

Численное моделирование укрепления береговой линии реки Волги для обустройства пешеходной дорожки к водоему

Роман Николаевич Никоноров^{1,2}, Ульяна Олеговна Московкина¹,
Екатерина Алексеевна Софронова¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации (НИЦ Тоннельной ассоциации); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сооружение объектов на береговых линиях является дорогостоящей задачей, пользующейся ограниченным спросом. При разработке проектных решений возведения данных объектов требуется учитывать ряд дополнительных задач, например, таких как разработка мероприятий по укреплению склонов и защите грунтового массива от эрозии. В процессе выполнения проектных работ следует дополнительно принимать во внимание технические и технологические возможности реализации проекта в условиях опасных склоновых процессов.

Материалы и методы. Разнообразие условий возведения проектируемых на береговой линии объектов обуславливает ограниченность применения типовых решений, в результате чего возникает необходимость разработки индивидуального комплекса решений для каждого объекта, начиная с принципиального выбора технологических и конструктивных решений. Рассмотрены геотехнические аспекты проектирования инженерной защиты склона береговой линии р. Волги в районе д. Черкасово в рамках реализации проекта по благоустройству с учетом технологических и конструктивных особенностей территории.

Результаты. Выполнено численное моделирование производства работ на существующей площадке проектирования с оценкой устойчивости склона при условии проведения защитных мероприятий. Получены результаты оценки устойчивости грунтового массива.

Выводы. Проанализированы и представлены наиболее значимые факторы, влияющие на определение оптимальных конструктивных решений, предложены возможные варианты отдельных геотехнических решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивость склона, инженерная защита, благоустройство, берегоукрепительные мероприятия, численное моделирование, геотехнические решения

Благодарности. Авторы выражают признательность рецензенту, чьи подробные комментарии и рекомендации помогли повысить качество статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никоноров Р.Н., Московкина У.О., Софронова Е.А. Численное моделирование укрепления береговой линии реки Волги для обустройства пешеходной дорожки к водоему // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 906–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.906-921

Автор, ответственный за переписку: Роман Николаевич Никоноров, nikonorov.m@nizta.ru.

Numerical modeling of Volga River bank stabilization for the development of a pedestrian path to the water body

Roman N. Nikonorov^{1,2}, Ulyana O. Moskovkina¹, Ekaterina A. Sofronova¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Scientific and Engineering Center of the Tunnel Association; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Construction of facilities on riverbanks is a costly task with limited demand. A number of supplementary issues should be taken into account when developing design solutions for their construction. These issues include the development of slope stabilization measures and protection of the soil mass from erosion. The technical and technological feasibility of implementing such projects under conditions of hazardous slope processes should also be considered in the course of design development.

Materials and methods. The variety of conditions under which facilities on riverbanks are constructed limits the applicability of standard solutions; as a result, an individual set of solutions becomes necessary for each facility, beginning with the fundamental selection of technological and structural solutions. The geotechnical aspects of designing engineering protection facilities for the Volga riverbank slope near the village of Cherkasovo are considered within the framework of an improvement project, taking into account the technological and structural features of the site.

Results. Numerical modeling of construction operations at the existing project site was performed to assess slope stability after the implementation of protective measures. The analysis provided stability assessment results for the soil mass.

Conclusions. The most significant factors influencing the selection of optimal structural solutions were analyzed and presented, and possible options for specific geotechnical solutions were proposed.

KEYWORDS: slope stability, engineering protection, site improvement, bank protection measures, numerical modeling, geotechnical solutions

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the reviewer, whose detailed comments and recommendations helped improve the quality of the article.

FOR CITATION: Nikonorov R.N., Moskovkina U.O., Sofronova E.A. Numerical modeling of Volga River bank stabilization for the development of a pedestrian path to the water body. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):906-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.906-921 (rus.).

Corresponding author: Roman N. Nikonorov, nikonorov.rn@nizta.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемый участок склона расположен на берегу р. Волги в Тверской области. Территория находится под сельской застройкой. Овражно-балочная сеть развита слабо, местность имеет резкий склон в сторону реки в непосредственной близости от нее. На участке один водный объект — р. Волга в подпоре от Угличского гидроузла. В соответствии с результатами гидрометеорологических изысканий выявлен размыв грунта в зоне течения реки со средней скоростью 20 см/год.

Расположение и архитектурные решения благоустройства спуска показаны на рис. 1.

Инженерно-геологические условия площадки

Инженерно-геологические условия площадки на изученной глубине 20 м представлены насыпными, песчаными и глинистыми грунтами различного генезиса. Геологическое строение территории состоит из следующих геолого-генетических комплексов отложений:

- 1) современные техногенные отложения (tQIV);
- 2) современные склоновые отложения (dQIV);
- 3) верхнепермские отложения татарского яруса (P2t).

Специфические грунты на рассматриваемом участке имеют насыпные грунты (tQIV) ИГЭ-1 и ИГЭ-1в

мощностью до 1,6 м. Насыпные грунты — слежавшиеся насыпные отложения (плановая разновозрастная отсыпка возрастом более 10 лет). Насыпной грунт (ИГЭ-1) песчаного состава содержит пески средней крупности; насыпной грунт глинистого состава (ИГЭ-1в) — суглинки полутвердые, прослой твердые, мощностью от 0,05 до 1,0 м.

Среди важнейших специфических особенностей техногенных грунтов, отрицательно влияющих на их инженерно-геологическую оценку, следует отметить:

- значительную неоднородность по составу и неравномерную сжимаемость;
- возможность самоуплотнения от собственного веса, особенно при вибрационных воздействиях.

Водовмещающими грунтами являются пески различной крупности с прослоями и линзами супесей, суглинков, глин. Горизонт безнапорный, типа «верховодка». Горизонт хорошо водопроницаемый. Нижний водоупор — литологический — глинистые коренные отложения позднепермского возраста.

Глубина залегания грунтовых вод при вскрытии в апреле от 0,8 до 4,5 м. Коэффициент фильтрации от 12,38 до 23,27 м/сут в зависимости от плотности сложения песков. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, а также подтока из водоносного комплек-



Рис. 1. Расположение и архитектура спуска

Fig. 1. Location and architectural design of the descent to the water

Табл. 1. Нормативные и расчетные характеристики грунтов
Table 1. Characteristic values of soil parameters

Номер ИГЭ Numbered engineering- geological units	Наименование ИГЭ Types of engineering- geological units	Рекомендуемые нормативные значения характеристик Recommended design values of soil properties					При $\alpha = 0,85$ / If $\alpha = 0,85$				При $\alpha = 0,95$ / If $\alpha = 0,95$			
		ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	E , МПа E , MPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa
1	Насыпной грунт песчаного состава: пески средней крупности / Fill soil of sandy composition: medium-grained sands	1,81 2,01*	37(34)/32(28)	2(1)/1(1)	21	1,84 2,08	37(33)/31(27)	1(1)/1(1)	1,85 2,13	36 (33)/ 30(26)	1(1)/1(1)			1(1)/1(1)
1b	Насыпной грунт глинистого состава: суглинки, полутвердые, прослоями твердые Fill soil of clayey composition: semi-hard loams, with hard interlayers	1,97	(17)/14(14)	(36)/25(25)	7	1,99	(16)/13(13)	(33)/22(22)	2,00	(15)/13(13)				30/20(20)
6	Суглинки, твердые, прослоями полутвердые Hard loams, with semi-hard interlayers	1,94	24/22(22)	40/28(18)	25	1,96	23/21(20)	37/26(17)	1,97	23/21(20)				35/24(16)
7	Глины твердые, прослоями полутвердые Hard clays, with semi-hard interlayers	1,95	21/(21)	63(28)	21	1,95	20/(20)	57/(25)	1,95	20/(19)				52/(23)

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Номер ИГЭ Numbered engineering- geological units	Наименование ИГЭ Types of engineering- geological units	Рекомендуемые нормативные значения характеристик Recommended design values of soil properties						При $\alpha = 0,85$ / If $\alpha = 0,85$			При $\alpha = 0,95$ / If $\alpha = 0,95$		
		ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	E , МПа E , MPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees	C , кПа C , kPa	ρ , г/см ³ ρ , g/cm ³	φ , град φ , degrees
10a	Пески пылеватые, средней плотности, влажные, водонасыщенные Silty sands, medium dense, moist to saturated	1,76 1,92	31/(23)	3/(3)	22	1,81 1,97	30/(24)	3/(3)	1,83 2,00	30/(22)	3/(3)		
10b	Пески пылеватые, рыхлые, влажные Silty sands, loose, moist	1,71	28/(25)	2/(2)	14	1,79	27/(24)	2/(1)	1,84	27/(23)	2/(1)		
11	Пески пылеватые, плотные, влажные, водонасыщенные Silty sands, dense, moist to saturated	1,93 2,09	36/(32)	7/(4)	30	2,06 2,19	35/(30)	7/(3)	2,15 2,27	34/(29)	7/(3)		
11c	Супеси твердые, прослоями пластичные Hard sandy loams, with plastic interlayers	1,97	30/(12)	26/(11)	39	1,98	29/(12)	25/(10)	1,99	28/(11)	24/(10)		

Примечание: * — принято на основании архивных данных. Прочностные характеристики приведены в числителе для водонасыщенного состояния, в знаменателе — по результатам среза «плашка по плашке» по сухой (по смоченной) поверхности.
Note: * — adopted based on archival data. Strength characteristics are given in the numerator for the water-saturated state and in the denominator based on the results of a direct shear test, “plate against plate”, on a dry/wetted surface.

са, приуроченного к четвертичным склоновым отложениям борта долины и из водоносного комплекса верхнепермского горизонта. В периоды паводка уровень потенциального повышения данного горизонта может подниматься на 1,5–2,0 м из-за эффекта подпора паводковыми водами р. Волги.

В табл. 1 приведены основные нормативные и расчетные характеристики грунтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Учитывая неоднородность напластования и физико-механических свойств грунтов рассматриваемого склона, можно предположить возможное скольжение [1–3] и обрушение грунтов [4–7] при производстве работ по благоустройству береговой линии, включающей в себя не только возведение пешеходных настилов, но и подрезку насыпных грунтов.

К определению возможных поверхностей скольжения при потере устойчивости грунтов склона можно подойти, пользуясь различными методами [8–18], среди них:

1) метод Феллениуса, который учитывает только сумму моментов всех сил, удерживающих откос;

2) метод Шахунянца, учитывающий равновесие сил по направлению скольжения и нормальные усилия между отсеками, на которые была разбита призма скольжения;

3) метод Ямбу исходит из равновесия сил по направлению скольжения и нормальных усилий между отсеками, на которые была разбита призма скольжения;

4) метод Спенсера принимает во внимание все воздействия: равновесие сил по направлению скольжения; нормальные усилия между отсеками, на которые была разбита призма скольжения; сумму моментов всех сил, удерживающих откос; касательные усилия между отсеками;

5) метод Моргенштерна – Прайса учитывает все воздействия: равновесие сил по направлению скольжения; нормальные усилия между отсеками, на которые была разбита призма скольжения; сумму моментов всех сил, удерживающих откос; касательные усилия между отсеками;

6) метод Бишоп рассматривает сумму моментов всех сил, удерживающих откос и нормальные усилия между отсеками, на которые была разбита призма обрушения;

7) метод касательных сил учитывает только равновесие сил по направлению скольжения;

8) численное моделирование с использованием метода конечных элементов, метода конечных разностей, метода дискретных элементов и других методов [19–23].

Все расчетные методы оценки степени устойчивости склонов основаны на применении теории предельного равновесия, рассматривающей предельное напряженное состояние грунтового массива.

Варианты укрепления склона [24–29] площадки:

1. Георешетки¹.

Георешетка применяется для укрепления склонов с целью устранения сыпучести слабых грунтов и обеспечения эффективного дренажа². Устройство георешетки³ не препятствует фильтрации влаги и не нарушает режимы питания растений и газонов. Ячеистая конструкция также позволяет предотвратить разрушение почвенного слоя на откосах. Данный вариант замедляет процесс эрозии поверхности склона, но не увеличивает сопротивление склона оползневым процессам.

2. Лесонасаждение.

Для дополнительного укрепления склона также возможно использование лесонасаждений в сочетании с посевом многолетних трав или одерновкой. Устойчивость достигается за счет корневой системы деревьев и кустарников, которая пронизывает грунт на различную глубину и создает прочный каркас, однако степень оценки эффективности укрепления склона сложно прогнозируется.

3. Ограждающие консольные конструкции с применением армирующих элементов.

Подпорные стенки в местах подрезки грунта для обустройства площадок спуска могут быть выполнены следующих видов:

- шпунтовое ограждение;
- свайное ограждение, выполняемое из буронабивных, буросекущихся, бурокасательных, забивных и других видов свай;
- стальные элементы из прокатного профиля с деревянной или композитной заборкой;
- монолитная стена в грунте. Технология устройства монолитной подземной стены непосредственно в грунте без разработки открытого котлована. Является дорогостоящей и неостребованной в сложных геологических и геоморфологических условиях и принятых конструктивных решениях рассматриваемого объекта строительства, при суммарной длине ограждающих конструкций составляет 20 м;
- сборная стена в грунте. Стена в грунте, устраиваемая из сборных (предварительно изготовленных железобетонных, стальных, деревянных, композитных и т.п.) элементов, погружаемых забивкой или вдавливанием без выемки грунта с помощью молотов, вибропогружателей, вибровдавливающих, виброударных, вдавливающих и вращательно-вдавливающих устройств;
- ограждение из грунтоцементных элементов, изготавливаемых путем смешивания местного грунта

¹ ГОСТ Р 56708–2015. Георешетка полимерная гексагональная. Технические условия. М., 2015.

² ОДМ 218.2.051–2015. Рекомендации по проектированию и расчету противооползневых сооружений на автомобильных дорогах. М., 2015.

³ СТО 30478650-001–2012. Георешетка дорожная армированная (РД). Технические условия. М., 2012.

с цементным раствором непосредственно на площадке производства работ.

Каждый из представленных вариантов крепления грунта имеет свои преимущества и недостатки как конструктивные, так и технологические. В статье рассмотрен вариант устройства ограждения в виде сборной стены в грунте.

4. Предотвращение размыва грунтов в зоне постоянного контакта с водой.

Одним из вариантов реализации мероприятий по обеспечению сохранности грунтов береговой линии в зоне постоянного контакта с водой является устройство ограждающих конструкций с применением:

- стальных элементов;
- железобетонных элементов;
- элементов из композитных материалов;
- деревянных конструкций. Особенно долговечно и надежно ведут себя конструкции из лиственницы.

Выбор варианта защиты грунта в зоне постоянного контакта с водой от размыва необходимо оценивать не только с точки зрения экономической эффективности, но и с позиции коррозионной стойкости, доступности подбираемых материалов и возможностей устройства в сложившихся условиях. Технология возведения подпорной стены из лиственничных бревен наиболее проста и менее затратна. В сложившихся гидрометеорологических условиях в зоне постоянного контакта береговой линии с водой оптимальным будет вариант конструкции из бревен лиственницы.

Также для предотвращения суффозионных и эрозийных процессов верхних слоев грунта может быть выполнена засыпка пространства между ограждающей конструкцией и существующей поверхностью склона щебнем, песком и булыжниками.

Проектные решения площадки строительства предполагают устройство спуска к воде в виде шести горизонтально расположенных платформ, выполненных из плит, соединенных между собой лестницами с возведением беседки на одной из платформ. Установка плит предусматривается на естественном основании. Одна из платформ частично находится над водой, ее опирание предусмотрено в виде опор из трубобетона диаметром 388 мм с заполнением бетоном класса по прочности не ниже В25, марки водонепроницаемости не менее W8, класса по морозостойкости F200. Материал платформ — бетон класса по прочности В25 толщиной 250 мм. Облицовочные и ограждающие материалы подпорных стен изготавливаются из бетона класса по прочности не ниже В20, по водонепроницаемости не ниже W4 в местах выше прогнозируемого уровня поднятия вод и не ниже W8 в местах ниже уровня вод, по морозостойкости не ниже F200.

Исходя из проектных решений и вышеизложенных вариантов обеспечения устойчивости склона в качестве защитных мероприятий принимаются:

- устройство подпорных стен выше прогнозируемого уровня воды выполняется в виде сборной сте-

ны в грунте, устойчивость которой обеспечивается заделкой в грунт;

- ограждающие конструкции вдоль береговой линии выполняются из бревен лиственницы диаметром 300 мм с шагом, равным их диаметру;
- планировка поверхности путем срезки насыпного слоя грунта;
- засыпка пространства между ограждающей конструкцией и существующей поверхностью склона щебнем, песком и булыжниками.

В представленном исследовании для определения устойчивости многоуровневого неоднородного склона использовался сертифицированный в РФ программный комплекс (ПК) Plaxis 2D. В качестве анализируемого показателя рассматривается коэффициент запаса устойчивости склона — показатель отношения сил, удерживающих массив грунта на наклонной поверхности, к силам, сдвигающим этот массив.

Численным методом коэффициент устойчивости определяется последовательным снижением расчетных значений характеристик сопротивления сдвигу грунта ϕ , c до ϕ' , c' , соответствующих предельному состоянию склона при учете фактических геологических и гидрогеологических условий.

Численные расчеты выполнялись с применением модели Мора — Кулона в соответствии с результатами данных инженерно-геологических изысканий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты в ПК Plaxis 2D проводились в соответствии с проектируемыми стадиями производства работ по объекту:

1. Загружение собственным весом грунта и определение начального напряженно-деформированного состояния грунтового массива.
2. Выполнение срезки насыпного слоя в соответствии с проектными решениями для предотвращения атмосферной эрозии берегового склона и дальнейшего устройства георешетки.

Деформированная сетка и изополя общих деформаций представлены на рис. 2, 3.

Призма скольжения и данные по расчету устойчивости грунтового массива на этапе срезки насыпного слоя приведены на рис. 4, 5.

3. Устройство ограждающей конструкции из бревен вдоль береговой линии.

4. Устройство ограждающих конструкций типа «стена в грунте» из сборного железобетона в зоне расположения пешеходных платформ и дорожек с целью предотвращения местной потери устойчивости склона и развития негативных последствий.

На рис. 6 представлена деформированная сетка на этапе завершения работ 3-й и 4-й стадий расчета. Общие перемещения приведены на рис. 7.

Вид призмы скольжения после устройства ограждающих конструкций 3-й и 4-й стадий расчета приведен на рис. 8, данные по результатам оцен-

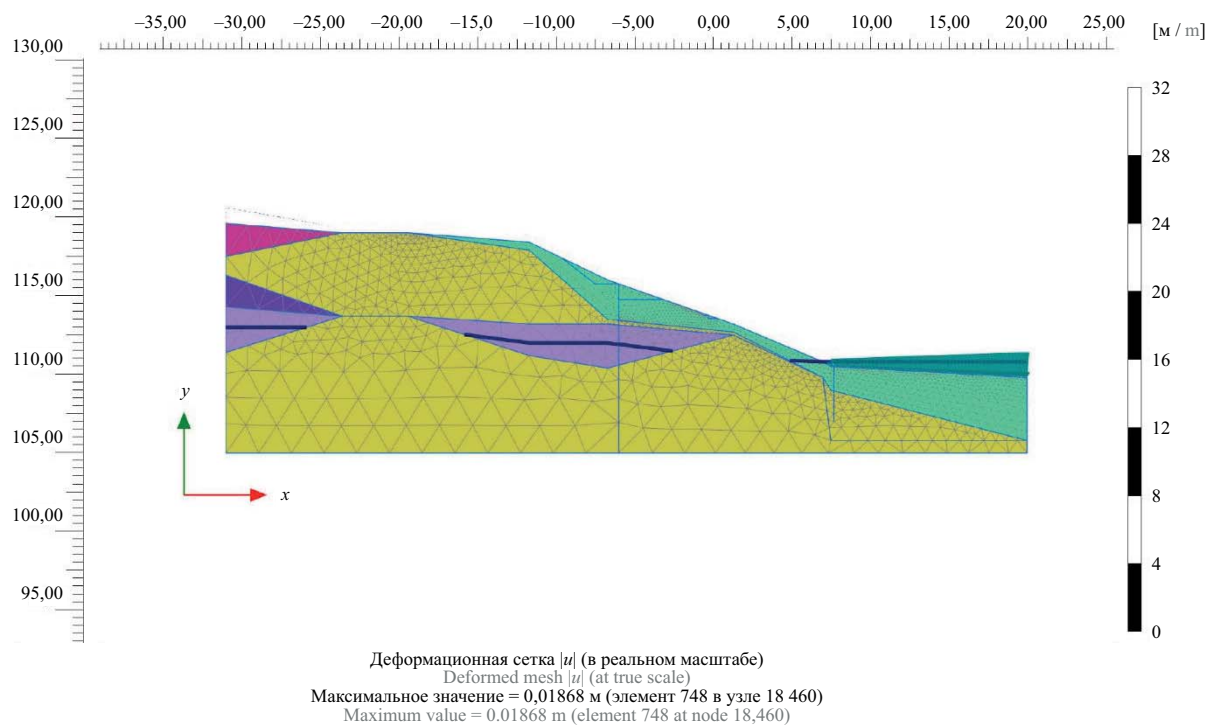


Рис. 2. Деформированная сетка на стадии срезки ИГЭ-1

Fig. 2. Deformed mesh at the shear stage of EGU-1

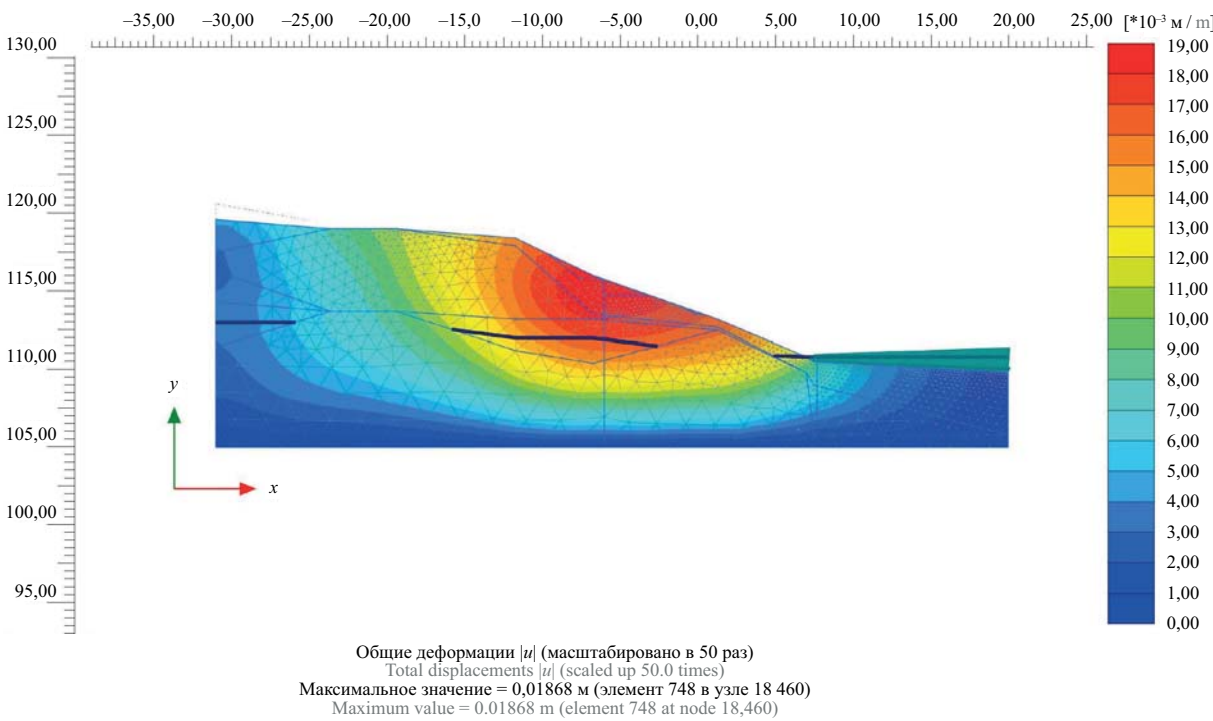


Рис. 3. Общие перемещения на стадии срезки ИГЭ-1

Fig. 3. Total displacements at the shear stage of EGU-1

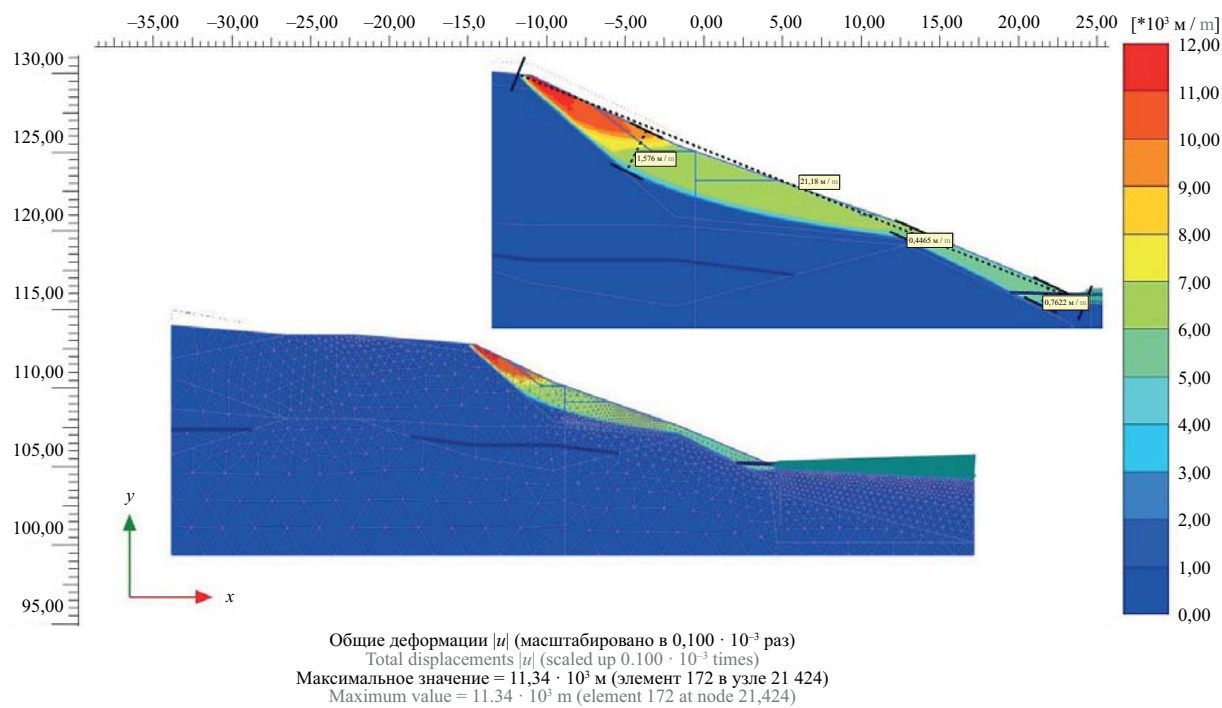


Рис. 4. Призма скольжения на стадии срезки ИГЭ-1

Fig. 4. Sliding prism at the shear stage of EGU-1

Информация о шаге / Step info				
Фаза / Phase	Уст срезка [Phase_11] / Stab cuting (фаза_11)			
Шаг / Step	Начальный / Initial			
Режим расчета / Calulation mode	Классический режим / Classical mode			
Тип шага / Step type	Безопасность / Safety			
Обновленная сетка Updated mesh	Нет / False			
Тип решателя / Solver type	Пикос / Picos			
Тип ядра / Kernel type	64 бит / 64 bit			
Коэффициент экстраполяции Extrapolation factor	2,000			
Относительная жесткость Relative stiffness	−1,778E ^{−12}			
Множители / Multipliers				
Вес грунта / Soil weight			$\sum M_{Weight}$	1,000
Коэффициент снижения прочности Strength reduction factor	M_{sf}	−0,05977E ^{−3}	$\sum M_{sf}$	1,846
Время / Time	Приращение Increment	0,000	Конечное время End time	0,000
Поэтапное строительство / Staged construction				
Активная доля общей площади Active proportion total area	M_{Area}	0,000	$\sum M_{Area}$	0,9715
Активная доля этапа Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	$\sum M_{Stage}$	0,000
Силы / Forces				
F_x	0,000 кН/м / kN/m			
F_y	0,000 кН/м / kN/m			
Консолидация / Consolidation				
Реализованное избыточное давление, макс Realised $P_{Excess,Max}$	0,000 кН/м ² / kN/m ²			

Рис. 5. Информация о расчетном этапе на фазе срезки ИГЭ-1 ($k_{уст}$)

Fig. 5. Calculation-stage information for the EGU-1 shear phase (k_{sf})

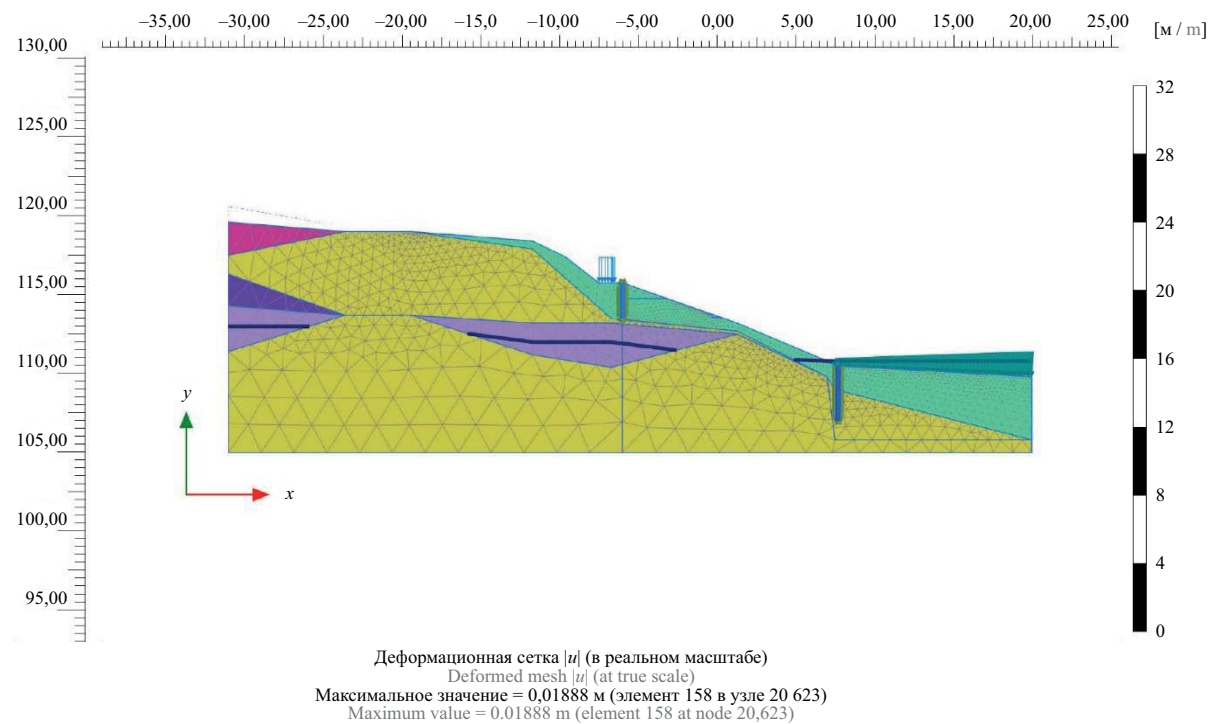


Рис. 6. Деформированная сетка на стадии устройства ограждения из сборного железобетона
Fig. 6. Deformed mesh at the stage of installing the precast reinforced concrete retaining structure

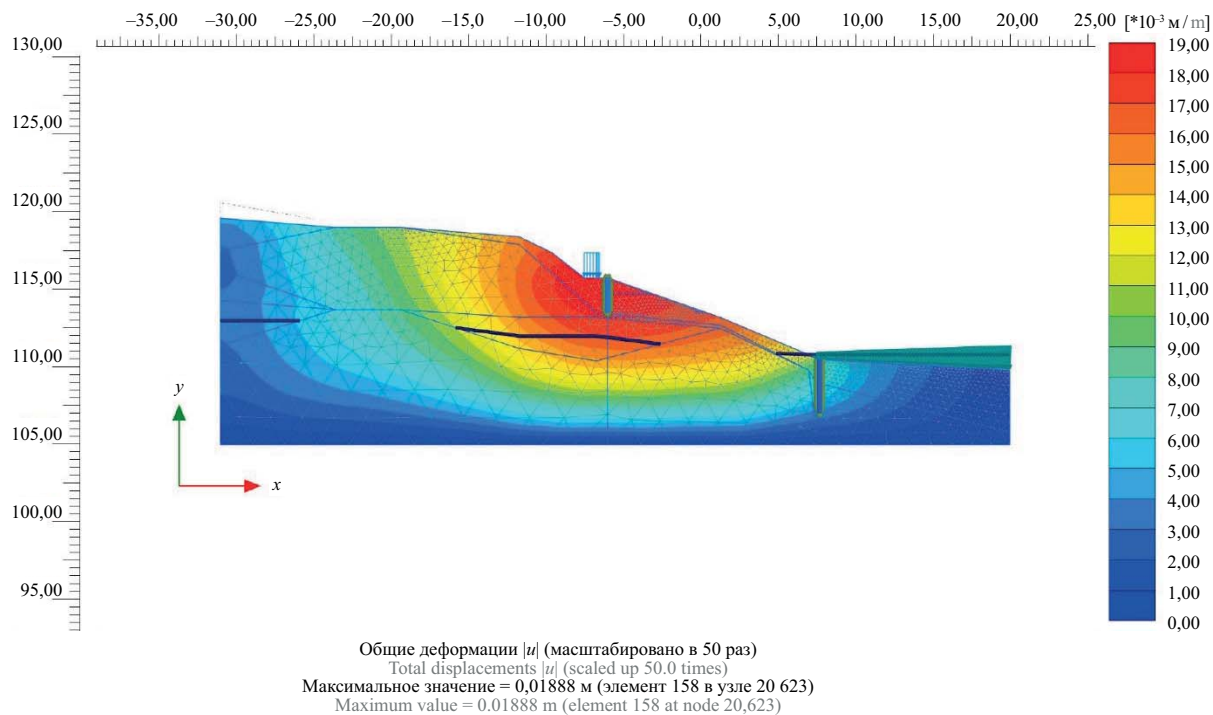


Рис. 7. Общие перемещения на стадии устройства ограждения из сборного железобетона
Fig. 7. Total displacements at the stage of installing the precast reinforced concrete retaining structure

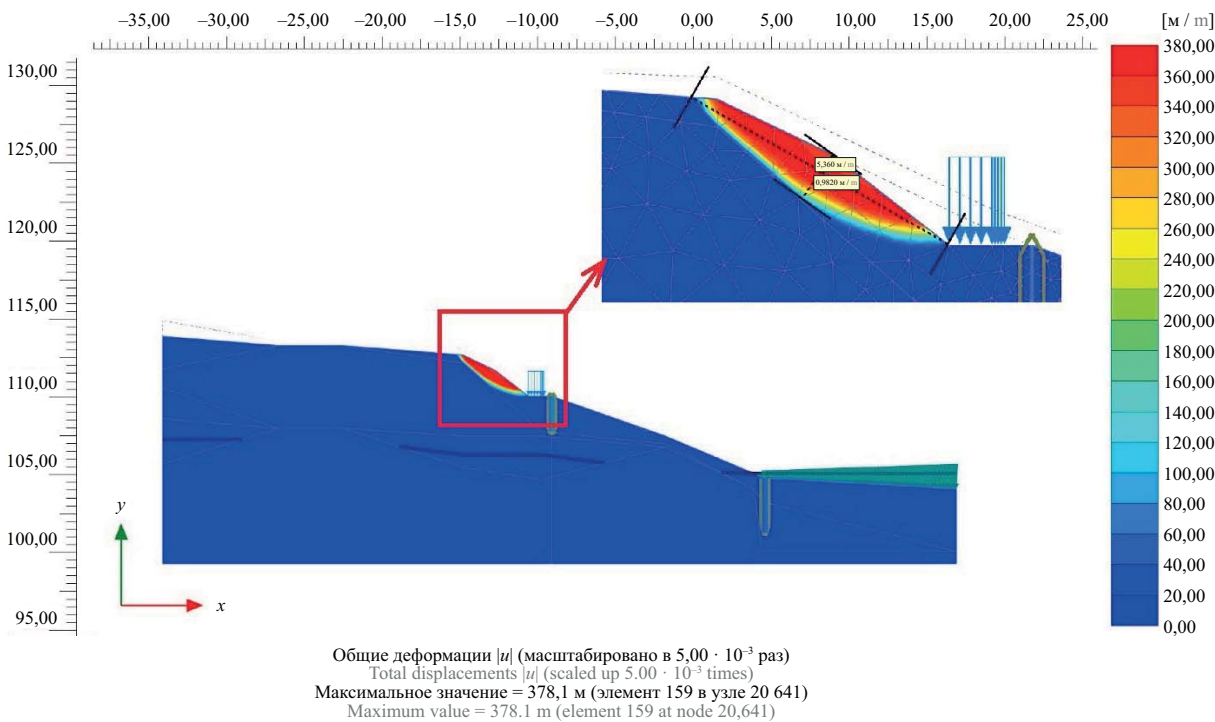


Рис. 8. Призма скольжения на этапе устройстве ограждения из сборного железобетона

Fig. 8. Sliding prism at the stage of installing the precast reinforced concrete retaining structure

Информация о шаге / Step info				
Фаза / Phase	Уст нагр [Phase_8] / Stab loading (фаза_8)			
Шаг / Step	Начальный / Initial			
Режим расчета / Calulation mode	Классический режим / Classical mode			
Тип шага / Step type	Безопасность / Safety			
Обновленная сетка Updated mesh	Нет / False			
Тип решателя / Solver type	Пикос / Picos			
Тип ядра / Kernel type	64 бит / 64 bit			
Коэффициент экстраполяции Extrapolation factor	2,000			
Относительная жесткость Relative stiffness	−0,08563E ^{−9}			
Множители / Multipliers				
Вес грунта / Soil weight			$\sum M_{Weight}$	1,000
Коэффициент снижения прочности Strength reduction factor	M_{sf}	−0,08985E ^{−3}	$\sum M_{sf}$	1,439
Время / Time	Приращение Increment	0,000	Конечное время End time	0,000
Поэтапное строительство / Staged construction				
Активная доля общей площади Active proportion total area	M_{Area}	0,000	$\sum M_{Area}$	0,9694
Активная доля этапа Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	$\sum M_{Stage}$	0,000
Силы / Forces				
F_x	0,000 кН/м / kN/m			
F_y	0,000 кН/м / kN/m			
Консолидация / Consolidation				
Реализованное избыточное давление, макс Realised $P_{Excess,Max}$	0,000 кН/м ² / kN/m ²			

Рис. 9. Информация о расчетном этапе на фазе устройства ограждения из сборного железобетона ($k_{\text{уст}}$)

Fig. 9. Information about the calculation phase at the stage of installing the precast reinforced concrete retaining structure (k_{sf})

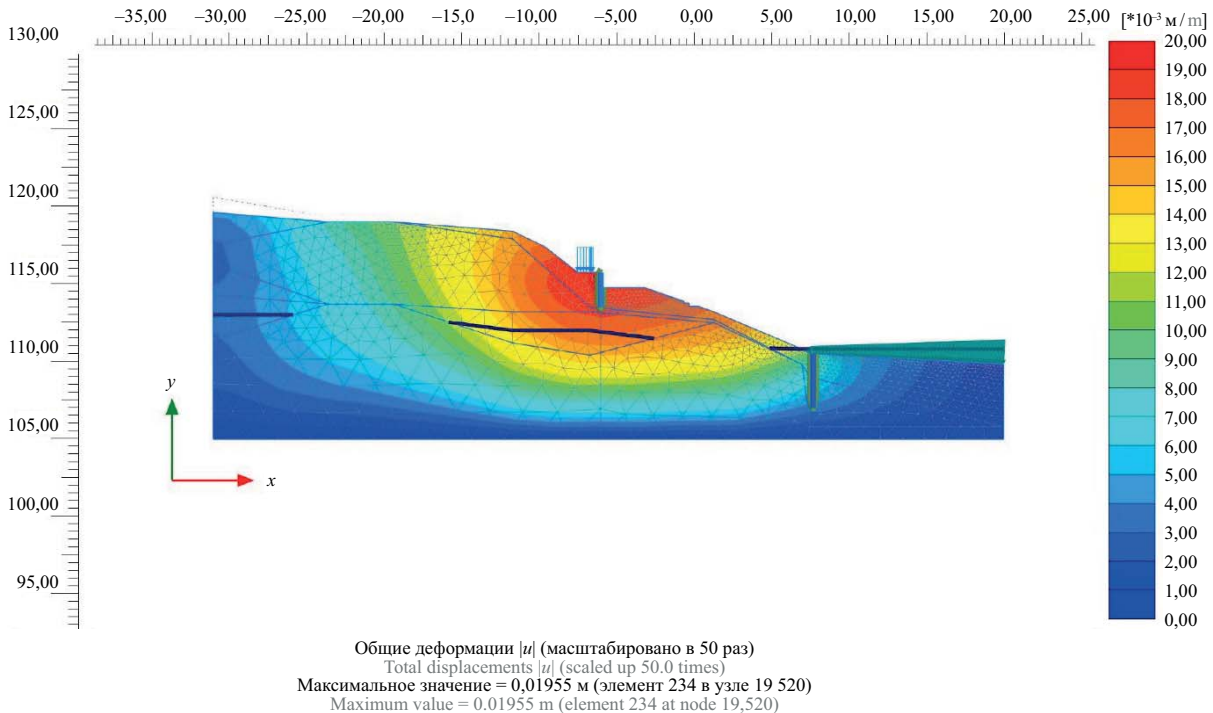


Рис. 10. Общие перемещения на стадии разработки грунта для устройства лестницы
Fig. 10. Total displacements during excavation for stair construction

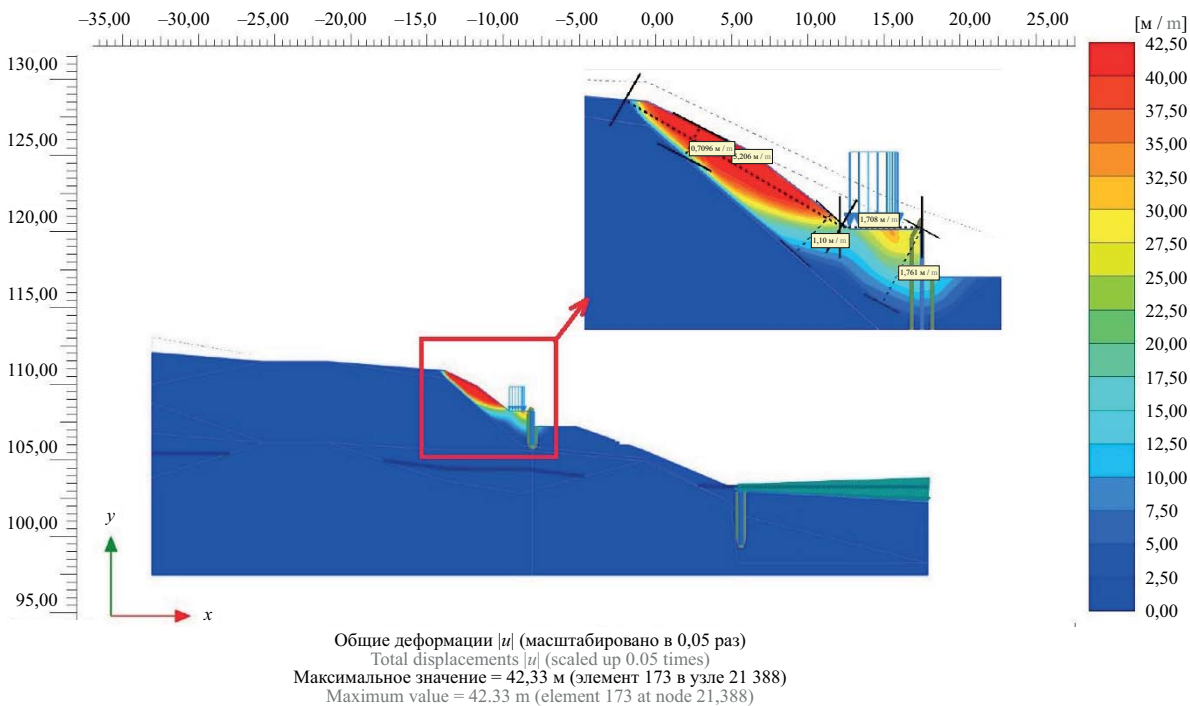


Рис. 11. Призма скольжения на фазе разработки грунта для устройства лестницы
Fig. 11. Sliding prism during excavation for stair construction

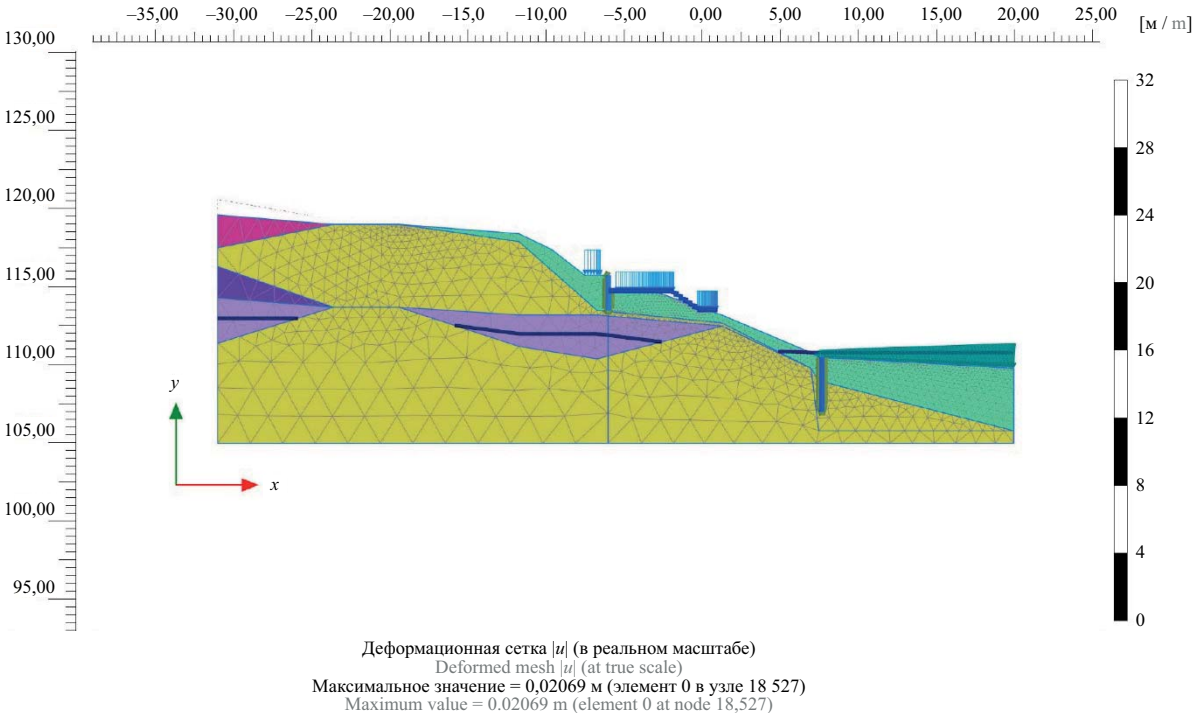


Рис. 12. Деформированная сетка эксплуатационной стадии

Fig. 12. Deformed mesh at the stage of operation

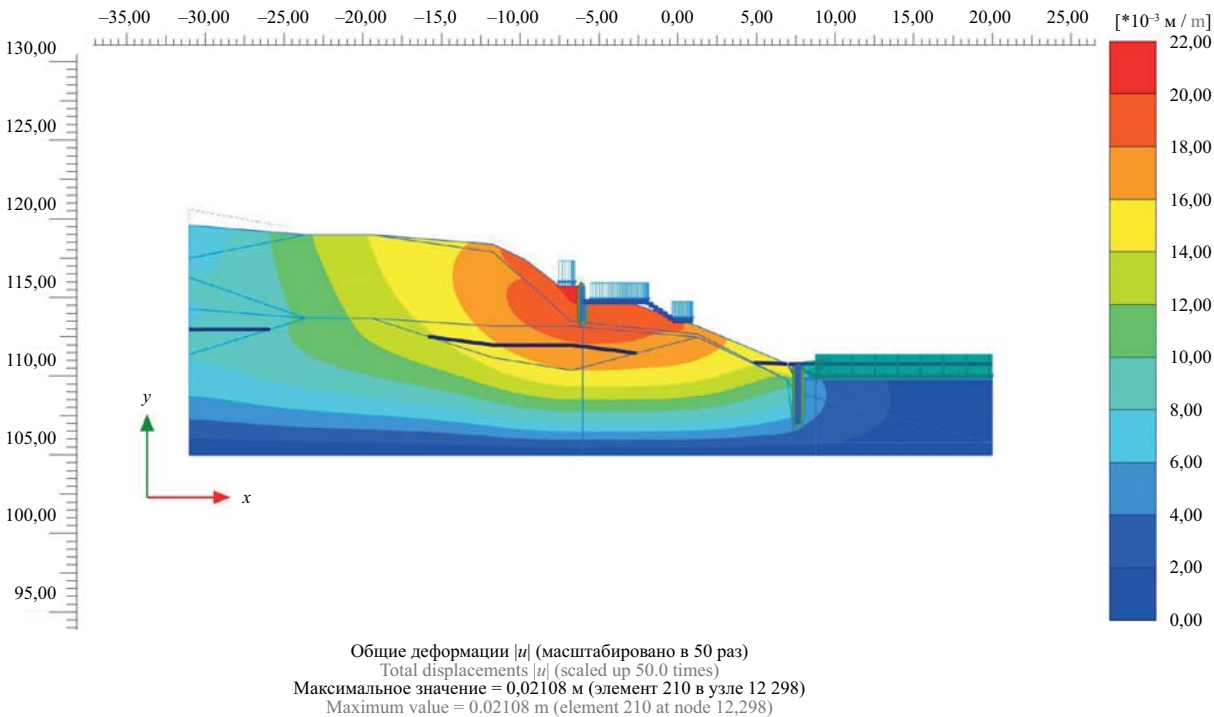


Рис. 13. Общие деформации на стадии эксплуатации

Fig. 13. Total displacements at the stage of operation

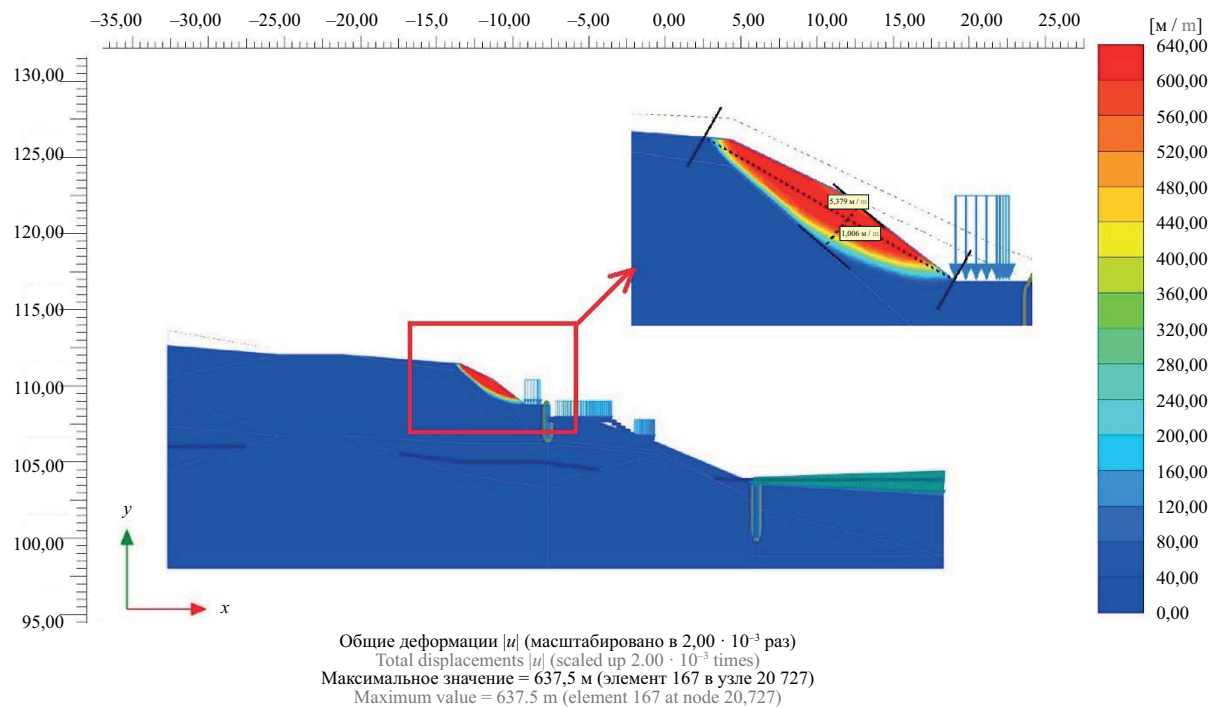


Рис. 14. Призма скольжения на эксплуатационной фазе

Fig. 14. Sliding prism at the stage of operation

Табл. 2. Результаты расчетов коэффициентов устойчивости на различных стадиях расчета

Table 2. Results of stability factor calculations at various stages of analysis

Номер стадии Stage number	Наименование / Stage name	$k_{уст}$ факт k_{sf} actual	$k_{уст}$ треб k_{sf} required
2	Срезка ИГЭ-1 EGU-1 shear stage	1,85	1,2
3	Ограждающая конструкция из бревен лиственницы Retaining structure made of larch logs	1,84	
4	Стена в грунте в зоне расположения пешеходных платформ и дорожек Diaphragm wall near pedestrian platforms and pathways	1,44	
5	Разработка грунта для устройства пешеходных платформ Excavation for construction of pedestrian platforms	1,47	
6	Возведение пешеходных платформ и лестниц Construction of pedestrian platforms and stairs	1,44	
7	Эксплуатационная стадия Operation stage	1,44	

ки устойчивости склона на 4-й стадии представлены на рис. 9.

5. Разработка грунта для устройства пешеходных платформ и проверка устойчивости системы «грунтовой массив – сооружение».

На рис. 10 показаны изополя общих деформаций массива грунта на этапе завершения разработки грунта для устройства пешеходных платформ.

Вид формирующейся призмы обрушения на данном этапе расчета представлен на рис. 11.

6. Возведение пешеходных платформ и лестниц.

7. Приложение эксплуатационной нагрузки на пешеходные платформы величиной 15 кН/пог. м.

На рис. 12, 13 приведены результаты расчетов общих деформаций на завершающем этапе производства работ.

Призма обрушения, полученная по результатам численного моделирования на этапе завершения работ по проектируемому объекту, показана на рис. 14.

Анализируя полученные результаты на каждой стадии расчета, можно сделать вывод о том, что принятые решения являются эффективными в рассматриваемых условиях проектируемого благоустройства. Критерий устойчивости склона на всех этапах осуществления работ не ниже предельного значения

1,2⁴, т.е. выполняется условие: $k_{уст}^{факт} > k_{уст}^{треб}$. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования приняты следующие защитные мероприятия:

- планировка поверхности;

⁴ СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения : введ. 01.01.2013. М., 2012.

- возведение ограждающей конструкции вдоль береговой линии из бревен лиственницы;
- засыпка пространства между ограждающей конструкцией и существующей поверхностью склона щебнем, песком и булыжниками;
- устройство подпорных стен выше прогнозируемого уровня воды в виде сборной стены в грунте, устойчивость которой обеспечивается заделкой в грунт.

Принятые защитные мероприятия обеспечивают штатную эксплуатацию проектируемых конструкций и сооружений в сложившихся условиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гинзбург Л.К. Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости склона и оползневого давления. М. : Центральное бюро научно-технической информации, 1986. 123 с.
2. Симонян В.В. Определение главных осей движения оползня по эллипсу смещений // Актуальные проблемы землепользования, землеустройства и кадастров : сб. ст. Всеросс. школы молодых ученых. 2006. С. 334–344. EDN SAQAWX.
3. Хвостова О.Е. Оценка запаса устойчивости склонов береговой линии Горьковского водохранилища // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4 (83). С. 50–61. EDN NUXQYX.
4. Farres P.J. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability // Catena. 1987. Vol. 14. Issue 1–3. Pp. 119–130. DOI: 10.1016/s0341-8162(87)80009-7
5. Poesen J. Field measurements of splash erosion to validate a splash transport model // Zeitschrift für Geomorphologie. 1986. Vol. 58. Pp. 81–91.
6. Кондрашова В.А., Мельникова Е.С., Черднichenko Т.Ф. Повышение надежности капитального ремонта защитных сооружений причальной набережной реки Волги, расположенной в Ворошиловском районе г. Волгограда // Экономика строительства. 2025. № 6. С. 592–595. EDN APUPLH.
7. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М. : ЛЕНАНД, 2015. 320 с.
8. Albataineh N. Slope stability analysis using 2D and 3D methods. Akron : The University of Akron, 2006.
9. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // Géotechnique. 1955. Vol. 5. Issue 1. Pp. 7–17. DOI: 10.1680/geot.1955.5.1.7
10. Gitirana G.Jr. Weather-related Geo-hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability : PhD Thesis. Saskatoon : University of Saskatchewan, 2005.
11. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis // Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes. 1954. Pp. 43–49.
12. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces // Géotechnique. 1965. Vol. 15. Issue 1. Pp. 79–93. DOI: 10.1680/geot.1965.15.1.79
13. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Тимофеев Е.М. Новый подход к расчету устойчивости оползневых склонов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2008. № 1. С. 21–29. EDN JVAQBR.
14. Сироткина О.Н., Тарабукин В.В., Фоменко И.К., Шубина Д.Д. Сравнительный анализ методов расчета устойчивости склона в объемной постановке задачи // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 9–1 (99). С. 55–62. DOI: 10.23670/IRJ.2020.99.9.011. EDN OJPPWS.
15. Фоменко И.К. Общая классификационная схема методов расчета устойчивости склонов // Научные труды SWorld. 2012. Т. 35. № 3. С. 75–80. EDN PDHMBV.
16. Фоменко И.К. Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 44–53. EDN PLSVTP.
17. Фоменко И.К., Зеркаль О.В. Преимущества методов оценки устойчивости склонов в трехмерной постановке // Геотехника. 2011. № 5. С. 38–41. EDN OWGMSH.
18. Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Горобцов Д.Н. Современные средства в количественной оценке устойчивости склонов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения : мат. науч.-практ. конф. 2017. С. 94–101. EDN ZROHVF.
19. Gitirana G.Jr., Santos M.A., Fredlund M.D. Three-dimensional analysis of the Lodalen landslide // GeoCongress 2008. 2008. Pp. 186–190. DOI: 10.1061/40971(310)23
20. Васильев С.А. Математическая модель для прогноза эрозионных процессов на склоновых агроландшафтах // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 9 (184). С. 96–100. EDN VHLKCD.
21. Копытов Д.Ю., Овчинникова С.В., Коженко Н.В. Интегрированное применение методов расчета устойчивости оползневых склонов // Инженерный вестник Дона. 2024. № 8 (116). С. 514–520. EDN PRUZEC.

22. Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Обзор зарубежного опыта инженерной защиты морских берегов и склонов // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. 2024. Т. 3. № 1. С. 27–47. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47. EDN ZBEPOK.

23. Сироткина О.Н., Фоменко И.К., Горобцов Д.Н. О классификации математических методов оценки локальной оползневой опасности // Наука России: цели и задачи : сб. науч. тр. по мат. II Междунар. науч. конф. 2017. С. 50–55. DOI: 10.18411/sr-10-04-2017-2-13. EDN YQALPN.

24. Bauer B. Soil splash as an important agent of erosion // *Geographia Polonica*. 1990. Vol. 58. Pp. 99–106.

25. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes // *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247*. Washington, DC : Transportation Research Board, 1996. Pp. 36–75.

26. Highland L.M., Bobrowsky P. The landslide handbook — A guide to understanding landslides // Circular. 2008. 129 p. DOI: 10.3133/cir1325

27. Зотов Д.И. Особенности развития оползневого процесса на территории Нижегородской области // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. 2014. № 4 (13). С. 55–59. EDN TKOKNN.

28. Соколов Н.С. Практика усиления нагруженного склона // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 70–78. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-70-78. EDN VVEYPO.

29. Харичкин А.И., Соловьев Д.Ю., Афанасьев Н.А., Журавлев Р.Р. Геотехнические аспекты инженерной защиты территории Нижнего Новгорода на примере объекта «Фуникулер на откосе Нижегородского кремля» // *Construction and Geotechnics*. 2024. Т. 15. № 4. С. 25–35. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.03. EDN IYZSAE.

Поступила в редакцию 21 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 28 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 28 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Роман Николаевич Никоноров — преподаватель кафедры механики грунтов и геотехники, магистр; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; главный инженер; Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации (НИЦ Тоннельной ассоциации); 129344, г. Москва, ул. Енисейская, д. 7, стр. 4, ком. 10; SPIN-код: 7569-0706, ORCID: 0000-0002-0807-3787; nikonorov.rn@nizta.ru;

Ульяна Олеговна Московкина — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; moskovkina.u@mail.ru;

Екатерина Алексеевна Софронова — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; soka280204@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ginzburg L.K. *Recommendations on the selection of methods for calculating slope stability coefficient and landslide pressure*. Moscow, Central Bureau of Scientific and Technical Information, 1986; 123. (rus.).

2. Simonyan V.V. Determination of the main axes of landslide movement using displacement ellipse. *Actual problems of land use, land management and cadastres : collection of articles of the All-Russian school of young scientists*. 2006; 334–344. EDN SAQAWX. (rus.).

3. Khvostova O.E. Slope stability assessment of Gorkovskoe reservoir shoreline. *Proceedings of R.E. Alekseev NSTU*. 2010; 4(83):50–61. EDN NUXQYX. (rus.).

4. Farres P.J. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*. 1987; 14(1–3): 119–130. DOI: 10.1016/s0341-8162(87)80009-7

5. Poesen J. Field measurements of splash erosion to validate a splash transport model. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 1986; 58:81–91.

6. Kondrashova V.A., Melnikova E.S., Cherednichenko T.F. Improving the reliability of major repairs of protective structures of the Volga river berth embankment located in the Voroshilovsky district of Volgograd. *Construction Economics*. 2025; 6:592–595. EDN APULPH. (rus.).

7. Pendin V.V., Fomenko I.K. *Methodology for assessment and prediction of landslide hazard*. Moscow, LENAND, 2015; 320. (rus.).

8. Albataineh N. *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*. Akron, The University of Akron, 2006.

9. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*. 1955; 5(1):7–17. DOI: 10.1680/geot.1955.5.1.7

10. Gitirana G.Jr. *Weather-related Geo-hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability* : PhD Thesis. Saskatoon, University of Saskatchewan, 2005.
11. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes*. 1954; 43-49.
12. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*. 1965; 15(1):79-93. DOI: 10.1680/geot.1965.15.1.79
13. Kalinin E.V., Panas'yan L. L., Timofeev E.M. A new approach to landslide slope stability analysis. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2008; 1:21-29. EDN JVAQBR. (rus.).
14. Sirotkina O.N., Tarabukin V.V., Fomenko I.K., Shubina D.D. Comparative analysis of methods for calculating slope stability under 3D problem statement. *International Research Journal*. 2020; 9-1(99):55-62. DOI: 10.23670/IRJ.2020.99.9.011. EDN OJPPWS. (rus.).
15. Fomenko I.K. General classification scheme of slope stability calculation methods. *Scientific works SWorld*. 2012; 35(3):75-80. EDN PDHMBV. (rus.).
16. Fomenko I.K. Current trends in slope stability calculations. *Engineering Geology World*. 2012; 6:44-53. EDN PLSVTP. (rus.).
17. Fomenko I.K., Zerkal O.V. Advantages of three-dimensional methods of assessing slope stability. *Geotechnics*. 2011; 5:38-41. EDN OWGMSH. (rus.).
18. Fomenko I.K., Zerkal O.V., Gorobtsov D.N. Modern tools for quantitative assessment of slope stability. *Engineering and geological problems of our time and methods for their solution : proceedings of the scientific and practical conference*. 2017; 94-101. EDN ZROHVF. (rus.).
19. Gitirana G.Jr., Santos M.A., Fredlund M.D. Three-dimensional analysis of the Lodalen landslide. *GeoCongress 2008*. 2008; 186-190. DOI: 10.1061/40971(310)23
20. Vasiliev S.A. A mathematical model to predict erosion on sloping agrolandscape. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2015; 9(184):96-100. EDN VHLKCD. (rus.).
21. Kopytov D.Y., Ovchinnikova S.V., Kozhenko N.V. Integrated application of methods for calculating the stability of landslide slopes. *Engineering journal of Don*. 2024; 8(116):514-520. EDN PRUZEC. (rus.).
22. Prokopov A.Yu., Adoniev N.A. Foreign experience review on engineering protection of seashores and hillslopes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024; 3(1):27-47. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47. EDN ZBEPOK. (rus.).
23. Sirotkina O.N., Fomenko I.K., Gorobtsov D.N. On the classification of mathematical methods for assessing local landslide hazard. *Science of Russia: goals and objectives : collection of scientific papers based on the materials of the II international scientific conference*. 2017; 50-55. DOI: 10.18411/sr-10-04-2017-2-13. EDN YQALPN. (rus.).
24. Bauer B. Soil splash as an important agent of erosion. *Geographia Polonica*. 1990; 58:99-106.
25. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247*. Washington, DC, Transportation Research Board, 1996; 36-75.
26. Highland L.M., Bobrowsky P. The landslide handbook — A guide to understanding landslides. *Circular*. 2008; 129. DOI: 10.3133/cir1325
27. Zotov D.I. Features of landslide process development in Nizhny Novgorod region. *Bulletin of the Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2014; 4(13):55-59. EDN TKOKNN. (rus.).
28. Sokolov N.S. Practice of strengthening the loaded slope. *Construction Materials*. 2019; 1-2:70-78. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-70-78. EDN VVEYPO. (rus.).
29. Kharichkin A.I., Soloviev D.Yu., Afanasev N.A., Zhuravlev R.R. Geotechnical aspects of civil protection engineering of Nizhny Novgorod at the facility “funicular on the slope of the Nizhny Novgorod kremlin”. *Construction and Geotechnics*. 2024; 15(4):25-35. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.03. EDN IYZSAE. (rus.).

Received December 21, 2025.

Adopted in revised form on February 28, 2026.

Approved for publication on February 28, 2026.

B I O N O T E S : **Roman N. Nikonorov** — lecturer of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics, master's degree; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; chief Engineer; **Scientific and Engineering Center of the Tunnel Association**; 10, build. 4, 7 Eniseyskaya st., Moscow, 4129344, Russian Federation; SPIN-code: 7569-0706, ORCID: 0000-0002-0807-3787; nikonorov.rn@nizta.ru;

Ulyana O. Moskovkina — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; moskovkina.u@mail.ru;

Ekaterina A. Sofronova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; soka280204@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.