

УДК 625.8:691.87

**ОЦЕНКА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПЛОСКИХ И
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГЕОРЕШЕТОК ПРИ АРМИРОВАНИИ
МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ
ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

Старший преподаватель **К.А. Куликова**
(Ярославский государственный
технический университет),
канд. техн. наук, доцент **А.А. Игнатьев**
(ФАО «РОСДОРНИИ»;
Ярославский государственный
технический университет)
Конт. информация: ignatevaa@rosdornii.ru;
christinaandreevna@gmail.com

Рассмотрены и проанализированы традиционные плоские георешетки и инновационная 3D-георешетка, с позиции возможного отказа работы дорожных конструкций. Сообщается о выполненных исследованиях и испытаниях образцов георешеток на механическую повреждаемость и заклинивающую способность.

Ключевые слова: георешетка, ячейка, форма ячейки, пятно контакта, узловое соединение, повреждаемость.

Значительный рост уровня автомобилизации в Российской Федерации за последние годы, согласно статистике Центра экономики инфраструктуры (**рис. 1**), обуславливает воздействие повышенных нагрузок на дорожные одежды, в том числе от движения транспортных средств с ненормативными нагрузками на ось. За период с 2000 г. по 2022 г. среднее количество индивидуальных легковых автомобилей на 1000 жителей увеличилось на 209 единиц (с 137 до 346), а к 2026 г. может достигнуть 382 автомобиля. Неучет этих обстоятельств при эксплуатации, проектировании, строительстве и реконструкции автомобильных дорог создает условия, при которых появление недопустимых напряжений в дорожных конструкциях и их последующее преждевременное разрушение становится неизбежным.

На современном этапе, по данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат) [2], общая протяженность автомобильных дорог общего пользования на 01.01.2022 составила 1 566 110,2 км, из которых 51,8 % региональных и межмуниципальных, при этом 47,0 % дорог местного значения не отвечают нормативным требованиям. Недоремонт по отдельным регионам достигает 84,2 %.

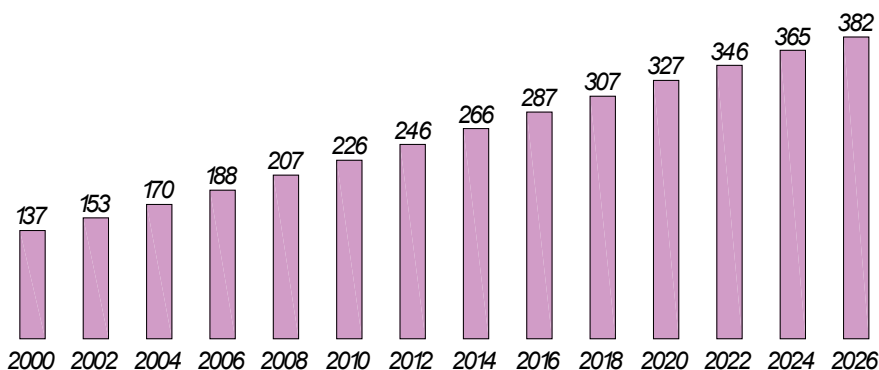


Рис. 1. Изменение уровня автомобилизации в России за период 2000-2026 гг. [1]

До 10 июня 2017 года нормативные межремонтные сроки регламентировались Постановлением Правительства РФ от 23 августа 2007 года № 539 [3] и составляли 4 года и 12 лет для ремонта и капитального ремонта соответственно. Позднее Постановлением Правительства РФ от 30 мая 2017 года № 658 [4] для автомобильных дорог, за исключением дорог V категории, сроки были увеличены: в части ремонта – до 12 лет, в части капитального ремонта – до 24 лет. При этом предусматривается снижение ассигнований федерального бюджета не менее чем на 5 %.

С учетом перечисленных выше факторов необходимо более активно внедрять инновационные разработки и технологии, позволяющие увеличить несущую способность и повысить долговечность автомобильных дорог.

Для увеличения доли автомобильных дорог регионального значения, соответствующих нормативным требованиям, а также для снижения доли автомобильных дорог федерального и регионального значения,

функционирующих в режиме перегрузки, в рамках стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021-2025 гг. [5], одним из приоритетных направлений является расширение перечня современных дорожно-строительных материалов, а также поиск новых и модернизация традиционных изделий. К данному направлению относится и применение геосинтетических материалов. Ключевой задачей для исследований в области армирования дорог становится повышение эффективности использования ресурсов и увеличение долговечности и сроков службы автомобильных дорог.

Исследование конъюнктуры рынка современных геосинтетических материалов показало следующее:

- в настоящее время для армирования дорожных конструкций 50 % георешеток изготавливается из искусственных неорганических волокон, а другие 50 % – из полимеров;
- стоимость изделий из искусственных неорганических волокон составляет в 3-5 раз меньше по сравнению с полимерами, что объясняет, в частности, их повышенный спрос;
- преобладающая часть георешеток изготавливается плоскими и имеет в основном квадратную форму ячейки.

Наиболее распространенным видом отказа автомобильных дорог является нарушение прочности в отдельных слоях дорожной одежды. Снизить риск перехода дорожной конструкции в предельное состояние можно за счет минимизации (предотвращения) перемещений и сдвигов каменного материала под воздействием многократных циклов приложения нагрузки и обеспечения надежной заклинки. Как показали проведенные исследования и патентный анализ [6-16], в дорожных конструкциях, армированных георешетками, степень заклинивания щебня напрямую зависит от формы и размера ячейки изделия.

Так, для армирования дорожных одежд наибольшее распространение получили традиционно плоские георешетки с ячейками квадратной формы (патенты: RU 2 539 192 C2 от 2015.20.01; RU 2 166 019 C2 от 2001.27.04; RU 2 725 981 C1 от 2020.07.08 и т.д.) и треугольной формы (патент RU 164 791 U1 от 2016.27.04). Ряд патентов отражают результаты исследований по созданию инновационных способов усиления конструктивных слоев, таких как применение георешеток с гексагональной ячейкой, образованной пересечением объемных ребер треугольного сечения (патент RU 2 652 411 C1 от 2018.26.04), конструкции вертикального армирования асфальтобетонных покрытий при помощи разъемных шипов,

расположенных в узловых соединениях (патент RU 2 272 093 С2 от 2004.24.05) и ряд других [17-24].

Исследования показали, что для улучшения прочностных характеристик дорожных конструкций в целом необходимо повышение плотности структуры материалов. Для армируемых слоев данный эффект достигается путем получения композита «георешетка + щебень/асфальтобетон» и зависит от геометрической формы ячейки изделия. При этом важным аспектом является и размер пятна контакта между слоями, что обуславливает адгезию и сцепление между слоями асфальтобетонного покрытия. В данном случае пятно контакта – это область внутри окна ячейки георешетки, обеспечивающая устойчивое взаимодействие материалов армируемого и нижележащего слоев дорожной одежды (рис. 2).

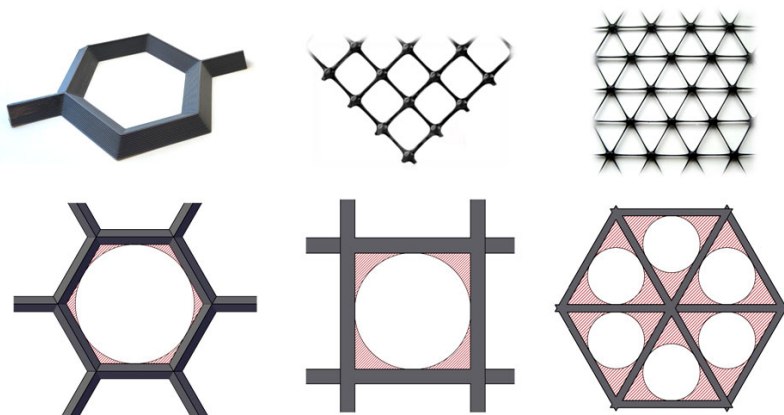


Рис. 2. Пятно контакта георешеток с ячейками разной геометрической формы

Проведенные исследования показали, что увеличение площади пятна контакта по отношению к свободной площади ячейки позволяет уменьшить площадь незадействованного пространства ячейки и тем самым получить более плотную структуру конструктивного слоя. В табл. 1 представлены сравнительные данные относительно площадей ячеек различной геометрической формы, а также площадей «нерабочих зон», которые могут образоваться вблизи узловых соединений ячеек при одинаковой площади пятна контакта.

В процессе заклинки, под воздействием растягивающих напряжений со стороны заполнителя, ячейки георешеток, деформируясь, стремятся принять форму круга.

Возникающие растягивающие напряжения георешетки с разной геометрической формой ячеек воспринимают по-разному: квадратные – в четырех направлениях, треугольные – в шести, гексагональные – в трех (рис. 3).

Таблица 1

Значения площадей ячеек различной геометрической формы

<i>Форма ячейки</i>	<i>Гексагональная ячейка</i>	<i>Квадратная ячейка</i>	<i>Треугольная ячейка</i>
<i>Площадь пятна контакта, мм²</i>	1256		
<i>Свободная площадь ячейки, мм²</i>	1385	1600	2078
<i>Площадь «нерабочих зон» вблизи узловых соединений, мм²</i>	129	344	822

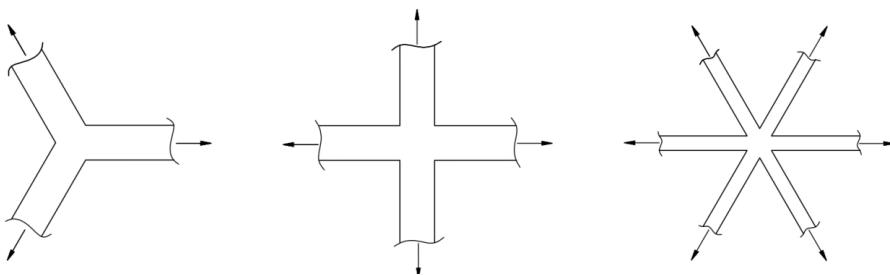


Рис. 3. Распределение напряжений в узловых соединениях

Самым уязвимым местом в георешетках является узловое соединение, поскольку в этой зоне концентрируются возникающие напряжения. На основе изучения предлагаемых на рынке форм ячеек, было

установлено, что при использовании шестиугольной ячейки увеличивается число узловых соединений и ребер, которые воспринимают нагрузку при том же размере ячейки (свободной площади), что и у других форм. Узловое соединение воспринимает напряжения только от трех ребер. При этом количество ребер увеличивается, их длина уменьшается, соответственно уменьшаются напряжения в самих ребрах. Благодаря этому растягивающие напряжения в георешетке распределяются более равномерно, что является существенным преимуществом.

Для демонстрации данного преимущества ниже представлена схема (рис. 4), на которой показано то, как распределяется число узловых соединений, воспринимающих нагрузку от колеса автомобиля георешетками с различной формой ячейки. Диаметр круга D , равновеликого отпечатку колеса расчетного автомобиля, в предлагаемом примере принят равным 37 см. Для наглядности изображения размер ячеек увеличен в два раза по сравнению с существующими георешетками на рынке и составляет: для квадратной ячейки – 80×80 мм (площадь одной ячейки 6400 мм^2); для шестиугольной ячейки – диаметр вписанной окружности – 86 мм (площадь одной ячейки – 6405 мм^2); для треугольной ячейки – сторона правильного треугольника – 80 мм (площадь одной ячейки – 2771 мм^2).

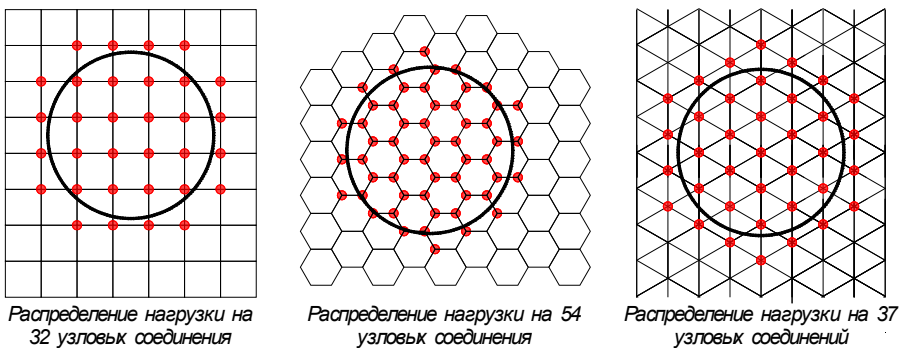


Рис. 4. Число узловых соединений, воспринимающих нагрузку от круглого штампа георешетками с различной формой ячейки

Так как форма круга условно принимается при расчете дорожных одежд, а отпечаток расчетного колеса автомобиля фактически имеет эллиптическую форму (рис. 5), принимая площади круга и эллипса равновеликими, представим также распределение нагрузки на узловые

соединения, воспринимающие нагрузку георешетками, с различной формой ячейки для эллипса (рис. 6).

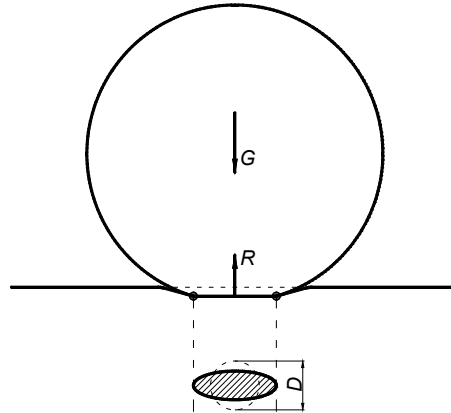
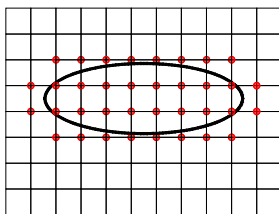
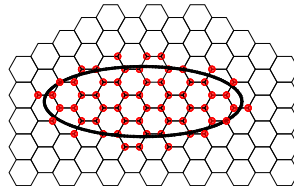


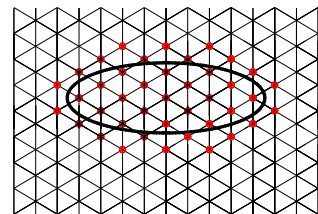
Рис. 5. Отпечаток расчетного колеса автомобиля:
D – размер пятна контакта колеса с дорожным покрытием;
G – вес автомобиля; R – сила реакции



Распределение нагрузки на 36 узловых соединений



Распределение нагрузки на 58 узловых соединений



Распределение нагрузки на 41 узловое соединение

Рис. 6. Число узловых соединений, воспринимающих нагрузку от эллиптического штампа георешетками с различной формой ячейки

Как видно из данных примеров, число узловых соединений, воспринимающих нагрузку для георешетки с квадратной ячейкой и треугольной при одинаковой длине ребер, практически не отличается, при этом площадь треугольной ячейки меньше в два раза. Число узловых соединений у шестиугольной ячейки практически в два раза больше, чем у

квадратной ячейки. Если размер шестиугольной ячейки увеличить примерно в полтора раза по сравнению с квадратной ячейкой, то даже в этом случае нагрузка будет распределяться между большим числом ребер и во всех направлениях.

При этом ячейки треугольной и квадратной формы обладают меньшей свободной площадью, что при неправильном подборе гранулометрического состава асфальтобетонной смеси приведет к снижению сдвигоустойчивости конструкции по сравнению с неармированной, а при усилении несущего основания с крупной фракцией инертного материала такие георешетки, наоборот, обусловят снижение качества заклинки и будут выполнять разделяющую функцию, вместо армирующей.

Следует отметить, что наиболее приближенной к форме круга является гексагональная ячейка, что позволяет максимально сократить площадь так называемой «нерабочей зоны» и в результате обеспечить минимизацию деформаций, нарушающих работу георешетки, что также было подтверждено экспериментальными исследованиями.

При проведении испытаний на прессе производилось моделирование воздействия от дорожного катка массой 8 т. В спроектированный металлический короб размером 20×20 см укладывался щебень фракции 20-40 мм по ГОСТ 8267-93 (дата актуализации – 01.01.2021, статус – действующий) в слой толщиной не менее 15 см, далее укладывались различные виды георешеток для изучения их повреждаемости (нарушение целостности и сплошности изделия при уплотнении вышележащего слоя), поверх укладывался слой щебня той же фракции и толщиной не менее 10 см. На созданную таким образом конструкцию в коробе прикладывалась нагрузка величиной 80 кН в течение 30 с.

Для исследований были отобраны следующие геосинтетические материалы:

- Армосет Б (Техполимер).
- TriAx 170 (Tensar).
- Геокомпозит РГК.
- Инновационная 3D-георешетка.

После проведения испытаний была выполнена визуальная оценка повреждений образцов (**рис. 7**). Результаты испытаний плоских геосинтетических материалов приведены в **табл. 2**.

Кроме того, в ходе исследований были проведены испытания инновационной 3D георешетки, патент на которую был получен в 2018 г. (RU 2 652 411 C1 от 2018.26.04). Для проведения испытаний на повреждаемость была изготовлена 3D-георешетка с применением аддитивной

технологии печати из пластика PETG с диаметром нити 0,2 мм. Высота решетки – 10 мм.

После проведения испытаний была выполнена визуальная оценка опытного образца 3D-георешетки. Установлено, что образец успешно выдержал воздействие моделируемой нагрузки: сплошность и целостность решетки не нарушена; перегибы и переломы отсутствуют. При этом были выявлены деформации в виде 40 мелких повреждений (рис. 8), равномерно распределенных по всей поверхности решетки, максимальной глубиной 2 мм, и проходящих в основном в верхней зоне решетки, что подтверждает эффективность заклинки.

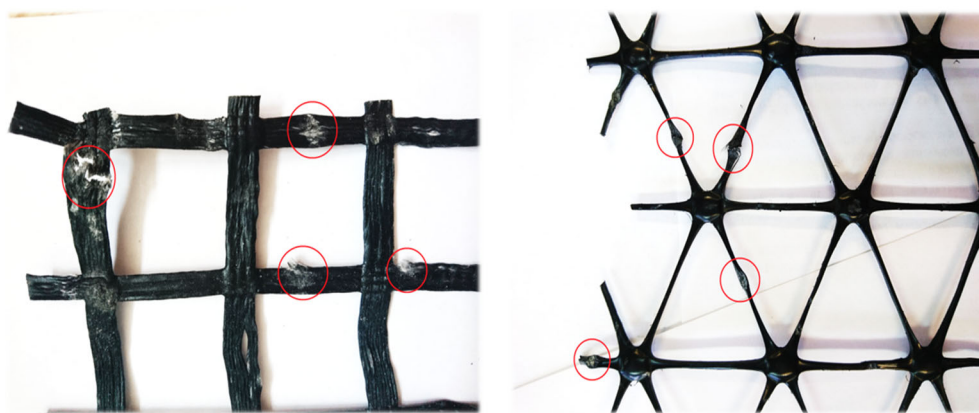


Рис. 7. Повреждения образцов Армосет-Б (слева) и TriAx 170 (справа)

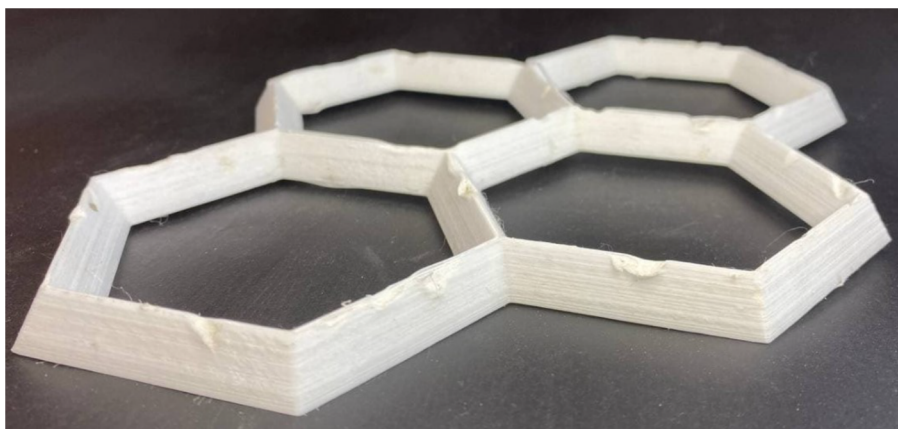


Рис. 8. Повреждения образца 3D-георешетки

Таблица 2

Результаты испытаний плоских геосинтетических материалов

<i>Георешетка</i>	<i>Образец</i>		<i>Повреждения, шт.</i>		<i>Описание повреждений</i>
	<i>№</i>	<i>площадь, м²</i>	<i>на образец</i>	<i>на 1 м²</i>	
<i>Армосет-Б</i>	1	0,036	6	168	Образцы получили многочисленные повреждения в виде надрывов и расщепления ребер. Повреждены узловые соединения в местах нахождения острых граней щебня.
	2	0,036	2	56	
	3	0,036	1	28	
	4	0,036	0	0	
	5	0,036	3	84	
<i>TriAx 170</i>	1	0,027	7	259	Большинство ребер имеют изгибы и смятия. Некоторые ребра полностью разрушены. Отдельные узловые соединения незначительно повреждены.
	2	0,027	3	121	
<i>Геокомпозит РГК</i>	1	0,022	4	180	Большинство значительных повреждений обнаружено вблизи узловых соединений. Зафиксирован разрыв геотекстиля.

Результаты испытаний показали, что толщина ребер армирующего материала является ключевым параметром, определяющим жесткость и устойчивость к механическим повреждениям.

По мнению производителей, способность георешетки легко деформироваться позволяет ей подстраиваться под деформации, сохраняя свою целостность и соответственно армирующие свойства. Но в этом заключается и их основной недостаток, так как основной задачей армирующей прослойки является замедление и предупреждение развития деформаций.

Стренги, состоящие из отдельных нитей, в процессе заклинки изгибаются, принимая волнообразную форму (рис. 9). При воздействии нагрузки ребра частично воспринимают растягивающие напряжения, основное же их усилие сконцентрировано на восстановлении прямолинейной формы. При этом возникающее напряжение концентрируется в местах изгиба, где происходит разрыв стренг, а острые грани минерального заполнителя ускоряют этот процесс.

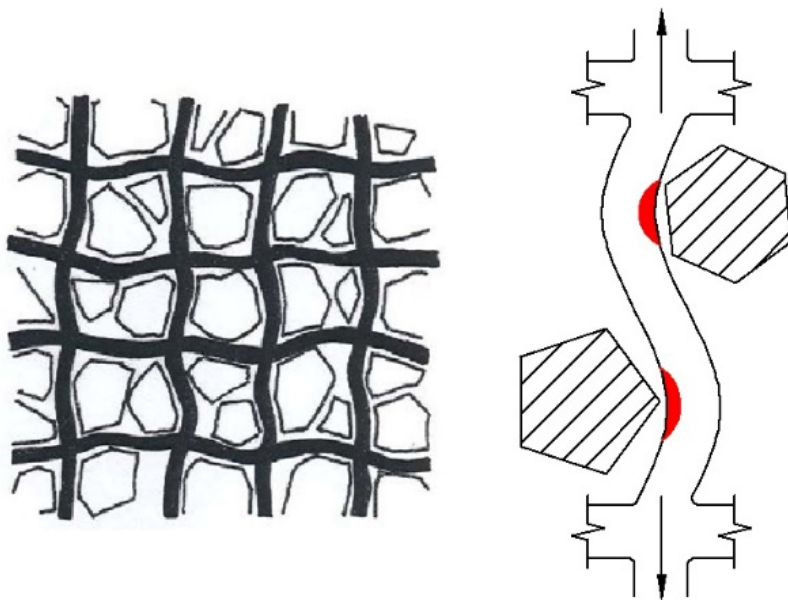


Рис. 9. Концентрация напряжений в местах изгиба ребра

ВЫВОДЫ

На основе результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно заключить следующее:

- уплотнение щебня в процессе его укатки оказывает значительное разрушающее воздействие на ребра георешетки и ее несущую способность;
- гексагональная форма ячейки позволяет обеспечить более плотную структуру получаемого композита за счет минимизации площадей «нерабочих зон» и более эффективному распределению каменного материала;
- исследована новая инновационная 3D-георешетка. По результатам испытаний выявлена ее низкая механическая повреждаемость и высокая заклинка каменного материала, в том числе за счет повышенной жесткости и износостойкости самой решетки и наличию объемных ребер в конструкции; благодаря более равномерному распределению растягивающих напряжений в 3D-георешетке ее повреждаемость значительно меньше существующих аналогов, применяемых на автомобильных дорогах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Транспортная инфраструктура и экономический рост.* – М.: Издательство «Перо», 2019. – 142 с. [Электронный ресурс] / Центр экономики инфраструктуры. – Режим доступа: <https://www.infraeconomy.com/data/files/transportnaya-infrastruktura-i-ehkonomicheskij-rost.pdf> (дата обращения: 19.11.2021).
2. *Протяженность путей сообщения и объекты дорожной инфраструктуры* [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики (Росстат). – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (дата обращения: 19.11.2021).
3. *Постановление Правительства Российской Федерации «О нормативах денежных затрат на содержание и ремонт автомобильных дорог федерального значения и правилах их расчета» от 23 августа 2007 года № 539* [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902057567> (дата обращения: 20.11.2021).

4. Постановление Правительства Российской Федерации «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения» от 30 мая 2017 года № 658 [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/436738392> (дата обращения: 20.11.2021).
5. Стратегия развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021-2025 гг., утвержденная распоряжением Федерального дорожного агентства от 03.03.2021 № 771-р [Электронный ресурс] / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). – Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/2-strategiya.pdf> (дата обращения: 19.11.2021).
6. Литвинов Н.Н. Обоснование расчетной модели армированного щебеночного основания дорожной одежды: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.11 / Литвинов Николай Николаевич. – Омск, 2018. – 126 с.
7. Горынин Г.Л. Математическое моделирование механических свойств армогрунтов / Г.Л. Горынин, А.Ф. Власко // Техника и технологии строительства. – 2015. – № 2(2). – С. 11-17.
8. Матвеев С. А. Влияние структуры армирования на физико-механические свойства композита «грунт – георешетка» / С.А. Матвеев // Вестник Югорского государственного университета. – 2005. – № 1(1). – С. 65-73.
9. Xiaochao Tang. Evaluation of geogrids for stabilizing weak pavement subgrade / Xiaochao Tang, Chassan R. Chehab, Angelica Palomino // International Journal of Pavement Engineering. – 2008. – December. – Vol. 9, No. 6. – PP. 413-429.
10. Sanat K. Pokharel. Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading / Sanat K. Pokharel, JieHan, DovLeshchinsky, Robert L. Parsons // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2018. – March. – Vol. 11, Issue 2. – PP. 114-127. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416301948> (дата обращения: 13.10.2022).
11. Мартынов Е.А. Определение эффекта армирования дорожных конструкций геосинтетическими материалами / Е.А. Мартынов

- // Техника и технологии строительства. – 2015. – № 2(2). – С. 30-38.
12. K. Rajagopal. *Studies on geocell reinforced road pavement structures* [Электронный ресурс] / K. Rajagopal, A. Veeragavan, S. Chandramouli // *Geosynthetics Asia 2012: proceedings of 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics (Bangkok, Thailand, 13-15 December 2012)*. – PP. 497-502. – Режим доступа: https://www.prs-med.com/wp-content/uploads/2016/11/studies_on_geocell_reinforced_road_pavements-rajagopal_2012.pdf (дата обращения: 20.02.2021).
13. Патент № 156100 U1 Российская Федерация, МПК E06B 3/70 (2006.01), E01B 1/00(2006.01). Каркасная конструкция: № 2014122253/12: заявл. 02.06.2014: опубл. 27.10.2015. – Бюл. № 30 / Лялык В.В.; заявитель и патентообладатель Лялык В.В. 14 с.: ил. // Yandex.ru: патенты. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU156100U1_20151027 (дата обращения: 01.02.2023).
14. Патент № 2539196 C2 Российская Федерация, МПК D04H 3/045 (2012.01), E02D 17/20 (2006.01). Армирующая сетка: № 2013114496/03; заявл. 29.03.2013; опубл. 20.01.2015. Бюл. № 2 / 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». 5 с.: ил. // Yandex.ru: патенты. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2539192C2_20150120 (дата обращения: 01.02.2023).
15. Патент № 2166019 C2 Российская Федерация, МПК E01C 11/16, E04C 5/07. Текстильная сетка для армирования слоев, связанных с помощью битумов (варианты): № 99115877/03: заявл. 05.12.1997: опубл. 27.04.2001. Бюл. № 12 / Касснер Ю. (Германия), Пинтц Х. (Германия), Фон Франсецки У. (Германия); заявитель и патентообладатель ХюскерЗюнтетик ГМБХ УНД КО (Германия). 5 с.: ил. // Yandex.ru: патенты. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2166019C2_20010427.pdf (дата обращения: 01.02.2023).
16. Патент № 164791 U1 Российская Федерация, МПК E01C 3/04 (2006.01). Георешетка: № 2016116540/03: заявл. 27.04.2016: опубл. 04.02.2020. Бюл. № 10 / Литвинцев А.В.; заявитель и патентообладатель ООО «СтратегТехнология»; Максимов Е.Н. // Yandex.ru: патенты. URL:

- https://yandex.ru/patents/doc/RU164791U1_20160920
(дата обращения: 01.02.2023).
17. Патент № 2725981 C1 Российская Федерация: МПК E04C 5/07. Арматурная сетка из композитного материала: № 2019114357: заявл. 13.05.2019; опубл. 08.07.2020. Бюл. № 19 / Ганиев З.М.Г., Гуринович В.С.; заявитель и патентообладатель ООО «Гален». 11 с.: ил. // Yandex.ru: патенты. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2725981C1_20200708.pdf
(дата обращения: 02.02.2023).
18. Патент № 2652411 C1 Российская Федерация: МПК E01C 5/20 (2006.01). Георешетка для армирования дорожной одежды: № 2017124781: заявл. 11.07.2017; опубл. 26.04.2018. Бюл. № 12 / Игнатъев А.А., Курочкина К.А., Ронжин Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГБУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (ЯГТУ). 13 с.: ил. // Yandex.ru: патенты. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2652411C1_20180426.pdf
(дата обращения: 02.02.2023).
19. Патент № 2272093 C2 Российская Федерация: МПК E01C 11/18 (2006.01). Конструкция вертикального армирования асфальтобетонных покрытий: № 2004115817/03: заявл. 24.05.2004; опубл. 20.03.2006. Бюл. № 8. / Земляков А.Н., Никоренко Ю.Л.; заявитель и патентообладатель Воронежский военный авиационный инженерный институт. 6 с.: ил. // Yandex.ru: патенты. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2272093C2_20060320.pdf
(дата обращения: 02.02.2023).
20. Патент № 2717536 C1 Российская Федерация: МПК E01C 3/04 (2006.01), E01C 5/20 (2006.01), E02D 17/20 (2006.01). Георешетка: № 2018136294; заявл. 15.10.2018; опубл. 24.03.2020, Бюл. № 9 / Кузьбожев А.С., Шишкин И.В., Бирилло И.Н., Шкулов С.А., Маянц Ю.А., Елфимов А.В.; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Газпром». 9 с.: ил. // Patenton.ru: пантеон патентов. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2717536C1.pdf> (дата обращения: 02.02.2023).
21. Патент № 22788 U1 Российская Федерация: МПК E01C 5/00 (2000.01). Георешетка: № 2001133884/20; заявл. 19.12.2001; опубл. 27.04.2002. Бюл. № 12 / Ким А.И., Бубновский В.В., Лукачев Н.Н.; заявитель и патентообладатель Ким А.И., Бубновский В.В., Лукачев Н.Н. 10 с.: ил. // Yandex.ru: патенты.

- URL: https://patents.s3.yandex.net/RU22788U1_20020427.pdf
(дата обращения: 02.02.2023).
22. Патент № 184566 U1 Российская Федерация: МПК E02D 17/20. Устройство для армирования земляного полотна, дорожной одежды и укрепления откосов: № 2017136052: заявл. 11.10.2017: опубл. 30.10.2018. Бюл. № 31 / Хусаинов И.Ж., Пиеничникова Е.С.; заявитель и патентообладатель Хусаинов И.Ж., Пиеничникова Е.С. 7 с.: ил. // Yandex.ru: патенты. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU184566U1_20181030.pdf
(дата обращения: 02.02.2023).
23. Патент № 200047 U1 Российская Федерация: МПК E04C 5/07. Арматурная сетка из базальтового волокна: № 2020103567: заявл. 28.01.2020: опубл. 02.10.2020. Бюл. № 28. / Нелюб В.А., Бородулин А.С., Калинин А.Н., Орлов М.А., Берлин А.А., Малышева Г.В., Солодилов В.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет (МГТУ им. Н.Э. Баумана))». 8 с.: ил. // Yandex.ru: патенты. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU200047U1_20201002.pdf (дата обращения: 02.02.2023).
24. Патент № 2744597 C1 Российская Федерация: МПК E04B 1/19. Пространственный арматурный модуль: № 2020121753: заявл. 30.06.2020: опубл. 11.03.2021. Бюл. № 8 / Бекренёв А.Г., Бекренёв Р.А., Бекренёва В.А., Молохин И.В., Комраков Е.В., Молохина Л.А.; заявитель и патентообладатель Бекренёв А.Г., Молохина Л.А. 20 с.: ил. // Patenton: ru : пантеон патентов. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2744597C1.pdf>
(дата обращения: 02.02.2023).

L I T E R A T U R A

1. *Transportnaya infrastruktura i ekonomicheskij rost.* – М.: Izdatel'stvo «Pero», 2019. – 142 s. [Elektronnyj resurs] / Centr ekonomiki infrastruktury. – Rezhim dostupa: <https://www.infraconomy.com/data/files/transportnaya-infrastruktura-i-ehkonomicheskij-rost.pdf> (data obrashcheniya: 19.11.2021).
2. *Protyazhennost' putej soobshcheniya i ob"ekty dorozhnoj infrastruktury* [Elektronnyj resurs] / Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj

-
- statistiki (Rosstat). – Rezhim dostupa: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (data obrashcheniya: 19.11.2021).
3. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii «O normativah denezhnyh zatrat na sodержanie i remont avtomobil'nyh dorog federal'nogo znacheniya i pravilah ih rascheta» ot 23 avgusta 2007 goda № 539 [Elektronnyj resurs] / Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii.* – Rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/902057567> (data obrashcheniya: 20.11.2021).
 4. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii «O normativah finansovyh zatrat i Pravilah rascheta razmera byudzhetnyh assignovanij federal'nogo byudzheta na kapital'nyj remont, remont i sodержanie avtomobil'nyh dorog federal'nogo znacheniya» ot 30 maya 2017 goda № 658 [Elektronnyj resurs] / Elektronnyj fond pravovoj i normativno-tekhnicheskoy dokumentacii.* – Rezhim dostupa: <https://docs.cntd.ru/document/436738392> (data obrashcheniya: 20.11.2021).
 5. *Strategiya razvitiya innovacionnoj deyatel'nosti v oblasti dorozhnogo hozyajstva na period 2021-2025 gg., utverzhdannaya rasporyazheniem Federal'nogo dorozhnogo agentstva ot 03.03.2021 № 771-r [Elektronnyj resurs] / Federal'noe dorozhnoe agentstvo (Rosavtodor).* – Rezhim dostupa: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/2-strategiya.pdf> (data obrashcheniya: 19.11.2021).
 6. Litvinov N.N. *Obosnovanie raschetnoj modeli armirovannogo shchebenochnogo osnovaniya dorozhnoj odezhdyy: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.11 / Litvinov Nikolaj Nikolaevich.* – Omsk, 2018. – 126 s.
 7. Gorynin G.L. *Matematicheskoe modelirovanie mekhanicheskikh svojstv armogruntoy / G.L. Gorynin, A.F. Vlasko // Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva.* – 2015. – № 2(2). – S. 11-17.
 8. Matveev S. A. *Vliyanie struktury armirovaniya na fiziko-mekhanicheskie svojstva kompozita «grunt – georeshetka» / S.A. Matveev // Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta.* – 2005. – № 1(1). – S. 65-73.
 9. Xiaochao Tang. *Evaluation of geogrids for stabilizing weak pavement subgrade / Xiaochao Tang, Chassan R. Chehab, Angelica Palomino // International Journal of Pavement Engineering.* – 2008. – December. – Vol. 9, No. 6. – PP. 413-429.
 10. Sanat K. Pokharel. *Experimental evaluation of geocell-reinforced bases under repeated loading / Sanat K. Pokharel, JieHan, DovLeshchinsky, Robert L. Parsons // International Journal of Pavement Re-*

- search and Technology. – 2018. – March. – Vol. 11, Issue 2. – PP. 114-127. – Rezhim dostupa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416301948> (data obrashcheniya: 13.10.2022).
11. Martynov E.A. *Opredelenie effekta armirovaniya dorozhnykh konstrukcij geosinteticheskimi materialami* / E.A. Martynov // *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*. – 2015. – № 2(2). – S. 30-38.
 12. K. Rajagopal. *Studies on geocell reinforced road pavement structures [Elektronnyj resurs]* / K. Rajagopal, A. Veeragavan, S. Chandramouli // *Geosynthetics Asia 2012: proceedings of 5th Asian Regional Conference on Geosynthetics* (Bangkok, Thailand, 13-15 December 2012). – PP. 497-502. – Rezhim dostupa: https://www.prs-med.com/wp-content/uploads/2016/11/studies_on_geocell_reinforced_road_pavements-rajagopal_2012.pdf (data obrashcheniya: 20.02.2021).
 13. Patent № 156100 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK E06B 3/70 (2006.01), E01B 1/00(2006.01). Karkasnaya konstrukciya: № 2014122253/12; zayavl. 02.06.2014; opubl. 27.10.2015. – Byul. № 30 / Lyalyk V.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Lyalyk V.V. 14 s.: il. // Yandex.ru: [patenty. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU156100U1_20151027](https://yandex.ru/patents/doc/RU156100U1_20151027) (data obrashcheniya: 01.02.2023).
 14. Patent № 2539196 S2 Rossijskaya Federaciya, MPK D04H 3/045 (2012.01), E02D 17/20 (2006.01). Armiruyushchaya setka: № 2013114496/03; zayavl. 29.03.2013; opubl. 20.01.2015. Byul. № 2 / Safonov V.G., Sedov M.P., SHraer I.I., Hizhnyak E.M.; zayavitel' i patentoobladatel' OAO «Volzhskij zavod asbestovykh tekhnicheskikh izdelij», OOO «Volzhskij zavod tekstil'nykh materialov». 5 s. : il. // Yandex.ru: [patenty. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2539192C2_20150120](https://yandex.ru/patents/doc/RU2539192C2_20150120) (data obrashcheniya: 01.02.2023).
 15. Patent № 2166019 S2 Rossijskaya Federaciya, MPK E01S 11/16, E04S 5/07. Tekstil'naya setka dlya armirovaniya sloev, svyazannyh s pomoshch'yu bitumov (varianty): № 99115877/03; zayavl. 05.12.1997; opubl. 27.04.2001. Byul. № 12 / Kassner YU. (Germaniya), Pintc H. (Germaniya), Fon Fransecki U. (Germaniya); zayavitel' i patentoobladatel' HyuskerZyuntetik GMBH UND KO (Germaniya). 5 s.: il. // Yandex.ru: [patenty. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2166019C2_20010427.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2166019C2_20010427.pdf) (data obrashcheniya: 01.02.2023).
 16. Patent № 164791 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK E01C 3/04 (2006.01). Georeshetka: № 2016116540/03; zayavl. 27.04.2016; opubl. 04.02.2020. Byul. № 10 / Litvincev A.V.; zayavitel' i pa-

- tentoobladatel' ООО «StrategTekhnologiya»; Maksimov E.N. // Yandex.ru: *patenty*. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU164791U1_20160920 (data obrashcheniya: 01.02.2023).
17. Patent № 2725981 S1 Rossijskaya Federaciya: MPK E04S 5/07. *Armturnaya setka iz kompozitnogo materiala*: № 2019114357: *zayavl.* 13.05.2019; *opubl.* 08.07.2020. *Byul.* № 19 / Ganiev Z.M.G., Gurinovich V.S.; *zayavitel' i patentoobladatel' ООО «Galen»*. 11 s. : *il.* // Yandex.ru: *patenty*. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2725981C1_20200708.pdf (data obrashcheniya: 02.02.2023).
 18. Patent № 2652411 S1 Rossijskaya Federaciya: MPK E01C 5/20 (2006.01). *Georeshetka dlya armirovaniya dorozhnoj odezhdyy*: № 2017124781: *zayavl.* 11.07.2017; *opubl.* 26.04.2018. *Byul.* № 12 / Ignat'ev A.A., Kurochkina K.A., Ronzhin E.A.; *zayavitel' i patentoobladatel' FGBU VO «Yaroslavskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet» (YAGTU)*. 13 s.: *il.* // Yandex.ru: *patenty*. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2652411C1_20180426.pdf (data obrashcheniya: 02.02.2023).
 19. Patent № 2272093 C2 Rossijskaya Federaciya: MPK E01C 11/18 (2006.01). *Konstrukciya vertikal'nogo armirovaniya asfal'tobetonnyh pokrytij*: № 2004115817/03: *zayavl.* 24.05.2004; *opubl.* 20.03.2006. *Byul.* № 8. / Zemlyakov A.N., Nikorenko YU.L.; *zayavitel' i patentoobladatel' Voronezhskij voennyj aviacionnyj inzhenernyj institut*. 6 s.: *il.* // Yandex.ru: *patenty*. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2272093C2_20060320.pdf (data obrashcheniya: 02.02.2023).
 20. Patent № 2717536 C1 Rossijskaya Federaciya: MPK E01C 3/04 (2006.01), E01C 5/20 (2006.01), E02D 17/20 (2006.01). *Georeshetka*: № 2018136294; *zayavl.* 15.10.2018; *opubl.* 24.03.2020, *Byul.* № 9 / Kuz'bozhev A.S., Shishkin I.V., Birillo I.N., Shkulov S.A., Mayanc Yu.A., Elfimov A.V.; *zayavitel' i patentoobladatel' Publichnoe akcionernoje obshchestvo «Gazprom»*. 9 s. : *il.* // Patenton: ru : *panteon patentov*. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2717536C1.pdf> (data obrashcheniya: 02.02.2023).
 21. Patent № 22788 U1 Rossijskaya Federaciya: MPK E01C 5/00 (2000.01). *Georeshetka*: № 2001133884/20: *zayavl.* 19.12.2001; *opubl.* 27.04.2002. *Byul.* № 12 / Kim A.I., Bubnovskij V.V., Lukachev N.N.; *zayavitel' i patentoobladatel' Kim A.I., Bubnovskij V.V., Lukachev N.N.* 10 s. : *il.* // Yandex.ru: *patenty*. URL:

-
- https://patents.s3.yandex.net/RU22788U1_20020427.pdf
(data obrashcheniya: 02.02.2023).
22. Patent № 184566 U1 Rossijskaya Federaciya: MPK E02D 17/20. *Ustrojstvo dlya armirovaniya zemlyanogo polotna, dorozhnoj odezhdy i ukrepleniya otkosov*: № 2017136052: zayavl. 11.10.2017: opubl. 30.10.2018. Byul. № 31 / Husainov I.ZH., Pshenichnikova E.S.; zayavitel' i patentoobladatel' Husainov I.ZH., Pshenichnikova E.S. 7 s.: il. // Yandex.ru: patenty. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU184566U1_20181030.pdf (data obrashcheniya: 02.02.2023).
23. Patent № 200047 U1 Rossijskaya Federaciya: MPK E04C 5/07. *Armturnaya setka iz bazal'tovogo volokna*: № 2020103567: zayavl. 28.01.2020: opubl. 02.10.2020. Byul. № 28. / Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kalinnikov A.N., Orlov M.A., Berlin A.A., Malysheva G.V., Solodilov V.I.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOUVO «Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. N.E. Baumana (Nacional'nyj issledovatel'skij universitet (MGU im. N.E. Baumana))». 8 s.: il. // Yandex.ru: patenty. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU200047U1_20201002.pdf (data obrashcheniya: 02.02.2023).
24. Patent № 2744597 S1 Rossijskaya Federaciya: MPK E04B 1/19. *Prostranstvennyj armaturnyj modul'*: № 2020121753: zayavl. 30.06.2020: opubl. 11.03.2021. Byul. № 8 / Bekrenyov A.G., Bekrenyov R.A., Bekrenyova V.A., Molohin I.V., Komrakov E.V., Molohina L.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Bekrenyov A.G., Molohina L.A. 20 s.: il. // Patenton: ru: panteon patentov. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2744597C1.pdf> (data obrashcheniya: 02.02.2023).

.....
**ESTIMATION OF DAMAGEABILITY OF FLAT AND SPATIAL
GEOGRIDS WHEN REINFORCING MATERIALS OF ROAD
PAVEMENT STRUCTURAL LAYERS**

Senior Lecturer **K.A. Kulikova**
(Yaroslavl State Technical University),
Ph. D. (Tech.), Associate Professor **A.A. Ignatiev**
(FAI «ROSDORNII»;
Yaroslavl State Technical University)
Contact information: ignatevaa@rosdornii.ru;
christinaandreewna@gmail.com

Traditional flat geogrids and an innovative 3D geogrid are reviewed and analyzed from the perspective of a possible failure of road constructions. The researches and tests of geogrid samples for mechanical damage and jamming ability are reported.

Key words: geogrid, cell, cell shape, contact patch, nodal connection, damageability.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.М. Кулижников.
(ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 11.11.2022 г.