СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

УДК 626.17

DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.4

Результаты исследований объемных георешеток

Н.А. Зубачев¹, И.М. Галимов², А.В. Кузин², О.А. Собина²

¹ ООО «ПРЕСТОРУСЬ»; г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Защита поверхности склонов — часто встречающаяся проблема при строительстве большинства объектов дорожного, гидротехнического, железнодорожного строительства. Конструктивное решение защиты откосов должно быть технологичным, долговечным, простым и недорогим при монтаже и эксплуатации. При изучении методов защиты склонов от эрозионного воздействия с применением объемных георешеток была обнаружена проблема вымывания материала заполнителя из ячеек при воздействии потока воды. Актуальность исследования обусловлена широким применением при строительстве сооружений объемных георешеток, которые являются предметом исследования. Цель — разработка рекомендаций по выбору материала заполнителя объемных георешеток, изучение факторов, влияющих на эффективность удержания заполнителя.

Материалы и методы. Методика исследования заключалась в проведении комплекса теоретических (планирование экспериментов, традиционные статистические методы обработки информации, аналитические расчеты), а также экспериментальных работ в лабораторных условиях.

Результаты. На основе выполненных экспериментов выявлена высокая эффективность удержания крупного заполнителя (щебня) и мелкого (песка) объемной георешеткой при воздействии потока воды. Исходя из расчетов критических скоростей сноса частиц с откоса и расчетов устойчивости георешетки на откосе, получены предельные значения заложения откосов с объемными георешетками.

Выводы. Данные испытания позволили сделать выводы о том, что одной из ключевых причин обрушений откосов является неправильный выбор материала заполнителя. Разработаны методики подбора параметров объемной георешетки как для не подтопляемых, так и для подтопляемых откосов. Практическая значимость состоит в том, что разработаны научно-обоснованные рекомендации по выбору материала заполнителя объемных георешеток.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротехника, геосинтетика, объемные георешетки, эрозия откосов, укрепление откосов

Благодарность. Авторы выражают признательность компании ООО «ПРЕСТОРУСЬ» и исполнительному директору М.М. Азарху за оказанную помощь при проведении данного исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зубачев Н.А., Галимов И.М., Кузин А.В., Собина О.А. Результаты исследований объемных георешеток // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 3. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.4

Results of studies of volumetric geogrid

Nikita A. Zubachev¹, Ilya M. Galimov², Alexey V. Kuzin², Olga A. Sobina²

¹ PRESTORUS LLC; Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. As part of the work on the study of methods of protection of slopes from erosion using bulk geogrid was found the problem of leaching the filler material from the cells under the influence of water flow. The relevance of the work is due to the widespread use of bulk geogrid structures in the construction, which are the subject of the study. The aim is to develop recommendations for the choice of the material of the filler volume geogrid. The objectives of the study are to study the factors affecting the efficiency of retention of the filler. The practical significance lies in the fact that scientifically-based

recommendations on the choice of the filler material of bulk geogrids have been developed. For many years, the improvement of structures and the development of new solutions for the protection of structures from water erosion were carried out by various specialists in the field of hydraulic research of objects of hydraulic and transport construction, including: I. Levi, A. Guryev, N.In. Khanov, Yu.M. Kosichenko, K.D. Kozlov, W. Müller, O. Kief, Y. Schary and others.

Materials and methods. The method of research was to conduct a complex of theoretical and experimental work in the laboratory. Practical methods taking into account the specifics of the study include the implementation of experiments. Theoretical methods are associated with the planning of experiments, traditional statistical methods of information processing, analytical calculations.

Results. On the basis of the performed experiments high efficiency of retention of large aggregate (crushed stone) and small (sand) volume geogrid under the influence of water flow was revealed. Based on the calculations of the critical velocities of particle drift from the slope and stability calculations of the geogrid on the slope, the limit values of the slopes with bulk geogrids are obtained.

Conclusions. These tests have led to the conclusion that one of the key reasons for the collapse of the slopes is the wrong choice of filler material. In addition, the developed technique of selection of parameters of volumetric geogrid as to not flood prone and flood prone slopes.

KEYWORDS: gidrotekhnika, geosintetika, volumetric geogrid, erosion of slopes, consolidation of slopes

Acknowledgment. The authors express their gratitude to the company LLC "PRESTORUS" and to the executive director of M.M. Azarkh for the assistance rendered during the conduct of this study.

FOR CITATION: Zubachev N.A., Galimov I.M., Kuzin A.V., Sobina O.A. Results of studies of volumetric geogrid. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019; 9(3):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.4 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Развитие транспортного строительства, в частности расширение и модернизация существующей автодорожной, а также железнодорожной инфраструктуры или строительство новой, возведение и реконструкция воднотранспортных гидротехнических сооружений увеличивается из года в год и сопровождается разработкой новых высокоэффективных методов и решений для удовлетворения высоких требований производства работ в сжатые сроки. Для достижения поставленных задач используются не только традиционные строительные материалы (щебень, песок, бетон и др.), но и современные материалы, выполненные из синтетического полимерного сырья, из которого изготавливаются различные геоткани, георешетки, являющиеся весьма эффективным конструктивным решением, в частности для предотвращения размыва откосов [1–24].

Защита поверхности склонов — часто встречающаяся проблема при строительстве большинства объектов дорожного, гидротехнического, железнодорожного строительства. Склоны подвергаются постоянным разрушающим воздействиям, так все откосы испытывают эрозионное воздействие осадков (рис. 1), откосы дамб — действие потока воды и волн, льда, откосы железнодорожных насыпей — постоянные динамические нагрузки¹. Под воздей-

ствием такого количества нагрузок откосы быстро разрушаются и уже само тело насыпи (сооружения) начинает деформироваться. В связи с этими многочисленными трудностями конструктивное решение защиты откосов должно быть технологичным, долговечным, простым и недорогим при монтаже и эксплуатации [7]. По нашему мнению, таким решением являются конструкции с применением объемных георешеток.

Для проведения испытаний крупнейший производитель геосинтетических материалов (ООО «ПРЕСТОРИС») предоставил объемную георешетку нового поколения — инновационную пространственную полимерную решетку ГЕОКОРД®.

На данный момент на рынке геосинтетики существует огромное разнообразие объемных георешеток. В данной статье приводятся сравнение различных объемных георешеток, а также сведения об эффективности удержания заполнителя объемными георешетками при воздействии потока воды, о подборе материала заполнителя и о назначении геометрических параметров объемных георешеток в зависимости от угла заложения откоса. Зачастую проектировщики не уделяют этому достаточного внимания и выбирают материал заполнителя исключительно из сложившегося опыта, и могут не учесть множество факторов. Такой подход неверный, в данной статье даются ответы на все вопросы, касающиеся подбора заполнителя. Также показаны нюансы, которые необходимо учитывать при проектировании сооружений с применением объемных георешеток.

¹ СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*.

Рис. 1. Размыв откоса под действием дождевых и сточных вод

Основной и, пожалуй, самой важной функцией объемных георешеток является защита откосов от эрозии, вызванной осадками или другими потоками воды. Чтобы защитить откос, ячейки объемной георешетки заполняют различными материалами: песок, растительный грунт, щебень, камень или обломочная порода. Выбор заполнителя обуславливается назначением объекта, интенсивностью осадков, подтопляемостью откоса, углом заложения, дополнительными нагрузками, действующими на откос.

Показателем эффективности работы объемной георешетки на откосе, а, следовательно, ее противоэрозионной функции, служит способность удержания заполнителя при воздействии потока воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы изучить эффективность удержания заполнителя объемными георешетками при воздействии дождя или потока воды, были проведены лабораторные испытания на гидравлической установке для щебня (гидравлический лоток позволяет имитировать направленный поток воды, имеющий большую скорость, что соответствует реальному практическому случаю применения объемной георешетки заполненной щебнем) и на натурной модели орошаемого откоса (песок и растительный грунт наиболее часто применяемые заполнители неподтопляемых откосов, основное разрушающее действие на них оказывает дождь). Цель испытаний — определить процент вымываемости заполнителя из ячеек при воздействии на откос потока воды (в случае с щебнем) или дождя (песок).

Для изучения состава и размера фракций заполнителя объемных георешеток с учетом гидравлического воздействия были проведены теоретические расчеты критических скоростей потока для ряда частиц заполнителя, которые впоследствии сравнивались с результатами эксперимента по измерению критических скоростей при помощи «водных» тензодатчиков.

Назначение рациональных уклонов откосов и геометрических параметров объемных георешеток происходило на основе расчетов критических скоростей сноса частиц с откоса и расчетов устойчивости георешетки на откосе в соответствии с ОДМ 218.3.032-2013². Также во внимание принимался большой опыт укрепления откосов объемными георешетками компании ООО «ПРЕСТОРИУС».

Исследование эффективности удержания заполнителя георешетками при воздействии потока воды.

В первом испытании исследовалась эффективность удержания заполнителя двумя типами объемных георешеток: перфорированной — ГЕОКОРД тип С 200/172 Р (прочность на растяжение — 29 кН/м; высота ячейки — 200 мм; размер ячейки по стороне — 172 мм) и неперфорированной — ГЕОКОРД тип С 200/172. Решетки заполнялись щебнем фракции 20–40 мм, угол заложения откоса состав-

² ОДМ 218.3.032-2013. Методические рекомендации по усилению конструктивных элементов автомобильных дорог пространственными георешетками (геосотами). Приложение А. Расчетная оценка условий предельного равновесия поверхностной зоны откоса, укрепленной геосотами.

Рис. 2. Гидравлическая модель для определения эффективности удержания заполнителя — щебня при воздействии потока воды

лял 1:2 и 1:1 [3–5]. В ходе испытаний образы подвергались воздействию потока воды со скоростью до 2 м/с в течение 20 мин, после чего замерялось количество щебня, вымытого из ячеек, и определялся процент потери георешеткой заполнителя. Проводилось три серии испытаний для каждого типа георешетки и для каждого заложения откоса (рис. 2).

По итогам испытаний было установлено, что потери заполнителя в среднем составили не более 1 % как для перфорированной, так и неперфорированной георешетки. Однако дренажная способность перфорированной георешетки значительно выше, вода не оказывает воздействия на заполни-

тель, и он более стабилен в ячейке. Данный результат свидетельствует о высокой эффективности удержания заполнителя — щебня объемной георешеткой при воздействии потока воды, следовательно, объемная георешетка (в данном эксперименте — ГЕОКОРД) обладает высокой противоэрозионной способностью и отлично подходит для защиты откосов.

Во втором испытании георешетка ГЕОКОРД тип С 100/172 0530 Р (перфорированная) и ГЕОКОРД тип С 100/172 0530 (неперфорированная), заполненные песком средней крупности фракции 2–2,5 мм укладывались на натурную модель откоса 1:2 и 1:1 (рис. 3, 4) и подвергались ороше-

Рис. 3. Натурная модель откоса для определения эффективности удержания заполнителя — песка георешетками при воздействии потока воды

Рис. 4. Процесс испытания

нию из дождевых установок с интенсивностью 3 л/мин·м² в течении 20 мин. Вода с частицами вымытого песка собиралась в баки и помещалась в сушильную камеру, далее определялся процент потери грунта.

По итогам испытаний было установлено, что потери заполнителя составили не более 15 %. Учитывая крупность заполнителя, высокую интенсивность осадков и отсутствие посева травы — это весьма хороший результат. Георешетка ГЕОКОРД способна хорошо удерживать даже мелкий заполнитель, но как показали результаты испытаний, посадка травы для создания армирования необходима.

Подбор состава и размера фракций заполнителя объемных георешеток с учетом гидравлического воздействия.

В целях эффективного подбора состава и фракций заполнителя георешетки, необходимо определить зависимость между скоростью потока воды и крупностью фракции заполнителя.

По формуле (1) определим гидравлическую крупность частиц заполнителя различных фракций:

$$W = \sqrt{\frac{4gD\rho_s}{3C\rho}}, \quad (1)$$

где D — диаметр частиц заполнителя; ρ_s — плотность частицы; C — коэффициент сопротивления 0,45 для шарообразной частицы; ρ — плотность жидкости (воды 1 т/м³); g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²).

Чтобы учесть все режимы движения воды (ламинарный и турбулентный), а также большие размеры частиц заполнителя воспользуемся эмпирической формулой расчета скорости осаждения частиц взвеси (2):

$$W = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{36\nu}{D} + 7,5 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) Dg \right]^{\frac{1}{2}} - 36 \frac{\nu}{D} \right\}. \quad (2)$$

Полученные результаты сведены в табл. 1 (все величины брались по справочным данным [7]).

Следующим шагом было определение критических скоростей, при которых частицы заполнителя

Табл. 1. Гидравлическая крупность при $t = 15^\circ\text{C}$ (по А.В. Воронцову)

Диаметр частиц, мм	200	20	5	2,5	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001
Гидравлическая крупность, мм/сек (м/сек)	3920 (3,92)	1240 (1,24)	620 (0,62)	430 (0,43)	100 (0,1)	60 (0,06)	21 (0,021)	8 (0,008)	2 (0,002)	0,08 (8 · 10 ⁻⁵)	0,03 (3 · 10 ⁻⁵)	0,0008 (8 · 10 ⁻⁷)

Табл. 2. Критическая скорость сноса частиц на незащищенном откосе

Грунт d , мм	$v_{кр}$, м/с
Глинистые частицы (0,001)	0,002
Ил (0,005–0,05)	0,1–0,13
Мелкие пески (0,05–0,1)	0,1–0,18
Пески средней крупности (1–2,5)	0,18–0,35
Крупные пески (2,5–5)	0,35–0,5
Щебень, камень (20–200)	2–3

будут уноситься с откоса (не защищенного георешеткой).

Критическая скорость при безнапорном режиме рассчитывается по формуле (3):

$$v_{кр} = B^4 \sqrt{\frac{1}{Fr}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{см} - \rho_{в}}{\rho_{в}}} \cdot \left(\frac{\rho_{т} - \rho_{см}}{\rho_{в}} \right)^2, \quad (3)$$

где B — эмпирический коэффициент (3,85 — песок, гравий; 2,86 — крупнообломочная порода);

$Fr = \frac{W^2}{gD}$ — число Фруда; $\rho_{см}$ — плотность смеси;

$\rho_{в}$ — плотность воды; $\rho_{т}$ — плотность заполнителя; W — гидравлическая крупность частиц заполнителя (см. табл. 1).

Полученные результаты сведены в табл. 2. Все величины брались по справочным данным [6].

При расчете толщина потока воды принималась равной $h = 0,5$ м, уклоны для тока воды: 1,5–4,5 % — при таких уклонах гарантируется снос частиц.

Зная критические скорости сноса частиц грунта незащищенного откоса, был определен данный показатель уже для откоса, защищенного объемной георешеткой. Основное влияние на критические скорости будут оказывать ячейки георешетки, так как они оказывают сопротивление движению жидкости и частицы материала заполнителя будут задерживаться между ячейками и, следовательно, критические скорости сноса частиц будут существенно уменьшаться. Для определения критических скоростей с учетом размеров ячейки объемной георешетки (применяем георешетку ГЕОКОРД® с размером ячейки по диагонали 200 мм, перфорированную), учитывая ее текстурирование, мы провели ряд испытаний на гидравлическом лотке. Измерение критических скоростей проводилось при помощи «водных» тензодатчиков, которые способны измерить силовое воздействие потока. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таким образом, зная критические скорости потока воды приходящегося на откос, можно подобрать тип заполнителя ячейки георешетки и его фракцию.

Табл. 3. Критическая скорость сноса частиц на защищенном георешеткой откосе

Грунт d , мм	$v_{кр}$, м/с
Глинистые частицы (0,001)	0,0002
Ил (0,005–0,05)	0,01–0,013
Мелкие пески (0,05–0,1)	0,01–0,018
Пески средней крупности (1–2,5)	0,018–0,035
Крупные пески (2,5–5)	0,035–0,05
Щебень, камень (20–200)	0,2–0,3

РЕЗУЛЬТАТЫ

Назначение рациональных уклонов откосов и параметров объемных георешеток.

Исходя из расчетов критических скоростей сноса частиц с откоса и расчетов устойчивости георешетки на откосе, мы рекомендуем использовать объемные георешетки на откосах с предельным заложением 1:0,5 (60°). Также, базируясь на большом опыте укрепления откосов объемными георешетками, мы разработали методику подбора параметров объемной георешетки, а именно: высоты, размеров ячейки, толщины стенок, от величины угла заложения откоса. Данные методики были разработаны как для не подтопляемых (рис. 5), так и для подтопляемых откосов (рис. 6). Необходимо помнить, что фиксация объемной георешетки на откосе осуществляется при помощи анкеров, количество которых определяется исходя из расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные испытания позволили сделать выводы о том, что причиной обрушений откосов, помимо прочих факторов, является неправильный выбор материала заполнителя. При подготовке решения защиты откоса с применением объемных георешеток необходимо учитывать следующие рекомендации:

- при назначении параметров откосов и типов объемных георешеток следует собирать полный пакет исходных данных для проектирования и не пренебрегать инженерными изысканиями;
- при проектировании откосов с применением объемных георешеток принимать углы заложения до 60°;
- осуществлять подбор частиц заполнителя в зависимости от исходных данных проекта, ориентируясь на описанные в данной статье методы;
- при проектировании защиты откосов против эрозии использовать перфорированную георешетку, что позволит избежать потери заполнителя и переувлажнения тела откоса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азарх М.М. Перспективы применения георешетки «Геовиб» при строительстве автомобильных дорог в России // Автомобильные дороги. 2003. № 5. С. 42–43.
2. Алексеева А.В. Анализ и проблемы исследований армированных геосинтетическим материалом подушек // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 4. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/04/66954>
3. 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.
4. Векслер А.Б., Дерюгин Г.К. Определение предельно допустимого расхода воды при переливе через каменнонабросную плотину // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2000. Т. 236. С. 24–36.
5. Зайцев А.А., Бубновский В.В. Пластиковые геоячейки «Прудон-494» при строительстве пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 7. С. 23–24.
6. Кнороз В.С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1958. Т. 59. С. 62–81.
7. Козлов К.Д., Гурьев А.П., Ханов Н.В. Гидравлические исследования покрытия из геокompозитного материала // Природообустройство. 2014. № 5. С. 80–86.
8. Мельникова Е.П., Нужненко Ю.В., Скрыпник Т.В. Повышение устойчивости грунтовых сооружений путем армирования геосинтетическими материалами // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике. 2016. № 1. С. 29–34.
9. Мерзлякин А.Е. Эффективность армирования щебня с помощью геоячеек // Тр. «СоюздорНИИ». 2010. Вып. 212. С. 57–67.
10. Мошенжал А.В. Рекомендации по учету решеток «ГЕО Газон» в расчетах нежестких аэродромных покрытий. СПб. : МИАКОМ, 2014. 40 с.
11. Пшеничникова Е.С., Хусаинов И.Ж., Жигур Ю.Л. Исследование деформации слоя, состоящего из объемной решетки, заполненной песком // Новости в дорожном деле : сб. науч.-техн. информ. М. : Инфотрансдор, 2006. Вып. 3. С. 16–24.
12. Пшеничникова Е.С. и др. Строительство опытного участка с применением объемной пластиковой георешетки «Геовиб» в I дорожно-климатической зоне // Сб. науч. тр. ГосДорНИИ «СоюзДорНИИ». М. : Гос. дорож. науч.-исслед. ин-т ФГУП «СоюздорНИИ», 2001. Вып. 201. С. 63–67.
13. Чугунов А. Геостаб: универсальный материал для дорог и ландшафта // Автомобильные дороги. 2005. № 2. С. 17.
14. Шуваев А.Н., Санников С.П. Применение объемных пластиковых георешеток в дорожном строительстве // Строительный вестник Тюменской области. 2003. № 4. С. 42–44.
15. Müller W.W., Wöhlecke A. The performance of geocomposite drains in the long run // Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics / ed. M. Ziegler. Essen : German Geotechnical Society (DGGT), 2014.
16. Müller W.W. Long-term pull-out resistance and material properties of geogrids // Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics / ed. M. Ziegler. Essen : German Geotechnical Society (DGGT), 2014.
17. Ziegler M., Jacobs F. Laboratory testing of the compound behavior of geogrid reinforced soil // Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics / ed. Ziegler M. Essen : German Geotechnical Society (DGGT), 2014.
18. Wang Z., Jacobs F., Ziegler M. Experimental and DEM investigation of pull-out behaviour of geogrid embedded in granular soil // Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics / ed. M. Ziegler. Essen : German Geotechnical Society (DGGT), 2014.
19. Kief O., Schary Y., Pokharel S.K. High-modulus geocells for sustainable highway infrastructure // Indian Geotechnical Journal. 2015. Vol. 45. Issue 4. Pp. 389–400. DOI: 10.1007/s40098-014-0129-z
20. Parsons R., Jowkar M., Han J. Performance of geogrid reinforced ballast under dynamic loading. Nebraska, USA : University of Nebraska-Lincoln, 2012.
21. Das B.M. Use of geogrid in subgrade-ballast system of railroads subjected to cyclic loading for reducing maintenance. Sacramento, USA : California State University, 2010.
22. Meyer N. Determination of the bearing capacity of geocell reinforced soil over soft subgrade with static and dynamic plate load tests. Institute of Geotechnical Engineering and Mine Surveying, TU Clausthal, 2007.
23. Jacobs F., Ziegler M., Vollmert L., Ehrenberg H. Explicit design of geogrids with a nonlinear interface model / ed. M. Ziegler // Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics. Essen : German Geotechnical Society (DGGT), 2014.
24. Yee T.W., Lim L.K., Ter Harmsel M., Choi J.C., Hwang S.P. Geotextile tubes as rockfill replacement for construction of polder dike at Saemangeum, Korea // Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics / ed. M. Ziegler. Essen : German Geotechnical Society (DGGT), 2014.

Поступила в редакцию 29 мая 2019 г.

Принята в доработанном виде 21 июня 2019 г.

Одобрена для публикации 26 августа 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: **Никита Александрович Зубачев** — ведущий инженер Технического отдела; **ООО «ПРЕСТО-РУСЬ»**; 125367, г. Москва, ул. Габричевского, д. 5, корп. 1; zubachev@presto.ru;

Илья Мидхатович Галимов — старший преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 809150; GalimovIM@mgsu.ru;

Алексей Владимирович Кузин — бакалавр кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; iges@mgsu.ru;

Ольга Александровна Соби́на — бакалавр кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; iges@mgsu.ru.

INTRODUCTION

The development of transport construction, in particular expansion and modernization of existing road and railway infrastructure or construction of new, construction and reconstruction of water transport hydraulic structures is increasing from year to year and is accompanied by the development of new high-performance methods and solutions to meet the high requirements of work in a short time. To accomplish the task are not only traditional building materials (gravel, sand, concrete, etc.), but modern materials made of synthetic polymer materials, which are made from a variety of geotextile, geogrid, which is a highly effective design

solution, in particular for the prevention of erosion of slopes [1–24].

Protection of the surface of the slopes is a common problem in the construction of most objects of road, hydraulic, railway construction. The slopes are subject to constant destructive effects, so all the slopes are eroded by precipitation, the dam slopes are affected by the flow of water and waves (fig. 1), ice, railway embankments permanent dynamic loads. Under the influence of such a number of loads, the slopes quickly collapse and the body of the embankment (structure) itself begins to deform. Due to these numerous difficulties, a constructive solution for the protection of slopes should be technologically advanced, durable, simple and inexpensive

Fig. 1. Erosion of the slope under the action of rain and wastewater

during installation and operation. In our opinion, such a solution is constructions using three-dimensional polymer geocell. To prepare the study, we turned to the largest manufacturer of geosynthetic materials LLC “PRESTORUS”. For testing, a new generation geocell was provided to us — the innovative spatial polymer lattice GEOCORD®.

At the moment there is a huge variety of three-dimensional polymer geocell on the geosynthetics market. In this article, we will not compare different three-dimensional polymer geocell, but talk about the effectiveness of retaining the aggregate by voluminous geocell under the influence of water flow, selecting the aggregate material and assigning the geometrical parameters of three-dimensional polymer geocell depending on the angle of inclination. Often, designers do not pay enough attention to this and prescribe a placeholder material solely from current experience and may not take into account many factors. This approach is incorrect and in this article we have tried to highlight all the issues relating to the selection of aggregate, and dismantled a few nuances that need to be taken into account when designing structures with the use of three-dimensional polymer geocell.

The main and, perhaps, the most important function of bulk geocell is to protect the slopes from erosion caused by precipitation or other water flows. To protect the slope, the cells of the geocell are filled with various materials: sand, vegetable soil, crushed stone, stone or detritus. The choice of aggregate is determined by the purpose of the object, the intensity of precipitation, the flooding of the slope, the angle of the deposit, the additional loads acting on the slope.

An indicator of the effectiveness of the bulk geocell on the slope, and, consequently, its anti-erosion function, is the ability to hold the aggregate when exposed to water flow.

MATERIALS AND METHODS

In order to study the retention efficiency of the aggregate by geocell under the influence of rain or water flow, several laboratory tests were conducted on a crushed hydraulic installation (a hydraulic tray allows to simulate a directional flow of water having a greater speed, which corresponds to the actual practical case of using a three-dimensional polymer geocell filled with rubble) and on-site irrigated slope models (sand and vegetable soil are the most frequently used aggregates of unsinkable slopes, mainly rain has a crushing effect on them). The purpose of the test was to determine the percentage of washout aggregate from the cells when exposed to the slope of the flow of water (in the case of rubble) or rain (sand).

To study the composition and size of aggregate geocell aggregation fractions taking into account the hydraulic impact, theoretical calculations were made of critical flow rates for a number of aggregate particle

sizes, which were subsequently compared with the results of an experiment to measure critical velocities using water strain gauges.

The assignment of rational slope slopes and geometrical parameters of bulk geocell was made on the basis of calculations of critical velocities of particle drift from a slope and calculations of the stability of the geocell on the slope in accordance with³. Also taken into account was the great experience of strengthening the slopes by geocell of the company PRESTORUS LLC.

Investigation of the efficiency of retention of aggregate geocell when exposed to water flow.

In the first test, the effectiveness of holding the aggregate with two types of geocell was studied: perforated — GEOCORD type C 200/172 P (tensile strength — 29 kN/m; 200 mm — cell height, 172 mm — cell size on the side) and unperforated — “GEOCORD” type C 200/172. The grates were filled with rubble with a fraction of 20–40 mm, the slope laying angle was 1:2 and 1:1 [3–5]. During the tests, the images were exposed to the flow of water at a speed of up to 2 m/s for 20 minutes, after which the amount of rubble measured from the cells was measured and the percentage loss of the aggregate geocell was determined. Three series of tests were carried out for each type of geocell and for each laying of a slope (fig. 2).

Fig. 2. Hydraulic model for determining the effectiveness of retaining aggregate-crushed stone under the influence of water flow

As a result of the tests, it was found that aggregate losses averaged no more than 1 % for both perforated and non-perforated geocell. However, the drainage capacity of the perforated geocell is much higher, water does not have a proclaiming effect on the aggregate and it is more stable in the cell. This result indicates high retention of aggregate-crushed stone by the bulk geocell

³ SP 38.13330.2012. Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships). Updated version of SNiP 2.06.04-82*.

when exposed to water flow, therefore, the bulk geocell (in this experiment, GEOCORD) has a high erosion capacity and is excellent for protecting slopes.

In the second test, the geocell GEOCORD type C 100/172 0530 P (perforated) and GEOCORD type

Fig. 3. Full-scale model of the slope to determine the effectiveness of retention of aggregate-sand geocell when exposed to water flow

C 100/172 0530 (non-perforated) filled with medium-sized sand with a fraction of 2–2.5 mm fit a full-scale slope model of 1:2 and 1:1 (fig. 3, 4) and were subjected to irrigation from rain plants with an intensity of 3 liter/min·m² for 20 minutes [3–6]. Water with particles of washed sand was collected in tanks and placed in a drying chamber, then the percentage of soil loss was determined.

According to the results of the tests, it was found that the loss of aggregate was not more than 15 %. Given the size of the aggregate, the high intensity of precipitation and the absence of grass sowing — this is a very good result. The geocell “GEOCORD” is capable of holding even fine aggregate well, but as shown by the test results, planting grass to create reinforcement is necessary.

Selection of the composition and size of aggregate geocell aggregate fractions taking into account the hydraulic effect.

In order to effectively select the composition and fractions of the geocell aggregate, it is necessary to determine the relationship between the water flow rate and the aggregate fraction size.

According to the formula (1) we determine the hydraulic particle size of the aggregate particles of different fractions:

$$W = \sqrt{\frac{4gD\rho_s}{3C\rho}}, \quad (1)$$

where D — aggregate particle diameter; ρ_s — particle density; C — coefficient of resistance, 0.45 for a spheri-

Fig. 4. Testing process

Table 1. Hydraulic size at $t = 15^\circ\text{C}$ (according to A.V. Vorontsov)

Diameter of particles, mm	200	20	5	2.5	1.0	0.5	0.2	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
Hydraulic size, mm/s (m/s)	3920 (3,92)	1240 (1,24)	620 (0.62)	430 (0.43)	100 (0.1)	60 (0.06)	21 (0.021)	8 (0.008)	2 (0.002)	0.08 ($8 \cdot 10^{-5}$)	0.03 ($3 \cdot 10^{-5}$)	0.0008 ($8 \cdot 10^{-7}$)

Table 2. The critical rate of particle drift on an unprotected slope

Soil d , mm	$\gamma_{\text{кр}}$, м/с
Clay particles (0.001)	0.002
IL (0.005–0.05)	0.1–0.13
Fine sands (0.05–0.1)	0.1–0.18
Sands of medium size (1–2.5)	0.18–0.35
Large sands (2.5–5)	0.35–0.5
Crushed stone, stone (20–200)	2–3

Table 3. Critical particle demolition speed on a geocell protected slope

Soil d , mm	$\gamma_{\text{кр}}$, м/с
Clay particles (0.001)	0.0002
IL (0.005–0.05)	0.01–0.013
Fine Sands (0.05–0.1)	0.01–0.018
Sands of medium size (1–2.5)	0.018–0.035
Large sands (2.5–5)	0.035–0.05
Crushed stone, stone (20–200)	0.2–0.3

cal particle; ρ — fluid density (water 1 t/m³); g — free fall acceleration (9.81 m/s²).

To take into account all modes of water movement (laminar and turbulent), as well as large sizes of aggregate particles, we use the empirical formula for calculating the sedimentation rate of suspended particles (2):

$$W = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{36\nu}{D} + 7.5 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) Dg \right]^{\frac{1}{2}} - 36 \frac{\nu}{D} \right\}. \quad (2)$$

The results are summarized in table 1 (all values were taken according to reference data [7]).

The next step was to determine the critical speeds at which the aggregate particles would be carried away from the slope (not protected by the geocell).

The critical speed when the pressure-free mode is calculated by the formula (3):

$$\gamma_{\text{cr}} = B^4 \sqrt{\frac{1}{Fr}} \cdot \sqrt[9]{\frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_w} \cdot \left(\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho_w} \right)^2}, \quad (3)$$

where B — empirical coefficient (3.85 — sand, gravel; 2.86 — coarse clastic rock); $Fr = \frac{W^2}{gD}$ — Froude number; ρ_m — mixture density; ρ_w — water density; ρ_a — aggregate density; W — hydraulic aggregate particle size see table 1.

We summarize the results in table 2, all values were taken according to reference data [6].

In the calculation, the thickness of the water flow was assumed to be $h = 0.5$ m, slopes for water flow: 1.5–4.5 % — with such slopes, particle drift is guaranteed.

Now, knowing the critical speeds of the demolition of particles of the soil of an unprotected slope, we will define this indicator already for a slope protected

by a voluminous geocell. The geocell cells will have a major impact on the critical speeds, since they resist the movement of fluid and the particles of the aggregate material will linger between the cells and, therefore, the critical particle drift velocities will decrease significantly. To determine the critical speeds taking into account the cell size of a voluminous geocell (using a GEOCORD® geocell with a cell size of 200 mm diagonal perforated) and considering its texturing, we conducted a series of tests on a hydraulic tray. Measurement of critical velocities was carried out with the help of “water” strain gauges, which are able to measure the force effect of the flow. The test results are presented in table 3.

Thus, knowing the critical flow rates of water falling on a slope, one can choose the type of geocell cell aggregate and its fraction.

RESULTS

Assignment of rational slope slopes and parameters of three-dimensional polymer geocell.

Based on the calculations of critical velocities of particle drift from the slope and calculations of the stability of the geocell on the slope [2], we recommend using bulk geocell on the slope with a marginal laying of 1:0.5 (60°). Also based on a wide experience of slope reinforcement with three-dimensional polymer geocell, we developed a technique for selecting the parameters of a three-dimensional polymer geocell, namely: height, cell size, wall thickness, and the slope angle. These techniques were developed for both non-flood (fig. 5) and flooded slopes (fig. 6). It must be remembered that the fixation of the bulk geocell on the slope is carried out using anchors, the number of which is determined based on the calculation.

Fig. 5. Diagram of the selection of parameters of geocell, depending on the laying of the slope (non-flooded)

Fig. 6. Diagram of the selection of parameters of geocell, depending on the laying of the slope (flooded)

CONCLUSION

The tests that were carried out made it possible to conclude that the cause of the collapse of slopes, among other factors, is the wrong choice of aggregate material. When preparing a slope protection solution using geocell, the following recommendations should be considered:

- when assigning the parameters of slopes and types of three-dimensional polymer geocell, you should col-

lect a complete package of initial data for design and not neglect engineering surveys;

- when designing slopes with the use of three-dimensional polymer geocell, to take angles of up to 60°;
- carry out the selection of aggregate particles depending on the initial data of the project, focusing on the methods described in this article;
- when designing the protection of slopes against erosion, use a perforated geocell to avoid loss of aggregate and over-wetting of the body of the slope.

REFERENCES

1. Azarh M.M. Prospects for the use of geogrid "Geoweb" during the construction of roads in Russia. *Roads*. 2003; 5:42-43. (rus.).
2. Alekseeva A.V. Analysis and problems of research of pillows reinforced with geosynthetic material. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2016; 4. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/04/66954> (rus.).
3. Baranov E.V., Gurjev A.P., Khanov N.V. Use of bulk polymeric geogrids in strengthening slopes of retaining hydraulic structures. *Environmental Engineering*. 2015; 2:45-48. (rus.).
4. Veksler A.B., Deryugin G.K. Determination of maximum permissible discharge of water in overflowing a rockfill dam. *Izvestia, B.E. Vedeneev VNIIG*. 2000; 236:24-36. (rus.).
5. Zaitsev A.A., Bubnovsky V.V. Plastic geocells "Prudon-494" in the construction of the track. *Railway Track and Facilities*. 2013; 7:23-24. (rus.).
6. Knoroz V.S. Non-washing speed for non-cohesive soils and factors determining it. *Izvestia, B.E. Vedeneev VNIIG*. 1958; 59:62-81. (rus.).
7. Kozlov K.D., Gurjev A.P., Khanov N.V. Hydraulic studies of the coating from the geocomposite material. *Environmental Engineering*. 2014; 5:80-86. (rus.).
8. Melnikova E.P., Nujnenko U.V., Skrypnik T.V. The stability of ground facilities by reinforcement geosynthetics. *Modern trends and prospects for the introduction of innovative technologies in engineering, education and the economy*. 2016; 1:29-34. (rus.).
9. Merzlikin A.E. *The effectiveness of reinforcement and rubble with the help of joycec*. Moscow, 2010; 212:57-67. (rus.).
10. Moshenzhal A.V. *Recommendations on accounting lattices, "GEO Turf" in the calculation of non-rigid airfield pavements*. Saint-Petersburg, MIAKOM Publ., 2014; 40. (rus.).
11. Pshenichnikova E.S., Khusainov I.J., Zigure Yu.L. Study of the deformation layer, consisting of three-dimensional geocells filled with sand. *News, road case*. Moscow, Informavtodor Publ., 2006; 3:16-24. (rus.).
12. Pshenichnikova E.S. et al. The Construction of the pilot area using the volume of the plastic geogrid "Geoweb" in I road-climatic zone. *Proc. of scientific papers Gosdornii "Soyuzdornii"*. Moscow, State. road scientific researcher Institute of Federal State Unitary Enterprise "Soyuzdornii", 2001; 201:63-67. (rus.).
13. Chugunov A.V. Geostab: universal material for roads and landscape. *Highways*. 2005; 2:17. (rus.).
14. Shuvaev A.N., Sannikov S.P. Application of bulk plastic geogrids in road construction. *Building Bulletin of the Tyumen region*. 2003; 4:42-44. (rus.).
15. Müller W.W., Wöhlecke A. The performance of geocomposite drains in the long run. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics*. Ed M. Ziegler. Essen, German Geotechnical Society (DGGT), 2014.
16. Müller W.W. Long-term pull-out resistance and material properties of geogrids. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics*. Ed M. Ziegler. Essen, German Geotechnical Society (DGGT), 2014.
17. Ziegler M., Jacobs F. Laboratory testing of the compound behavior of geogrid reinforced soil. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics*. Ed M. Ziegler. Essen, German Geotechnical Society (DGGT), 2014.
18. Wang Z., Jacobs F., Ziegler M. Experimental and DEM investigation of pull-out behaviour of geogrid embedded in granular soil. Ed M. Ziegler. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics*. Essen, German Geotechnical Society (DGGT). 2014.
19. Kief O., Schary Y., Pokharel S.K. High-modulus geocells for sustainable highway infrastructure. *Indian Geotechnical Journal*. 2015; 45(4):389-400. DOI: 10.1007/s40098-014-0129-z
20. Parsons R., Jowkar M., Han J. *Performance of geogrid reinforced ballast under dynamic loading*. Nebraska, USA, University of Nebraska-Lincoln, 2012.
21. Das B.M. *Use of geogrid in subgrade-ballast system of railroads subjected to cyclic loading for reducing maintenance*. Sacramento, USA, California State University, 2010.
22. Meyer N. *Determination of the bearing capacity of geocell reinforced soil over soft subgrade with static and dynamic plate load tests*. Institute of Geotech-

nical Engineering and Mine Surveying, TU Clausthal, 2007.

23. Jacobs F., Ziegler M., Vollmert L., Ehrenberg H. Explicit design of geogrids with a nonlinear interface model. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics*. Ed M. Ziegler. Essen, German Geotechnical Society (DGGT), 2014.

24. Yee T.W., Lim L.K., Ter Harmsel M., Choi J.C., Hwang S.P. Geotextile tubes as rockfill replacement for construction of polder dike at Saemangeum, Korea. *Proc. of the 10th Int. Conf. on Geosynthetics*. Ed M. Ziegler. Essen, German Geotechnical Society (DGGT), 2014.

Received May 29, 2019.

Adopted in its final form on June 21, 2019.

Approved for publication August 26, 2019.

BIONOTES: **Nikita A. Zubachev** — Lead Engineer, Technical Department (TechO); **PRESTORUS LLC**; block 1, 5 Gabrichevskogo, Moscow, 5125367, Russian Federation; zubachev@presto.ru;

Ilya M. Galimov — Senior Lecturer of Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; RISC ID: 809150; GalimovIM@mgsu.ru;

Alexey V. Kuzin — bachelor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; iges@mgsu.ru;

Olga A. Sobina — bachelor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; iges@mgsu.ru.