

Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и тоннелей

УДК 625.7:691.87

DOI 10.23968/1999-5571-2023-21-3-88-94

© К. А. Куликова, ст. преподаватель
(Ярославский государственный технический
университет, Ярославль, Россия)
E-mail: kurochkinaka@ystu.ru

© K. A. Kulikova, senior lecturer
(Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia)
E-mail: kurochkinaka@ystu.ru

© А. А. Игнатьев, директор департамента
(ФАУ «РОСДОРНИИ», НИУ Высшая
школа экономики, Школа инноватики
и предпринимательства, Москва, Россия)
E-mail: ignatievaa@rosdornii.ru

© A. A. Ignatyev, Director of the Department
(FAU «ROSDORNII»; National Research University
Higher School of Economics, School of Innovation and
Entrepreneurship, Moscow, Russia)
E-mail: ignatievaa@rosdornii.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ РЕБРА 3D-ГЕОРЕШЕТКИ НА ЗАКЛИНКУ КАМЕННОГО МАТЕРИАЛА

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE 3D-GEOGRID RIB CROSS-SECTION ON THE WEDGING OF STONE MATERIAL

Представлены результаты исследований по установлению оптимальной формы поперечного сечения ребра 3D-георешетки. В ходе исследований изучалось поведение частиц щебня в массиве и определялись механические характеристики заклинивания несущего основания. Выполнен анализ плоского и объемного армирования на поведение частиц щебня в армированном массиве. Сделаны выводы по влиянию геометрии ребра на применение 3D-георешетки в щебеночном основании на повышение эксплуатационных характеристик автомобильных дорог. Установлено, что наиболее оптимальными вариантами армирования дорожных одежд являются георешетки с соотношением сторон поперечного сечения ребра 1:1 и 1:2.

Ключевые слова: эффект армирования, конфигурация георешетки, заклинка, «эффект плиты».

The paper presents the results of research on establishing the optimal cross-sectional shape of a 3D geogrid rib. In the course of research, there was studied the behavior of crushed stone particles in the array and the mechanical characteristics of the bearing base wedging were determined. The influence of flat and volumetric reinforcement on the behavior of crushed stone particles in a reinforced array was analyzed. Conclusions were drawn regarding the influence of rib geometry on the use of 3D geogrids in crushed stone base on the improving of highway operational characteristics. It has been established that the most optimal options for reinforcing road clothes are geogrids with the ratio of the sides of the cross-section of the rib 1:1 and 1:2.

Keywords: reinforcement effect, geogrid configuration, wedging, «plate effect».

Введение

Важным параметром гарантии безотказной службы несущего основания дорожной одежды является достаточная плотность массива крупного инертного заполнителя. Однако не всегда удается добиться требуемой плотности структуры слоя щебня на протяжении всего участка автомобильной

дороги даже за счет расклиновки. В процессе производства работ может происходить локальное проникновение (вдавливание) щебеночного материала в недостаточно уплотненное песчаное основание.

Плоские георешетки, призванные решить проблему повышения прочности конструкции, не всегда справляются с возложенной

на них задачей. Низкая механическая устойчивость [1] не оправдывает ожидаемый экономический и эксплуатационный эффекты армирования дорожных оснований и дорожных одежд в целом.

Опираясь на положительные результаты исследований заклинки георешетки с соотношением сторон 1:1 [2], были смоделированы георешетки с соотношением сторон 1:2 и 2:1 по патенту RU 2 652 411 С1 от 2018.26.04 [3] и проведены визуальные испытания на оценку заклинивающей способности в зависимости от формы поперечного сечения ребра георешетки.

Цель исследования заключается в установлении оптимальной формы поперечного сечения ребра 3D-георешетки.

Задачи исследования: изучение поведения частиц щебня в массиве, определение механических характеристик заклинивания несущего основания.

Обзор исследований отечественных и зарубежных авторов показал, что конфигурация георешетки напрямую влияет на заклинивающую способность армирования [4–10]. Патентный обзор [3, 11–14] указывает на актуальность изучения варианта рациональной формы армирования дорожных конструкций (оснований и покрытий) для получения высокого эффекта армирования дорожной конструкции.

Рынок геосинтетических материалов в настоящее время широко представлен плоскими георешетками с ячейками квадратной и треугольной формы, а также геосотами.

Экспериментальные исследования Литвинова Н. Н. [4] показали, что влияние георешетки на прогиб армированной конструкции заключается в закреплении зерен от смещения внутри щебеночного массива. Данное условие было обеспечено высокой осевой жесткостью ребер решетки на растяжение за счет стальных стержней в ребрах, препятствующих проникновению материала в нижележащий слой. Так, деформации

конструкции в большей степени зависят не от процента армирования, а от жесткости стержней изделия.

В работе [15] показано изменение структуры и числа контактов и связей под действием вертикальной нагрузки, нарушающей изначальное равновесие между щебенками в массиве. Под действием возникающих перемещений и поворотов происходит перекомпоновка частиц, приводящая к увеличению числа контактов, то есть формированию более плотной структуры и большей площади распространения вертикальных напряжений, а следовательно, к повышению эффекта армирования за счет более быстрого затухания напряжений по глубине и снижению деформативности конструкции.

Результаты исследований Санникова С. П. [16] показали снижение осадки дискретного материала в процессе за счет «удерживающей» способности объемного армирования, что положительно сказалось на прочностных характеристиках конструкции.

Методы

В качестве источников для анализа были отобраны работы авторов, рассматривающих армирование дорожных оснований из щебня. Труды, посвященные армированию дорожных покрытий, в данной статье не исследуются. В источниках [4, 6–10, 15, 16] анализируется поведение в статически однородных сыпучих грунтах под действием вертикальной нагрузки без введения и с введением плоского и объемного армирования. В работах с исследованием плоского армирования [4, 7, 9, 15] рассматривается испытание двухслойных конструкций, представленных слоем щебня разной толщины, устроенным на песчаном основании. Объемное армирование [6, 8, 10, 16] исследовалось дискретным заполнителем в виде щебня. Во всех случаях выполнялись штамповые испытания.

Оценка заклинивающей способности 3D-георешетки производилась с помощью

графического моделирования «ядра» заполнителя и «эффекта плиты».

Результаты

Апробированные исследования [1, 2] показывают, что при усилении дорожных оснований качественная заклинка обеспечивается благодаря распору, возникающему в середине ребра инновационной 3D-георешетки. Под действием вертикальных сил, возникающих в процессе укладки и уплотнения материала, крупные частицы инертного заполнителя перекомпоновываются и закрепляются в ребрах, образуя горизонтальное давление в плоскости основания решетки и формируя эффект чаши.

При этом угол между ребром решетки и плоскостью основания оказывает влияние на размер образуемого «ядра» из каменного материала в ячейке, а также на расположение его центра тяжести и глубину проникновения нижних зерен щебеночного материала в нижележащие слои. На рис. 1 представлено поведение армируемого материала при усилении слоя 3D-георешеткой с различной формой поперечного сечения ребра и одинаковым размером ячейки.

Пространственное расположение центра тяжести «ядра» заполнителя является важ-

ным показателем в механике заклинивания, так как приближение центра тяжести к плоскости основания изделия снижает вероятность заклинки. Частицы «ядра», обладая избыточным свободным пространством вокруг себя, не могут рационально перекомпоноваться, закрепиться между собой, и в свободном состоянии проникают в глубину.

Геометрические параметры заклинивания и проникновения в нижележащие слои при размере ячейки 60 мм и высоте поперечного сечения 10 мм представлены на рис. 2–4 (согласно условным обозначениям, приведенным на рис. 1).

При укладке инертного материала слой частично или полностью включается в совместную работу с решеткой, образуя «эффект плиты» (рис. 5), подтвержденный многочисленными экспериментальными работами [17–19]. Данный эффект сказывается на повышении прочности конструкции и длительности срока эксплуатации автомобильной дороги. Таким образом, разное соотношение сторон ребра позволит варьировать конфигурацию и высоту дорожной одежды и ее прочностные характеристики под требуемые условия эксплуатации автомобильной дороги.

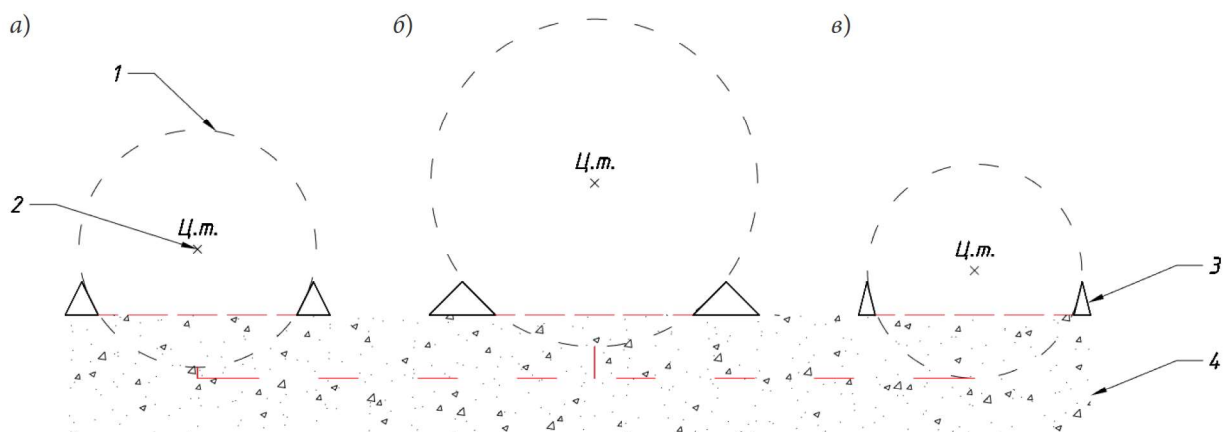


Рис. 1. Влияние формы ребра на заклинивающую способность 3D-георешетки: а — заклинивание материала при соотношении сторон ребра 1:1; б — заклинивание материала при соотношении сторон ребра 1:2; в — заклинивание материала при соотношении сторон ребра 2:1; 1 — «ядро» заполнителя в ячейке; 2 — центр тяжести «ядра» заполнителя; 3 — ребро 3D-георешетки; 4 — нижележащий слой

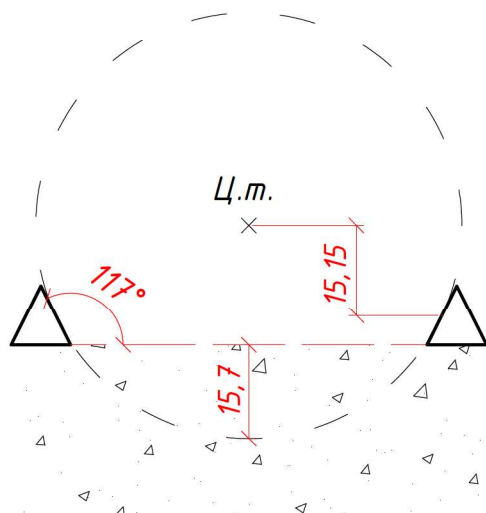


Рис. 2. Заклинка при соотношении сторон 1:1

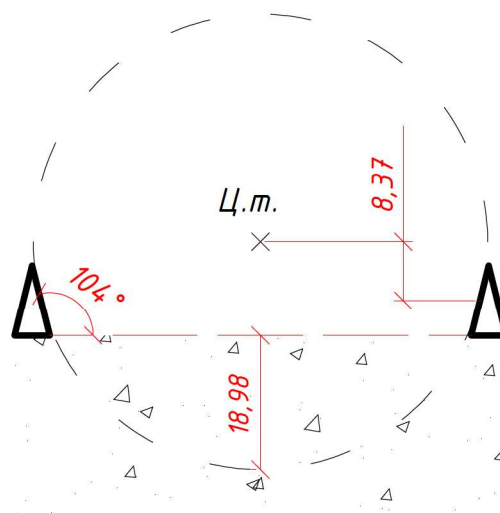


Рис. 4. Заклинка при соотношении сторон 2:1

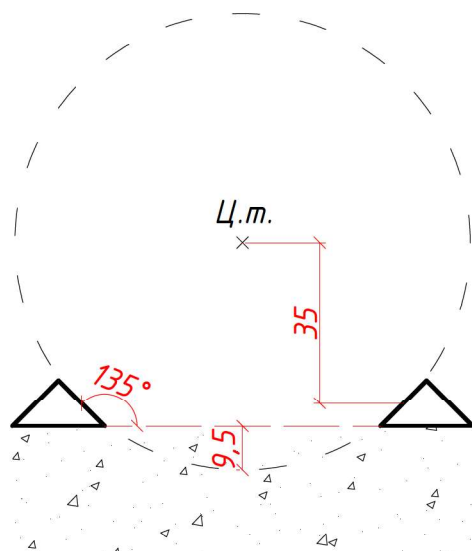


Рис. 3. Заклинка при соотношении сторон 1:2

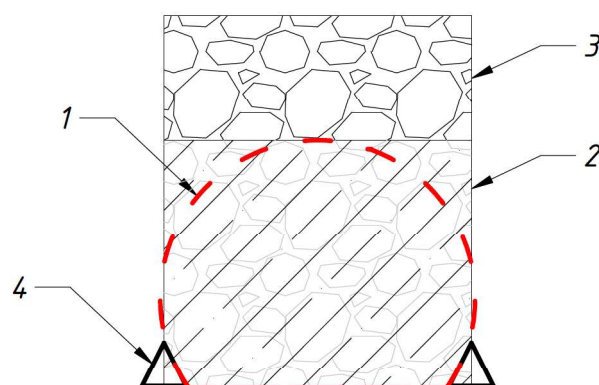


Рис. 5. «Эффект плиты» в основании конструкции дорожной одежды: 1 — «ядро» заполнителя в ячейке; 2 — часть слоя инертного заполнителя, включившаяся в совместную работу с 3D-георешеткой; 3 — часть слоя инертного заполнителя, не включившаяся в совместную работу с 3D-георешеткой; 4 — ребро 3D-георешетки

Значения показателей заклинка инертного материала 3D-георешеткой с различной формой поперечного сечения ребра

Показатель	Значение показателя при соотношении сторон		
	1:1	1:2	2:1
Угол между ребром решетки и плоскостью основания изделия	117°	135°	104°
Расстояние от центра тяжести «ядра» до распора, мм	15,15	35,00	8,37
Глубина проникновения инертного заполнителя в нижележащие слои, мм	15,70	9,50	18,98
Толщина слоя с «эффектом плиты», мм	56,01	89,50	45,73
Расстояние между распорами, мм	65,0	70,0	62,5
Диаметр «ядра», мм	71,72	98,99	64,70

Основные механические характеристики заклинивания сведены в таблицу.

Обсуждение

При одинаковом размере ячейки (диаметре вписанной окружности) и одинаковой высоте поперечного сечения максимальная толщина слоя инертного материала, включаемого в совместную с георешеткой работу, отмечена при соотношении сторон ребра 1:2.

Угол наклона ребра при соотношении 1:2 снижает вероятность проникновения крупного каменного заполнителя внутрь ячейки за счет образованного диаметра «ядра», превышающего расстояние между распорами на 40 %. Таким образом, создаются благоприятные условия для оптимальной перекомпоновки частиц, образования плотной и прочной структуры композита. Также предотвращается смещение контактирующих слоев.

При соотношении 2:1 центр тяжести наиболее близок к плоскости основания 3D-георешетки, а образованный диаметр «ядра» превышает расстояние между распорами всего на 3 %, что значительно скажется на качестве заклинивания, приближая эффект такой 3D-георешетки к плоскому армированию, в сравнении с объемными изделиями с соотношением сторон 1:1 и 1:2.

Выводы

Таким образом, наиболее оптимальными вариантами армирования дорожных одежд являются георешетки с соотношением сторон 1:1 и 1:2. В зависимости от условий эксплуатации автомобильных дорог и перспективного количества циклов приложения нагрузки они позволят варьировать конфигурацию дорожных одежд и толщину слоев основания и покрытия.

Библиографический список

1. Куликова К. А., Игнатъев А. А. Оценка повреждаемости плоских и пространственных георешеток при армировании материалов конструктивных слоев дорожной одежды // Дороги и мосты: сб. науч. трудов. М., 2023. № 49. С. 33–53. URL: https://rosdornii.ru/upload/iblock/868/szqdl3t1qcwlnr4cl2xcez5ylynyn33x/2.-Kulikova_Ignatev-Otsenka-povrezhdaemosti.pdf (дата обращения: 10.10.2023).
2. Куликова К. А., Игнатъев А. А., Галибина В. А. Заклинивающая способность ячейки гексагональной формы 3D-георешетки // Дороги. Инновации в строительстве. Геосинтетические и композитные материалы. Спецвыпуск. 2022. № 99. С. 18–19. URL: <http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/roads99/99.pdf> (дата обращения: 10.10.2023).
3. Георешетка для армирования дорожной одежды: патент RU 2652411 С1 Рос. Федерация: МПК E01C 5/20 / Игнатъев А. А., Курочкина К. А., Ронжин Е. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет» № 2017124781; заявлен 11.07.2017; опубликован 26.04.2018. Бюл. № 12.
4. Литвинов Н. Н. Обоснование расчетной модели армированного щебеночного основания дорожной одежды: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. Омск, 2018. 126 с.
5. Горынин Г. Л., Власко А. Ф. Математическое моделирование механических свойств армогрунтов // Техника и технологии в строительстве. Геосинтетические материалы. Спецвыпуск. 2015. № 2 (2). С. 58–61.
6. Матвеев С. А. Влияние структуры армирования на физико-механические свойства композита «грунт-георешетка» // Вестник Югорского государственного университета. 2005. № 1 (1). С. 65–73.
7. Xiaochao Tang, Chassan R. Chehab, Angelica Palomino. Evaluation of geogrids for stabilising weak pavementsubgrade // International Journal of Pavement Engineering. December 2008. Vol. 9, No. 6. Pp. 413–429.
8. Sanat K. Pokharel, Jie Han, Dov Leshchinsky, Robert L. Parsons. Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading // International Journal of Pavement Research and Technology. March 2018. Vol. 11, Iss. 2. Pp. 114–127. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416301948> (дата обращения: 13.10.2023).
9. Мартынов Е. А. Определение эффекта армирования дорожных конструкций геосинтетическими материалами // Техника и технологии строительства. 2015. № 2 (2). С. 30–38.
10. Rajagopal K., Veeragavan A., Chandramouli S. Studies on geocell reinforced road pavement structures // Geosynthetics Asia. 2012. Pp. 497–502. URL: https://www.prs-med.com/wp-content/uploads/2017/05/Studiess_Geocell_Reinforced_Road_Pavements-Rajagopal_2012.pdf (дата обращения: 13.10.2023).
11. Каркасная конструкция: патент RU 156 100 U1 МПК E06B 3/70 / Лялык В. В.; заявитель и патен-

тообладатель Лялык В. В. № 2014122253/12; заявлен 02.06.2014; опубликован 27.10.2015. Бюл. № 30.

12. Армирующая сетка: патент RU (11) 2 539 196 С2 / Сафонов В. Г., Седов М. П., Шраер И. И., Хижняк Е. М.; заявитель и патентообладатель ОАО «Волжский завод асбестовых технических изделий», ООО «Волжский завод текстильных материалов»; № 2013114496/03; заявлен 29.03.2013; опубликован 20.01.2015. Бюл. № 2.

13. Текстильная сетка для армирования слоев, связанных с помощью битумов (варианты): патент RU 2 166 019 С2 Рос. Федерация: МПК E01C 11/16, E04C 5/07 / Касснер Ю., Пинтц Х., Фон Франсецки У.; заявитель и патентообладатель Хюскер Зюнтетик ГМБХ УНД КО. № 99115877/03; заявлен 05.12.1997; опубликован 27.04.2001. Бюл. № 12.

14. Георешетка: патент 164791 U1 Рос. Федерация: МПК E01C 3/04 / Литвинцев А. В.; заявитель и патентообладатель ООО «СтратегТехнология» (RU). № 2016116540/03; заявлен 27.04.2016; опубликован 04.02.2020. Бюл. № 4.

15. Мошенжал А. В. Совершенствование проектирования дорожных одежд с конструктивными слоями из малосвязных грунтов, армированных геосинтетическими материалами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. Хабаровск, 2016. 173 с.

16. Санников С. П. Армирование несущих слоев из грунтов и каменных материалов объемными георешетками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. Тюмень, 2004. 24 с.

17. Журавлев И. Н. Оценка влияния геоматериалов на напряженно-деформированное состояние железнодорожного земляного полотна: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. СПб., 2005. 197 с.

18. Гладков В. Ю. Армирование зернистых оснований нежестких дорожных одежд геотекстильными прослойками в виде сеток: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.14. М., 1985. 195 с.

19. Мельников А. В. Исследование прочности и деформируемости слабых грунтов оснований, усиленных армированием: дис. ... магистра техники и технологии строительства. Пенза, 2012. 216 с.

References

1. Kulikova K. A., Ignat'ev A. A. *Otsenka povrezhdaemosti ploskikh i prostranstvennykh georeshyotok pri armirovani materialov konstruktivnykh sloev dorozhnoy odezhdy* [Assessment of damageability rate of flat and spatial geogrids when reinforcing materials of structural layers of pavement]. *Sbornik nauchnykh trudov «Dorogi i mosty»* [Collection of scientific papers "Roads and Bridges"]. Moscow, 2023, no. 49, pp. 33–53. Available at: https://rosdornii.ru/upload/iblock/868/szqdl3t1qcwlnr4cl2xcez5ylynyn33x/2.-Kulikova_Ignat'ev-Otsenka-povrezhdaemosti.pdf (accessed: 10.10.2023).

2. Kulikova K. A., Ignat'ev A. A., Galibina V. A. *Zaklinivayushchaya sposobnost' yacheyki geksagonal'noy formy 3D-georeshyotki* [Wedging ability of hexagonal shaped 3D geogrid cell]. *Dorogi. Innovatsii v stroitel'stve. Geosinteticheskie i kompozitnye materialy. Spetsvypusk – Roads. Innovations in Construction. Geosynthetic and composite materials. Special Issue*, 2022, no. 99, pp. 18–19. Available at: <http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/roads99/99.pdf> (accessed: 10.10.2023).

3. Ignat'ev A. A., Kurochkina K.A., Ronzhin E. A. *Georeshetka dlya armirovaniya dorozhnoy odezhdy* [Geogrid for reinforcement of roadway clothes]. Patent RF, no. 2652411 S1, 2017.

4. Litvinov N. N. *Obosnovanie raschetnoy modeli armirovannogo shchebenochnogo osnovaniya dorozhnoy odezhdy. Diss. kand. tekhn. nauk* [Substantiation of the calculation model of the reinforced crushed stone base of the pavement. PhD in Sci. Tech. diss.]. Omsk, 2018, 126 p.

5. Gorynin G. L., Vlasko A. F. *Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskikh svoystv armogrunтов* [Mathematical modeling of mechanical properties of reinforced soil]. *Tekhnika i tekhnologii v stroitel'stve. Geosinteticheskie materialy. Spetsvypusk – Engineering and Technologies in Construction. Geosynthetic materials. Special Issue*, 2015, no. 2 (2), pp. 58–61.

6. Matveev S. A. *Vliyanie struktury armirovaniya na fiziko-mekhanicheskie svoystva kompozita «grunt-georeshetka»* [Influence of reinforcement structure on physical and mechanical properties of composite "soil-geogrid"]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Ugra State University*, 2005, no. 1 (1), pp. 65–73.

7. Xiaochao Tang, Chassan R. Chehab, Angelica Palomino. Evaluation of geogrids for stabilising weak pavement sub-grade. *International Journal of Pavement Engineering*, December 2008, vol. 9, no. 6, pp. 413–429.

8. Sanat K. Pokharel, Jie Han, Dov Leshchinsky, Robert L. Parsons. Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading. *International Journal of Pavement Research and Technology*, March 2018, vol. 11, iss. 2, pp. 114–127. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416301948> (accessed: 13.10.2023).

9. Martynov E. A. *Opredelenie effekta armirovaniya dorozhnykh konstruktsey geosinteticheskimi materialami* [Determination of the effect of reinforcement of road structures by geosynthetic materials]. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'nosti – Engineering and Technologies of Construction*, 2015, no. 2 (2), pp. 30–38.

10. Rajagopal K., Veeragavan A., Chandramouli S. Studies on geocell reinforced road pavement structures.

Geosynthetics Asia, 2012, pp. 497–502. Available at: https://www.prs-med.com/wp-content/uploads/2017/05/Studiess_Geocell_Reinforced_Road_Pavements-Rajagopal_2012.pdf (accessed: 13.10.2023).

11. Lyalyk V. V. *Karkasnaya konstruktsiya* [Frame construction]. Patent RF, no. 2014122253/12, 2014.

12. Safonov V. G., et al. *Armirusuyushchaya setka* [Reinforcing mesh]. Patent RF, no. 2013114496/03, 2013.

13. Kassner Yu., Pintts Kh., Fon Fransetski U. *Tekstil'naya setka dlya armirovaniya sloev, svyazannykh s pomoshch'yu bitumov (varianty)* [Textile mesh for reinforcing layers bonded with bitumen (variants)]. Patent RF, no. 2 166 019 S2, 1997.

14. Litvintsev A. V. *Georeshetka* [Geogrid]. Patent RF, no. 164791, 2016.

15. Moshenzhal A. V. *Sovershenstvovanie proektirovaniya dorozhnykh odezhd s konstruktivnymi sloyami iz malosvyaznykh gruntov, armirovannykh geosinteticheskimi materialami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of design of road pavements with structural layers of low-cohesive soils reinforced with geosynthetic materials. PhD in Sci. Tech. diss.]. Khabarovsk, 2016, 173 p.

16. Sannikov S. P. *Armirovanie nesushchikh sloev iz gruntov i kamennykh materialov ob'emnymi georeshetkami*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Reinforcement of bearing layers of soils and stone materials with volumetric geogrids. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Tyumen, 2004, 24 p.

17. Zhuravlev I. N. *Otsenka vliyaniya geomaterialov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna*. Diss. kand. tekhn. nauk [Estimation of influence of geomaterials on the stress-deformed state of a railroad earth base bed. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2005, 197 p.

18. Gladkov V. Yu. *Armirovanie zernistyykh osnovaniy nezhestkikh dorozhnykh odezhd geotekstil'nyimi prosloykami v vide setok*. Diss. kand. tekhn. nauk [Reinforcement of granular bases of non-rigid roadways with geotextile layers in the form of meshes. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1985, 195 p.

19. Mel'nikov A. V. *Issledovanie prochnosti i deformiruемости slabyykh gruntov osnovaniy, usilennykh armirovaniem*. Diss. magistra tekhniki i tekhnologii stroitel'stva. [Investigation of strength and deformability of weak base soils hardened with reinforcement. MSci in Sci. Tech. diss.]. Penza, 2012, 216 p.