

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 677.076:624.138.9

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.9

Оценка повреждаемости и заклинивающей способности инновационной 3D-георешетки на границе раздела слоев «песок – щебень»

Алексей Александрович Игнатьев¹, Илья Александрович Чижиков²

¹ *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ); г. Москва, Россия;*

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты экспериментальных исследований инновационной 3D-георешетки в сравнении с традиционно выпускаемыми плоскими георешетками Славрос СД-40 и Армосет Б, применяемыми для армирования грунтовых оснований. В ходе экспериментальных исследований оценивались повреждаемость георешеток при воздействии уплотняющей нагрузки, разделяющая функция георешеток и заклинивающая способность.

Материалы и методы. Заклинивающая способность, разделяющая функция и устойчивость к разрушению готовых образцов георешеток оценивались в лабораторных условиях с применением разработанной конструкции испытательного контейнера, который представляет собой металлическую коробку размерами 20 × 20 × 20 см и металлическую крышку размерами 19,5 × 19,5 × 10,5 см с толщиной стенок 5 мм. В качестве пресса для моделирования уплотняющей установки использовалась гидравлическая установка ЗИМ П-10.

Результаты. Результаты испытаний на повреждаемость показали, что образцы георешетки Армосет Б и Славрос СД-40 получили многочисленные повреждения в виде разрушения ребер, вмятин и перегибов отдельных стренг. Исходя из общего количества повреждений и характера повреждения уложенного слоя бумаги в качестве индикатора заклинивание каменного материала минимально, наблюдаются характерные разрывы на листе и заметно проникновение каменного материала через армируемую георешетку. Для 3D-георешетки, исходя из количества повреждений на слое бумаги, можно говорить о достаточном и высоком проценте заклинивания каменного материала. Георешетка отлично справилась с функцией разделения слоев рыхлого песка и щебня. Заклинивание каменного материала происходит выше слоя армирования, что очень важно для армирующих прослоек и повышения эффективности армирования слоев.

Выводы. Результаты экспериментальных исследований с разработанной конструкцией инновационной 3D-георешетки продемонстрировали, что георешетка имеет значительные перспективы для применения ее в качестве армирующей прослойки в гражданском строительстве. Требуется проведение более масштабных экспериментальных исследований для оценки эксплуатационной эффективности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: георешетка, заклинивающая способность, щебень, песок, разделение слоев, повреждаемость георешеток, уплотнение

Благодарности. Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментальных исследований Эскандеру Алишеровичу Рустамову и Кристине Андреевне Куликовой, а также рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Игнатьев А.А., Чижиков И.А. Оценка повреждаемости и заклинивающей способности инновационной 3D-георешетки на границе раздела слоев «песок – щебень» // Строительство: наука и образование. Т. 15. Вып. 3. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.9

Автор, ответственный за переписку: Алексей Александрович Игнатьев, ignatievaa@rosdornii.ru.

Assessment of damage and jamming ability of innovative 3D geogrid at the sand – crushed stone interface

Aleksey A. Ignatyev¹, Il'ya A. Chizhikov²

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. The paper presents comparative results of experimental studies of innovative 3D geogrids in comparison with traditionally produced flat geogrids Slavros SD-40 and Armoset B, used for reinforcement of soil foundations. Damageability of geogrids under compaction load, separating function of geogrids and wedging ability were evaluated during experimental studies.

Materials and methods. The wedging ability, separating function and resistance to failure of ready-made geogrids samples were evaluated in laboratory conditions using the developed design of a test container, which is a metal box with dimensions 20 × 20 × 20 cm and a metal lid with dimensions 19.5 × 19.5 × 10.5 cm with a wall thickness of 5 mm. A ZIM P-10 hydraulic machine was used as a press to simulate the sealing unit.

Results. Damage test results showed that the Armoset B and Slavros SD-40 geogrid specimen sustained numerous damages in the form of rib failures, indentations and kinking of individual strands. Based on the total amount of damage and the nature of damage to the laid paper layer, as an indicator, the jamming of the stone material is minimal, characteristic tears on the sheet are observed and the penetration of the stone material through the reinforced geogrid is noticeable. For 3D geogrid, based on the number of damages on the paper layer, we can speak about a sufficient and high percentage of stone material jamming. The geogrid perfectly coped with the function of separation of loose sand and crushed stone layers. The jamming of stone material occurs above the reinforcement layer, which is very important for reinforcing interlayers and increasing the efficiency of reinforcement layers.

Conclusions. The results of experimental studies with the developed design of innovative 3D geogrid showed that this geogrid has significant prospects for its application as a reinforcing interlayer in civil engineering. More extensive experimental studies are required to assess the operational efficiency.

KEYWORDS: geogrid, jamming capacity, crushed stone, sand, layer separation, geogrid damage, compaction

Acknowledgements. The authors express their gratitude for assistance in conducting experimental studies to Eskander Alisherovich Rustamov and Kristina Andreevna Kulikova, as well as to the reviewers.

FOR CITATION: Ignatyev A.A., Chizhikov I.A. Assessment of damage and jamming ability of innovative 3D geogrid at the sand – crushed stone interface. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.9

Corresponding author: Aleksey A. Ignatyev, ignatievaa@rosdornii.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях строительства широкое применение находят такие геосинтетические материалы, как георешетки. Они активно используются при укреплении грунтовых оснований под различные фундаменты, для повышения несущей способности слабых грунтов, разделения слоев. В дорожном строительстве георешетки активно применяются для увеличения несущей способности оснований дорожных одежд и колееустойчивости дорожных одежд [1], а также для уменьшения толщины конструктивных слоев. Кроме того, армирование грунтовых оснований направлено на повышение долговечности конструкций.

Сегодня на рынке геосинтетических материалов представлено большое разнообразие конструкций георешеток. В основном их отличие заключается в форме и размерах ячейки, технологии и способах производства (плетеные или сварные), в используемых материалах. Основная форма ячеек квадратная и треугольная, размеры колеблются от 20 до 50 мм. Есть и другие уникальные решения. При этом для до-

рожного строительства широкое применение нашли георешетки, используемые с целью армирования асфальтобетонных слоев, выполненные из базальтового или стекловолокна. Они укладываются между слоями асфальтобетона при температурах выше 120 °С, что обеспечивает их устойчивость в ходе укладки и последующей эксплуатации.

Стоит отметить, что в основном георешетки выпускаются производителями плоскими, продиктовано это необходимостью уменьшения толщины прослойки и снижением материалоемкости. Это имеет и свои недостатки. В частности, за счет малой толщины уменьшается глубина погружения в слой и несколько снижается адгезия между слоями, а также сокращается армирующая способность. Возможен сдвиг между слоями, при котором повреждения георешетки приводят к значительному снижению ее прочности [2], тем самым нарушается требуемая монолитность и, как следствие, наступает быстрое разрушение покрытия. Говоря о разделяющей функции георешеток, когда их применяют для разделения слоев (например, «песок – щебень»), то рассчитыва-

ют на возможность заклинивания каменного материала и стабилизацию его свойств в процессе последующей эксплуатации и на минимизацию возможного взаимного проникновения слоев друг в друга. Важно, чтобы каменный материал не проникал в песчаные слои и сохранялись проектные толщины слоев, а также пористость каменного материала не компенсировалась бы проникающим в поры песчаным грунтом. Добиться этого можно только в том случае, если георешетка обеспечивает достаточную заклинивающую способность каменного материала, при которой щебень не просачивается сквозь ячейки и обеспечивает надежное удержание каменного материала в нижних слоях. Именно здесь проявляются основные недостатки плоских георешеток. Плоская поверхность не позволяет надежно удерживать колотый камень (щебень), что способствует срыву его с поверхности. Также для обеспечения заклинивания требуется, чтобы размер ячейки соответствовал размеру каменного материала. Есть рекомендации, по которым размер ячейки не должен превышать двух размеров самой большой фракции щебня.

В последнее время в отечественной и зарубежной практике активно стали обсуждать повреждаемость георешеток, уложенных между слоями каменного материала или слоями песка и каменного материала. Результаты в ряде случаев неутешительны [3–5]. Причем повреждаемость напрямую зависит от материала, из которого изготавливается георешетка [6]. Георешетки, полученные экструзионным методом, более устойчивы к ударным нагрузкам и истиранию, но за счет стремления производителей сэкономить материал при производстве толщины ребер сильно уменьшаются, что приводит к их более высокой повреждаемости, о чем говорят исследования, направленные на численное моделирование разрушения ребер георешеток [7–9]. Порой [3] износ может достигать 90 % от первоначальной прочности, что практически сводит на нет все возложенные на георешетку обязательства по укреплению и армированию слоев. Не менее актуальным аспектом является и стойкость к воздействию природных факторов. В ряде работ этому уделено особое внимание. Так, воздействие ультрафиолета и температуры [10–12] может еще до укладки георешетки уменьшить ее прочность более чем на 50 %. Безусловно, и культура производства работ оказывает значительное влияние на последующие эксплуатационные характеристики объекта. При укладке георешеток любые перекосы, умышленное изменение геометрии приводят к тому, что георешетка изменяет свои характеристики и более активно подвержена повреждаемости и снижению эксплуатационных параметров [2]. Кроме того, на георешетку, уложенную на подготовленную поверхность, из самосвала выгружается щебень, что при высоте более 1 м вызывает существенные повреждения и даже разрушение. Изучению этому эффекту посвящено ис-

следование [13], в котором рассмотрено повреждение георешеток при падении каменного материала с высоты 1 и 2 м. Результаты исследований показали, что однородность размера каменного материала оказывает наибольшее влияние на повреждаемость георешеток. А в практике строительства именно однородность каменного материала нашла наиболее широкое применение. Смеси из каменных материалов используются значительно реже. Все это создает определенные сложности для производства работ. При этом важно и то, что щебень имеет ровную поверхность, которая достаточно легко перерезает или перерубает отдельные ребра георешетки.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению особенностей армирования конструктивных слоев и оснований [14–18] и оценке повреждаемости георешеток, расположенных между слоями каменного материала или слоями песка и щебня, исследований, направленных на оценку заклинивающей способности, практически нет. А этот фактор является одним из важнейших с точки зрения повышения несущей способности и уменьшения толщины конструктивного слоя, а также снижения эффекта взаимного проникновения слоев друг в друга.

На протяжении ряда лет коллективом авторов проводятся исследования по изучению особенностей армирования оснований инновационной 3D-георешеткой [19, 20]. Результаты уникальны как в части армирующей способности, так и заклинивающей способности каменного материала. Исследования продолжаются в этом направлении. В рамках данной публикации будут представлены результаты экспериментальных исследований, направленные на сравнение георешеток по повреждаемости и заклинивающей способности при укладке их между слоями песка и каменного материала.

Предложен новый способ оценки заклинивающей способности каменного материала, который предполагает укладку листа бумаги в качестве индикатора. Уникальность этого способа состоит в том, что он позволяет наглядно увидеть разницу при сравнении нескольких георешеток на заклинивающую способность и насколько эффективно георешетка удерживает каменный материал от его проникновения в песчаные слои.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Заклинивающая способность, разделяющая функция и устойчивость к разрушению готовых образцов георешеток, включая инновационную 3D-георешетку, оценивались в лабораторных условиях.

Цель эксперимента заключалась в необходимости оценки георешеток различной конструкции и материала в процессе уплотнения на границе слоев «песок – щебень» с последующим сравнением их механической устойчивости к разрушению

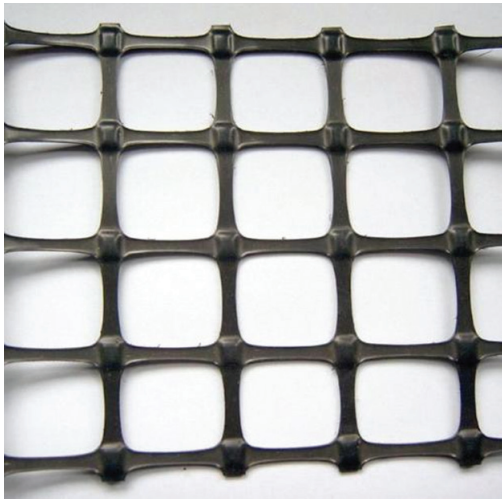


Рис. 1. Экструдированная георешетка Славрос СД-40

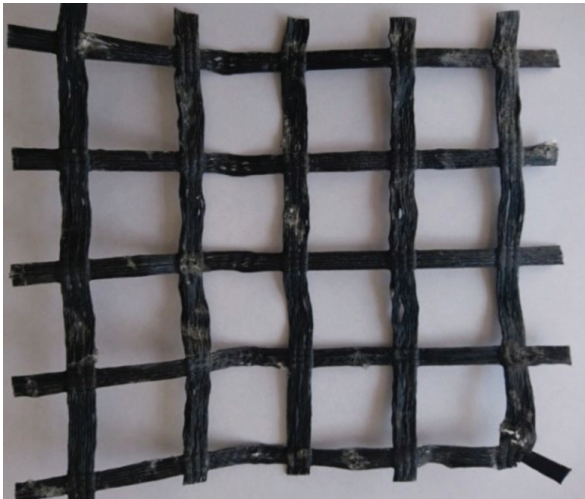


Рис. 2. Тканая георешетка Армосет Б

под повторяемой статической нагрузкой и заклинивающей способности.

Для эксперимента были отобраны следующие образцы георешеток:

1. Экструдированная георешетка Славрос СД-40 с ячейкой 40 × 40 мм (рис. 1).

В табл. 1 представлены физико-механические показатели георешетки СД-40.

2. Тканая георешетка Армосет Б с ячейкой 30 × 30 мм (рис. 2).

В табл. 2 приведены физико-механические показатели георешетки Армосет Б.

3. Инновационная 3D-георешетка для армирования дорожной одежды с размером по диагонали 70 мм (рис. 3).

Характеристики георешетки: материал — Petg; диаметр отверстия — 63 мм; высота ребра — 8 мм; ширина ребра — 10 мм.

Георешетка для армирования дорожной одежды представляет собой конфигурацию ячеек треугольной формы, образованных пересечением ребер. Конфигурация ячеек образует правильный шестиугольник.

Суть испытания заключалась в моделировании технологии укладки георешетки и механическом повреждении ее вследствие контакта с каменным материалом в процессе уплотнения.

Для испытаний использовалась гидравлическая установка ЗИМ П-10, которая состояла из нагрузочной плиты, испытательного контейнера и силовой установки, создающей требуемое давление (рис. 4).

Табл. 1. Физико-механические показатели георешетки Славрос СД-40

Показатель	Значение
Нагрузка при растяжении, кН/м, не менее:	
• при нормируемой нагрузке вдоль/поперек;	40/40
при относительном удлинении:	13/13
• 2 % вдоль/поперек;	26/26
• 5 % вдоль/поперек	
Размер ячейки, длина/ширина, мм	40/40
Перекося ячейки, градусы	±3
Ширина рулона, м, не более	4
Длина рулона ±1 %, м	50

Табл. 2. Технические характеристики Армосет Б

Показатель	Значение
Нагрузка при растяжении, кН/м, не менее:	
• при нормируемой нагрузке вдоль/поперек;	50/50
при относительном удлинении:	12,5/12,5
• 3 % вдоль/поперек	
Размер ячейки, длина/ширина, мм	42 ± 2/42 ± 2
Перекося ячейки, градусы	Не нормировано
Ширина рулона, м, не более	5,2 ± 0,1
Длина рулона ±1 %, м	100



Рис. 3. Инновационная 3D-георешетка для армирования дорожной одежды

Эксперимент

Для проведения испытаний был изготовлен испытательный контейнер, который представляет собой металлическую коробку размерами $20 \times 20 \times 20$ см и металлическую крышку размерами $19,5 \times 19,5 \times 10,5$ см (рис. 5) с толщиной стенок 5 мм.

С целью изучения особенностей армирования, оценки заклинивающей способности, а также оценки функции разделения слоев производилось три вида испытаний:

1) на границе слоев «рыхлый песок (не уплотненный — естественного насыпания) – бумага – щебень»;

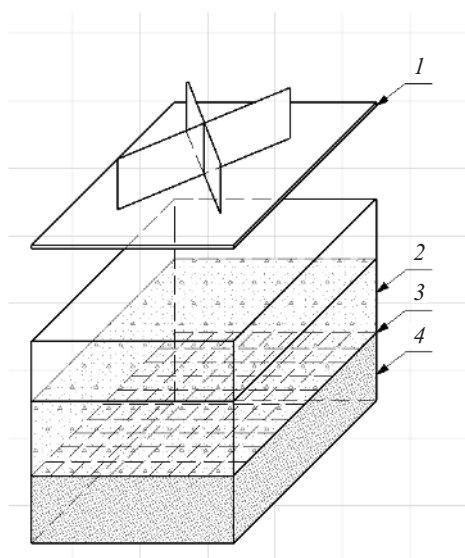


Рис. 5. Испытательный контейнер (металлическая коробка): 1 — металлическая крышка; 2 — слой основания (гранитный щебень М1000 фракции 20–40 мм); 3 — разделяющий слой из георешетки и листа белой бумаги в качестве индикатора для оценки заклинивающей способности каменного материала; 4 — дополнительный слой основания — песок средней крупности



Рис. 4. Гидравлическая установка ЗИМ П-10

2) на границе слоев «уплотненный песок (коэффициент уплотнения 0,93–0,95) – бумага – щебень»;

3) на границе слоев «уплотненный песок (коэффициент уплотнения 0,98) – бумага – щебень».

Для каждого вида испытаний отобрано по три образца исследуемых георешеток.

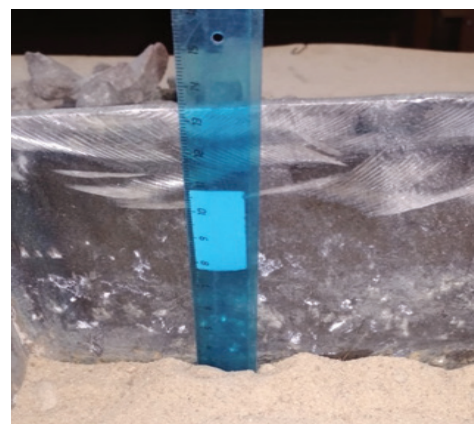


Рис. 6. Подготовленное основание из песка средней крупности



Рис. 7. Уложенный слой щебня на песчаный слой, слой бумаги и испытываемую георешетку

На дно испытательного контейнера (рис. 6) укладывался слой гранулированного материала (песок средней крупности) толщиной от 30 до 40 мм. В первом испытании слой песка не уплотнялся. Во втором испытании песок уплотнялся нагрузочной плитой до коэффициента уплотнения 0,93–0,95. В третьем испытании для уплотнения, помимо воздействия нагрузочной плиты, были обеспечены оптимальная влажность 8–9 % и доведение коэффициента уплотнения до 0,98.

Затем на подготовленном основании располагался лист белой бумаги, который в процессе проведения испытаний позволял определить процент заклинивания щебня и эффективность заклинки. Таким образом, он выступал в роли индикатора.

Георешетка размещалась на подготовленном основании в центре контейнера и засыпалась слоем щебня М1000 фракции 20–40 мм толщиной от 60 до 70 мм (рис. 7).

В процессе одного испытания через нагрузочную плиту три раза прикладывалась нагрузка 80 кН и выдерживалась в течение 30 с.

Далее образец извлекался и выполнялись визуальная оценка и фиксация повреждений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний на границе слоев «рыхлый песок – бумага – щебень».

1. Георешетка Армосет Б.

На дно испытательного контейнера укладывался слой рыхлого песка толщиной от 30 до 40 мм. Далее укладывался слой из бумаги, георешетка Армосет Б и сверху засыпался щебень М1000 фракции 20–40 мм толщиной 60–70 мм.

На рис. 8 представлены результаты испытаний.

По результатам первого испытания видно, что образец георешетки Армосет Б получил многочисленные повреждения в виде вмятин и перегибов отдельных стренг. Разрушения узлового соединения отсутствуют, есть только деформации.

Исходя из общего количества повреждений и характера повреждения уложенного слоя бумаги, заклинивание каменного материала минимально, наблюдаются характерные разрывы на листе и заметно проникновение каменного материала через армируемую георешетку. Это может означать, что георешетка Армосет Б недостаточно справляется с функцией разделения слоев дорожной одежды.

Количество повреждений в целом небольшое (отмечено до 10 характерных визуальных повреждений). Можно отметить, что фракция 20–40 мм минерального заполнителя оказывает существенное влияние на повреждаемость георешетки. Чем меньше фракция минерального заполнителя и чем тщательнее подобран гранулометрический состав, тем

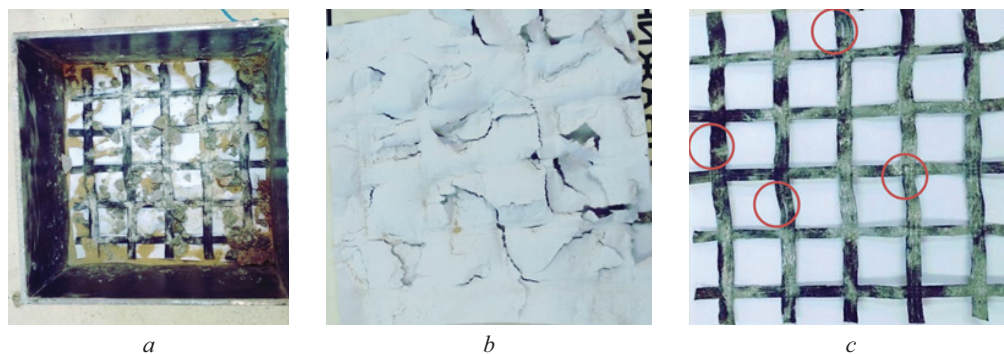


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований Армосет Б: а — общее состояние армируемой георешетки на слое рыхлого песка; б — состояние индикатора заклинки (бумага); в — повреждение извлеченной георешетки Армосет Б

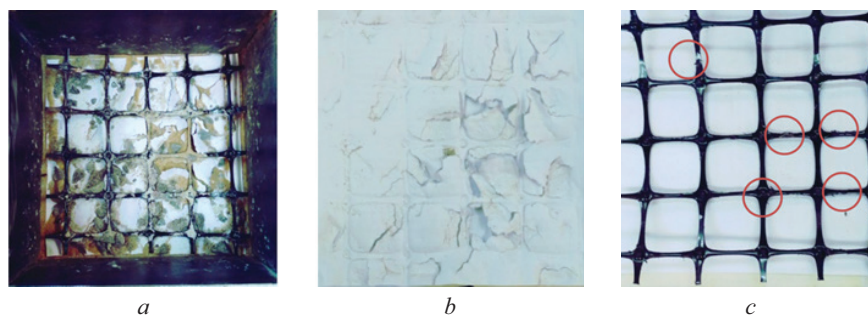


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований Славрос СД-40

меньше повреждаемость георешетки. Оценивая заклинивающую способность георешетки, заметим, что после уплотнения каменный материал достаточно легко извлекался без прикладывания усилий, что говорит о невысокой заклинивающей способности данной георешетки.

2. Славрос СД.

На дно испытательного контейнера укладывался рыхлый песок толщиной от 30 до 40 мм, далее шел слой из белой бумаги, георешетка Славрос СД и щебень М1000 фракции 20–40 мм толщиной 60–70 мм.

На рис. 9 представлены результаты испытаний георешетки Славрос СД-40.

По результатам первого испытания видно, что образец георешетки Славрос СД-40 получил многочисленные повреждения в виде разрушения отдельных стренг и узловых соединений. Исходя из количества повреждений на слое бумаги процент заклинивания каменного материала георешеткой низкий и недостаточный. Характер разрывов на бумаге показывает, что георешетка Славрос СД недостаточно справляется с функцией разделения слоев дорожной одежды. Наблюдается значительное проникновение каменного материала в слой песка при том, что размер ячейки — 40 мм, а самая малая фракция каменного материала — 20 мм, самая большая — 40 мм.

На георешетке Славрос СД присутствуют повреждения в виде раздавливания ребра, которые сконцентрированы вблизи узловых соединений. Расщепления узловых соединений не отмечается. Ребра получили существенные повреждения, которые определенно сказались на их прочности. Оценивая заклинивающую способность георешетки,

стоит заметить, что после уплотнения каменный материал достаточно легко извлекался без прикладывания усилий, что говорит о невысокой заклинивающей способности данной георешетки.

3. Инновационная 3D-георешетка.

На дно испытательного контейнера укладывался слой рыхлого песка толщиной от 30 до 40 мм, далее шел слой из белой бумаги, инновационная 3D-георешетка и щебень М1000 фракции 20–40 мм толщиной 60–70 мм.

На рис. 10 приведены результаты испытаний.

Исходя из количества повреждений на слое бумаги, можно говорить о достаточном и высоком проценте заклинивания каменного материала. Это показывает, что 3D-георешетка отлично справилась с функцией разделения слоев рыхлого песка и щебня. Заклинивание каменного материала происходит выше слоя армирования, что очень важно для армирующих прослоек и повышения эффективности армирования слоев. При таком эффекте можно смело говорить о возможности уменьшения толщины слоя каменного материала за счет высокой заклинивающей способности георешетки.

На инновационной 3D-георешетке присутствуют минимальные повреждения в виде небольших углублений. Перегибов и деформации конструкции георешетки нет. Расщепления узловых соединений не произошло. В целом повреждения характеризуются как незначительные и не оказывают влияния на прочность геосинтетического материала. Также в процессе извлечения слоя основания из гранитного щебня произошло надежное заклинивание щебня в ячейках, которые имеют размеры более чем в 3 раза превышающие минимальную фракцию щебня (60 мм) (рис. 11).

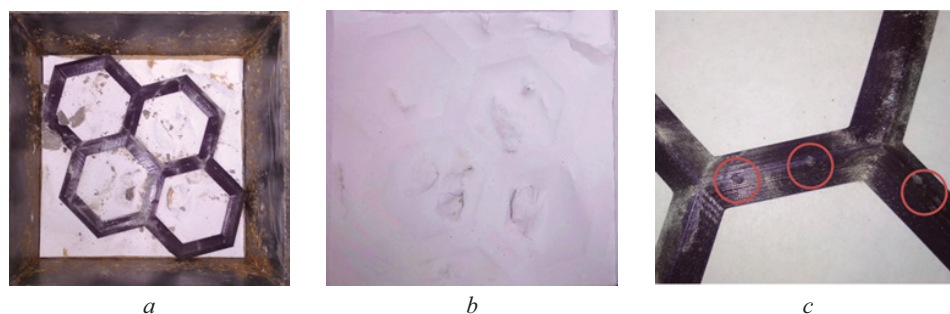


Рис. 10. Результаты экспериментальных исследований инновационной 3D-георешетки



Рис. 11. Заклинивание каменного материала в инновационной 3D-георешетке

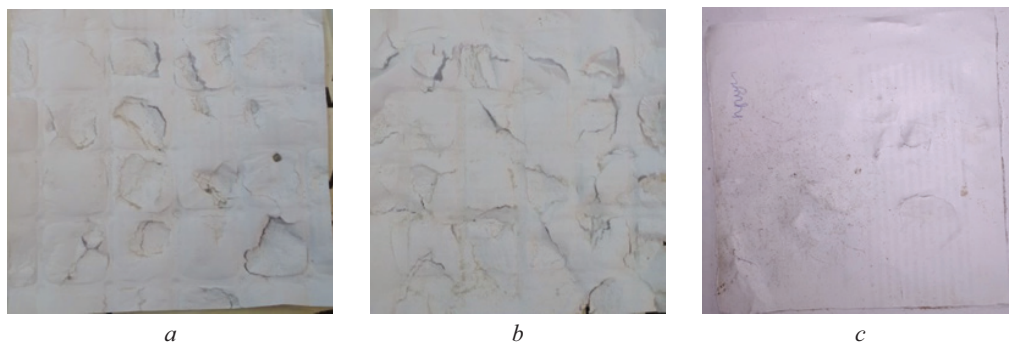


Рис. 12. Результаты заклинки щебня на уплотненном песчаном основании с коэффициентом уплотнения 0,93–0,95: а — георешетка Славрос СД-40; б — георешетка Армосет Б; с — инновационная 3D-георешетка

В ходе извлечения каменного материала из армирующей георешетки пришлось выбивать его из конструкции с привлечением молотка. Этот факт показал, что надежная заклинка возможна на подобных конструкциях, и данное конструктивное решение имеет значительные перспективы для дальнейшего развития в строительных конструкциях.

Аналогичные результаты получены и при двух последующих испытаниях на уплотненном слое песка. Аналогично у георешеток Славрос СД-40 и Армосет Б функция разделения была нарушена и заклинка не происходила в должном виде, наблюдалось проникновение щебня вглубь песчаного основания через представленные георешетки. Инновационная 3D-георешетка, напротив, улучшила свои показатели в части заклинивания каменного материала и выполнения функции разделения, что хорошо видно на рис. 12, с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подводя общие выводы проведенных исследований, можно говорить о следующих достигнутых результатах.

Сравнительные испытания на повреждаемость георешеток Славрос СД-40, Армосет Б и инновационной 3D-георешетки показали, что гибкая георешетка Армосет Б подвержена значительно большим продольным и поперечным деформациям в ходе приложения статической нагрузки на уложенный слой каменного материала толщиной 60–70 мм. При этом у жесткой георешетки Славрос СД-40 отсутствовали продольные деформации, но наблюдались более серьезные разрушения отдельных стренг и узловых соединений. Инновационная

3D-георешетка практически не получила повреждений, лишь на отдельных гранях были заметны незначительные углубления на поверхностном слое.

Испытания на оценку функции разделения слоев продемонстрировали, что у плоской гибкой георешетки Армосет Б и жесткой плоской георешетки Славрос СД-40 функция разделения работает неэффективно. Выбранный в качестве индикатора оценки разделения слоев лист белой бумаги получил значительные деформации, и каменный материал проник вглубь песчаного слоя. При этом результаты испытаний для инновационной 3D-георешетки напротив показали отличные результаты по предотвращению проникновения каменного материала вглубь песчаного слоя несмотря на то, что размер отверстия георешетки превышал в 3 раза размер минимальной фракции щебня.

Испытания на оценку заклинивающей способности показали аналогичный характер. Для плоской гибкой георешетки Армосет Б и плоской жесткой георешетки Славрос СД-40 заклинивающая способность оказалась в целом невысокой, каменный материал после проведенного испытания достаточно легко извлекался без сопротивления. Инновационная георешетка, напротив, продемонстрировала результат, при котором для извлечения щебня потребовалось его выбивать с привлечением молотка.

Экспериментальные исследования с разработанной конструкцией инновационной 3D-георешетки показали, что данная георешетка имеет перспективы для применения ее в качестве армирующей прослойки в гражданском строительстве. Необходимо проведение более масштабных экспериментальных исследований для оценки ее эффективности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tamrakar P., Kwon J., Wayne M., Lee H. Calibration of pavement ME rutting model for geogrid stabilized roadways // *Transportation Geotechnics*. 2021. Vol. 31. P. 100684. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100684
2. Al-Barqawi M., Aqel R., Wayne M., Titi H., Elhajjar R. Polymer geogrids : a review of material, design and structure relationships // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 16. P. 4745. DOI: 10.3390/ma14164745
3. Сиротюк В.В., Левашиов Г.М. Технологическая повреждаемость некоторых геосинтетических материалов, применяемых для армирования асфальтобетонных покрытий // *Дороги и мосты*. 2010. № 1 (23). С. 85–96. EDN OOHCHZ.
4. Carlos D., Almeida F., Carneiro J.R., Lopes M. Influence of mechanical damage under repeated loading on the resistance of geogrids against abrasion // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 13. P. 3544. DOI: 10.3390/ma14133544
5. Куликова К.А., Игнатъев А.А. Оценка повреждаемости плоских и пространственных георешеток при армировании материалов конструктивных слоев дорожной одежды // *Дороги и мосты*. 2023. № 1 (49). С. 33–53. EDN JIHUSM.
6. Canestrari F., Belogi L., Ferrotti G., Graziani A. Shear and flexural characterization of grid-reinforced asphalt pavements and relation with field distress evolution // *Materials and Structures*. 2015. Vol. 48. Issue 4. Pp. 959–975. DOI: 10.1617/s11527-013-0207-1
7. Viciña L., Jaramillo-Fierro X., Cuenca P., Goday-Paucar B., Inga-Lafebre J., Chávez J. et al. Evaluation of the effectiveness of geogrids manufactured from recycled plastics for slope stabilization — a case study // *Polymers*. 2024. Vol. 16. Issue 8. P. 1151. DOI: 10.3390/polym16081151
8. Dong Y. Li, Guo H.J., Han J., Zhang J. Numerical analysis of installation damage of a geogrid with rectangular apertures // *Results in Physics*. 2018. Vol. 9. Pp. 1185–1191. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.04.016
9. Albuja-Sánchez J., Córdor L., Oñate K., Ruiz S., Lal D. Influence of geogrid arrangement on the bearing capacity of a granular soil on physical models and its comparison to theoretical equations // *SN Applied Sciences*. 2023. Vol. 5. Issue 9. DOI: 10.1007/s42452-023-05474-w
10. Yuan H., Bai X., Zhao H., Wang J. Experimental study on the Influence of aging on mechanical properties of geogrids and bearing capacity of reinforced sand cushion // *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020. DOI: 10.1155/2020/8839919.
11. Игнатъев А.А., Курочкина К.А. Оценка прочностных характеристик материалов геосеток, используемых в составе асфальтобетонного дорожного покрытия // *Транспортное строительство*. 2017. № 4. С. 5–7. EDN ZHJYHR.
12. Meng Y., Xu C. Effects of freeze-thaw cycles on the tensile properties of geogrids and shear behavior of geogrid-soil interface // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1335. Issue 1. P. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/1335/1/012003
13. Fleury M., Kamakura G., Pitombo C., Cunha A., Ferreira F., Lins da Silva J. Assessing and predicting geogrid reduction factors after damage induced by dropping recycled aggregates // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 13. P. 9942. DOI: 10.3390/su15139942
14. Wang H., Kang M., Kim Y., Qamhia I., Tutumluer E., Shoup H. Evaluating different geogrid products for modulus improvement with bender element sensor technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1332. Issue 1. P. 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/1332/1/012008
15. Alwiyah S. Pengujian daya dukung tanah pasir dengan kekuatan Geogrid // *Journal Saintis*. 2021. Vol. 21. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.25299/saintis.2021.vol21(01).6566
16. Al-Sumaiday H., Khalaf W., Muhawwiss F. Experimental investigation of bearing capacity of circular and ring footings on geogrid-reinforced cohesionless soils // *Civil and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 20. Issue 1. Pp. 349–363. 2024. DOI: 10.2478/cee-2024-0027
17. Wu J., Zhang F., Gao L., Hou J. Bearing capacity and reinforced mechanisms of horizontal-vertical geogrid in foundations: PFC3D Study // *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 6. P. 1533. DOI: 10.3390/buildings-14061533
18. Koerner R.M. *Designing with Geosynthetics*. 5th ed. 2005. 818 p.
19. Патент RU № 2652411 C1, МПК E01C 5/20. Георешетка для армирования дорожной одежды / А.А. Игнатъев, К.А. Курочкина, Е.А. Ронжин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»; заявл. № 2017124781 от 11.07.2017. Опубл. 26.04.2018. EDN RVYLRA.
20. Куликова К.А., Игнатъев А.А. Оценка влияния поперечного сечения ребра 3D-георешетки на заклинку каменного материала // *Вестник гражданских инженеров*. 2024. № 3 (104). С. 88–94. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-21-3-88-94. EDN LOYAOQ.

Поступила в редакцию 9 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 29 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Алексей Александрович Игнатьев** — доктор технических наук, доцент, директор департамента развития отраслевого образования; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 652263, Scopus: 57223088598, ResearcherID: AAZ-2908-2021, ORCID: 0000-0003-1425-5330; ignatievaa@rosdormii.ru;

Илья Александрович Чижиков — кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9007-2019, РИНЦ ID: 979182, ORCID: 0009-0000-2212-3501; ilya2@mail.ru.

Вклад авторов:

Игнатьев А.А. — научное руководство, концепция исследования, постановка задачи экспериментального исследования, подготовка основного содержания статьи, итоговые выводы.

Чижиков И.А. — подготовка обзора исследований, оформление работы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

In modern conditions of construction such geosynthetic materials as geogrids are widely used. They are actively used to reinforce soil bases for various foundations, to increase the bearing capacity of weak soils, to separate layers. In road construction, geogrids are actively used to increase the bearing capacity of roadway bases and rutting resistance of roadways [1], as well as to reduce the thickness of structural layers. In addition, reinforcement of soil bases is aimed at increasing the durability of structures.

Today on the market of geosynthetic materials there is a great variety of geogrids designs. Basically, their difference lies in the shape and size of the cell, technology and production methods (woven or welded), in the materials used. The basic shape of cells is square and triangular, the sizes vary from 20 to 50 mm. There are other unique solutions. At the same time, geogrids used for reinforcing asphalt concrete layers, made of basalt or glass fibre, are widely used for road construction. They are placed between asphalt concrete layers at temperatures above 120 °C, which ensures their stability during paving and subsequent operation.

It is worth noting that geogrids are mostly produced flat by manufacturers, dictated by the need to reduce the thickness of the layer and reduce material intensity. This has its own disadvantages. In particular, due to the small thickness the depth of immersion in layers is reduced and adhesion between layers is somewhat reduced, as well as the reinforcing capacity is reduced. Shear between the layers is possible, where damage to the geogrid leads to a significant reduction in its strength [2], thus violating the required monolithicity and, as a consequence, the rapid destruction of the pavement. Speaking about the separating function of geogrids, when they are used to separate layers (e.g. “sand – crushed stone”), it is expected that the stone material can be wedged and its properties stabilized during subsequent operation and that the possible mutual penetration of layers into each other is minimized. It is important that the stone material does not penetrate into the sand

layers and that the design thicknesses of the layers are maintained and that the porosity of the stone material is not compensated by the sandy soil penetrating into the pores. This can only be achieved if the geogrid provides sufficient wedging capacity of the stone material, whereby the crushed stone does not seep through the cells and ensures a reliable retention of the stone material in the lower layers. This is where the main disadvantages of flat geogrids become apparent. The flat surface does not allow for reliable retention of chipped stone (crushed stone), which contributes to its dislodging from the surface. It also requires the mesh size to match the size of the stone material to ensure wedging. There are recommendations that the mesh size should not exceed two sizes of the largest fraction of crushed stone.

Recently, in domestic and foreign practice, the damageability of geogrids placed between layers of stone material or layers of sand and stone material has been actively discussed. The results in some cases are disappointing [3–5]. Moreover, the damageability directly depends on the material from which the geogrid is made [6]. Geogrids produced by extrusion method are more resistant to impact loads and abrasion, but due to the desire of manufacturers to save material during production, the thickness of ribs is greatly reduced, which leads to their higher damageability, as evidenced by studies aimed at numerical modelling of geogrid rib failure [7–9]. At times [3], the wear can reach 90 % of the original strength, which practically nullifies all the obligations imposed on the geogrid to strengthen and reinforce the layers. No less relevant aspect is the resistance to the impact of natural factors. In a number of works this is given special attention. Thus, the impact of ultraviolet and temperature [10–12] can reduce its strength by more than 50 % even before laying the geogrid. Undoubtedly, and the culture of workmanship has a significant impact on the subsequent performance of the object. When laying geogrids any distortions, deliberate change of geometry lead to the fact that the geogrid changes its characteristics and is more actively exposed to damage

and reduction of operational parameters [2]. In addition, on the geogrid laid on the prepared surface, crushed stone is unloaded from a dump truck, which at a height of more than 1 m causes significant damage and even destruction. A study [13] is devoted to the study of this effect, in which the damage of geogrids during the fall of stone material from a height of 1 and 2 m was considered. The results of the study showed that the homogeneity of the size of stone material has the greatest influence on the damageability of geogrids. And in the practice of construction it is the homogeneity of stone material that has found the widest application. Mixtures of stone materials are used much less frequently. All this creates certain difficulties for the production of works. It is also important that crushed stone has a jagged surface, which quite easily cuts or chops the individual ribs of the geogrid.

Despite the large number of works devoted to the study of the peculiarities of reinforcement of structural layers and foundations [14–18] and assessment of damageability of geogrids located between layers of stone material or layers of sand and crushed stone, there are practically no studies aimed at assessing the wedging capacity. And this factor is one of the most important from the point of view of increasing the bearing capacity and reducing the thickness of the structural layer, as well as reducing the effect of mutual penetration of layers into each other.

For a number of years, a team of authors has been conducting research on studying the peculiarities of reinforcing foundations with innovative 3D geogrid [19, 20]. The results are unique both in terms of reinforcing capacity and wedging ability of the stone material. Research continues in this direction. Within the framework of this publication, the results of experimental studies aimed at comparing geogrids in terms of damage and wedging capacity when placed between sand and stone material layers will be presented.

A new method of assessing the jamming ability of rock material is proposed, which involves laying

a sheet of paper as an indicator. The uniqueness of this method is that it allows to clearly see the difference when comparing several geogrids for wedging capacity and how effectively the geogrid keeps the stone material from penetrating into the sand layers.

MATERIALS AND METHODS

The consolidation capacity, separation function and fracture resistance of prefabricated geogrid specimens, including the innovative 3D geogrid, were evaluated under laboratory conditions.

The aim of the experiment was to evaluate geogrids of different design and material during the compaction process at the sand – crushed stone interface and then compare their mechanical resistance to failure under repeated static load and wedging capacity.

The following geogrid specimens were selected for the experiment:

1. Extruded geogrid Slavros SD-40 with 40×40 mm cell (Fig. 1).

Table 1 presents physical and mechanical properties of SD-40 geogrid.

2. Woven geogrid Armoset B with 30×30 mm mesh (Fig. 2).

Table 2 shows physical and mechanical properties of Armoset B geogrid.

3. Innovative 3D geogrid for pavement reinforcement with a diagonal dimension of 70 mm (Fig. 3).

Geogrid characteristics: material — Petg; hole diameter — 63 mm; rib height — 8 mm; rib width — 10 mm.

Geogrid for pavement reinforcement is a configuration of triangular cells formed by intersection of edges. The configuration of cells forms a regular hexagon.

The essence of the test was to simulate the technology of geogrid laying and mechanical damage due to its contact with stone material during compaction.

For the tests we used a hydraulic unit ZIM P-10, which consisted of a load plate, a test container and a power unit creating the required pressure (Fig. 4).

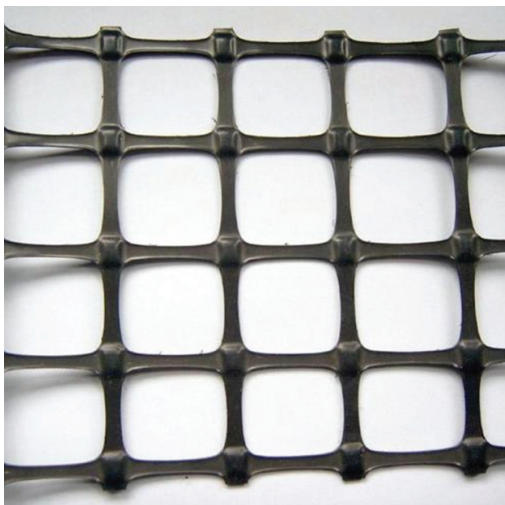


Fig. 1. Extruded geogrid Slavros SD-40

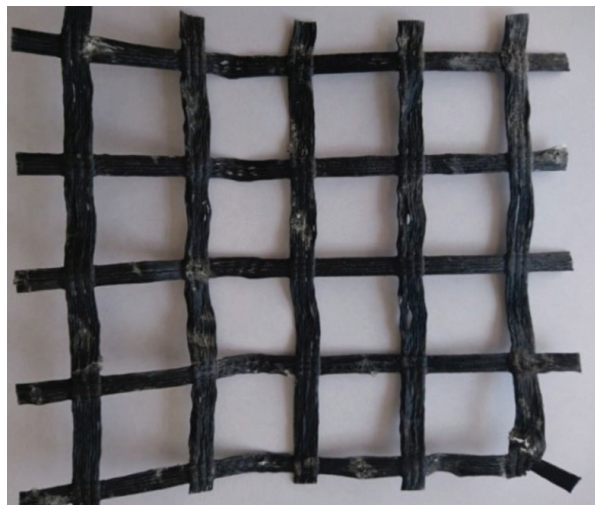


Fig. 2. Woven geogrid Armoset B

Table 1. Physical and mechanical properties of Slavros SD-40 geogrids

Indicator	Value
Tensile load, kN/m, not less: <ul style="list-style-type: none">• at standardized load along/across;	40/40
at relative elongation: <ul style="list-style-type: none">• 2 % along/across;• 5 % along/across	13/13 26/26
Cell size, length/width, mm	40/40
Cell skew, degrees	±3
Roll width, m, no more than	4
Roll length ±1 %, m	50

Table 2. Technical characteristics of Armoset B

Indicator	Value
Tensile load, kN/m, not less: <ul style="list-style-type: none">• at standardized load along/across;	50/50
at relative elongation: <ul style="list-style-type: none">• 3 % along/across	12.5/12.5
Cell size, length/width, mm	42 ± 2/42 ± 2
Cell skew, degrees	Not standardized
Roll width, m, no more than	5.2 ± 0.1
Roll length ±1 %, m	100



Fig. 3. Innovative 3D geogrid for pavement reinforcement



Fig. 4. Hydraulic installation of ZIM P-10

Experiment

A test container, which is a metal box with dimensions 20 × 20 × 20 × 20 cm and a metal lid with dimensions 19.5 × 19.5 × 19.5 × 10.5 cm (Fig. 5) with a wall thickness of 5 mm, was fabricated for testing.

In order to study the peculiarities of reinforcement, to assess the jamming ability, as well as to evaluate the function of layer separation, three types of tests were performed:

- 1) at the boundary of layers “loose sand (not compacted — natural filling) – paper – crushed stone”;
- 2) at the boundary of layers “compacted sand (compaction factor 0.93–0.95) – paper – crushed stone”;

3) at the boundary of layers “compacted sand (compaction factor 0.98) – paper – crushed stone”.

For each type of tests three specimens of investigated geogrids were selected.

At the bottom of the test container (Fig. 6) a layer of granular material (medium coarse sand) with a thickness of 30 to 40 mm was placed. In the first test, the sand layer was not compacted. In the second test, the sand was compacted with a load plate to a compaction factor of 0.93–0.95. In the third test, in addition to the impact of the load plate, an optimum moisture content of 8–9 % and a compaction factor of 0.98 were ensured for compaction.

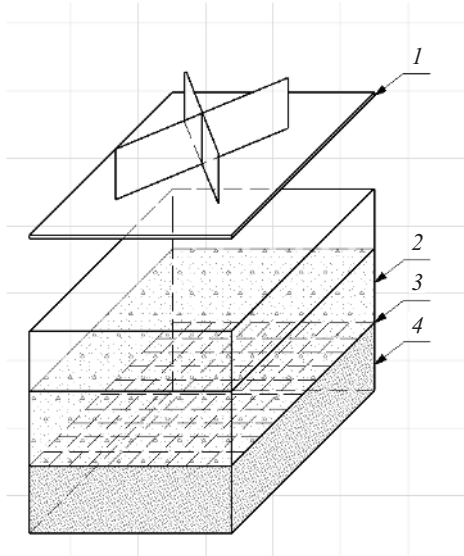


Fig. 5. Test container (metal box): 1 — metal lid; 2 — base layer (granite crushed stone M1000 fraction 20–40 mm); 3 — separating layer of geogrid and white paper sheet as an indicator to assess the jamming ability of the stone material; 4 — additional base layer — medium coarse sand

A sheet of white paper was then placed on the prepared base to determine the percentage of crushed stone jamming and the effectiveness of the jamming during the tests. Thus, it acted as an indicator.

The geogrid was placed on the prepared base in the centre of the container and filled with a layer of crushed stone M1000 of 20–40 mm fraction with thickness from 60 to 70 mm (Fig. 7).

During one test, a load of 80 kN was applied through the load plate three times and held for 30 s.

The specimen was then removed and the damage was visually assessed and recorded.

RESEARCH RESULTS

Test results at the interface of loose sand – paper – crushed stone layers.

1. Armoset B geogrid.

At the bottom of the test container a layer of loose sand 30 to 40 mm thick was placed. Then a layer of paper, geogrid Armoset B was laid and crushed stone M1000 of 20–40 mm fraction with thickness of 60–70 mm was poured on top.

Fig. 8 shows the test results.



Fig. 6. Prepared base of medium coarse sand

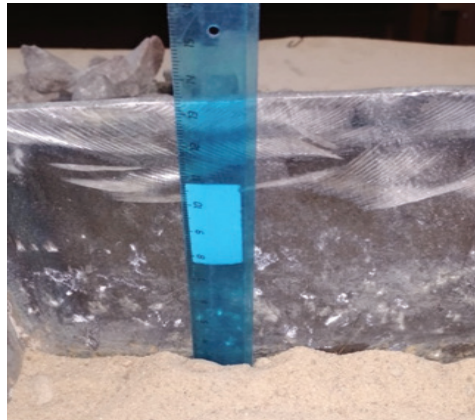


Fig. 7. Placed crushed stone layer on sand layer, paper layer and geogrid under test

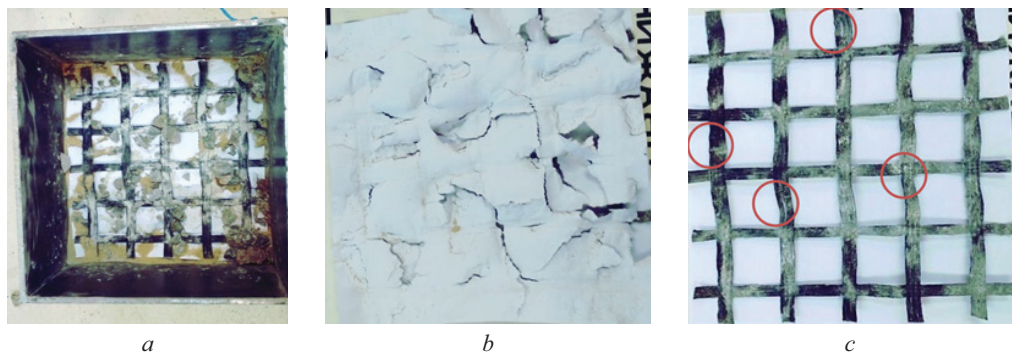


Fig. 8. Results of experimental studies of Armoset B: *a* — general condition of reinforced geogrid on loose sand layer; *b* — condition of wedging indicator (paper); *c* — damage of removed Armoset B geogrid

The results of the first test show that the Armoset B geogrid specimen has received numerous damages in the form of dents and kinks of individual strands. There is no failure of the nodal joint, only deformations.

Based on the total amount of damage and the nature of the damage to the laid paper layer, the jamming of the stone material is minimal, there are characteristic tears in the sheet and there is noticeable penetration of the stone material through the reinforced geogrid. This may indicate that the Armoset B geogrid is not adequately performing its pavement separation function.

The number of damages is generally small (up to 10 characteristic visual damages were observed). It can be noted that the fraction of 20–40 mm of mineral aggregate has a significant impact on the damageability of geogrid. The smaller the fraction of mineral aggregate and the more carefully selected granulometric composition, the less damage to the geogrid. Evaluating the jam-

ming ability of the geogrid, we note that after compaction the stone material was easily extracted without effort, which indicates a low jamming ability of this geogrid.

2. Slavros SD.

At the bottom of the test container was laid loose sand with thickness from 30 to 40 mm, followed by a layer of white paper, Slavros SD geogrid and crushed stone M1000 fraction 20–40 mm with thickness of 60–70 mm.

Fig. 9 shows the test results of Slavros SD-40 geogrid.

According to the results of the first test it can be seen that the specimen of Slavros SD-40 geogrid received numerous damages in the form of destruction of individual strands and nodal joints. Based on the number of damages on the paper layer, the percentage of rock material jamming by the geogrid is low and insufficient. The nature of the tears on the paper

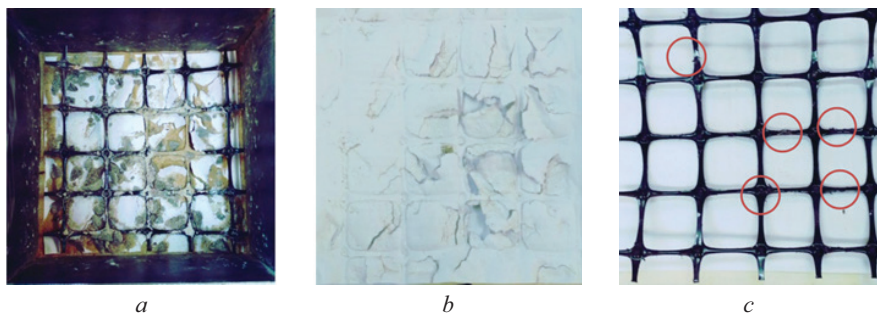


Fig. 9. Experimental results of Slavros SD-40

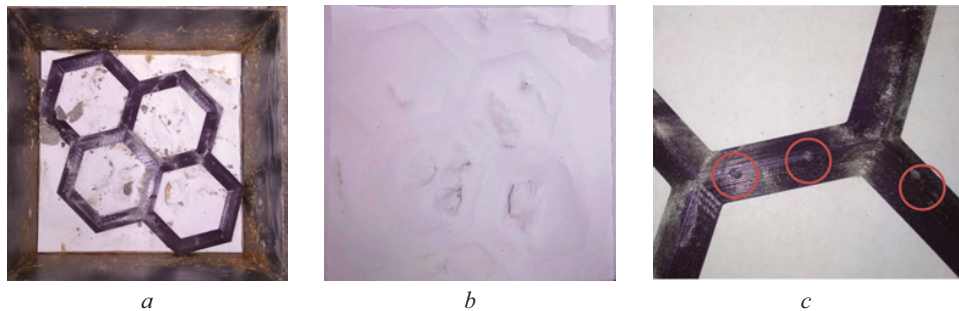


Fig. 10. Experimental results of innovative 3D geogrid



Fig. 11. Jamming of stone material in the innovative 3D geogrid

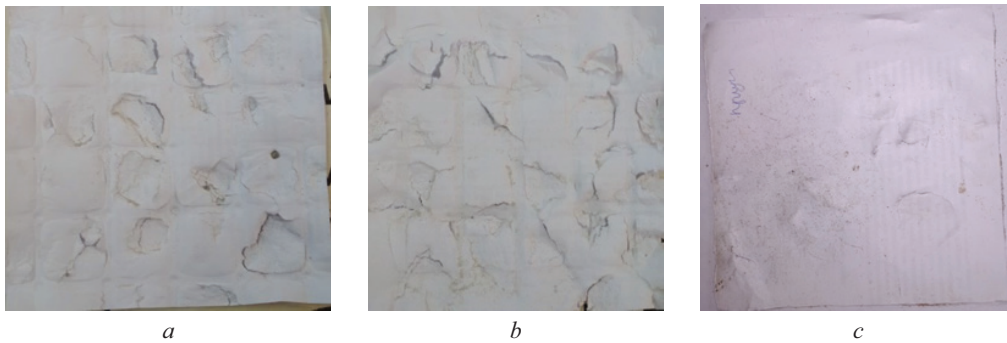


Fig. 12. Results of crushed stone wedging on compacted sandy base with compaction factor 0.93–0.95: *a* — Slavros SD-40 geogrid; *b* — Armoset B geogrid; *c* — innovative 3D geogrid

shows that Slavros SD geogrid does not sufficiently cope with the function of separating the pavement layers. There is a significant penetration of stone material into the sand layer, while the mesh size is 40 mm, and the smallest fraction of stone material is 20 mm and the largest fraction is 40 mm.

The Slavros SD geogrid has crush damage in the form of crushed edges, which is concentrated near the nodal joints. No splitting of the nodal joints is noted. The ribs have sustained significant damage that has definitely affected their strength. When assessing the jamming ability of the geogrid, it is worth noting that after compaction, the stone material was easily removed without effort, which indicates that the jamming ability of this geogrid is not high.

3. Innovative 3D geogrid.

At the bottom of the test container was laid a layer of loose sand with a thickness of 30 to 40 mm, followed by a layer of white paper, innovative 3D geogrid and crushed stone M1000 fraction 20–40 mm with a thickness of 60–70 mm.

Fig. 10 shows the results of the tests.

Based on the amount of damage on the paper layer, we can speak about a sufficient and high percentage of jamming of the rock material. This shows that the 3D geogrid has perfectly fulfilled the function of separating the loose sand and crushed stone layers. The wedging of the stone material occurs above the reinforcement layer, which is very important for reinforcing layers and increasing the efficiency of the reinforcement layers. With this effect we can safely say that it is possible to reduce the thickness of the stone material layer due to the high wedging ability of the geogrid.

The innovative 3D geogrid shows minimal damage in the form of small depressions. There are no kinks or deformation of the geogrid structure. There was no splitting of the node connections. In general, the damage is characterized as insignificant and does not affect the strength of the geosynthetic material. Also, in the process of extraction of the base layer of granite crushed stone there was a reliable jamming of the crushed stone in the cells, which have sizes more than 3 times exceeding the minimum fraction of crushed stone (60 mm) (Fig. 11). During the removal of the stone material from the reinforcing geogrid, it was necessary to knock it out of the structure using a hammer. This fact showed that reliable wedging is possible on such structures, and this design solution has significant prospects for further development in building structures.

Similar results were obtained in two subsequent tests on a compacted sand layer. Similarly, for Slavros SD-40 and Armoset B geogrids, the separation function was impaired and the wedging did not take place in a proper manner, there was a penetration of crushed stone deep into the sand base through the presented geogrids. In contrast, the innovative 3D geogrid improved its performance in terms of wedging of stone material and separation function, which can be clearly seen in Fig. 12, *c*.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Summarising the general conclusions of the conducted research, the following achieved results can be stated.

Comparative damage tests of Slavros SD-40, Armoset B and innovative 3D geogrid have shown that flexible geogrid Armoset B is subjected to significantly

higher longitudinal and transverse deformations during the application of static load on the laid layer of stone material 60–70 mm thick. At the same time, the rigid Slavros SD-40 geogrid had no longitudinal deformations, but more serious failures of individual strands and nodal joints were observed. The innovative 3D geogrid was practically undamaged, with only minor depressions in the surface layer on some faces.

Layer separation function evaluation tests showed that the Armoset B flat flexible geogrid and the Slavros SD-40 rigid flat geogrid did not have an effective separation function. The white paper sheet chosen as an indicator to evaluate the separation of the layers was significantly deformed and the stone material penetrated deep into the sand layer. In contrast, the test results for the innovative 3D geogrid showed excellent results in

preventing the stone material from penetrating the sand layer, despite the fact that the geogrid opening size was 3 times the minimum crushed stone fraction.

The jamming capacity evaluation tests showed a similar pattern. For the flat flexible geogrid Armoset B and flat rigid geogrid Slavros SD-40 the jamming ability was generally low, the stone material was easily extracted without resistance after the test. The innovative geogrid, on the contrary, showed the result that in order to extract the crushed stone it was necessary to knock it out with a hammer.

Experimental studies with the developed design of the innovative 3D geogrid showed that this geogrid has prospects for its application as a reinforcing layer in civil engineering. It is necessary to conduct larger-scale experimental studies to evaluate its effectiveness.

REFERENCES

1. Tamrakar P., Kwon J., Wayne M., Lee H. Calibration of pavement ME rutting model for geogrid stabilized roadways. *Transportation Geotechnics*. 2021; 31:100684. DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100684
2. Al-Barqawi M., Aqel R., Wayne M., Titi H., Elhajjar R. Polymer geogrids: a review of material, design and structure relationships. *Materials*. 2021; 14(16):4745. DOI: 10.3390/ma14164745
3. Sirotuk V.V., Levashov G.M. Technological process damageability of certain geosynthetic materials applied for reinforcing asphalt concrete pavements. *Roads and Bridges*. 2010; 1(23):85-96. EDN OOHCHZ. (rus.).
4. Carlos D., Almeida F., Carneiro J.R., Lopes M. Influence of mechanical damage under repeated loading on the resistance of geogrids against abrasion. *Materials*. 2021; 14(13):3544. DOI: 10.3390/ma14133544
5. Kulikova K.A., Ignatiev A.A. Estimation of damageability of flat and spatial geogrids when reinforcing materials of road pavement structural layers. *Roads and Bridges*. 2023; 1(49):33-53. EDN JIHUSM. (rus.).
6. Canestrari F., Belogi L., Ferrotti G., Graziani A. Shear and flexural characterization of grid-reinforced asphalt pavements and relation with field distress evolution. *Materials and Structures*. 2015; 48(4):959-975. DOI: 10.1617/s11527-013-0207-1
7. Vicuña L., Jaramillo-Fierro X., Cuenca P., Godoy-Paucar B., Inga-Lafebre J., Chávez J. et al. Evaluation of the effectiveness of geogrids manufactured from recycled plastics for slope stabilization — a case study. *Polymers*. 2024; 16(8):1151. DOI: 10.3390/polym16081151
8. Dong Y. Li, Guo H.J., Han J., Zhang J. Numerical analysis of installation damage of a geogrid with rectangular apertures. *Results in Physics*. 2018; 9:1185-1191. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.04.016
9. Albuja-Sánchez J., Córdor L., Oñate K., Ruiz S., Lal D. Influence of geogrid arrangement on the bearing capacity of a granular soil on physical models and its comparison to theoretical equations. *SN Applied Sciences*. 2023; 5(9). DOI: 10.1007/s42452-023-05474-w
10. Yuan H., Bai X., Zhao H., Wang J. Experimental study on the Influence of aging on mechanical properties of geogrids and bearing capacity of reinforced sand cushion. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020. DOI: 10.1155/2020/8839919
11. Ignatiev A.A., Kurochkina K.A. The evaluation of strength properties of materials for geomeshes used as a component of bituminous concrete pavement. *Transport Construction*. 2017; 4:5-7. EDN ZHJYHR. (rus.).
12. Meng Y., Xu C. Effects of freeze-thaw cycles on the tensile properties of geogrids and shear behavior of geogrid-soil interface. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024; 1335(1):012003. DOI: 10.1088/1755-1315/1335/1/012003
13. Fleury M., Kamakura G., Pitombo C., Cunha A., Ferreira F., Lins da Silva J. Assessing and predicting geogrid reduction factors after damage induced by dropping recycled aggregates. *Sustainability*. 2023; 15(13):9942. DOI: 10.3390/su15139942
14. Wang H., Kang M., Kim Y., Qamhia I., Tutumluer E., Shoup H. Evaluating different geogrid products for modulus improvement with bender element sensor technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024; 1332(1):012008. DOI: 10.1088/1755-1315/1332/1/012008
15. Alwiyah S. Pengujian daya dukung tanah pasir dengan perkuatan Geogrid. *Journal Saintis*. 2021; 21(1):1-10. DOI: 10.25299/saintis.2021.vol21(01).6566
16. Al-Sumaiday H., Khalaf W., Muhawiss F. Experimental investigation of bearing capacity of circular and ring footings on geogrid-reinforced cohesionless

soils. *Civil and Environmental Engineering*. 2024; 20(1):349-363. 2024. DOI: 10.2478/cee-2024-0027

17. Wu J., Zhang F., Gao L., Hou J. Bearing capacity and reinforced mechanisms of horizontal–vertical geogrid in foundations: PFC3D Study. *Buildings*. 2024; 14(6):1533. DOI: 10.3390/buildings14061533

18. Koerner R.M. *Designing with Geosynthetics*. 5th edition. 2005; 818.

19. Patent RU No. 2652411 C1, МПК E01C 5/20. *Geogrid for pavement reinforcement* / A.A. Ignatiev,

K.A. Kurochkina, E.A. Ronzhin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Yaroslavl State Technical University”; application No. 2017124781 dated 11.07.2017. Published 26.04.2018. EDN RVYLRA. (rus.).

20. Kulikova K.A., Ignatyev A.A. Evaluation of the influence of the 3D geogrid rib cross-section on the wedging of stone material. *Bulletin of Civil Engineers*. 2024; 3(104):88-94. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-21-3-88-94. EDN LOYAOQ. (rus.).

Received September 9, 2024.

Adopted in revised form on September 26, 2024.

Approved for publication on September 29, 2024.

B I O N O T E S: **Aleksey A. Ignatyev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Department of Industry Education Development; **Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 652263, Scopus: 57223088598, ResearcherID: AAZ-2908-2021, ORCID: 0000-0003-1425-5330; ignatievaa@rosdornii.ru;

Il'ya A. Chizhikov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9007-2019, ID RSCI: 979182, ORCID: 0009-0000-2212-3501; ilya2@mail.ru.

Contribution of the authors:

Aleksey A. Ignatyev — scientific guidance, research concept, setting the task of the experimental study, preparation of the main content of the article, final conclusions.

Il'ya A. Chizhikov — preparation of research review, design of the paper.

The authors declare that they have no conflict of interest.