

УДК 625.12

Апробация методики сдвиговых испытаний геосинтетического композита «КАПЛАМ»

Д. Н. Сомов, И. С. Игошев, А. В. Петряев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сомов Д. Н., Игошев И. С., Петряев А. В. Апробация методики сдвиговых испытаний геосинтетического композита «КАПЛАМ» // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 3. С. 114–127. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-114-127

Аннотация

Цель: исследовать влияние различных методов испытаний на сдвиговые свойства геоматериалов и определить метод испытаний, обеспечивающий наиболее стабильные результаты прочности на сдвиг. Продемонстрировать необходимость включения методики испытаний геосинтетических материалов на сдвиг в государственные стандарты. Определить свойства взаимодействия геосинтетического композита «КАПЛАМ» с грунтом. **Методы:** для проведения испытаний на сдвиг на границе раздела «грунт — геоматериал» с нормальной нагрузкой от 100 до 500 кПа использовалась сдвиговая установка размером 300 × 375 мм. Данные испытания были проведены согласно американскому стандарту ASTM D5321. **Результаты:** полученные в ходе испытаний зависимости позволяют определить методику испытаний, которая дает наиболее значимые результаты по прочности на сдвиг, и понять фундаментальные механизмы, лежащие в основе наблюдаемой прочности на сдвиг. Выявлена необходимость проведения дополнительного изучения данной методики на примере других геосинтетических материалов. **Практическая значимость:** в целом эти результаты имеют важное значение для проектирования откосов железнодорожных насыпей, систем облицовки ИССО и проведения испытаний на прочность на сдвиг. Испытания обеспечивают лучшее моделирование полевых условий и более точное представление о прочности на сдвиг композитных материалов.

Ключевые слова: сдвиг, геокompозит, коэффициент трения, касательное напряжение, нормальное напряжение, деформация

Введение

В качестве гидроизоляционного материала в железнодорожном строительстве часто используются геосинтетики — синтетические материалы, изготовленные из полимерных материалов. Геоматериалы взаимодействуют с почвой, песком, камнями и любыми другими сопутствующими материалами, что приводит к появлению в конструкции множества плоскостей сдвига, которые потенциально могут приводить к потере устойчивости грунтовой конструкции, особенно вдоль склона, что в конечном итоге приведет к его обрушению. В зарубежной литературе общую границу между геосинтетиком и грунтом называют «интерфейсом». Поэтому при проектировании и строительстве необходимо использовать подходящий геосинтетический интерфейс и внутреннюю прочность на сдвиг [1].

Несмотря на важность прочности геосинтетических материалов на сдвиг, методология испытаний до сих пор остается неопределенной. Многие лаборатории

определяют расчетные значения различных показателей взаимодействия геосинтетиков и грунта, используя стандартные схемы испытаний с грунтами в воздушно-сухом состоянии. Исследователи не учитывали важные физические параметры грунта — влажность и плотность. Увеличение/уменьшение значений таких факторов влияет на дилатансию в грунтах, которая характеризуется изменением объема массива грунта при сдвиговой деформации.

Однако в настоящее время в России отсутствует инженерная методика определения характеристик взаимодействия геосинтетиков с грунтом, которая бы показывала изменение характеристик прочности и деформации грунта в условиях совместного использования армирующих элементов с грунтом при различных нагрузках. Наиболее полные такие исследования были проведены Пономаревым [2], который получил коэффициенты трения нескольких видов геоматериалов по грунту.

Из-за отсутствия отечественных регламентов на проведение лабораторных испытаний взаимодействия геосинтетических материалов с грунтом возникает сложность выбора стандартизированной схемы испытания. С целью решения данной проблемы можно использовать американские ASTM D5321 [3], ASTM D6243 [4] и немецкие DIN EN ISO 12957–1 [5], DIN 60009 [6] нормы.

Основная цель данного исследования состояла в том, чтобы изучить с помощью сдвиговой установки влияние различных методик испытаний для определения коэффициентов трения на границах раздела «песок — геосинтетика». Кроме того, важно было определить характеристики грунта, которые дают наиболее значимые результаты по прочности на сдвиг, и понять фундаментальные механизмы, лежащие в основе взаимодействия на границе «грунт — геосинтетический материал».

Экспериментальные материалы и методы

Материалы для проведения испытаний

Для достижения целей данного исследования были использованы грунт и геосинтетическая мембрана, которые образуют важные компоненты интерфейса системы покрытия откосов насыпей в современном железнодорожном строительстве.

В исследовании использовался песок средней крупности. В табл. 1 приведены инженерные свойства грунтов. Гранулометрический состав был определен по ГОСТ 12536-2014 [7] (табл. 1). Также была определена максимальная плотность и оптимальная влажность грунта по ГОСТ 22733-2016 [8] (рис. 1).

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав песка

Более 10 мм	10–5 мм	5–2 мм	2–1 мм	1–0,5 мм	менее 0,5 мм
0 г	10,65 г	21,55 г	63,83 г	132,44 г	272 г
0%	2,13%	4,31%	12,766%	26,488%	54,4%

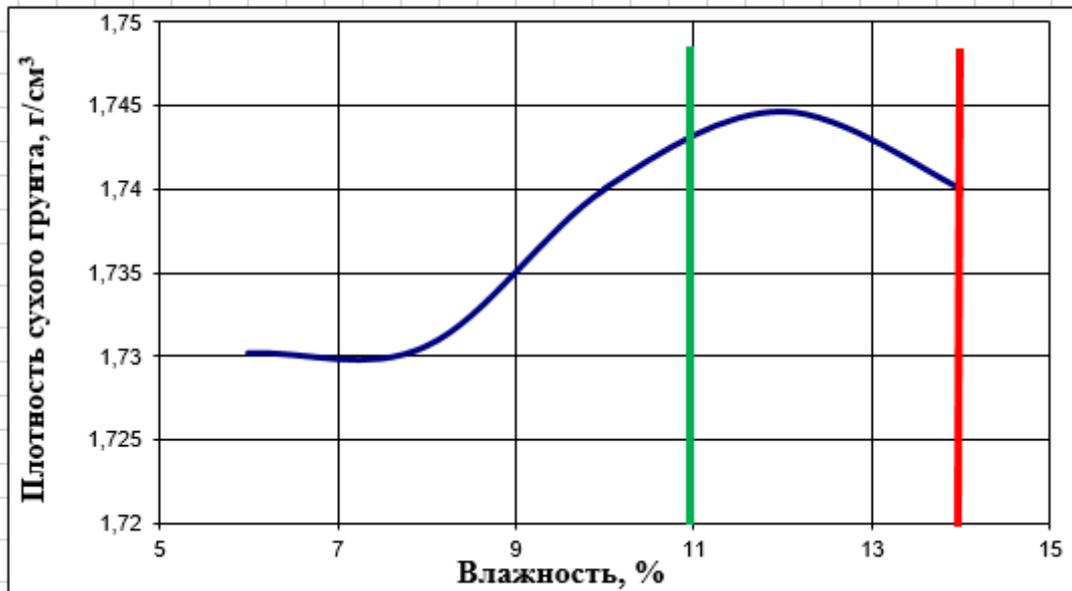


Рис. 1. Определение максимальной плотности и максимальной влажности грунта

В качестве геосинтетического материала в этом исследовании использовался геокompозит гидроизоляционный «КАПЛАМ». Он является гидроизолирующим материалом, представляет собой геокompозит, созданный из тканного полиэтиленового полотна различной прочности и слоя полиэтиленовой ламинации, нанесенного с двух сторон (рис. 2). В табл. 2 приведены основные характеристики геокompозита, предоставленные производителем.

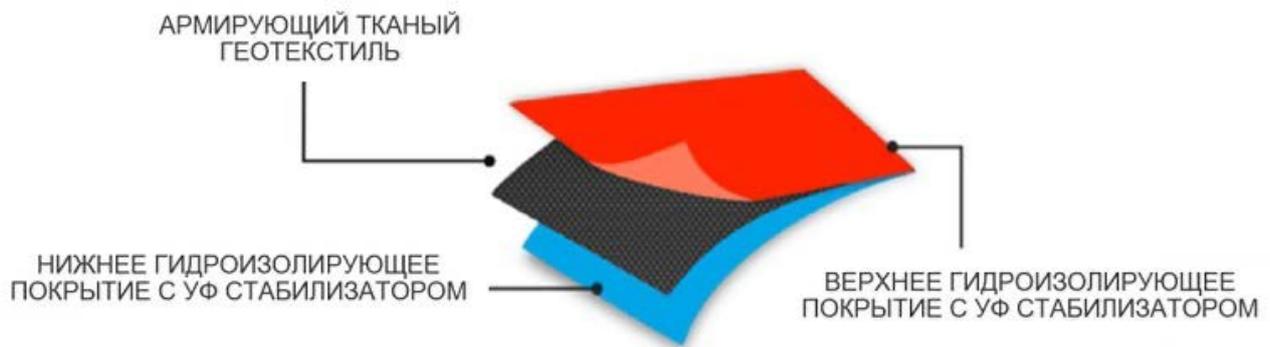


Рис. 2. Геокompозит гидроизоляционный «КАПЛАМ»

(Источник: <https://terratex-geo.uz/geokompозит-gidroizolyacionnyj-kaplam/>)

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические показатели геокompозита гидроизоляционного «КАПЛАМ»

Наименование показателей	Значения
Толщина, мкм	1000
Прочность при растяжении, кН/м, не менее	60

Окончание таблицы 1

Наименование показателей	Значения
Прочность при растяжении поперек, кН/м	900
Стойкость к агрессивным средам, %	80
Стойкость к УФ, %	90
Ширина, м	До 40 м
Длина, м	50, 100

Оборудование для испытаний

Испытания на сдвиг проводились в лаборатории кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса» ПГУПС с использованием отдельностоящего большого аппарата прямого сдвига «Геотек» ГТ 1.2.15, показанного на рис. 3. Оборудование состоит из верхней (неподвижной) срезной коробки с размерами плоскости 300×300 мм и глубиной 75 мм и нижней (подвижной) срезной коробки с размерами плоскости 375×300 мм и глубиной 75 мм.

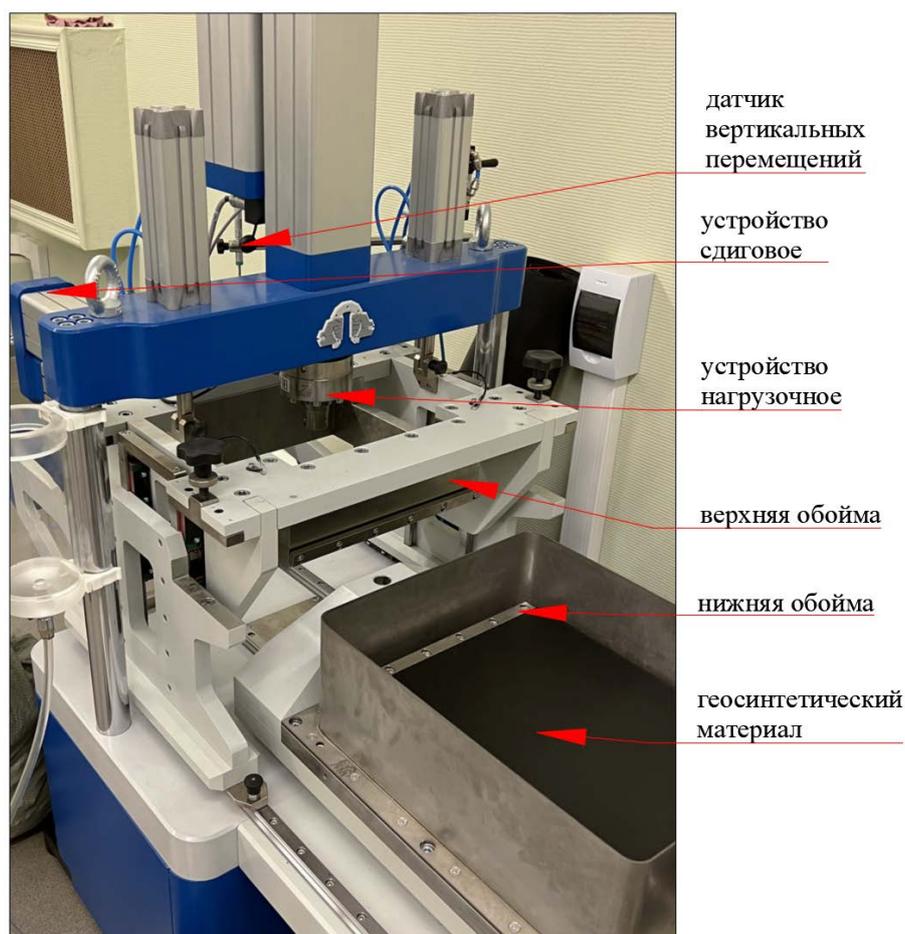


Рис. 3. Установка сдвиговая ГТ 1.2.15 (фото Д. Н. Сомова)

Проведение испытаний

Геосинтетические образцы были произвольно вырезаны из предоставленных рулонов и подобраны по размеру для нижней зоны сдвига. Для нижнего ящика образцы были вырезаны размером 300×375 мм. Испытания проводились при нормальных напряжениях 100, 200, 300, 500 кПа, чтобы отразить различные условия нагрузки.

Для определения прочности на сдвиг границы раздела между грунтом и геосинтетиком образец грунта уплотнялся в нижнем ящике, а образец геосинтетика крепился к нижнему ящику. Конфигурация образца была составлена в соответствии со стандартом ASTM D5321 [3]. Для испытаний системы «грунт — грунт» на сдвиг использовались методы испытаний, указанные в ГОСТ 12248.1 [9].

Последовательность испытания была следующая. На верхний торец образца грунта устанавливается пористый диск (идентичный тому, что установлен в нижней обойме) и верхний штамп. Затем датчики горизонтального и вертикального перемещения фиксируются в держателях винтом. Наконечник датчика горизонтального перемещения упирается в пластину-упор передвижной каретки устройства сдвигового, а наконечник датчика вертикальных перемещений упирается в пластину-упор датчика силы устройства нагрузочного. В процессе испытаний штоки датчиков выдвигаются из корпусов устройств.

Скорость смещения при сдвиге (SDR — Shear Displacement Rate) была установлена на уровне 1 мм/мин [3], период уплотнения грунтов составил 5 минут [9]. Кроме того, предполагалось, что время уплотнения будет достаточным для того, чтобы захватывающие поверхности полностью зацепились за испытуемые образцы. После завершения уплотнения между верхней и нижней коробками сдвига создавался зазор примерно 5–10 мм. Устройство сдвига было откалибровано, и было начато испытание на сдвиг.

В ходе проведения испытания нижняя обойма камеры сдвига перемещалась со скоростью, заданной испытателем, относительно верхней статической камеры сдвига. Вертикальные смещения и реакции на сдвиг фиксировались и сохранялись на компьютере во время фазы сдвига с помощью датчика горизонтальных перемещений и датчика нагрузки соответственно.

Испытания проводились до достижения 10% деформации образца [9].

Результаты испытаний

На рис. 4 представлены результаты испытаний сухого грунта при приложенных нормальных напряжениях 100 и 300 кПа, показывающие взаимосвязь между напряжением сдвига и горизонтальным смещением. Напряжение сдвига при нормальной нагрузке 100 кПа плавно увеличивалось вплоть до достижения пикового значения касательного напряжения. При увеличении нормальной нагрузки в 2 раза поведение частиц грунта изменилось, и они стали перемещаться в нижней обойме

противоположно направлению сдвига, что привело к их быстрому скоплению под геоматериалом и достижению критического напряжения на 15 мм деформации (рис. 5). Данное наблюдение описывает дилатансию в грунтах — перемещение частиц грунтов, сопровождающееся увеличением объема грунтового массива, при сдвиговой нагрузке.

Увлажнение грунтов до оптимальной влажности 11 % позволило снизить скорость перемещения частиц грунта и провести испытания при значениях нормальной нагрузки 300 кПа, 500 кПа. На рис. 6 и 7 показано минимальное увеличение касательного напряжения до 8 % при горизонтальных деформациях 15–30 мм и вертикальных нагрузках до 200 кПа. После достижения 30 мм горизонтальной деформации произошло резкое увеличение роста касательного напряжения — 15–20 %, что объясняется началом активной фазы перемещения частиц грунта с их дальнейшим накоплением под геоматериалом. При нагрузке от 300 кПа данный эффект начинается раньше — от 20 мм сдвига.

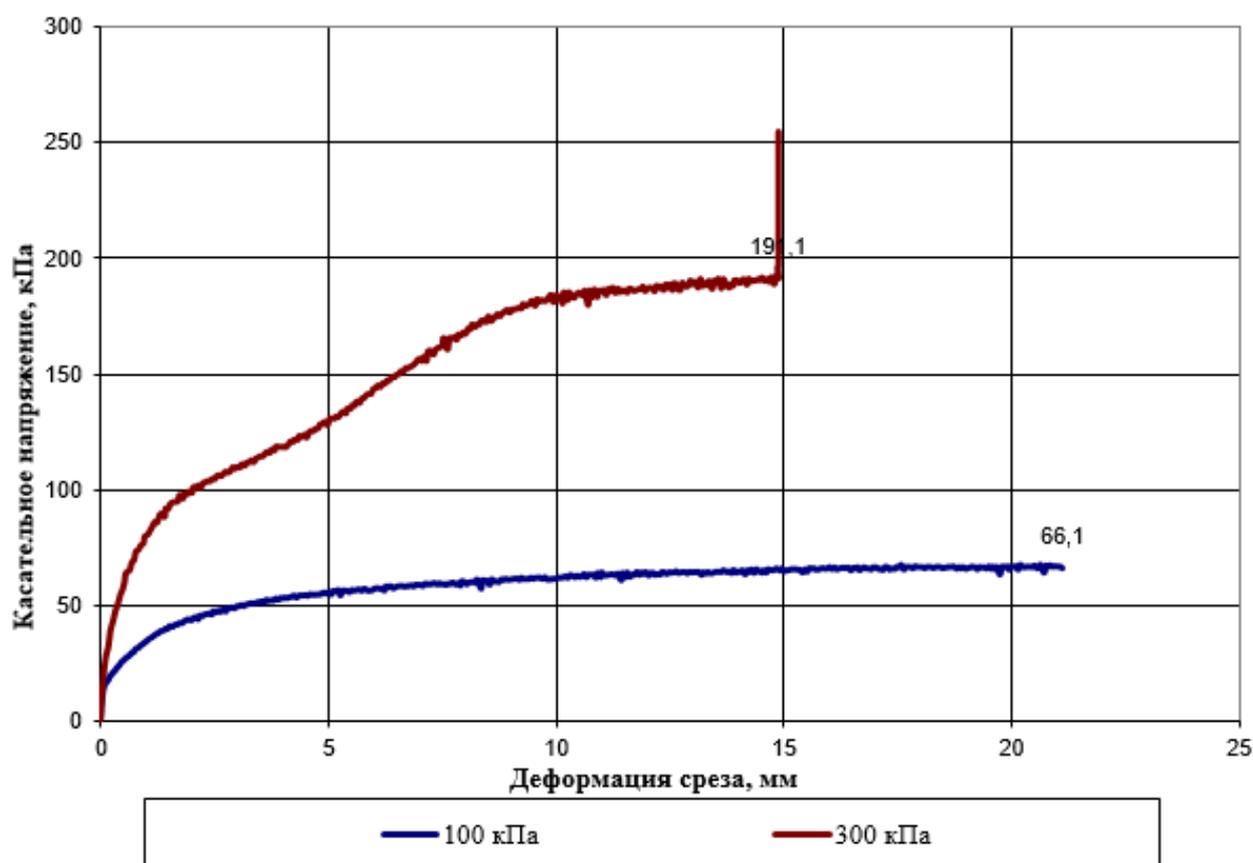


Рис. 4. Результаты сдвиговых испытаний системы «сухой грунт — геоматериал»



Рис. 5. Перемещение частиц грунта (фото Д. Н. Сомова)

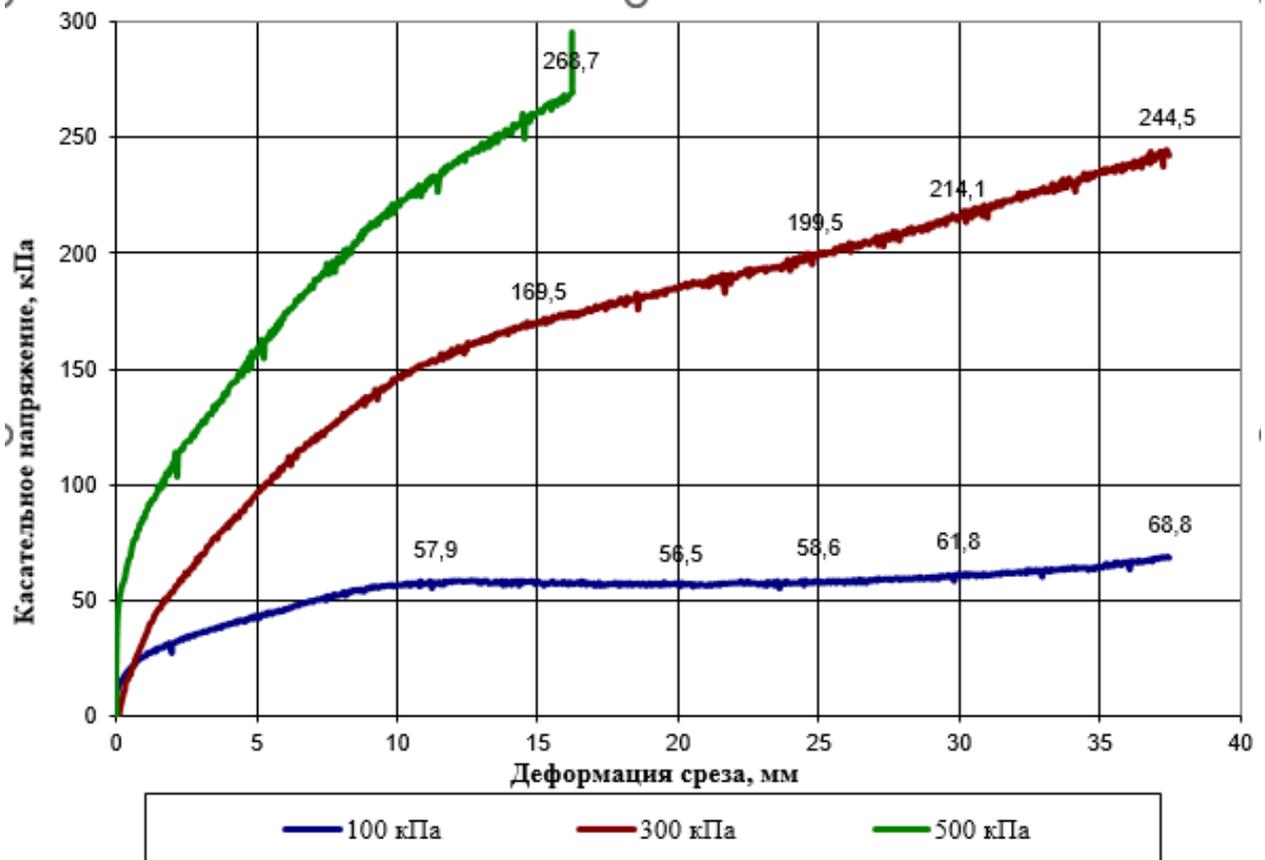


Рис. 6. Результаты сдвиговых испытаний системы «влажный грунт — геоматериал»

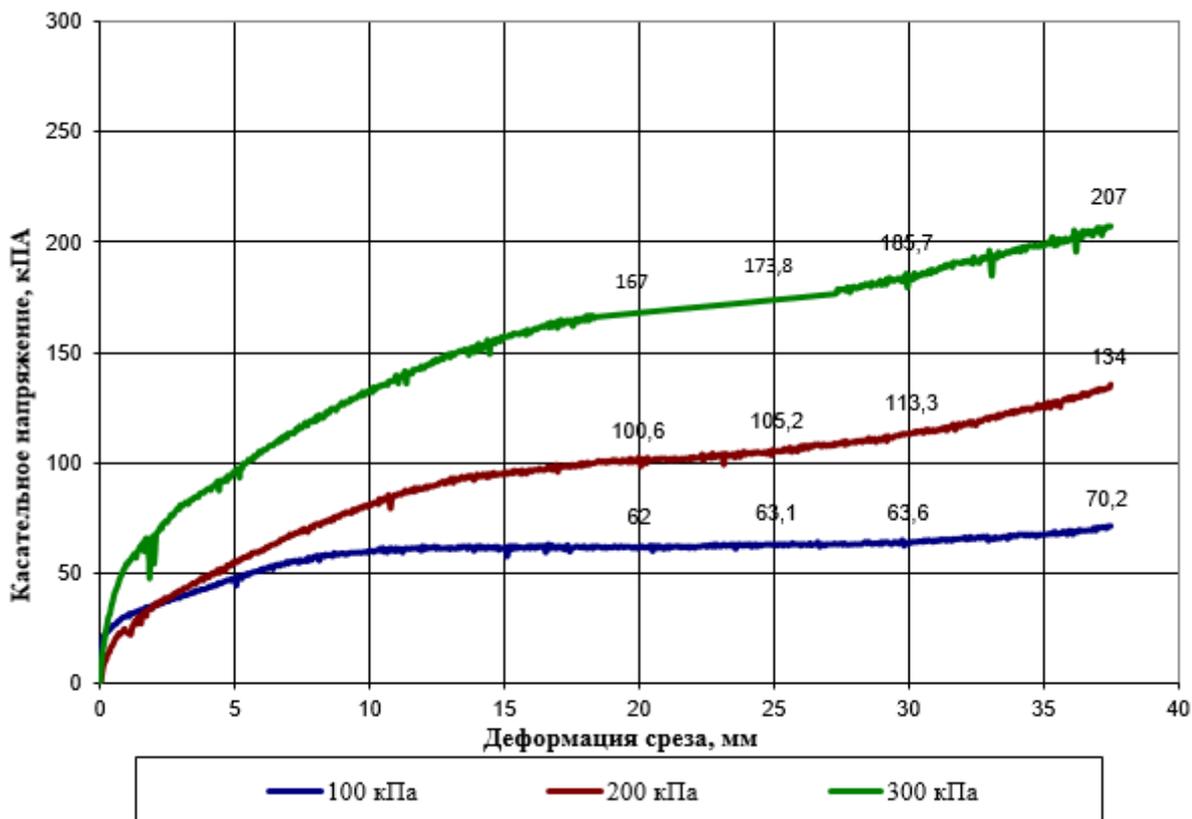


Рис. 7. Результаты сдвиговых испытаний системы «влажный грунт — геоматериал»

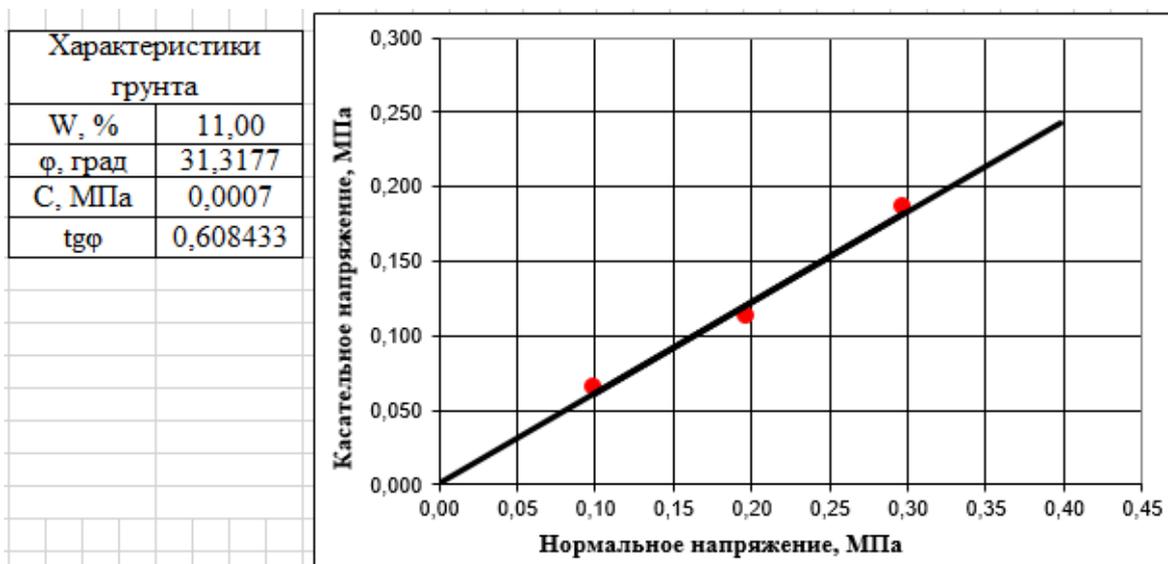


Рис. 8. Характеристики интерфейса «влажный грунт — геоматериал»

Для дополнительной оценки взаимодействия геосинтетического материала с грунтом было проведено испытание «грунт — грунт». Оно проводилось на том же оборудовании, что и испытание системы «грунт — геоматериал». Результаты испытаний представлены на рис. 9 и 10.

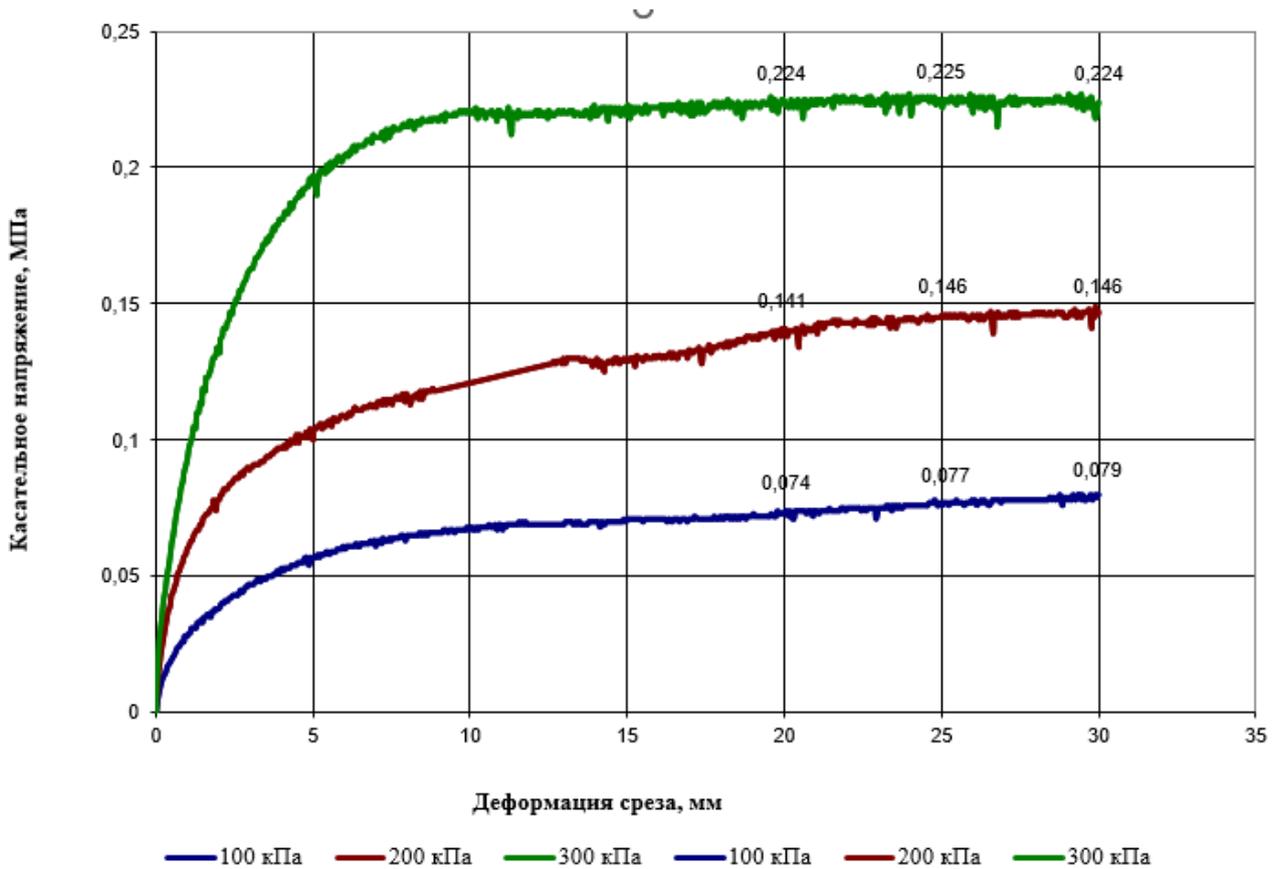


Рис. 9. Результаты сдвиговых испытаний системы «грунт — грунт»

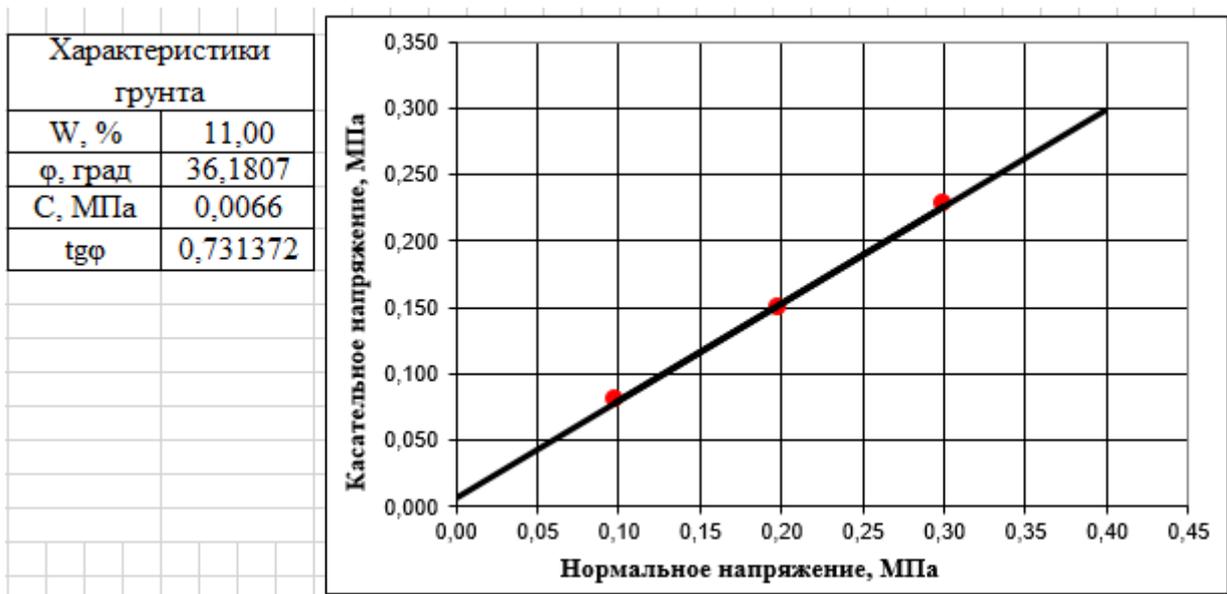


Рис. 10. Характеристики интерфейса «грунт — грунт»

Взаимодействие грунта и геоматериала характеризуется коэффициентом трения сдвига [5], который определяется по формуле:

$$f_g(\sigma) = \frac{\tau^{max}(\sigma)}{\tau_s^{max}(\sigma)}, \quad (1)$$

где $\tau^{max}(\sigma)$ — максимальное касательное напряжение, возникающее при соответствующем нормальном напряжении σ при испытании на сдвиг системы «грунт — геосинтетический материал»; $\tau_s^{max}(\sigma)$ — максимальное касательное напряжение, возникающее при соответствующем нормальном напряжении σ при испытании на сдвиг системы «грунт — грунт».

Полученные значения коэффициента трения на разных точках сдвига показаны на рис. 11. С увеличением вертикальной нагрузки коэффициент взаимодействия между грунтом и геоматериалом увеличивается и продолжает расти вплоть до достижения критического напряжения сдвига. При значениях нормального напряжения больше 100 кПа коэффициент трения увеличивается с ростом деформации сдвига.

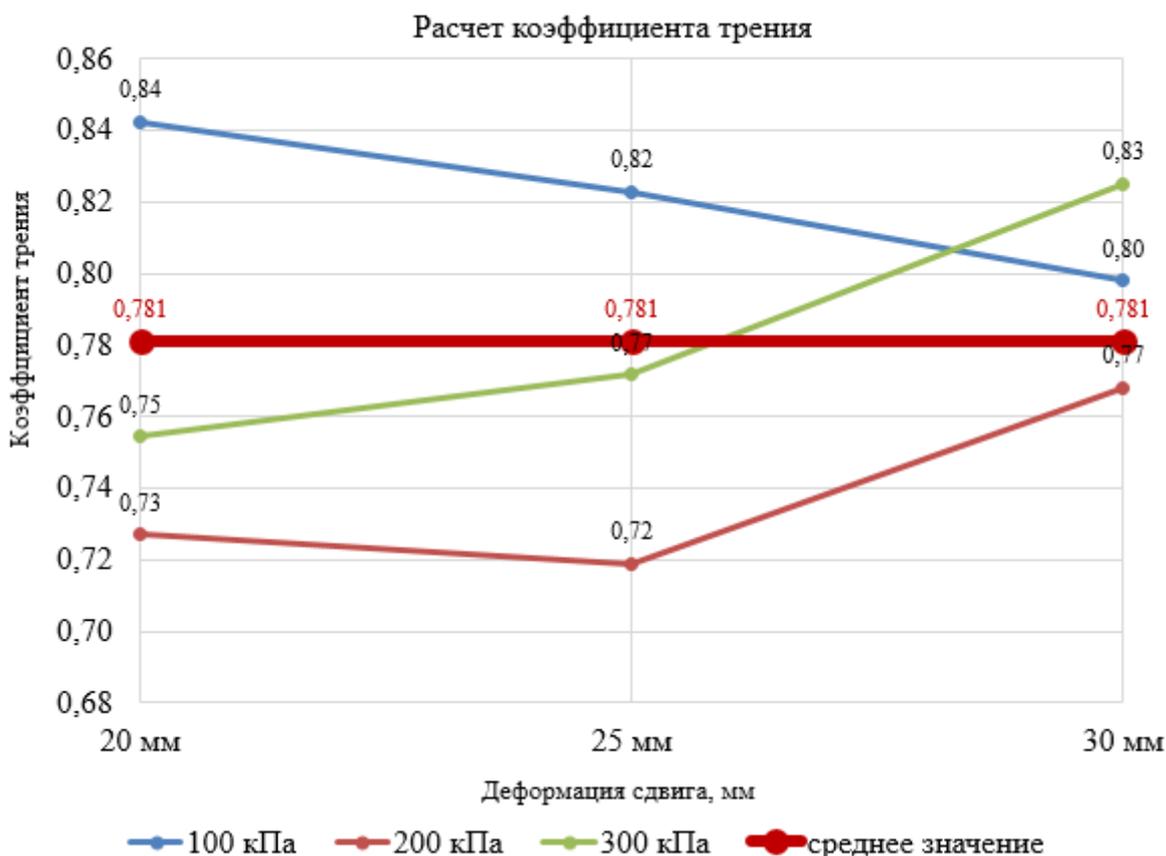


Рис. 11. Расчет коэффициента трения при сдвиге

Коэффициент взаимодействия геосинтетического материала с грунтом может быть рассчитан как отношение коэффициента трения системы «грунт — геоматериал» к коэффициенту трения системы «грунт — грунт». Коэффициенты трения двух систем получаются путем аппроксимации данных испытаний (рис. 8, 10). Итоговая формула имеет вид:

$$f_g = \frac{tg\varphi}{tg\varphi_c}, \quad (2)$$

где $tg\varphi$ — коэффициент трения при испытании на сдвиг системы «грунт — геосинтетический материал»; $tg\varphi_c$ — коэффициент трения при испытании на сдвиг системы «грунт — грунт».

Значение коэффициента трения при сдвиге для исследованного геоматериала определяется из выражения:

$$f_g = \frac{0,608}{0,731} = 0,832.$$

В конечном счете, сравнивая два полученных коэффициента взаимодействия геосинтетика и грунта, можно сделать вывод о том, что коэффициент трения, полученный путем аппроксимации данных сдвиговых испытаний (0,832), отличается от среднего значения коэффициента по трем точкам сдвига (0,781) на величину погрешности аппроксимирующей функции.

Выводы

Серия испытаний на прямой сдвиг с использованием различных конфигураций испытаний была проведена с использованием большого аппарата прямого сдвига ГТ 1.2.15 с размером коробки 300 × 375 мм. По результатам испытаний были сделаны следующие выводы:

1. Скорость перемещения частиц грунта при сдвиге зависит прямо пропорционально от нормальной нагрузки и от деформации сдвига. Но с помощью регулирования влажности можно снизить ее влияние на результаты испытания.

2. Оптимальная точка деформации сдвига для расчета коэффициента трения — 25 мм.

3. Коэффициенты взаимодействия на сдвиг f_g геокомпозита гидроизоляционного «КАПЛАМ» и песка средней крупности зависят от нормальной нагрузки — при повышении нормальной нагрузки коэффициент взаимодействия увеличивается.

4. Угол внутреннего трения грунта и коэффициент трения при сдвиге снижаются на 15 % с введением геокомпозита гидроизоляционного «КАПЛАМ».

Будущие исследования

Поскольку был испытан один тип геосинтетического образца, данные этих результатов ограничены рамками настоящего исследования. Поэтому необходимы дополнительные испытания с использованием других различных типов геосинтетических материалов, чтобы представить полное сравнение испытаний. Кроме того, необходимо провести дополнительные испытания с использованием грунтов различной влажности. Результаты этих тестов следует затем сравнить с соответствующими результатами, полученными в этом исследовании.

Библиографический список

1. Shear Strength of Single and Multi-layer Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing / S. S. Muluti [et al.] // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2023. Vol. 9, no. 33. DOI: 10.1007/s40891-023-00450-1.

2. Татьянников Д. А., Пономарев А. Б., Клевеко В. И. Определение характеристик трения для двух типов геосинтетических материалов путем проведения испытаний на сдвиг // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 1.

3. ASTM D5321. Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.

4. ASTM D6243. Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Resistance of Geosynthetic Clay Liner by the Direct Shear Method

5. DIN EN ISO 12957-1. Geokunststoffe — Bestimmung der Reibungseigenschaften — Teil 1: Scherkastenversuch (ISO 12957-1:2005); Deutsche Fassung EN ISO 12957-1:2005.

6. DIN 60009. Geokunststoffe — Prüfung und Bestimmung des Verbundbeiwerts mit Boden im Herausziehversuch.

7. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

8. ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности.

9. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.

Дата поступления: 07.07.2024

Решение о публикации: 12.08.2024

Контактная информация:

СОМОВ Даниил Николаевич — аспирант, инженер; somovdaniil2000@gmail.com

ИГОШЕВ Иван Сергеевич — аспирант, инженер; ighoshiev2000@mail.ru

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — докт. техн. наук, ст. науч. сотрудник; pgups60@mail.ru

Approbation of the methodology of shear tests of geosynthetic composite “KAPLAM”

D. N. Somov, I. S. Igoshev, A. V. Petryaev

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Somov D. N., Igoshev I. S., Petryaev A. V. Approbation of the methodology of shear tests of geosynthetic composite “KAPLAM” // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 3. P. 114–127. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-03-114-127

Abstract

Purpose: to investigate the effect of different test methods on the shear properties of geomaterials and to determine the test method that provides the most consistent shear strength results. Demonstrate the need to include shear test methods for geosynthetic materials in state standards. Determination of interaction properties of geosynthetic composite “KAPLAM” with soil. **Methods:** a 300×375 mm shear machine was used to perform shear tests at the soil-geomaterial interface with normal loads ranging from 100 to 500 kPa. These tests were performed according to the American standard ASTM D5321. **Results:** the relationships obtained from the tests allow the identification of the test methodology that produces the most significant shear strength results and an understanding of the fundamental mechanisms underlying the observed shear strength. The need for further investigation of this methodology on other geosynthetics is identified. **Practical relevance:** overall, these results have important implications for the design of railway embankment slopes, ISDS lining systems and shear strength testing. The tests provide better modelling of field conditions and a more accurate representation of the shear strength of composite materials.

Keywords: Shear, geocomposite, coefficient of friction, tangential stress, normal stress, deformation

References

1. Shear Strength of Single and Multi-layer Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing / S. S. Muluti [et al.] // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2023. Vol. 9, no. 33. DOI: 10.1007/s40891-023-00450-1.
2. Tat'yannikov D.A., Ponomarev A.B., Kleveko V.I. Opredelenie harakteristik treniya dlya dvuh tipov geosinteticheskikh materialov putem provedeniya ispytaniy na sdvig // Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura. 2014. № 1. (In Russian)
3. ASTM D5321. Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.
4. ASTM D6243. Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Resistance of Geosynthetic Clay Liner by the Direct Shear Method.
5. DIN EN ISO 12957-1. Geokunststoffe — Bestimmung der Reibungseigenschaften — Teil 1: Scherkastenversuch (ISO 12957-1:2005); Deutsche Fassung EN ISO 12957-1:2005.
6. DIN 60009. Geokunststoffe — Prüfung und Bestimmung des Verbundbeiwerts mit Boden im Herausziehversuch.
7. GOST 12536-2014. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava. (In Russian)

8. GOST 22733-2016. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimal'noj plotnosti. (In Russian)

9. GOST 12248.1-2020. Grunty. Opredelenie harakteristik prochnosti metodom odnoploskostonogo sreza. (In Russian)

Received: 07.07.2024

Accepted: 12.08.2024

Author's information:

Daniil N. SOMOV — Postgraduate Student, Engineer; somovdaniil2000@gmail.com

Ivan S. IGOSHEV — Postgraduate Student, Engineer; ighoshiev2000@mail.ru

Andrey V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering, Senior Researcher; pgups60@mail.ru