

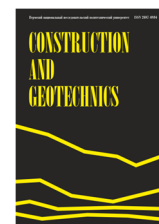


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 1, 2025

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.1.03

УДК 625.7:624.138.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ОБРАЗЦОВ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

**В.И. Брызгалов, М.А. Буранова, М.О. Карпушко,
А.М. Бургонутдинов, Д.Г. Золотозубов, Д.А. Татьянников**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 02 апреля 2024
Одобрена: 22 декабря 2024
Принята к публикации:
05 марта 2025

Ключевые слова:

геосинтетика, тканый геотекстиль,
нетканый геотекстиль, геосетка,
морозостойкость, прочность,
замораживание, оттаивание.

АННОТАЦИЯ

Геосинтетические материалы применяются в строительстве автомобильных дорог на протяжении более 30 лет. Геоматериалы относятся к отдельному классу полимерных строительных материалов, с помощью которых обеспечивается устойчивость и долговечность возводимых объектов. Главными преимуществами использования геосинтетиков являются: сокращение трудовых и материальных затрат, повышение грузоподъемности и увеличения срока службы дорожных конструкций. Применение современных геосинтетических материалов возможно в температурном диапазоне от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$, но следует учитывать, что при отрицательных температурах их относительное удлинение при нагрузке и прочность могут снижаться. При работе материалов при отрицательных температурах следует учитывать их морозостойкость. В статье проведено исследование устойчивости образцов геосинтетических материалов к многократному замораживанию и оттаиванию. Замораживание-размораживание образцов проводилось в лаборатории кафедры «Автомобильные дороги и мосты», испытания геосинтетиков на растяжение проводились в лаборатории кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Для проведения испытания было отобрано четыре различных материала: полотно геотекстильное нетканое иглопробивное и термокаландрированное (дорнит) – 350; георешетка полипропиленовая СД 100 %; полотно геотекстильное тканое ТН-20 100 % полипропилен; тканый геотекстиль ТН 50. Подобранные образцы для испытаний имели ширину 200 ± 1 мм, фиксация материала происходила в зажимах испытательной машины МТ-136. По результатам проведенных испытаний показатель морозостойкости составил: нетканый геотекстиль – 112,5 %; георешетка – 111,8 %, тканый геотекстиль ТН 20 – 174,4 %; тканый геотекстиль ТН 20 – 81 %. Это значит, что у большинства испытанных геосинтетических материалов прочность на растяжение увеличилась после многократного замораживания и оттаивания.

© Брызгалов Владислав Игоревич – аспирант, e-mail: vladislavbryzgalov@mail.ru.

Буранова Мирра Андреевна – студент Пермского строительного колледжа, e-mail: buranovamirra@gmail.com.

Карпушко Марина Олеговна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: mkarpushko@gmail.com.

Бургонутдинов Альберт Масугутович – доктор технических наук, профессор, e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru.

Золотозубов Дмитрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: dddzet@mail.ru.

Татьянников Даниил Андреевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: danco777@mail.ru.

Vladislav I. Bryzgalov – Postgraduate Student, e-mail: vladislavbryzgalov@mail.ru.

Mirra A. Buranova – Student of Perm Construction College, e-mail: buranovamirra@gmail.com.

Marina O. Karpushko – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: mkarpushko@gmail.com.

Albert M. Burgonutdinov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: burgonutdinov.albert@yandex.ru.

Dmitriy G. Zolotozubov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: dddzet@mail.ru.

Daniil A. Tatiannikov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: danco777@mail.ru.

RESEARCH OF FROST RESISTANCE OF SAMPLES OF GEOSYNTHETIC MATERIALS USED IN HIGHWAY CONSTRUCTION

V.I. Bryzgalov, M.A. Buranova, M.O. Karpushko, A.M. Burgonutdinov,
D.G. Zolotozubov, D.A. Tatiannikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 April 2024
Approved: 22 December 2024
Accepted for publication:
05 March 2025

Keywords:

geosynthetics, woven geotextile,
non-woven geotextile, geogrid,
frost resistance, strength,
freezing, thawing.

ABSTRACT

Geosynthetic materials have been used in highway construction for more than 30 years. Geomaterials belong to a separate class of polymer construction materials, which help to ensure stability and durability of erected objects. The main advantages of using geosynthetics are: reduction of labor and material costs, increased load capacity and longer service life. Application of modern geosynthetic materials is possible in the temperature range from -40°C to $+60^{\circ}\text{C}$, but it should be taken into account that at negative temperatures their extensibility and strength decreases. When materials work in negative temperatures, frost resistance should be taken into account. In this article, the resistance of geosynthetic materials to repeated freezing and thawing was investigated. The tests were carried out in the laboratory of the Department of "Construction Operations and Geotechnics" of Perm National Research Polytechnic University. Four different materials were selected for testing: geotextile nonwoven needle-punched and thermo-calendered (dornit) – 350; geogrid (geogrid) polypropylene SD 100%; geotextile woven fabric TH-20 100% polypropylene; woven geotextile TH 50. The selected test specimens had a width of 200 ± 1 mm, fixation of the material took place in the clamps of the MT-136 testing machine, providing a distance between them of 100 mm. The tested samples were immersed in a container with water with horizontal placement, the water level above the samples corresponded to 15 mm, the temperature of the freezing chamber corresponded to minus $(18\pm 2)^{\circ}\text{C}$ and were subjected to 30 cycles of "freezing – thawing". According to the obtained test results, the frost resistance index was: nonwoven geotextile – 112.5 %; geogrid – 111.8 %, woven geotextile TH 20 – 174.4 %; woven geotextile TH 20 – 81 %.

Введение

Применение геосинтетических материалов впервые началось в 60-е гг. XX в. Рынок геосинтетических материалов включает в себя геотекстиль, геомембраны, геосетки и геоячейки и др. Наибольшим спросом пользуется геотекстиль, объем которого к 2030 г. достигнет 12 млрд долл., темп роста прогнозируется 0,14 % [1].

В настоящее время объем мирового рынка по производству геоматериалов оценивается более чем в 14 млрд долл., а к 2030 г. может достичь 24 млрд долл. Большая часть рынка принадлежит Азиатско-Тихоокеанскому региону, где среднегодовой рост составляет порядка 8 %, а к 2030 г. стоимость рынка может составить 12 млрд долл. Увеличение спроса связано со строительством Китайско-Пакистанского экономического коридора, моста Чжухай-Макао в Гонконге и японской высокоскоростной железной дороги на магнитной подвеске.

Вторым по величине рынком геосинтетических материалов является Северная Америка. Рыночная стоимость рынка в 2030 г. может достигнуть 5 млрд долл., а среднегодовой рост составляет 6 %. Рост рынка связан с реконструкцией дорожной инфраструктуры на территории США.

Объем российского рынка в 2021 г. был оценен в 45,6 млрд руб., что выше на 13,3 % по сравнению с 2019 г. В 2022 г. прирост составил 7,3 %, в 2023 г. – 6,4 %. Наибольшим спросом пользуется георешетка, за 2022 г. объем потребления которой составил 69,8 млн м^2 .

На 2024 г. прогнозируется рост объема производства на 6–7 %, а к 2026 г. ожидается увеличение до 87,8 млн м² [2].

В дорожном строительстве геосинтетические материалы используют для разделения слоев конструкции дорожной одежды, выполняют армирующие и гидроизоляционные функции, обеспечивают устойчивость откосов.

Увеличить срок службы дорожной одежды и межремонтные сроки, снизить затраты на эксплуатацию автомобильной дороги, сократить сроки на строительство, повысить устойчивость покрытий к динамическим и статическим нагрузкам возможно за счет применения тканого геотекстиля, который производится из прочных полипропиленовых нитей на ткацком оборудовании.

Чаще всего, судя по результатам различных исследований [3–8], данный материал используют:

- для армирования слабых оснований при строительстве производственных дорог, аэродромов, нефтегазовых площадок;
- разделения конструктивных слоев дорожной одежды;
- строительства армогрунтовых конструкций;
- укрепления откосов и подходов к искусственным сооружениям.

Исследования, проведенные с целью изучения работы геосинтетических материалов в различных условиях [9–12], подтвердили их высокую эффективность при применении в различных грунтовых условиях.

Нетканый геотекстиль производится из полимерных волокон, соединенных с помощью пробивания или термообработки (рис. 2).

Нетканый геотекстиль используют в качестве разделительного слоя в контакте с грунтом, и он выполняет функции защиты и дренажа или обратного фильтра. Широкое применение материал получил в дорожном строительстве при армировании земляного полотна, а также в гражданском строительстве при возведении фундаментов.

Наибольшее распространение в дорожном строительстве получила георешетка, представляющая собой синтетический полимерный материал с ячеистой структурой, соединенный между собой нитями с помощью склеивания, сплавления или переплетения (рис. 3). Она может укладываться в основании дорожного покрытия, выполняя функции стабилизации и упрочнения, а также в покрытии, что позволяет снизить нагрузки от транспортных средств на нижележащие слои и уменьшить вероятность образования колеи [13–15].

В зависимости от материала изготовления и его свойств георешетки делятся:

- полиэфирные решетки, которые устойчивы к температурным перепадам и к агрессивной среде. Применяются при укладке горячих дорожных покрытий, что позволяет предотвратить разрушение слоя под большими нагрузками от автомобилей;
- стеклянные решетки, изготавливаемые из стекловолокна. Обладают повышенной прочностью, но низкой эластичностью. Применяются для армирования слоев покрытий;
- полипропиленовые решетки, которые обладают нейтральными химическими свойствами, что позволяет использовать в агрессивных средах, и устойчивы к прямым солнечным лучам. Применяются для стабилизации слоев оснований дорожной одежды.

Применение современных геосинтетических материалов возможно в температурном диапазоне от –40 до +60 °С, но следует учитывать, что при отрицательных температурах их относительное удлинение при нагрузке и прочность снижаются. При работе материалов в отрицательных температурах, как показывают исследования других авторов [16–20], следует учитывать морозостойкость геосинтетики.

Методика и средства испытаний

Морозостойкость геосинтетического материала – способность материала во влажном состоянии выдерживать попеременные циклы «замораживания – оттаивания» без потери свойств. Устойчивость геоматериалов к многократному замораживанию и оттаиванию определяется сравнением результатов испытаний на растяжение образцов материала, которые подвергались попеременной заморозке, с образцами материала, не подвергнутого такому воздействию.

Определение показателя морозостойкости геоматериала C_i , %, к воздействию перепада температур выполняется в соответствии с ГОСТ Р 55032-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к многократному замораживанию и оттаиванию» и находится по формуле, %:

$$C_i = \frac{T_{\text{мор}}}{T_0} 100,$$

где $T_{\text{мор}}$ – прочность материала при растяжении после попеременного замораживания и оттаивания, кН/м; T_0 – прочность материала при растяжении, не подвергнутого воздействию, кН/м.

При выполнении испытания необходимо соблюдение следующих условий:

- температура воздуха в помещении 20 ± 2 °С;
- относительная влажность в помещении 65 ± 5 %.

Для выполнения испытания было отобрано 6 образцов четырех разных материалов, из которых три образца на протяжении 30 сут подвергались замораживанию в морозильной камере при температуре минус 18 ± 2 °С в течение 12 ч, затем размораживанию при температуре 20 ± 2 °С в течение 12 ч. Характеристики материалов, используемых для испытаний, представлены в табл. 1.

Ширина отобранных образцов соответствовала 200 мм, длина была подобрана из учета надежной фиксации в зажимах испытательной машины МТ-136 с расстоянием между ними 100 мм. Скорость перемещения активного зажима составила 100 мм/мин.

Таблица 1

Паспортные характеристики геоматериалов

Table 1

Passport characteristics of geomaterials

Показатель	Иглопробивной нетканый геотекстиль	Георешетка СД	Тканый геотек- стиль ТН-20	Тканый геотек- стиль ТН 50
Поверхностная плотность, г/м ²	350	–	120	280
Разрывная нагрузка, кН/м	9	30	20	50
Относительное удлинение при нагрузке, %	50	15	17	20
Коэффициент фильтрации, м/сут	80	–	12,1	40
Размер ячеек, мм	–	35×39	–	–
Морозостойкость (30 циклов), %, не менее	90	90	90	90
Устойчивость к агрессивным средам, %, не менее	90	90	90	90

Результаты испытаний

В начале испытаниям на растяжение был подвержен нетканый материал, разрыв которого происходил в районе зажимов – отчётливо выражена «шейка» (рис. 1). Результаты проведённых испытаний и полученные значения растягивающих усилий приведены на графиках (рис. 2).

Максимальное усилие составило 296 кг, а удлинение 323 мм. Среднее значение прочности образцов при растяжении составило 13,6 кН/м.

На втором этапе была выполнена проверка материала на растяжение после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Максимальное усилие составило 328 кг, а удлинение 387 мм (рис. 3), среднее значение прочности образцов при растяжении составило 15,3 кН/м.

На следующем этапе была определена прочность на разрыв георешетки.

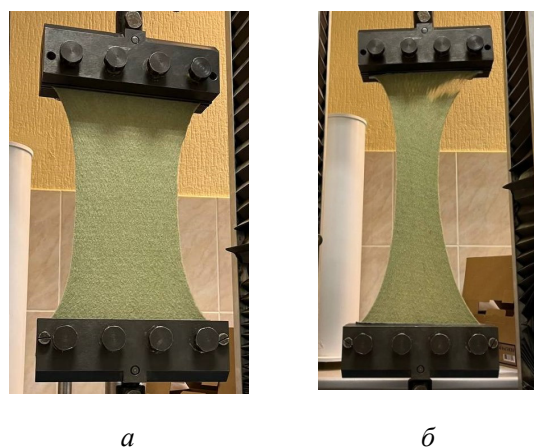


Рис. 1. Испытание нетканого геоматериала. Состояние образца:
a – в середине испытания; *б* – в конце испытания

Fig. 1. Testing of nonwoven geomaterial. Condition of the specimen:
a – in the middle of the test; *б* – at the end of the test

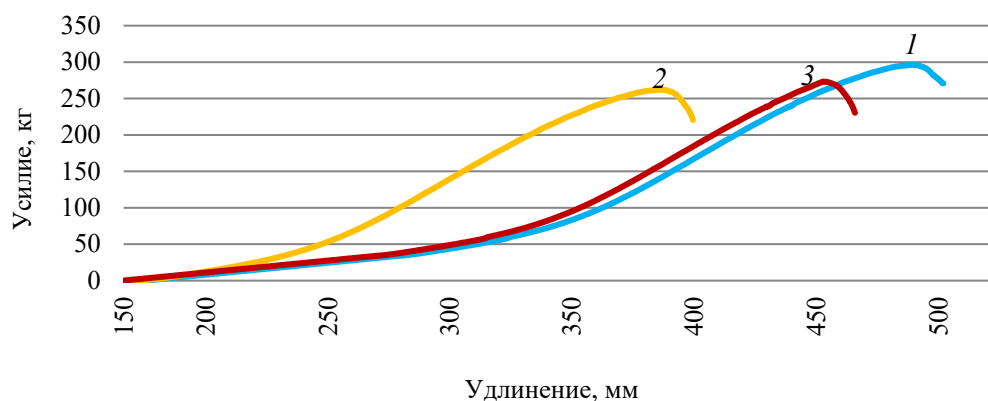


Рис. 2. Графики зависимости растягивающего усилия от удлинения нетканого геоматериала:
1, 2, 3 – номера образцов

Fig. 2. Graphs of dependence of tensile force on elongation of nonwoven geomaterial:
1, 2, 3 – sample numbers

Проведенные испытания показали, что максимальное растягивающее усилие составило 538 кг, максимальное удлинение – 17 мм, среднее значение прочности образцов при растяжении составило 7,6 кН/м (рис. 4).

С георешеткой была также выполнена серия испытаний после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Максимальное усилие составило 625 кг, а удлинение 17 мм (рис. 5), среднее значение прочности образцов при растяжении составило 8,5 кН/м.

На заключительном этапе определение прочности на разрыв происходило на тканых геосинтетических материалах ТН 20 и ТН 50.

Полученные результаты показывают, что максимальное растягивающее усилие составило 261 кг, максимальное удлинение – 32 мм, среднее значение прочности образцов при растяжении составило 12,1 кН/м (рис. 6).

Максимальное усилие после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания геотекстиля составило 603 кг, а удлинение 41 мм (рис. 7), среднее значение прочности образцов при растяжении составило 21,1 кН/м.

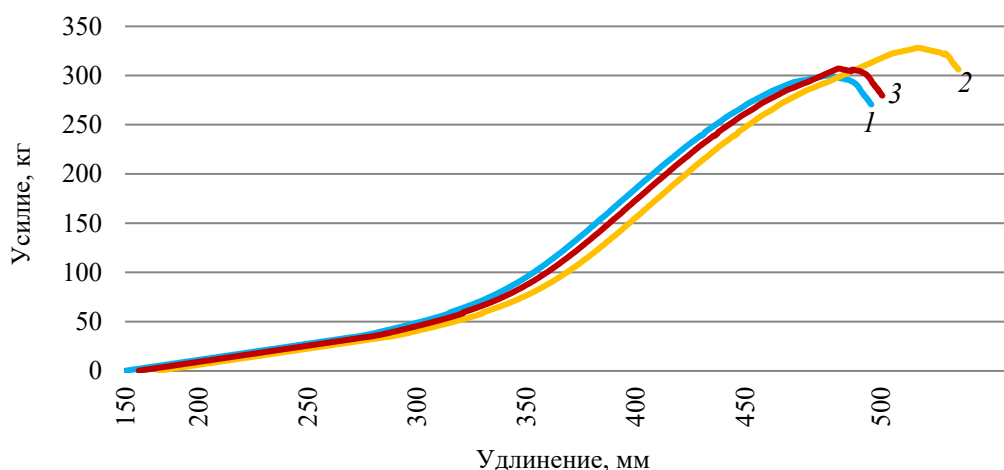


Рис. 3. Графики зависимости растягивающего усилия от удлинения нетканого геоматериала после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания: 1, 2, 3 – номера образцов

Fig. 3. Graphs of dependence of tensile force on elongation of nonwoven geomaterial after 30 cycles of alternate freezing and thawing: 1, 2, 3 – sample numbers

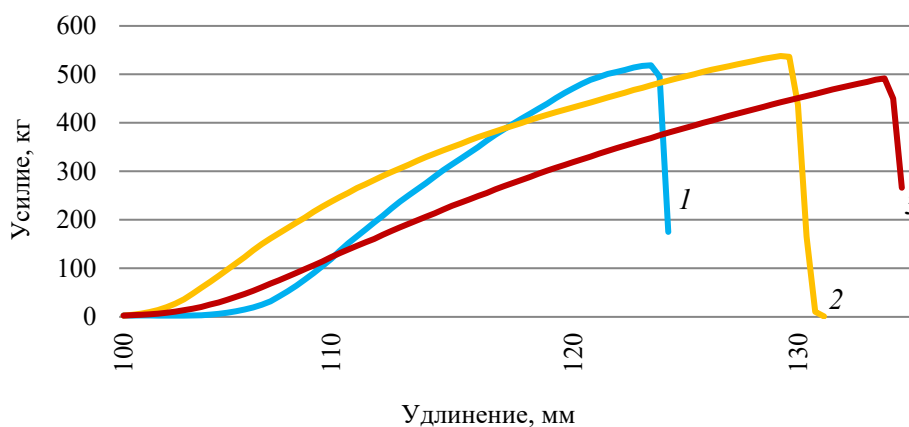


Рис. 4. Графики зависимости растягивающего усилия от удлинения георешетки: 1, 2, 3 – номера образцов

Fig. 4. Graphs of dependence of tensile force on geogrid elongation: 1, 2, 3 – sample numbers

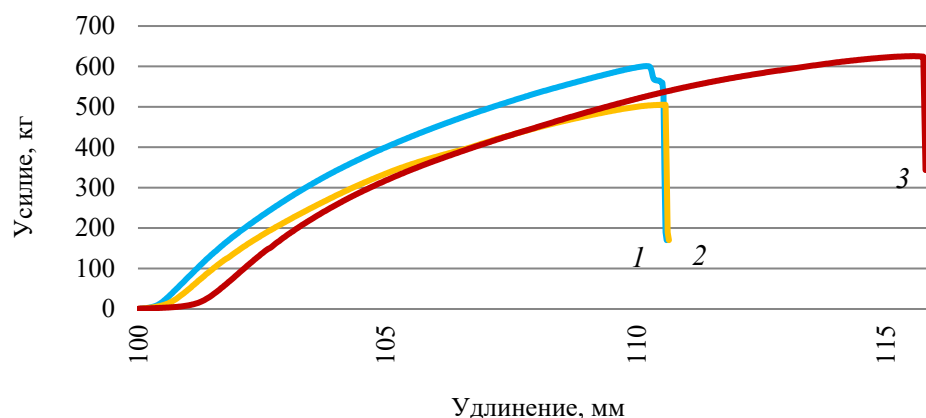


Рис. 5. Графики зависимости растягивающего усилия от удлинения георешетки после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания: 1, 2, 3 – номера образцов

Fig. 5. Graphs of dependence of tensile force on elongation of geogrid after 30 cycles of alternate freezing and thawing: 1, 2, 3 – sample numbers

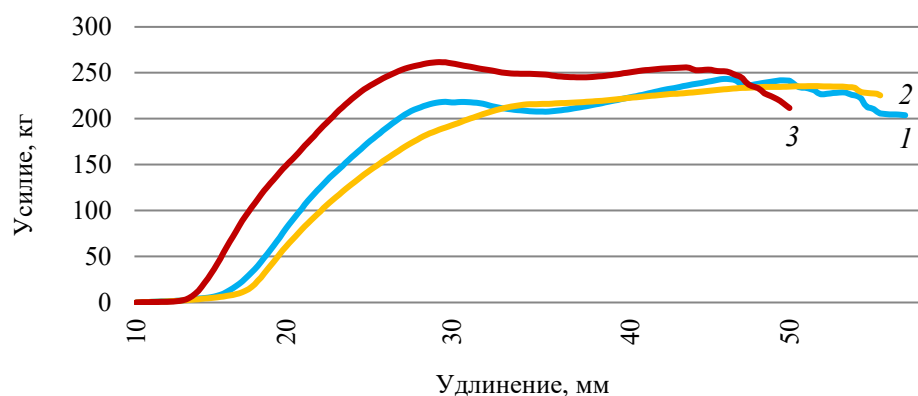


Рис. 6. Графики зависимости растягивающего усилия от удлинения тканого геотекстиля ТН 20: 1, 2, 3 – номера образцов

Fig. 6. Graphs of dependence of tensile force on elongation of woven geotextile TN 20: 1, 2, 3 – sample numbers

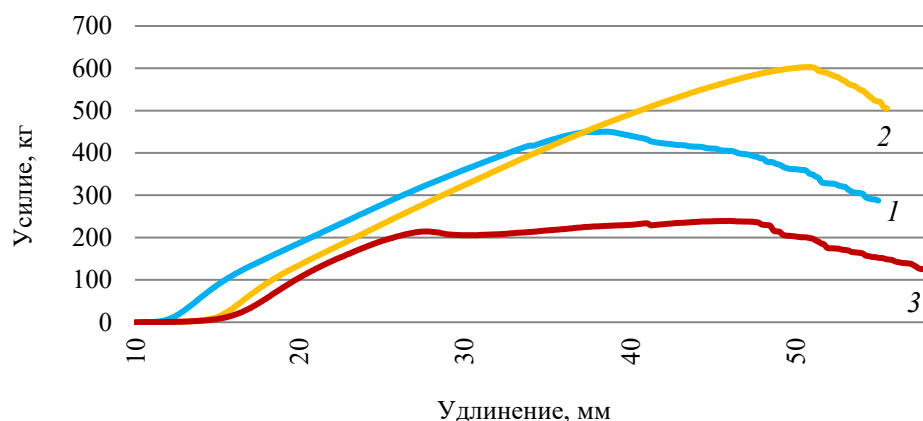


Рис. 7. Графики зависимости растягивающего усилия от удлинения тканого геотекстиля ТН 20 после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания: 1, 2, 3 – номера образцов

Fig. 7. Graphs of dependence of tensile force on elongation of woven geotextile TN 20 after 30 cycles of alternate freezing and thawing: 1, 2, 3 – sample numbers

Для тканого геоматериала ТН 50 были получены следующие результаты:

- максимальное растягивающее усилие – 707 кг,
- максимальное удлинение – 37 мм,
- среднее значение прочности образцов при растяжении составило 30,6 кН/м (рис. 8),
- максимальное усилие после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания 544 кг, удлинение 38 мм (рис. 9), среднее значение прочности образцов при растяжении составило 24,8 кН/м.

Полученные результаты лабораторных испытаний показали, что тканый геотекстиль ТН 50 не является морозостойким и его применение в условиях отрицательных температур невозможно. После 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания показатель морозостойкости составил 81 %.

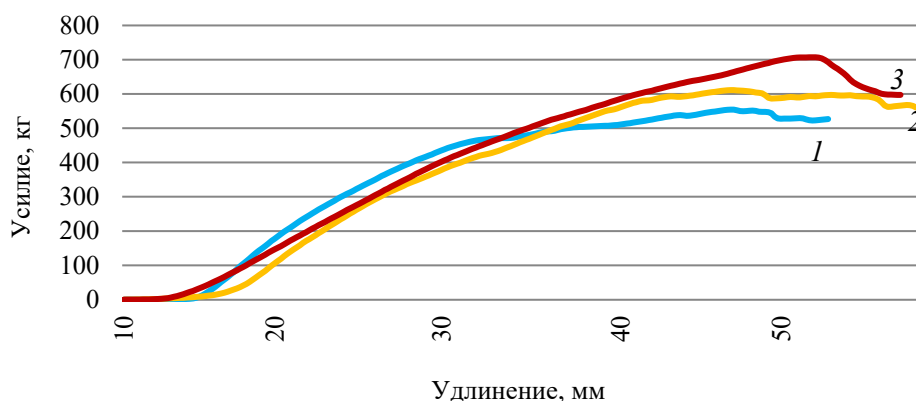


Рис. 8. Графики зависимости растягивающего усилия от удлинения тканого геотекстиля ТН 50: 1, 2, 3 – номера образцов

Fig. 8. Graphs of dependence of tensile force on elongation of woven geotextile TN 50: 1, 2, 3 – sample numbers

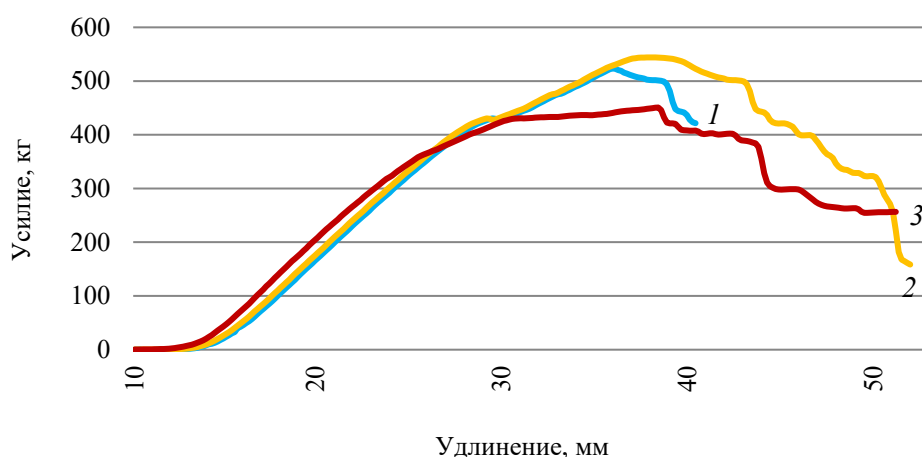


Рис. 9. Графики зависимости растягивающего усилия от удлинения тканого геотекстиля ТН 50 после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания: 1, 2, 3 – номера образцов

Fig. 9. Graphs of dependence of tensile force on elongation of woven geotextile TN 50 after 30 cycles of alternate freezing and thawing: 1, 2, 3 – sample numbers

Все полученные результаты проведенных испытаний были сведены в протокол испытаний на устойчивость к многократному замораживанию и оттаиванию (табл. 2).

Таблица 2

Результаты испытаний

Table 2

Test results

Материал	№ п/п	Максимальное усилие, кг	Прочность образцов при растяжении, кН/м	Среднее значение прочности образ- цов при растяже- нии, кН/м	Показатель морозостой- кости матери- ала, %	
Полотно геотекстильное нетка- ное – 350	1	296	14,5	13,6	112,5	
	2	262	12,9			
	3	273	13,4			
Полотно геотекстильное нетка- ное – 350 после 30 циклов «замо- раживание – оттаивание»	1	300	14,7	15,3		112,5
	2	328	16,1			
	3	307	15,1			
Геосетка полипропиленовая СД	1	519	7,6	7,6	111,8	
	2	538	7,9			
	3	492	7,2			
Геосетка полипропиленовая СД после 30 циклов «заморажива- ние – оттаивание»	1	601	8,8	8,5		111,8
	2	505	7,4			
	3	625	9,2			
Полотно геотекстильное тканое ТН-20	1	243	11,9	12,1	174,4	
	2	235	11,5			
	3	261	12,8			
Полотно геотекстильное тканое ТН-20 после 30 циклов «замора- живание – оттаивание»	1	450	22,1	21,1		174,4
	2	603	29,6			
	3	239	11,72			
Тканый геотекстиль ТН 50	1	554	27,2	30,6	81,0	
	2	611	30,0			
	3	707	34,7			
Тканый геотекстиль ТН 50 после 30 циклов «замораживание – от- таивание»	1	523	25,6	24,8		81,0
	2	544	26,7			
	3	451	22,1			

Заключение

В результате проведенных лабораторных испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные материалы – полотно нетканое геотекстильное – 350, георешетка полипропиленовая СД и полотно геотекстильное тканое ТН 20 – являются морозостойкими материалами и могут беспрепятственно работать в условиях с отрицательными температурами.

2. Показатели морозостойкости составили 112,5; 111,8; 174,4 % соответственно.

3. Значение показателя морозостойкости тканого геотекстиля ТН 50 составило 81 %, что меньше допустимого, равного 90 %.

4. После 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания физико-механические свойства материалов существенно не изменились, что не окажет отрицательного воздействия на прочность и устойчивость конструкции.

5. Прочность при растяжении стала выше после многократного замораживания и оттаивания.

6. Относительное удлинение для нетканого геотекстиля после замораживания и оттаивания выросло на 17%, для георешетки не изменилось, у тканого геотекстиля ТН 20 увеличилось на 22%.

Можно сделать вывод, что полотно нетканое геотекстильное – 350, георешетка полипропиленовая СД и полотно геотекстильное тканое ТН 20 являются морозостойкими материалами, а показатели морозостойкости составил: 112,5, 111,8 174,4 % соответственно. Показатель морозостойкости тканого геотекстиля ТН 50 составил 81 %, что является менее допустимым (90 %). Стоит отметить, что у морозостойких материалов прочность при растяжении стала выше после многократного замораживания и оттаивания. Относительное удлинение для нетканого геотекстиля после замораживания и оттаивания выросло на 17 %, для георешетки не изменилось, у тканого геотекстиля ТН 20 увеличилось на 22 %, а у тканого геотекстиля ТН 50 на 3 %.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Библиографический список

1. Straits research: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://straitsresearch.com/report/geosynthetics-market> (дата обращения: 31.03.2024).
2. Электронное издание компании СИБУР «СИБУР Клиентам»: сайт [Электронный ресурс]. – URL: https://magazine.sibur.ru/publication/trends/geosinteticheskie-materialy-dlya-avtodorog-dostizheniya-i-zadachi/?sphrase_id=1780210 (дата обращения: 31.03.2024).
3. Чельшева, Т.В. Исследование устойчивости геосинтетических материалов к многократному замораживанию и оттаиванию / Т.В. Чельшева // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2019. – С. 76–79.
4. Золотозубов, Д.Г. Исследование влияния прокола на сопротивление разрыву геосинтетических материалов / Д.Г. Золотозубов, О.А. Золотозубова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и Архитектура. – 2014. – № 1. – С. 80–90.
5. Hyeong-Joo, Kim. Introduction to a novel geotextile tube connection construction method: A case study of test site and field application / K. Hyeong-Joo, W. Myoung-Soo, S. Shamsher // Geotextiles and Geomembranes. – 2024. – Vol. 52. – P. 1–9. DOI: 0.1016/j.geotextmem.2024.03.005
6. Татьянников, Д.А. Применение переменного шага армирования геосинтетических материалов в фундаментных подушках из связных грунтов / Д.А. Татьянников // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 126–135. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.10
7. Ponomarev, A.B. Analysis of the performance of sand cushions reinforced with horizontal geosynthetic elements / A.B. Ponomarev, D.A. Tat'yannikov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2020. – Vol. 56, no. 6. – P. 371–377. DOI: 10.1007/s11204-020-09617-8
8. Бургунутдинов, А.М. Исследование работы подпорных конструкций с обратной засыпкой из армированного грунта, а также с использованием обратной засыпки из фиброармированной золы уноса / А.М. Бургунутдинов, К.Р. Истомина, В.И. Клевеко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 3. – С. 15–22. DOI: 10.15593/24111678/2019.03.02

9. Пономарев, А.Б. Анализ изменения прочностных характеристик геосинтетических материалов в процессе эксплуатации / А.Б. Пономарев, В.И. Клевеко, Д.А. Татянников // Научный вестник Воронежского Государственного Архитектурно-Строительного Университета. Строительство и Архитектура. – 2014. – № 3(35). – С. 11–16.
10. Моделирование сезонного промерзания земляного полотна автомобильной дороги / А.М. Бургонутдинов, К.Р. Кашапова, В.И. Клевеко, О.В. Моисеева // Материалы конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе». – 2015. – Т. 1. – С. 346–350.
11. Binquet, J. Bearing capacity tests on reinforced earth slabs / J. Binquet, K.L. Lee // Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE 101 (GT12). – 1975. – P. 1241–1255.
12. Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation / R. Sharma, Q. Chen, M. Abu-Farsakh, S. Yoon // Geotextiles and Geomembranes. – 2009. – Vol. 27. – P. 63–72.
13. Aju, D.E. Constrained vertex optimization and simulation of the unconfined compressive strength of geotextile reinforced soil for flexible pavement foundation construction / D.E. Aju, K.C. Onyelowe, G.U. Alaneme // Cleaner Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 5. – P. 1–21. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100287
14. Золотозубов, Д.Г. Методы определения характеристик сопротивления механическим взаимодействиям геосинтетических материалов / Д.Г. Золотозубов, О.А. Золотозубова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и Архитектура. – 2013. – № 1. – С. 98–103.
15. Готман, Н.З. Проектирование противокарстовой защиты автомобильных дорог с использованием геосинтетических материалов и системы сигнализации / Н.З. Готман, Ю.И. Пантелеев // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 3. – С. 5–14. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.01
16. Лаврентьев, Е.П. Основные тенденции развития технического текстиля в России / Е.П. Лаврентьев // Российский рынок технического текстиля и нетканых материалов. – 2016. – С. 12–25.
17. Ярмолинский, В.А. Оценка опыта применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве Дальнего Востока / В.А. Ярмолинский, И.С. Украинский // Транспортное строительство. – 2012. – № 6. – С. 22–23.
18. Козлов, И.Н. Применение нетканых геосинтетических материалов в конструкциях дорожной одежды автомобильных дорог / И.Н. Козлов, М.В. Таничев // Инженерные и социальные системы – 2020. – С. 79–83.
19. Прокопец, А.С. Способы строительства автомобильных дорог на торфяных грунтах / А.С. Прокопец, И.Л. Бартоломей // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. – 2016. – С. 48–53.
20. Reinforcement of ice crossings with geosynthetic materials / M.O. Karpushko, I.L. Bartolomei, A.A. Trapeznikov, E.N. Karpushko, A.V. Zhidelev // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 992. – P. 118–123.

References

1. Straits research, available at: <https://straitsresearch.com/report/geosynthetics-market> (accessed 31 March 2024).
2. Elektronnoe izdanie-kompanii sibur «SIBUR klientam», available at: https://magazine.sibur.ru/publication/trends/geosinteticheskie-materialy-dlya-avtodorog-dostizheniya-i-zadachi/?sphrase_id=1780210 (accessed: 31 March 2024).

3. Chelysheva T.V. Issledovanie ustoychivosti geosinteticheskikh materialov k mnogokratnomu zamorazhivaniyu i-ottaivaniyu [Study of resistance of geosynthetic materials to multiple freezing and thawing]. *Sovremennye tekhnologii aktualnye voprosy dostizheniya I innovatsii*, 2019, pp. 76-79.
4. Zolotozubov D.G., Zolotozubova O.A. Issledovanie vliyaniya prokola na soprotivlenie razryvu geosinteticheskikh materialov [Research of agency of the puncture on rupture strength of geosynthetic materials]. *Vestnik permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 1, pp 80-90.
5. Hyeong-Joo Kim, Myoung-Soo Won, Shamsher Sadiq. Introduction to a novel geotextile tube connection construction method: A case study of test site and field application. *Geotextiles and Geomembranes*, 2024, Vol. 52, pp. 1-9. DOI: 0.1016/j.geotexmem.2024.03.005.
6. Tatiannikov D.A. Application of variable pitch of reinforcement of geosynthetic materials in foundation pads from continuous soils. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 4, pp. 126-135. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.10.
7. Ponomarev A.B., Tat'yannikov D.A. Analysis of the performance of sand cushions reinforced with horizontal geosynthetic elements. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, vol. 56, iss. 6, pp. 371-377. DOI: 10.1007/s11204-020-09617-8.
8. Burgonutdinov A.M., Istomina K.R., Kleveko V.I. Study of retaining structures with reinforced soil backfill, and fiber reinforced fly ash backfill. *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ehkologiya*, 2019, no. 3, pp.15-22. DOI: 10.15593/24111678/2019.03.02.
9. Ponomarev A.B., Kleveko V.I., Tatiannikov D.A. Analysis of changes in strength characteristics of geosynthetic materials during operation. *Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2014, no. 3(35), pp. 11-16.
10. Burgonutdinov A.M., Kashapova K.R., Kleveko V.I., Moiseeva O.V. Modeling of seasonal freezing of the road bed. *Proceedings of the conference "Modernization and scientific research in the transport complex"*, 2015, vol. 1, pp. 346-350.
11. Binquet J., Lee K.L. Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE 101 (GT12)*, 1975, pp. 1241-1255.
12. Sharma R., Chen Q., Abu-Farsakh M., Yoon S. Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, vol. 27, pp. 63-72.
13. Daniel E. Aju, Kennedy C. Onyelowe, George U. Alaneme. Constrained vertex optimization and simulation of the unconfined compressive strength of geotextile reinforced soil for flexible pavement foundation construction. *Cleaner Engineering and Technology*, 2022, vol. 52, pp. 11-21. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100287.
14. Zolotozubov D.G., Zolotozubova O.A. Metody opredeleniya kharakteristik soprotivleniya mekhanicheskim vzaimodeystviyam geosinteticheskikh materialov [Methods for determination of resistance to mechanical stress geosynthetics]. *Vestnik permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 1. pp 98-103.
15. Gotman N.Z., Panteleev Y.I. The karst protection of highways using geosynthetic materials and alarm systems design. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 5-14. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.01.
16. Lavrentev E. P. Osnovnye tendentsii razvitiya tekhnicheskogo tekstilya v rossii [Main trends in the development of technical textiles in Russia]. *Rossiyskiy rynek tekhnicheskogo tekstilya i-netkanykh-materialov*, 2016, pp 12-25.

17. Yarmolinsky V.A., Ukrainsky I.S. Evaluation of experience in the application of geosynthetic materials in road construction in the Far East. *Transport construction*, 2012, no. 6, pp. 22-23.

18. Kozlov I. N., Tanichev M. V. Primenenie netkanykh geosinteticheskikh materialov v konstruktsiyakh dorozhnoy odezhdy avtomobilnykh dorog [Application of nonwoven geosynthetic materials in highway pavement structures]. *Inzhenernye i sotsialnye sistemy*, 2020, pp. 79-83.

19. Rrokopets A.S. Bartolomey I.L. Sposoby stroitelstva avtomobilnykh dorog na torfyanykh gruntakh [Methods of construction of roads on peat soils]. *Ekologiya i nauchnotekhnicheskii progress urbanistika*, 2016, pp 48-53.

20. Karpushko M.O., Bartolomei I.L., Trapeznikov A.A., Karpushko E.N., Zhidelev A.V. Reinforcement of ice crossings with geosynthetic materials. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 992, pp. 118-123