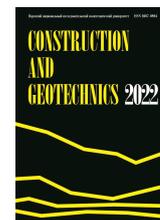




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 13, № 3, 2022

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.01

УДК 624.159

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТИВОКАРСТОВОЙ ЗАЩИТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СИСТЕМЫ СИГНАЛИЗАЦИИ

Н.З. Готман^{1,2}, Ю.И. Пантелеев¹

¹Российский университет транспорта, Москва, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 22 апреля 2022

Одобрена: 16 июля 2022

Принята к публикации:

15 сентября 2022

Ключевые слова:

карстовый провал, карстовая полость, геосинтетические материалы, система сигнализации, усилия и относительные деформации в геосинтетическом материале.

АННОТАЦИЯ

Анализируются результаты геотехнических расчетов карстозащитного мероприятия автомобильной дороги путем укладки геосинтетического материала в основании, при образовании карстовых деформаций двух типов: карстовый провал в основании дорожной насыпи и полость в карстующихся грунтах, залегающих на 5–20 м ниже основания насыпи.

При проектировании противокарстовой защиты с установкой системы сигнализации на геосинтетическом материале обоснована необходимость выполнения расчетов усилий и деформаций в геосинтетическом материале при образовании полости в карстующихся грунтах, так как именно они должны сообщать о росте полости на глубине для своевременного принятия мер защиты.

Получена аналитическая формула, позволяющая определить растягивающие усилия в геосинтетическом материале в зависимости от диаметра полости в карстующихся грунтах, мощности покровной толщи и высоты автодорожной насыпи.

© ПНИПУ

© Готман Наталья Залмановна – доктор технических наук, профессор, e-mail: natalya.gotman@marksgroup.ru

Пантелеев Юрий Игоревич – аспирант, e-mail: panteleevyuriy@icloud.com

Natalya Z. Gotman – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: natalya.gotman@marksgroup.ru

Yuriy I. Panteleev – Postgraduate Student, e-mail: panteleevyuriy@icloud.com

THE KARST PROTECTION OF HIGHWAYS USING GEOSYNTHETIC MATERIALS AND ALARM SYSTEMS DESIGN

N.Z. Gotman^{1,2}, Y.I. Panteleev¹

¹Russian University of transport, Moscow, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 April 2022
Approved: 16 July 2022
Accepted for publication:
15 September 2022

Keywords:

karst failure, karst cavity, geosynthetic materials, alarm system, forces and relative deformations in geosynthetic material.

ABSTRACT

The article analyzes the results of geotechnical calculations of karst protection measure of a highway by laying geosynthetic material in the base, when karst deformations of 2 types are formed: karst failure in the base of road embankment and cavity in karst soils laying 5–20 m below the embankment base.

When designing karst protection with installation of signalling system on geosynthetic material, the necessity to perform calculations of forces and deformations in geosynthetic material during formation of cavity in karst soils is justified, as they should report about cavity growth at depth for timely taking of protection measures.

An analytical formula has been obtained for determining the tensile forces in the geosynthetic material depending on the diameter of the cavity in karst soils, the power of the cover stratum and the height of the road embankment.

© PNRPU

Введение

В соответствии с требованиями норм РФ (СП 116.13330.2012) при проектировании автомобильных дорог на карстоопасных территориях предусматриваются защитные противокарстовые мероприятия, основная цель которых заключается в обеспечении безопасности дороги во время всего жизненного цикла (Пономарев А.Б. и др. [1–3]).

Основным мероприятием противокарстовой защиты автомобильных дорог является укладка геосинтетического материала (геоматериала) в основании насыпи [1–3, 4, 5]. Для повышения эффективности данного мероприятия на геоматериал устанавливается система сигнализации [6–9], которая позволяет фиксировать развитие процесса карстообразования в карстующихся грунтах (рис. 1).

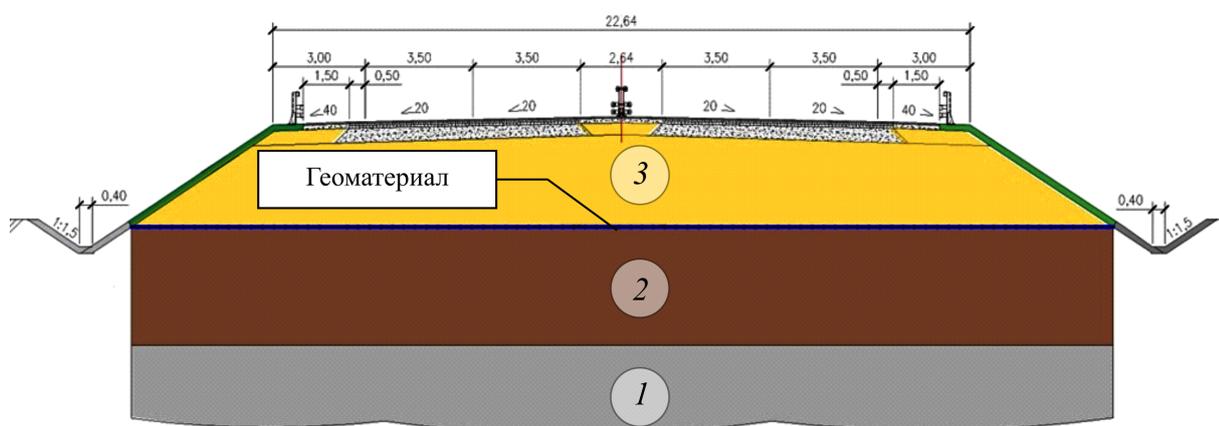


Рис. 1. Поперечный профиль армогрунтовой насыпи: 1 – карстующиеся грунты;

2 – покровная толща; 3 – автодорожная насыпь

Fig. 1. Transverse profile of the armogrunty embankment: 1 – karst soils; 2 – cover stratum;

3 – road embankment

При этом геоматериал должен выполнять функцию поддержки линейного сооружения до устранения последствий провала, а система сигнализация позволяет контролировать динамику развития процессов карстообразования на наиболее опасных участках дороги и при необходимости выполнить локальное инъецирование покровной толщи или тампонаж образовавшихся полостей цементным раствором.

В соответствии с аналитическими методами расчета геоматериала в основании дорог, разработанными зарубежными и Российскими учеными [4, 5, 10, 11], расчет производится на этапе образования карстовой воронки (провала) в основании насыпи автомобильной дороги (рис. 2), размер которой является основным расчетным параметром. Выполняется расчет относительного удлинения и растягивающего усилия в геосинтетическом материале, а также определяются деформации основания дорожного полотна.

При данной расчетной методике и проектировании противокарстовой защиты путем укладки геосинтетического материала, допускается появление пустот в основании, что ставит под вопрос безопасность и может полностью парализовать движение.

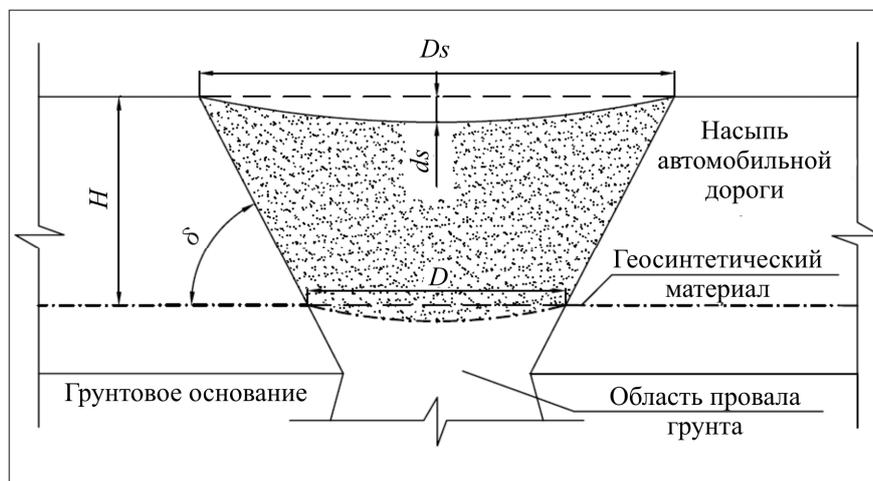


Рис. 2. Расчетная схема
Fig. 2. Calculation scheme

В связи с установкой сигнальной системы на геосинтетический материал появляется возможность контролировать процесс роста полости в карстующихся грунтах [1, 8, 9] и принять соответствующие меры до появления пустот в основании. Чувствительность сигнальной системы должна соответствовать незначительным относительным деформациям в геоматериале при образовании полости в карстующихся грунтах. При установке системы сигнализации на геоматериал именно относительные деформации будут сигнализировать о росте полости на глубине. Таким образом, система сигнализации должна фиксировать усилия растяжения и относительные деформации геоматериала, вызванные полостью в карстующихся грунтах.

Методика численных исследований и обоснование принятой расчетной модели

Для установления аналитической зависимости между диаметром полости в карстующихся грунтах и усилиями в геоматериале выполняются численные исследования [12]. В качестве расчетного параметра карстовых деформаций используется размер полости в карстующихся

грунтах (рис. 3), а результатом расчета (расчетные критерии) являются растягивающее усилие в геоматериале и относительная деформация, определяемая по графикам лабораторного испытания геосинтетического материала (Приложение А ОДМ218.5.003-2010), а также деформации проезжей части автомобильной дороги. Прогнозируемый размер полости за нормативное время эксплуатации дороги определяется в отчетах по инженерно-геологическим изысканиям при оценке карстовой опасности.

Расчеты выполнены на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния основания с учетом армирующей прослойки земляного полотна из геосинтетического материала и проектных нагрузок от подвижного транспорта $P_{AK} = 14,1$ кПа [13] в плоской и пространственной постановке с использованием верифицированных программных комплексов PLAXIS 2D и PLAXIS 3D.

По результатам расчета в плоской постановке выполнено сопоставление результатов расчета усилий в геосинтетическом материале при росте полости и образовании провала. Полученные результаты подтверждают, что растягивающие усилия (деформации) в геоматериале при расчете на образование полости в карстующихся грунтах существенно снижаются по сравнению с аналогичным расчетом, но при образовании провала под насыпью [14].

Аналитические зависимости усилий и относительных деформаций в геосинтетическом материале от прогнозируемого размера карстовой полости в карстующихся грунтах, мощности покровной толщи и высоты насыпи получены на основе численных расчетов в пространственной постановке.

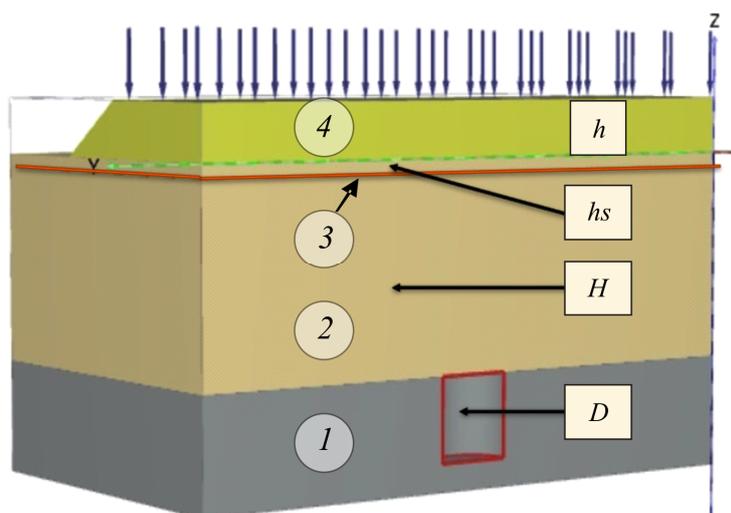


Рис. 3. Расчетная модель: 1 – карстующиеся грунты; 2 – покровная толща; 3 – геосинтетический материал; 4 – автодорожная насыпь

Fig. 3. Calculation model: 1 – karst soils; 2 – cover stratum; 3 – geosynthetic material; 4 – road embankment

Вариативная конечно-элементная расчетная модель (рис. 3) принята со следующими параметрами:

- грунтовый массив, представленный известняком, суглинком и песком (дорожная насыпь) с характеристиками, указанными в табл. 1, для моделирования грунта применяется упругопластическая модель Кулона – Мора;
- армирующий геосинтетический материал моделируется с помощью специального элемента с параметром нормальной (осевой) жесткости E_A , работающий исключительно на растяжение;

- размеры расчетной области определены из условия отсутствия влияния его на результаты расчета, узлы на вертикальных границах области закреплены по X и Y , на горизонтальной границе – по Z ;
- в расчете используется пять вариантов высоты насыпи (h , см. рис. 3): 2; 3; 4; 5; 6 м, глубина заложения геоматериала (h_s , см. рис. 3) принята равной 1 м [15];
- диаметр карстовой полости (D , см. рис. 3) варьируется от 2 до 6 м, для моделирования полости выделяются элементы, которые на этапе задания полости отключаются.
- мощность покровной толщи от основания дороги до кровли карстуемых грунтов (H , см. рис. 3) – 5; 10; 15; 20 м.
- в качестве армирующего материала принят изотропный геосинтетический материал с жесткостью 1700 кН/м.

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов

Table 1

Physical and mechanical properties of soils

Параметр	Карстовый слой	Покровная толща	Насыпь а/д
Наименование	Известняк	Суглинок	Песок
Удельный вес, кН/м ³	18,9	19,0	18,0
Модуль деформации, кН/м ²	120 000	20 000	28 000
Удельное сцепление, кН/м ²	700	30	1
Угол внутреннего трения, град	30	17	28
Коэффициент Пуассона	0,29	0,35	0,30

Расчет выполняется в следующей последовательности:

- определяется исходное НДС грунтового массива;
- выполняется поэтапный рост размеров карстовой полости в карстуемых грунтах, в процессе выполнения расчетов контролируется рост «свода обрушения» над карстовой полостью (рис. 4). Расчеты выполняются только при условии «устойчивых сводов», т.е. «всплытие» карстовой полости не происходит.

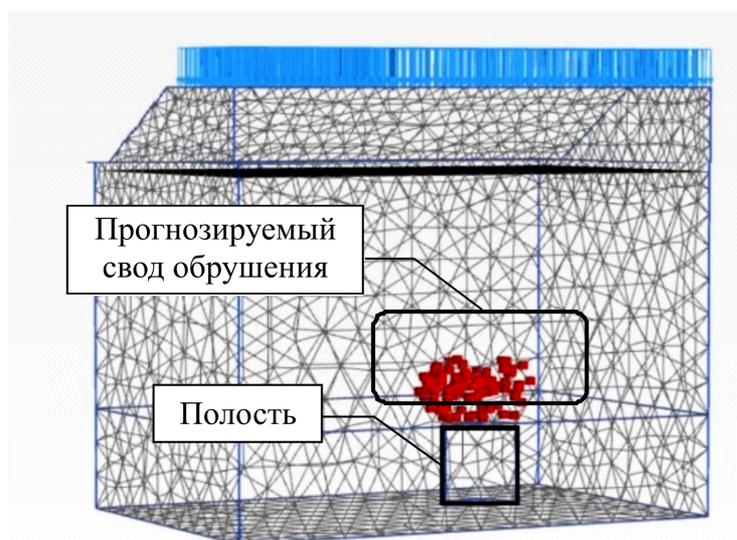


Рис. 4. Расчетная интерпретация образования «устойчивого свода» над карстовой полостью в карстуемых грунтах

Fig. 4. Computational interpretation of the "stable vault" over the karst cavity in karstic soils formation

Анализ результатов численных исследований

Результаты расчета растягивающих усилий, в геосинтетическом материале при изменении диаметра полости в карстующихся грунтах, высоты автодорожной насыпи и мощности покровной толщи представлены в табл. 2.

Таблица 2

Растягивающие усилия в геосинтетическом материале

Table 2

Tensile forces in geosynthetic material

Высота насыпи, м	Диаметр полости, м	Растягивающие усилия при толщине покровной толщи над карстовой полостью			
		5 м (кН/м)	10 м (кН/м)	15 м (кН/м)	20 м (кН/м)
2	2	0,932	0,488	0,399	0,315
	4	1,231	0,502	0,393	0,303
	6	1,625	0,581	0,372	0,244
3	2	0,692	0,737	0,584	0,468
	4	0,77	0,768	0,578	0,465
	6	1,207	0,863	0,572	0,454
4	2	0,714	0,803	0,862	0,586
	4	0,834	0,837	0,849	0,568
	6	1,39	0,965	0,841	0,527
5	2	0,931	1,083	0,916	0,753
	4	1,125	1,096	0,899	0,75
	6	1,56	1,258	0,872	0,683
6	2	0,495	1,263	1,297	0,983
	4	0,513	1,297	1,285	0,965
	6	0,795	1,542	1,27	0,902

Аналитическое решение для определения растягивающих усилий получено по результатам статистической обработки данных табл. 2. В результате регрессионного анализа установлена связь между безразмерными параметрами $\frac{N}{EA}$ и $\frac{D}{H}$, где N – растягивающие усилия геосинтетического материала (кН/м), EA – жёсткость геосинтетического материала (кН/м), D – диаметр карстовой полости (м), H – высота покровной толщи над карстующимися грунтами (м). Получены линейные зависимости $\frac{N}{EA} = f\left(\frac{D}{H}\right)$ вида $y = ax + b$ (рис. 5).

Коэффициент « a » может быть принят постоянным и равным 0,0002, а коэффициент b непосредственно зависит от высоты автодорожной насыпи (H)

$$\frac{N}{EA} = 0,0002 \frac{D}{H} + b. \quad (1)$$

График зависимости коэффициента « b » от безразмерного параметра h_s / h представлен на рис. 6.

Заменив коэффициент b в формуле (1) функциональной зависимостью $b = 0,0001(h_s / h)^{-0,888}$ (см. рис. 6), получим зависимость растягивающих усилий в геосинтетическом материале от диаметра полости (D) в карстующихся грунтах, мощности покровной толщи (H) и высоты автодорожной насыпи (h), кН/м:

$$10^3 \cdot N = EA \cdot \left(0,2 \cdot \frac{D}{H} + \left(\frac{h_s}{h} \right)^{-0,9} \right). \quad (2)$$

Используя формулу (1), получим зависимость диаметра полости от усилий в геоматериале, м:

$$D = \frac{H}{0,2} \cdot \left(\frac{N}{EA} \cdot 10^3 - \left(\frac{h_s}{h} \right)^{-0,9} \right). \quad (3)$$

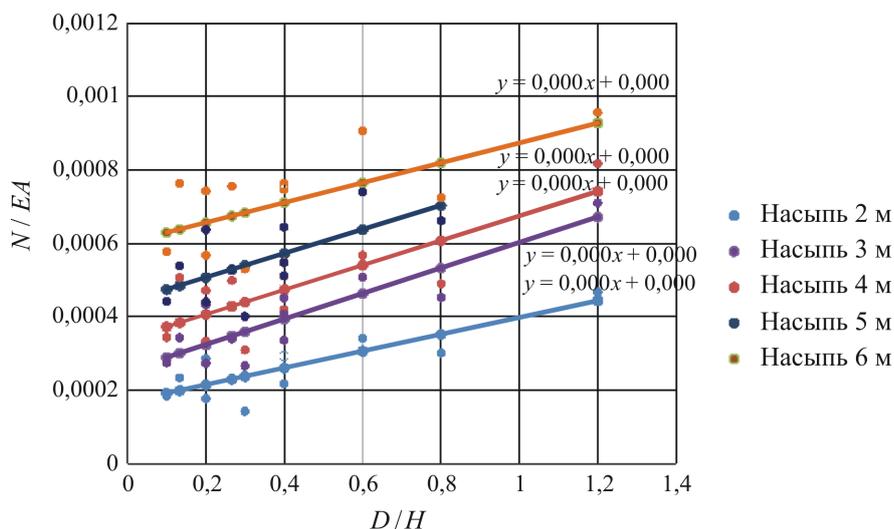


Рис. 5. Графическая интерпретация результатов численных расчетов: N – растягивающие усилия в геоматериале; EA – жёсткость геосинтетического материала; D – диаметр карстовой полости; H – высота покровной толщи над карстующимися грунтами

Fig. 5. Graphical interpretation of the results of numerical calculations: N – tension forces in geomaterial; EA – stiffness of geosynthetic material; D – diameter of karst cavity; H – height of covering strata above karst soils

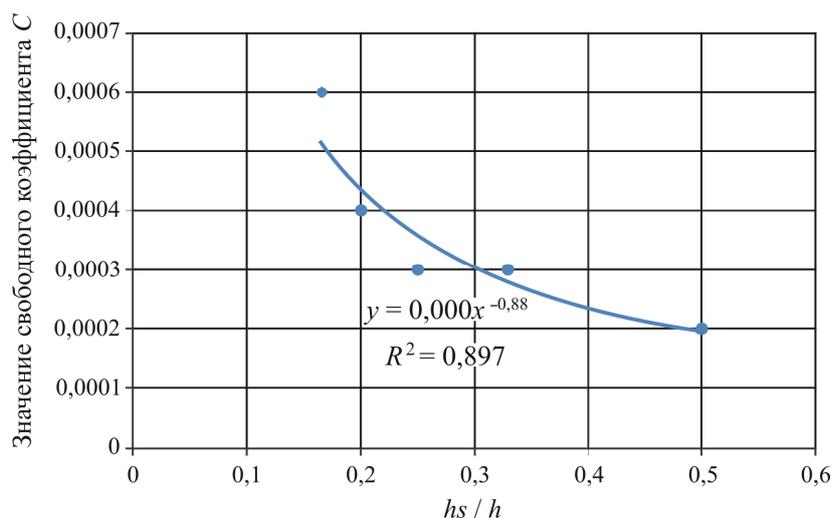


Рис. 6. Зависимость значения коэффициента b от h_s / h ; h_s – глубина заложения геосинтетического материала, м; h – высота автодорожной насыпи, м

Fig. 6. The dependence of the coefficient b value on h_s / h ; h_s – the depth of laying the geosynthetic material, m; h is the height of the road embankment, m

Полученные формулы (2) и (3) и графики зависимости относительных деформаций геоматериала от усилий растяжения в геоматериале (лабораторные испытания) позволяют корректно тарировать датчики и измерительную аппаратуру системы сигнализации при заданных диаметрах карстового провала (формула (2)) и по результатам измерений устанавливать начало процесса образования полости в карстующихся грунтах (формула (3)).

Выводы

По результатам выполненных численных исследований установлено следующее:

1. Для эффективной защиты основания автомобильных дорог от карстопроявлений применяются геосинтетические материалы с установкой на них сигнальной системы, которая позволяет контролировать процесс роста полости в карстующихся грунтах и принять соответствующие меры до появления пустот в основании.

2. По результатам выполненных численных исследований в пространственной постановке предложены аналитические решения для определения усилий в геосинтетическом материале в зависимости от диаметра карстовой полости в карстующихся грунтах, мощности покровной толщи над карстующимися грунтами и высоты дорожной насыпи.

3. Получены решения могут быть использованы при проектировании армирования оснований дорожной насыпи на карстоопасной территории укладкой геосинтетических материалов с установкой на них системы сигнализации и при анализе данных работы системы в процессе эксплуатации дороги.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Пономарев А.Б., Золотозубов Д.Г. Применение геосинтетических материалов при устройстве оснований и фундаментов на карстоопасных территориях // Материалы международного симпозиума «Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах». – Пермь, 2015. – С. 269–273.

2. Золотозубов Д.Г., Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Строительство на подрабатываемых и карстоопасных территориях: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 138 с.

3. Методы строительства армогрунтовых конструкций: учеб.-метод. пособие / В.Г. Офрихтер, А.Б. Пономарев, В.И. Клевеко, К.В. Решетникова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 145 с.

4. Alexiew D. Bridging a sink-hole by high-strength high-modulus geogrids // Proc. of Geosynthetics '97 Conference, March 1997. – Long Beach, USA. –1997. – P. 13–24.

5. BS 8006-1: 2016. Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills. L., 2016. – 256 p.

6. Виноградов Б.А. Диагностика напряженно-деформированного состояния аэродромных сооружений с применением геосинтетических материалов со встроенным оптоволоконном // Вестник МАДИ. – 2017. – Вып. 1 (48). – С. 73–77.

7. Травуш В.И. «Лакхта Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // *Строительные науки*. – 2018. – Вып. 4. – С. 94–107.
8. Савин А.Н. Контрольно-оповестительные системы для карстоопасных участков железнодорожного пути // *Евразия Вести*. – 2017.
9. Delmas P. Examples of monitoring of embankments for high-speed railroads by the use of geo-synthetics with optical fibers. Le cnam. – Paris, 2016.
10. Расчеты армированных грунтовых оснований при возникновении карстовых провалов / Д.Г. Золотозубов, А.Б. Пономарев, С.И. Шиян, М.А. Шубин // *Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства: материалы II Науч.-техн. конф.*, Волгоград, 24–25 октября 2009 г. – Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. – С. 47–50.
11. DGGT EBGeo. Empfehlungen für Planung und Bemessung von Bewehrungen mit Geokunststoffen / Hrsg. Geotechnik Deutsche Gesellschaft für. – Berlin: Verlag W.Ernst und Sohn, 2010.
12. Готман Н.З. Оценка параметров карстопроявлений по результатам численных расчетов оснований // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2019. – № 5. – С. 2–7.
13. Основания и фундаменты: учеб.-метод. пособие / А.Б. Пономарев, А.В. Захаров, Д.Г. Золотозубов, С.В. Калошина, Д.А. Татьянников. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2021. – 283 с.
14. Готман Н.З., Пантелеев Ю.И. Особенности противокарстовой защиты автомобильных дорог с использованием геосинтетических материалов / ФАУ РОСДОРНИИ «Дороги и мосты». – М., 2021. – С. 29–46.
15. Пономарев А.Б., Золотозубов Д.Г. Влияние глубины заложения армирующего материала на несущую способность основания при провалах грунта // *Вестник гражданских инженеров*. – 2010. – № 2 (23). – С. 100–104.

References

1. Ponomarev A.B., Zolotozubov D.G. The use of geosynthetic materials during the installation of the bases and foundations on the karst area. *Proc. of the International Symposium "Environmental safety and construction in karst areas"*. Perm, 2015, pp. 269-273.
2. Zolotozubov D.G., Ponomarev A.B., Sychkina E.N. Construction on moonlighted and karst-prone territories. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2012, 138 p.
3. Ofrichter V.G., Ponomarev A.B., Kleveko V.I., Reshetnikova K.V. Methods of construction of armogrunt structures. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2010, 145 p.
4. Alexiew D. Bridging a sink-hole by high-strength high-modulus geogrids. *Proc. of Geosynthetics '97 Conference*, March 1997, Long Beach, USA, 1997, pp. 13-24.
5. BS 8006-1: 2016 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills; 256 pages, London, 2016.
6. Vinogradov B.A. Diagnostics of the stress-strain state of airfield structures using geosynthetic materials with integrated optical fiber. *Bulletin of MADI*, 2017, iss. 1 (48), pp. 73-77.
7. Travush V.I. "Lakhta Center": automated monitoring of deformations of load-bearing structures and bases. *Construction Sciences*, 2018, iss. 4, pp. 94-107.
8. Savin A.N. Control and notification systems for karst-hazardous sections of railway track. *Eurasia Vesti*, 2017.

9. Delmas P. Examples of monitoring of embankments for high-speed railroads by the use of geo-synthetics with optical fibers. Le cnam. Paris. France, 2016.
10. Zolotozubov D.G., Ponomarev A.B., Shiyan S.I., Shubin M.A. Calculations of reinforced soil bases in the event of karst failures. *Engineering problems of building materials science, geotechnical and road construction: Materials of the II Scientific and Technical Conference*, Volgograd, 24–25 October 2009. Volgograd, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2009, pp. 47-50.
11. DGGT EBGEO. Empfehlungen für Planung und Bemessung von Bewehrungen mit Geokunststoffen / Hrsg. Geotechnik Deutsche Gesellschaft für. Berlin, Verlag W.Ernst und Sohn, 2010.
12. Gotman N.Z. Evaluation of karst manifestation parameters by results of numerical calculations of foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2019, no. 5, pp. 2-7.
13. Ponomarev A.B., Zakharov A.V., Zolotozubov D.G., Kaloshina S.V., Tatiannikov D.A. Bases and foundations. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2021, 283 p.
14. Gotman N.Z., Panteleev Yu.I. Peculiarities of calculation for anti-karst protection of roads with using geosynthetic materials. *FA ROSDORNII "Roads and bridges"*. Moscow, 2021, pp. 29-46.
15. Ponomarev A.B., Zolotozubov D.G. Effect of the reinforcing material depth location on the bearing capacity of the foundation at ground downfall. *Bulletin of Civil Engineers*, 2010, no. 2 (23), pp. 100-104.