

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ АВТОДОРОЖНЫХ НАСЫПЕЙ

Домненко Александр

специалист по техническому сопровождению проектов ТОО «Махина-ТСТ Казахстан». Адрес: Казахстан, г. Астана, ул. Иманова, 13, БЦ Нурсаулет, оф. 710, e-mail: aleksandr.domnenko@mahina-tst.com

Мартынов Антон

специалист по технической поддержке ООО «Махина-ТСТ». Адрес: Республика Беларусь, 212011, г. Могилёв, ул. Гришина, 87Б, e-mail: a.martinov@mahina-tst.com

АННОТАЦИЯ

Проблема устойчивости откосов насыпей транспортных магистралей (автомобильных и железнодорожных) является актуальной в Восточной Европе при сооружении высоких насыпей на участках залегания слабых грунтов. Деформации откосов насыпей (сдвиг, оползание), а также осадка всего земляного полотна приводят к ухудшению транспортно-эксплуатационного состояния транспортного сооружения, увеличивают затраты на содержание сооружения, а также могут привести к аварийной ситуации. Применение современных высокопрочных геосинтетических материалов позволяет обеспечить устойчивость откосов. Строящаяся автомобильная дорога М-11/П2 расположена в западной части Республики Беларусь. Часть трасса проходит через участки с сложными грунтовыми условиями. В основании земляного полотна залегают торф, сапропель, пылеватые и мелкие пески. Уровень грунтовых вод составляет 0,2 м от поверхности земли. Для устройства транспортной развязки проектом предусмотрено строительство путепровода с подходными насыпями высотой до 15 метров. Сравнительные расчеты земляного полотна позволили определить мероприятия по обеспечению общей и местной устойчивости откосов насыпи. Расчеты включали оценку устойчивости откосов, осадки земляного полотна и оценка стоимости работ. Расчеты показали необходимость усиления грунта откосов, поэтому было применено многослойное армирование откосных частей насыпи высокопрочным тканым геотекстилем. Также была предусмотрена замена слабого грунта и устройство армирующей прослойки в основании насыпи. Окончательное проектное решение с мероприятиями по армированию откосов оказалось более экономически эффективным, чем вариант без усиления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

общая устойчивость откосов насыпи, коэффициент запаса устойчивости, армирование грунта, геосинтетический материал, высокопрочный геотекстиль.

ВВЕДЕНИЕ

Объездная автомобильная дорога М-11/Р2 вокруг города Лида в западной части Беларуси (рисунок 1) в настоящее время находится в реконструкции. Проектом предусмотрено возведение путепровода над железнодорожными путями и второстепенной дорогой. Максимальная высота насыпи на подходах к путепроводу составляет 15 м.

В соответствии с действующими нормами проектирования автомобильных дорог Республики Беларусь [1], откосы насыпей высотой более 12 метров должны быть проверены на общую устойчивость. Что и было выполнено в процессе проектирования.

Традиционным способом решения проблемы обеспечения устойчивости откосов высоких насыпей в Беларуси является изменение ее конструкции, а именно снижение крутизны откосов и/или устройство берм. Минусом этого способа является увеличение площади занимаемых сооружением земель и объемов земляных работ.

Применение высокопрочных геосинтетических материалов для армирования грунтов земляного полотна до недавнего времени не находило широкого применения в Беларуси. К основным причинам можно отнести консервативные подходы в проектировании, сложность расчетов, недостаточность информации о данной технологии.

Рассмотренный в данной статье объект строительства является одним из первых известных реализуемых в Беларуси.



Рисунок 1 - Месторасположение объекта строительства

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УЧАСТКА СТРОИТЕЛЬСТВА

Участок строительства обладает сложными геологическими условиями. Плохие условия поверхностного водоотвода в связи с равнинным рельефом, а также высокий уровень грунтовых вод привели к заболачиванию местности. Геологическое строение на участке подходов к путепроводу следующее: у поверхности залегает слой слабого грунта (торфа и сапропеля) толщиной до 1,5 м, далее – слой супеси моренной толщиной до 2,9 м, ниже – песок пылеватый толщиной до 3,8 м, подстилаемый песком средним. Уровень грунтовых вод составляет 0,2-0,3 м от поверхности земли.

Фрагмент продольного профиля насыпи на подходах с геологическим строением представлен на рисунке 2.

Характеристики грунтов основания приведены в таблице 1.

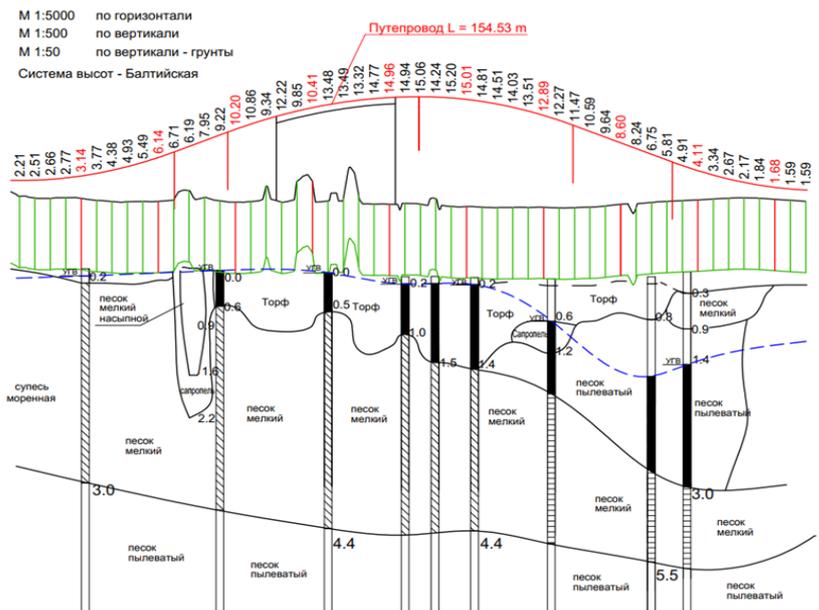


Рисунок 2 – Фрагмент продольного профиля

Таблица 1 – Расчетные характеристики грунтов основания

Грунт	Удельный вес γ_{unsat} , кН/м ³	Удельный вес в водонасыщ. сост. γ_{sat} , кН/м ³	Угол внутреннего трения φ , °	Удельное сцепление c , кПа
Супесь моренная	21.2	21.2	26.0	9.0
Песок пылеватый	17.5	19.3	34.0	9.0
Песок средний	17.3	23.0	29.0	3.0

ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ

3.1 Проверка общей устойчивости откосов

Комплексный подход к проблеме устойчивости земляного полотна автомобильных дорог в Республике Беларусь и к методикам расчета устойчивости откосов был предложен профессорами И.И. Леоновичем и Н.П. Вырко. Это нашло отражение в научных материалах [2] и позже легло в основу нормативного документа для проектирования – технического кодекса установившейся практики ТКП 200-2018 «Автомобильные дороги. Земляное полотно. Правила проектирования».

В соответствии с данным нормативным документом для расчета устойчивости откосов насыпей используется метод круглоцилиндрической поверхности сколь-

жения. При этом нормативное значение коэффициента запаса устойчивости составляет не менее 1,30.

Для расчета устойчивости откосов насыпи были выделены по два поперечных профиля справа и слева от путепровода. Выбор расчетного поперечного профиля осуществлялся по критерию высоты насыпи и геологического строения основания. Наличие слоя торфа или сапропеля в основании насыпи не учитывалось, так как предусмотрено его полное удаление и замена на грунт насыпи. В статье рассмотрен поперечный профиль № 3, как с наиболее неблагоприятными условиями.

Выбранный расчетный поперечный профиль представлен на рисунке 3.

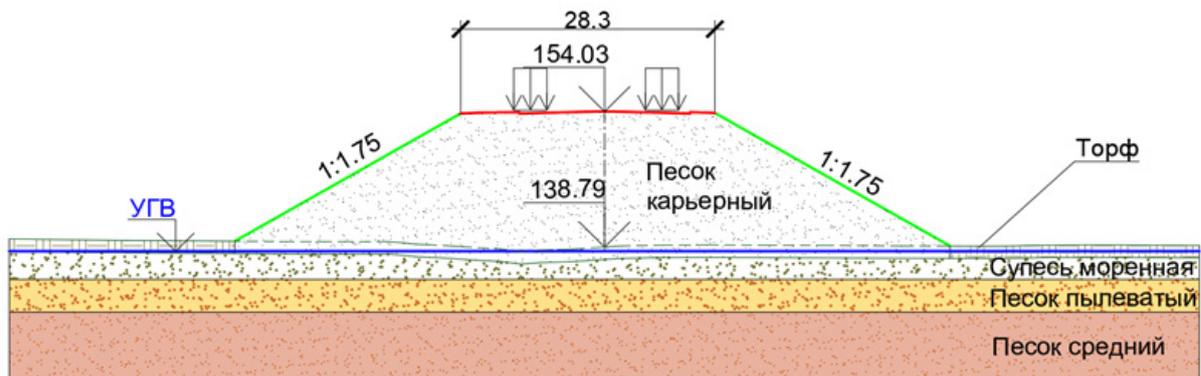


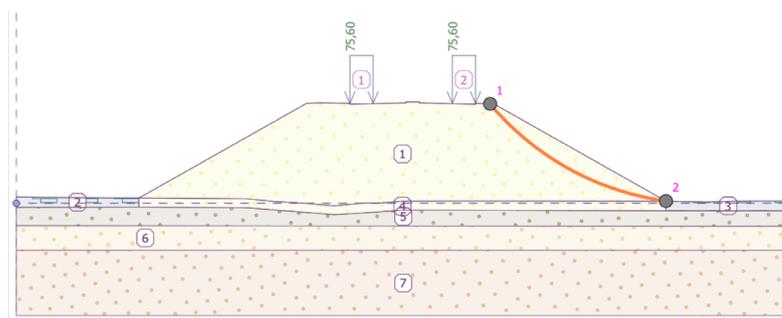
Рисунок 3 – Расчетный поперечный профиль №3

В качестве грунта для отсыпки насыпи проектом предусмотрено использовать грунт из близлежащего карьера, который представляет собой песок мелкий с расчетными значениями прочностных характеристик: $c = 1,3 \text{ кПа}$, $\phi = 29,1^\circ$.

Параметры расчетной временной нагрузки приняты в соответствии с межгосударственным нормативным документом - ГОСТ 32960-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения».

Для автоматизации расчета применялось программное обеспечение для геотехнических расчетов GEO 5, модуль «Устойчивость откоса». Данное программное обеспечение позволяет производить проверку устойчивости откоса различными методами, в том числе методом круглоцилиндрической поверхности скольжения (метод Феллениуса).

Результат расчета устойчивости откоса насыпи слева для расчетного поперечного профиля представлен на рисунке 4.



Проверка устойчивости откоса (Fellenius / Petterson)
 Суммирование активных сил : $F_a = 493,96 \text{ кН/м}$
 Суммирование пассивных сил : $F_p = 541,88 \text{ кН/м}$
 Оползневый момент : $M_a = 20800,45 \text{ кНм/м}$
 Удерживающий момент : $M_p = 22818,43 \text{ кНм/м}$
 Коэфф. запаса = $1,10 < 1,30$
Устойчивость откоса НЕ ПОДХОДИТ

Рисунок 4 – Результат расчета общей устойчивости откоса

Расчетный коэффициент запаса устойчивости $FS = 1,10$, что менее нормативного требования. На основании анализа остальных расчетных поперечных профилей, определен участок насыпи протяженностью 35 метров, на котором устойчивость откосов не обеспечивается.

3.2 Мероприятия по обеспечению устойчивости откосов

Повышение общей устойчивости может достигаться либо улучшением напряженного состояния грунтового массива, либо повышением сдвиговых характеристик грунтов.

В соответствии с [1] к мероприятиям по повышению устойчивости земляного полотна относятся:

- уположение откоса;
- устройство разгрузочных берм;
- устройство контрбанкетов;
- применение армирующих прослоек;
- снижение высоты откоса;
- использование в откосе легких материалов;
- использование в насыпи грунтов с повышенными значениями ϕ и c .

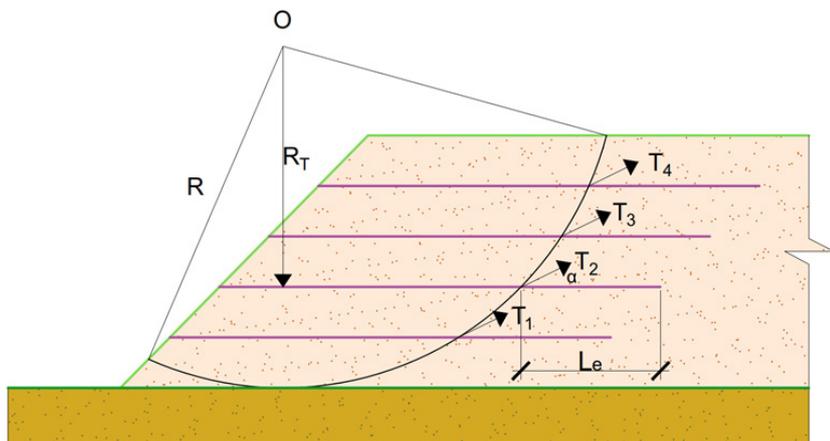


Рисунок 5 – Расчетная схема для определения общей устойчивости армированного откоса

Учитывая все условия данного объекта и на основании технико-экономического сравнения вариантов, в качестве мероприятия повышающего общую устойчивость откосов был выбран вариант использования армирующих прослоек из геосинтетических материалов.

В качестве альтернативного варианта рассматривалось изменение конструкции насыпи путем уположения откосов и устройство берм. Данный вариант оказался экономически нецелесообразен за счет увеличения объемов земляных работ и компенсаций землепользователям за дополнительный отвод земли.

Применение другого грунта для отсыпки насыпи также являлось экономически нецелесообразным. Это привело бы к удорожанию объекта за счет существенного увеличения транспортных затрат на доставку грунта.

Армирование грунта насыпи геосинтетиками позволяет сохранить геометрические очертания насыпи. Соответственно, остаются без изменения объемы земляных работ и площадь земельного отвода под сооружение. Сама же технология устройства армирующих прослоек является простой и относительно недорогой. Геосинтетическая арматура определенной длины укладывается в несколько слоев по высоте насыпи по мере ее возведения.

3.3 Армирование грунта и проверка общей устойчивости армированного откоса насыпи

Количество и длина прослоек, шаг армирования и прочность геоарматуры были определены расчетами на этапе проектирования.

Предполагается, что армирующие слои обеспечивают удерживающее усилие в точке пересечения каждого слоя с рассматриваемой потенциальной поверхностью сдвига. Расчетная схема представлена на рисунке 5. К формуле определения коэффициента запаса устойчивости FS добавляется слагаемое, учитывающее прочность геоарматуры на растяжение T_{allow} (см. формулу 1) [3].

Коэффициент запаса устойчивости FS:

$$FS = \left(\frac{M_R}{M_D} \right)_{\text{unreinforced}} + \frac{\sum T_{\text{allow}} R_T \cos \alpha}{M_D}$$

Где M_R и M_D – удерживающие и сдвигающие моменты для неармированного откоса соответственно; R_T – расстояние между центром окружности и расположенным слоем георматуры; T_{allow} – допустимая прочность георматуры на растяжение; α – угол действия растягивающей силы в георматуре относительно горизонтали.

В качестве геосинтетической арматуры на данном объекте применялся высокопрочный тканый геотекстиль, как наиболее доступный материал. На каждом откосе по высоте насыпи было уложено 6 слоев армирующего материала длиной 12 метров, а также один, нижний слой георматуры в основании земляного полотна. Долговременная расчетная прочность геотекстиля при растяжении составляет не менее 60 кН/м. Вертикальный шаг армирования – 2,0 м. Дополнительная функция нижнего слоя геосинтетика, устроенного на всю ширину основания земляного полотна – способствование равномерному распределению осадки насыпи.

Перевод долговременной расчетной прочности материала на растяжение в номинальную произведен путем применения редуцирующих коэффициентов и коэффициента безопасности в соответствии с методикой [4].

Основные расчетные, физико-механические и гидравлические параметры армирующего геоматериала приведены в таблице 2. Внешний вид геоматериала – на рисунке 6.



Рисунок 6. Материал геотекстильный рулонный Stabudtex 150/50

Таблица 2 – Основные характеристики геотекстильного материала Stabudtex 150/50

Наименование показателя	Значение
Поверхностная плотность, г/м ² :	≈ 300
Прочность при растяжении в продольном/поперечном направлении, кН/м, не менее:	150/50
Напряжение при растяжении при 2% относительном удлинении в продольном направлении, кН/м, не менее:	25
Напряжение при растяжении при 5% относительном удлинении в продольном направлении, кН/м, не менее:	65
Относительное удлинение при номинальной нагрузке в продольном/поперечном направлении, %, не более:	10/10
Прочность при статическом продавливании, кН, не менее:	6
Прочность при динамическом продавливании (испытание падающим конусом), мм, не более:	20
Морозостойкость материала (30 циклов), %, не менее:	90
Гибкости при отрицательных температурах на стержне диаметром 20±1 мм при температуре, °С, не выше:	-30
Устойчивость к ультрафиолетовому излучению, %, не менее:	90
Устойчивость к агрессивным средам, %, не менее:	90
Грибостойкость, не выше:	ПГ13
Коэффициент фильтрации, м/сут, не менее:	20
Открытый размер пор O90, мкм, не менее:	60

Результат расчета устойчивости откоса насыпи слева для расчетного поперечного профиля №3 с учетом армирования представлен на рисунке 7.

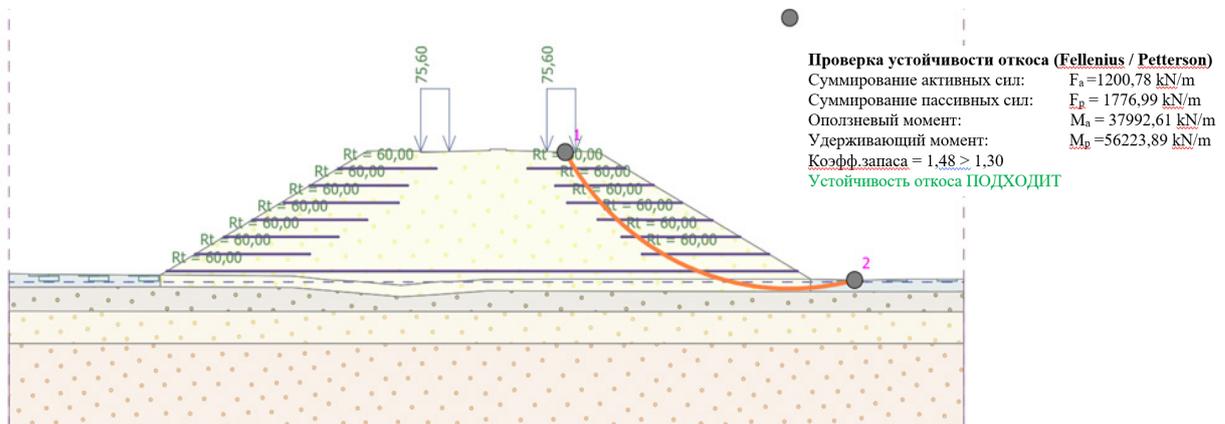


Рисунок 7 – Результат расчета общей устойчивости армированного откоса

Расчетный коэффициент запаса устойчивости составил $FS = 1,48 > 1,30$. Таким образом, устойчивость откоса насыпи согласно [1] обеспечивается.

Для предотвращения водной и ветровой эрозии откосов проектом предусмотрена укладка специального биоразлагаемого полотна (биомата), содержащего семена многолетних трав, по слою растительного грунта средней толщиной 10 см.

Фрагмент детального чертежа армированных откосов насыпи представлен на рисунке 8.

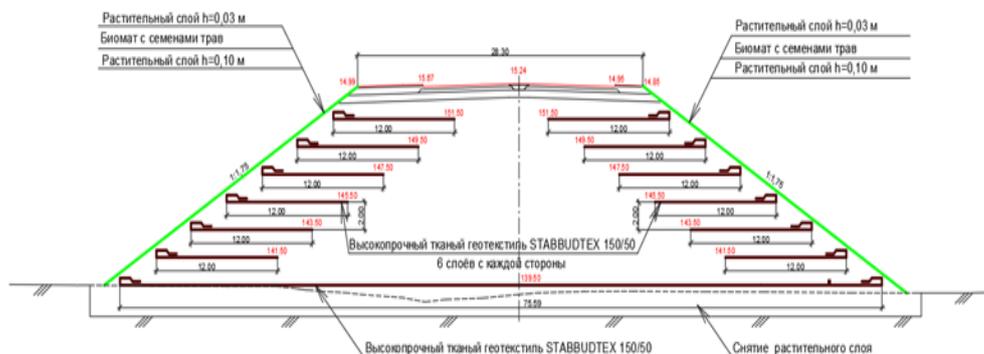


Рисунок 8 - Поперечный профиль земляного полотна с армирующими прослойками

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ

Работы по строительству дороги начались в октябре 2022 года. Основной этап строительства путепровода и подходов насыпей к нему пришёлся на период с марта по декабрь 2023 года. Работы по противозерозионной защите откосов планируется производить после окончания зимнего периода 2023/2024.

Перед укладкой армирующего материала грунтовое основание отсыпалось до проектных отметок, выравнивалось и уплотнялось. Коэффициент уплотнения грунта составлял не менее 0,98.

Укладка армирующих прослоек из высокопрочного геотекстиля производилась при послойной отсыпке грунта насыпи в соответствии с проектным решением, указанным на рисунке 8.

Заранее нарезанные полотна геотекстиля укладывались перпендикулярно оси насыпи и закреплялись с помощью металлических анкеров с целью предотвращения смещения в процессе отсыпки последующего слоя грунта. С внешнего края оставлялась часть полотна для оборачивания грунта в полуобойму, так называемый обратный анкер.

Далее поверх уложенных полотен способом «от себя» производилась отсыпка грунтового слоя толщиной 25 см. При этом следили, чтобы строительная техника не заезжала на не укрытые грунтом полотна во избежание их повреждения. Слой грунта выравнивался и уплотнялся дорожными катками. После контроля степени уплотнения технологические операции повторялись до достижения проектных параметров насыпи.

На рисунках 9, 10 приведен вид отсыпанной насыпи на подходах к путепроводу. Работы на мостовом полотне на момент написания статьи продолжаются.



Рисунок 9 - Армированный откос и строящийся путепровод



Рисунок 10 - Откос насыпи из армированного грунта на подходе к путепроводу

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описан один из первых проектов в Республике Беларусь с применением высокопрочных тканых геотекстильных материалов для армирования грунтов автодорожной насыпи.

Описанный объект строительства находится в Западной части Беларуси (г. Лида) и включает в себя возведение насыпи и путепровода над железнодорожными путями и второстепенной дорогой. С помощью высокопрочного геотекстильного материала Stabudtex 150/50 была успешно обеспечена устойчивость откосов насыпи на подходах к путепроводу высотой 15 м.

В ходе проектирования и строительства определено, что введение в грунтовый массив армирующих элементов изменяет его напряженно-деформированное состояние. Благодаря этому обеспечивается устойчивость откосов насыпей инженерных сооружений.

Современные армирующие геосинтетические материалы обладают высокой прочностью при растяжении при малых значениях деформации. При правильном применении они позволяют обеспечить устойчивость массивных откосов земляных сооружений с большой крутизной, в том числе при строительстве в сложных инженерно-геологических условиях.

При этом сама технология армирования геосинтетическими материалами достаточно проста, экономична, не требует специальных механизмов, позволяет минимизировать объемы земляных работ и тем самым сократить влияние на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТКП 200-2018. 2018. Автомобильные дороги. Земляное полотно. Правила проектирования. Госстандарт. Минск.
2. Леонович И.И., Вырко Н.П., Богданович Т.К. Устойчивость земляного полотна автомобильных дорог. *Строительная наука и техника* 4' 2006 58-63с.
3. International Geosynthetic Society. 2021. *Geosynthetics in Slopes over Stable Foundations*. [Электронный ресурс] - https://igs2.wpengine.com/wp-content/uploads/2021/04/IGS_Geosynthetics_Slopes_Stable-Foundations_Leaflet.pdf, дата доступа - 20 февраля 2024.
4. ISO/TR 20432. 2007. *Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement*. ISO, Geneva.