Baev O.A., Abramenko I.P., Vlasov M.V., Voevodina L.A., Garbuz A.Yu., Lyashkov M.A., Ariskina Yu.Yu., 2021. *Resursy agromeliorativnykh sistem: nauch.-prakt. izd.* [Resources of Agricultural Reclamation Systems: scientific and practical ed.]. Moscow, Rosinformagrotech Publ., 312 p., EDN: JXLZJB. (In Russian).
3. Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Verbitsky A.Yu., 2023. *Otsenka parametrov ekspluatatsii livneotvodyashchikh sooruzheniy nizkonapornoy plotiny v usloviyakh bystroy srabotki urovnya pavadkovykh vod* [Evaluation of the operation parameters of storm discharge facilities of a low-pressure dam under the conditions of a fast drop of the flood water level]. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], no. 4(394), pp. 424-428, DOI: 10.55186/25876740_2023_66_424, EDN: EYOUUQ. (In Russian).
4. Levkevich V.E., Kasperov G.I., Mikanovich D.S., Buzuk A.V., 2021. *Naturnye issledovaniya ustoychivosti uchastkov beregov i rusel sudokhodnykh rek i kanalov Belarusi* [Full-scale studies of the stability of bank sections and canals of navigable rivers and Belarus canals]. *Vodnye puti i ruslovye protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Waterways and Channel Processes. Hydraulic Engineering Structures of Waterways: Collection of Scientific Papers of the International Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg, pp. 179-192, EDN: XDBFJM. (In Russian).
5. Baranov E.V., Guryev A.P., Khanov N.V., 2015. *Primeneniye obyemnykh polimernykh georeshetok v ukreplenii otkosov podpornykh gruntovykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Use of bulk polymeric geogrids in strengthening slopes of retaining hydraulic structures]. *Prirodobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 45-48, EDN: UFEXGB. (In Russian).
6. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2014. *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie filtratsii cherez malye povrezhdeniya protivofiltratsionnykh ustroystv iz polimernykh geomembran* [Mathematical and physical modeling of filtration through small damage of anti-filtration devices from polymer geomembranes]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneev], vol. 274, pp. 60-73, EDN: TPUXHZ. (In Russian).
7. Solskiy S.V., Bykovskaya S.A., 2018. *Analiz vybora sposobov stabilizatsii sklonov i otkosov v opolzneopasnykh usloviyakh stroitelstva* [Analysis of selection of the methods for stabilizing slopes and scarps in landslide-hazardous construction conditions]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneev], vol. 290, pp. 69-87, EDN: VRUZHE. (In Russian).
8. Tkachev A.A., Karelskaya E.V., Makogonov A.V., 2020. *Sovershenstvovanie krepleniya otkosov orositelnykh kanalov* [Improving the fastening of irrigation canal slopes]. *Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya-2020): materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhn. konferentsii, posvyashchennoy 75-letiyu Pobedy v Velikoy Otechestvennoy voyne* [Science, Education, Production in Solving Environmental Problems (Ecology 2020): Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 75th Anniversary of the Victory in the Great Patriotic War]. Ufa, UGAU, vol. 1, pp. 40-43, EDN: ZWXCIO. (In Russian).

9. Bandurin M.A., 2022. *Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenka ostatochnogo resursa rabotosposobnosti vodoprovodnykh sooruzheniy orositelnykh system* [Diagnostics of the Technical Condition and Assessment of the Limited Operation Life of Water Supply Facilities of Irrigation Systems]. 3rd ed., rev. and add. Novocheerkassk, Lik Publ., 230 p., EDN: SXBEVB. (In Russian).
10. Tkachev A.A., Karelskaya E.V., 2020. *Obosnovanie ispolzovaniya razlichnykh konstruksiy pri provedenii beregoukrepitelnykh работ* [Justification of the use of various structures in carrying out coastal protection works]. *Melioratsiya kak drayver modernizatsii APK v usloviyakh izmeneniya klimata: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii* [Land Reclamation as a Driver of Modernization of the Agro-Industrial Complex in the Context of Climate Change: Materials of the International Scientific and Practical Conference Internet Conference]. Novocheerkassk, Lik Publ., pp. 126-132, EDN: ESUDTT. (In Russian).
11. Solskiy S.V., Nazukina Yu.E., 2023. *Sistematizatsiya opasnykh inzhenerno-geologicheskikh protsessov na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh* [Systematization of hazardous engineering-geological processes in hydraulic structures]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneyeva* [Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedenev], vol. 310, pp. 47-61, EDN: WFEHRC. (In Russian).
12. Maslov N.N., 1955. *Usloviya ustoychivosti sklonov i otkosov v gidroenergeticheskom stroitel'stve* [Conditions of Stability of Slopes and Embankments in Hydropower Engineering]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 468 p. (In Russian).
13. Levkevich V.E., Buzuk A.V., Kobayak V.V., 2009. *Prichiny narusheniya ustoychivosti zashchitnykh sooruzheniy na iskusstvennykh vodnykh obyektakh* [Causes of stability failure of protective constructions within artificial water bodies]. *Melioratsiya* [Land Reclamation], no. 1(61), pp. 79-84, EDN: VDFVMR. (In Russian).
14. Vyas S., Garg S., Hasilkar N., 2024. Geosynthetic solutions for river and coastal protection works. *E3S Web of Conferences*, vol. 569, DOI: 10.1051/e3sconf/202456903002, EDN: UWTHF.
15. Ashis M., 2015. Application of geotextiles in coastal protection and coastal engineering works: An overview. *International Research Journal of Environment Sciences*, vol. 4(4), pp. 96-103.
16. Dassanayake D.T., Oumeraci H., 2012. Hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers (GSCS): Effect of engineering properties of GSCS. *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 2, pp. 1-14, DOI: 10.9753/icce.v33.structures.55.
17. Karambas T.V., Samaras A.G., 2017. An integrated numerical model for the design of coastal protection structures. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*, vol. 5, iss. 50, pp. 1-15, DOI: 10.3390/jmse5040050, EDN: YIIGUK.
18. Ivanus I.V., 2021. *K voprosu rascheta ustoychivosti otkosa v razlichnykh programnykh kompleksakh* [To the question of calculation of stability ground slope in various program complexes]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernad'skogo. Geografiya. Geologiya* [Scientific Notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Geography. Geology], vol. 7, no. 1, pp. 276-285, EDN: VHUGCR. (In Russian).
19. Chubka P.Yu., Chubka Yu.Sh., 2021. *Sravnienie metodov rascheta ustoychivosti massivov gruntov* [Comparison of methods for calculating the stability of soil arrays]. *Vestnik evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science], vol. 13, no. 5, EDN: CIVRJW. (In Russian).
20. Agbelele K.J., Houehanou E.C., Ahlinhan M.F., Ali A.W., Aristide H.C., 2023. Assessment of slope stability by the Fellenius slice method: Analytical and numerical approach. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, no. 18(02), pp. 1205-1214, DOI: 10.30574/wjarr.2023.18.2.0874, EDN: NEKORT.

21. Chowdhury R., Flentje P., Bhattacharya G., 2010. Ch. 9. Slope analysis methods. Geotechnical Slope Analysis. 1st ed., London, Springer, pp. 211-249, DOI: 10.1201/9780203864203.

Информация об авторах

В. Ф. Талалаева – научный сотрудник, кандидат технических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская обл., г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), vika-silchenko@mail.ru, AuthorID: 988798, ORCID: 0000-0002-2541-204X;

О. А. Баев – ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, доцент, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации (346421, Ростовская обл., г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), Oleg-Baev1@yandex.ru, AuthorID: 699695, ORCID: 0000-0003-0142-4270;

А. Ю. Гарбуз – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, (346421, Ростовская обл., г. Новочеркасск, пр-т Баклановский, д. 190), A.Y.Garbuz@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1503-7300.

Information about the authors

V. F. Talalaeva – Researcher, Candidate of Technical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novocherkassk, Baklanovsky ave., 190), vika-silchenko@mail.ru, AuthorID: 988798, ORCID: 0000-0002-2541-204X;

O. A. Baev – Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novocherkassk, Baklanovsky ave., 190), Oleg-Baev1@ya.ru, AuthorID: 699695, ORCID: 0000-0003-0142-4270;

A. Yu. Garbuz – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems (346421, Rostov region, Novocherkassk, Baklanovsky ave., 190), A.Y.Garbuz@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1503-7300.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; одобрена после рецензирования 08.05.2026; принята к публикации 16.06.2026.

The article was submitted 04.03.2026; approved after reviewing 08.05.2026; accepted for publication 16.06.2026.