

UDC 624.138.2
IRSTI 67.13.21
REVIEW ARTICLE

STUDIES OF THE EFFECT OF REINFORCEMENT WITH GEOSYNTHETIC MATERIALS ON THE STRENGTH OF SOILS UNDER CONDITIONS OF TRIAXIAL COMPRESSION AND SINGLE-PLANE SECTION

Zh.K. Kanatova , S.Zh. Jumadilova* , F.B. Temirbekova , I.O. Aliev 

International Educational Corporation, Almaty, 050043, Kazakhstan

Abstract. *The study is a comprehensive analysis of the effect of geosynthetic materials on the strength characteristics of soils under triaxial compression and single plane shear conditions. The triaxial compression method is used to investigate the complex effects on soil specimens, which reflects real conditions and ensures the reliability of the results. The aim of the study is to evaluate the effectiveness of geosynthetic materials as a means of soil reinforcement. Particular attention is paid to analysing changes in the mechanical properties of soils reinforced with different types of geosynthetics compared to unreinforced samples. The study includes laboratory tests, during which the parameters of strength, deformability and stability of soils under different loads and variations of test conditions are evaluated. The results of the study provide important information for specialists in geotechnical design and construction. They help to evaluate the effectiveness of geosynthetic materials in strengthening soil structures under high loads and complex conditions. Additionally, the study includes an analysis of the effect of geogrid on the strength of weak soils, which allows to identify optimal strengthening options and compare their effectiveness. Thus, the study is a relevant contribution to the development of knowledge on the interaction between geosynthetic materials and soil structures, contributes to the optimisation of design and increases the durability of soil structures*

Keywords: *geogrids, sandy soils, geosynthetic materials, triaxial compression method.*

* Corresponding author

Saule Dzhumadilova, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-09>

Received 15 May 2024; Revised 10 July 2024; Accepted 20 August 2024

ӘОЖ 624.138.2
FTAMP 67.13.21
ШОЛУ МАҚАЛАСЫ

ҮШ ОСЬТІ ҚЫСУ ЖӘНЕ БІР ЖАЗЫҚТЫҚТЫ КЕСУ ЖАҒДАЙЫНДА ГЕОСИНТЕТИКАЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРМЕН НЫҒАЙТУДЫҢ ТОПЫРАҚ БЕРІКТІГІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Ж.К. Канатова , С.Ж. Джумадилова* , Ф.Б. Темирбекова , И.О. Алиев 

Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, 050043, Қазақстан

Аңдатпа. Зерттеу үш осьті қысу және бір жазықтықты кесу жағдайында геосинтетикалық материалдардың топырақ беріктігі сипаттамаларына әсерін кешенді талдаудан тұрады. Үш осьті қысу әдісі нақты жағдайларды көрсететін және нәтижелердің дұрыстығын қамтамасыз ететін топырақ үлгілеріне кешенді әсерді зерттеу үшін қолданылады. Зерттеудің мақсаты – топырақты нығайту құралы ретінде геосинтетикалық материалдардың тиімділігін бағалау. Бекітілмеген үлгілермен салыстырғанда геосинтетиканың әртүрлі түрлерімен нығайтылған топырақтың механикалық қасиеттеріндегі өзгерістерді талдауға ерекше назар аударылған. Зерттеу барысында әртүрлі жүктемелер мен сынақ жағдайларының вариациялары кезінде топырақтың беріктігі, деформациясы және тұрақтылығы параметрлері бағаланатын зертханалық сынақтарды жүргізуді қамтиды. Зерттеу нәтижелері геотехникалық жобалау және құрылыс мамандары үшін маңызды ақпаратты ұсынады. Жоғары жүктемелер мен қиын жағдайларда топырақ құрылымдарын нығайтудағы геосинтетикалық материалдардың тиімділігін бағалауға көмектеседі. Сонымен қатар, зерттеу нығайтудың оңтайлы нұсқаларын анықтауға және олардың тиімділігін салыстыруға мүмкіндік беретін геотордың әлсіз топырақтың беріктігіне әсерін талдауды қамтиды. Бұл зерттеу геосинтетикалық материалдар мен топырақ құрылымдарының өзара әрекеттесуі туралы білімді дамытуға өзекті үлес береді, жобалауды оңтайландыруға және геотехникалық тәжірибеде инженерлік құрылымдардың беріктігін арттыруға ықпал етеді.

Түйін сөздер: гео торлар, құмды топырақтар, геосинтетикалық материалдар, үш осьті қысу әдісі.

*Автор-корреспондент

Сауле Джумадилова, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-09>

Алында 15 мамыр 2024; Қайта қаралды 10 шілде 2024; Қабылданды 20 тамыз 2024

УДК 624.138.2

МРНТИ 67.13.21

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АРМИРОВАНИЯ ГЕОСЕНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ПРОЧНОСТЬ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ И ОДНОПЛОСКОСТНОГО СРЕЗА

Ж.К. Канатова , С.Ж. Джумадилова* , Ф.Б. Темирбекова , И.О. Алиев 

Международная образовательная корпорация, Алматы, 050043, Казахстан

Аннотация. Исследование представляет собой комплексный анализ влияния геосинтетических материалов на прочностные характеристики грунтов в условиях трехосного сжатия и одноплоскостного среза. Метод трехосного сжатия используется для исследования комплексного воздействия на грунтовые образцы, что отражает реальные условия и обеспечивает достоверность результатов. Цель исследования заключается в оценке эффективности геосинтетических материалов как средства укрепления грунтов. Особое внимание уделено анализу изменений в механических свойствах грунтов, укрепленных различными типами геосинтетики, по сравнению с неукрепленными образцами. Исследование включает в себя проведение лабораторных испытаний, в ходе которых оцениваются параметры прочности, деформируемости и устойчивости грунтов при действии различных нагрузок и вариаций условий испытания. Результаты исследования представляют собой важную информацию для специалистов в области геотехнического проектирования и строительства. Они помогают оценить эффективность геосинтетических материалов в укреплении грунтовых структур при высоких нагрузках и сложных условиях. Дополнительно, исследование включает анализ влияния геосетки на прочность слабых грунтов, что позволяет выявить оптимальные варианты укрепления и сравнить их эффективность. Данное исследование является актуальным вкладом в развитие знаний о взаимодействии геосинтетических материалов и грунтовых структур, способствует оптимизации проектирования и повышению долговечности инженерных конструкций в геотехнической практике.

Ключевые слова: георешетки, песчаные грунты, геосинтетические материалы, метод трехосного сжатия.

*Автор-корреспондент

Сауле Джумадилова, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-09>

Поступило 15 мая 2024; Пересмотрено 10 июля 2024; Принято 20 августа 2024

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 ВВЕДЕНИЕ

Плохие геологические условия, особенно связанные с наличием слабых грунтов, могут представлять серьезные вызовы для строительных проектов. Слабые грунты, такие как торф, глины или высоковлажные пески, часто характеризуются низкой несущей способностью, что затрудняет строительство устойчивых фундаментов, решением этих проблем обычно включает в себя проведение тщательных геотехнических исследований, разработку инженерных решений, таких как укрепление грунта и использование геосинтетических материалов.

Одним из важных аспектов актуальности исследований геосинтетических материалов является их эффективность в повышении прочности и устойчивости строительных конструкций. Геосинтетики позволяют значительно снизить риски разрушения и повреждения сооружений, таких как дамбы, земляные насыпи, автомобильные и железнодорожные дороги. Исследования позволяют определить оптимальные свойства и параметры геосинтетических материалов, чтобы обеспечить максимальную защиту и долговечность конструкций.

Другой важной сферой исследований является использование геосинтетиков в экологически чувствительных зонах, таких как зоны защиты водных ресурсов и заповедники. Геомембраны и геосетки могут использоваться для создания барьеров, которые предотвращают проникновение загрязненных вод или грунта в водоемы или экологически важные территории.

Таким образом, актуальность исследований геосинтетических материалов в строительстве обусловлена их важными функциями в области укрепления и защиты конструкций, а также потенциалом для создания новых материалов и технологий. Эти исследования позволяют улучшить качество и долговечность строительных проектов, а также сэкономить ресурсы и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Геосетка – геосинтетический плоский полимерный рулонный материал с сетчатой структурой, образованный эластичными рёбрами из высокопрочных пучков нитей, скреплёнными в узлах прошивочной нитью, переплетением, склеиванием, сплавлением или иным способом, с образованием ячеек, размеры которых больше образующих сетку рёбер, обработанных специальными составами для улучшения свойств и повышения их стабильности. Для защиты грунта на склонах от эрозии и осыпания при землеустройстве и строительстве дорог невозможно обойтись без применения геоматериалов. Чаще всего для этой цели используются геосинтетики, они прочны, хорошо удерживают частицы грунта, но не подвержены биоразложению и остаются в грунте десятки и сотни лет, создавая экологические проблемы (Li et al., 2008). Материалы из натурального сырья безопасны для окружающей среды по сравнению с их синтетическими прототипами, так как за несколько лет подвергается полному биоразложению, а сами волокна являются возобновляемым ресурсом. При использовании текстильной сетчатой структуры существенно увеличивается сцепление грунта, поскольку частицы мелкообломочного грунта уплотняются и заклиниваются в ячейках геосеток. При этом образуется устойчивая система геосетка-грунт, т.е. геоконкомпозит, в которой внешняя нагрузка равномерно распределяется по всему объему. (Shukla, 2016)

Геосетка создается из различных материалов и с разным размером ячеек. Вид материала подбирается в зависимости от того, какие задачи необходимо выполнить на том или ином объекте. В отличие от георешеток — трехмерных конструкций — геосетки плоские. Это рулонный материал, удобный в транспортировке и монтаже (Cook, 2003).

Использование геотекстиля и георешеток обладают более высокой прочностью, меньшей массой и лучшим взаимодействием с геосинтетикой, что позволяет сократить объем армирования и использовать меньше материала для насыпей с крутыми склонами, повышая их устойчивость к боковому скольжению и оседанию (Tatlisoz et al., 1998).

Сварные и тканые георешетки, а также более прочные интегральные георешетки обеспечивают лучшую стабилизацию, в то время как геотекстильные материалы и более слабые интегральные георешетки менее эффективны. Деформации связаны с прочностью материа-

лов в поперечном направлении. Необходимо дальнейшее исследование для определения ключевых параметров геосинтетиков в таких условиях (Cuelho et al., 2011).

Геосетки эффективнее для песчаных грунтов с низким содержанием мелких частиц, тогда как геотекстиль предпочтительнее для грунтов с высокой влажностью (Razeghi & Ensani, 2023).

Давление и свойства грунта оказывают существенное влияние на эффективность армирования георешёткой. Гравийные грунты повышают устойчивость прочности, чем песчаные, а увеличение давления влияет на эффект армирования, что подчёркивает необходимость учёта этих факторов при проектировании. (Zakarka et al., 2023).

Маэгава и др. исследовали использование георешёток для защиты от камнепадов. Испытания на насыпях, усиленными георешётками и геоячейками, показывают, что георешётки эффективно смягчают удары валунов, однако инерция катящихся объектов может обеспечить перспективу их движения вверх. (Maegawa et al., 2011).

Тагави и Мосалланезад предложили новую систему «анкерных георешёток», в которой стальные горизонтальные элементы увеличивают мощность, вырывающуюся на 65%, что открывает новые перспективы для руководства земляческих стен. (Taghavi & Mosallanezhad, 2017).

Наконец, Хасен и Аббас отметили, что георешётки снижают осадку фундаментов при землетрясениях, особенно при низких ускорениях, однако их эффективность в насыщенных грунтах ниже, чем в условиях сопротивления (Hasen & Abbas, 2024).

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

3.1 ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С НЕСВЯЗНЫМ ГРУНТОМ

Предметом испытаний являются образцы песка. Образец нарушенного состояния имеет плотность $1,89 \text{ г/см}^3$ и естественная влажность $W=6.719\%$. В соответствии с результатами испытаний на гранулометрический состав, песок представляют собой крупные пески (по ГОСТ 25100). Данные по гранулометрическому составу приведены в [таблице 1](#).

Таблица 1

Гранулометрический состав образца

Размер частиц d, мм	>2	>0,5	>0,25	>0,10	<0,10
Содержание частиц, % по массе	8,62	49,64	28,14	7,37	6,23

В программе испытаний предусмотрено два типа набора образцов, которые отличаются наличием геосеток не только по высоте, но и по торцам образца. Считаем, что при передаче вертикальной нагрузки, по торцам образца могут формироваться касательные напряжения, которые приводят к изменению напряженно-деформированного состояния и приводят к изменению разрушающей нагрузки. Целью исследований является изучение этого фактора.

Образцы нарушенной структуры изготавливаются в лаборатории. Для этого следует подготовить материал песка естественной влажности. Далее следует подготовить песок определенной массы для получения плотности $\rho=1,89 \text{ г/см}^3$. Затем материал уплотняется в разъемной форме высотой 20 см, диаметром 10 см. После готовности образца, разъемная форма извлекается. Впоследствии, образец фиксируется и незамедлительно прикладывается нагрузка ступенями, которая увеличивается с последующим нагружением.

Для подготовки упрочненного геосетками образца применяется вышеуказанная методика. Геосетка используется во время уплотнения в соответствии с программой испытаний в таблице. Тип геосетки подобран с использованием методов физического моделирования под размер образца диаметром $d=10 \text{ см}$. Сетка укладывается в горизонтальном положении, не меняя своей первоначальной формы как показано на [Рисунке 1](#).

Таблица 1

Программа испытаний образцов цилиндрической формы с несвязным грунтом

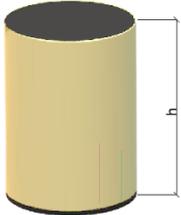
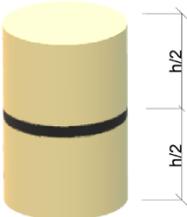
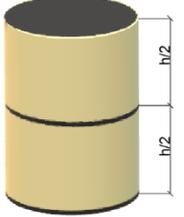
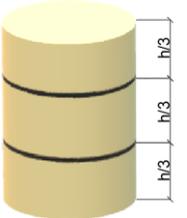
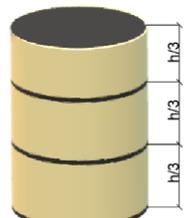
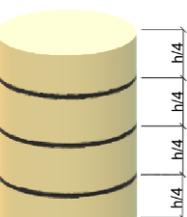
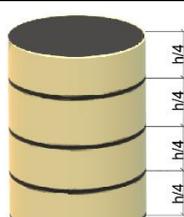
Название образца	Без геосеток по границам	С геосетками по границам
Без геосеток		
С 1 геосеткой		
С 2 геосетками		
С 3 геосетками		

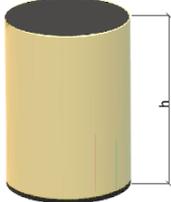
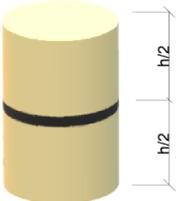
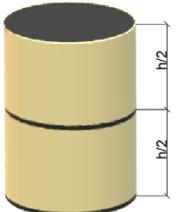
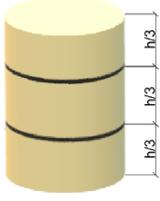
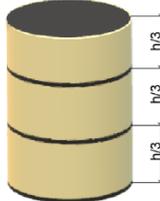


Рисунок 1 – Процесс подготовки образца для испытаний (материал авторов).

3.2 ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СО СВЯЗНЫМ ГРУНТОМ

Таблица 2

Программа испытаний образцов цилиндрической формы с связным грунтом

	Без геосеток по границам	С геосетками по границам
Без геосеток		
С 1 геосеткой		
С 2 геосетками		

Для проведения исследований использовался псевдосвязный материал, которых получен как композит пылеватого песка, веретенного масла и резиновой крошки. Все образцы композитного материала изготавливаются в лаборатории. Для подготовки материала использовали песок пылеватый естественной влажности, резиновая крошка в количестве 10-15% и веретенное масло 8-10% от объема итоговой смеси. Образец нарушенного состояния имеет плотность $1,89 \text{ г/см}^3$ и естественную влажность $w=6.8\%$. В соответствии с результатами испытаний на гранулометрический состав, песок представляют собой пылеватый песок согласно ГОСТ 25100-2011. По гранулометрическому можно понять, что в испытании был использован песок с размерами частиц $d=0.10\text{мм}$. В ходе подготовки образца добавляем в песок резиновую крошку объемом 10% от объема песка. Также добавляем 180мл веретенного масла в подготовленную смесь. Далее следует подготовить песок определенной массы для получения плотности $\rho=1,89\text{г/см}^3$. Затем материал уплотняется в разъемной форме высотой 20 см, диаметром 10 см. После готовности образца, разъемная форма извлекается. Впоследствии, образец фиксируется, и вертикальная нагрузка прикладывается ступенями, до разрушения образца согласно ГОСТ 12248.3-2020.

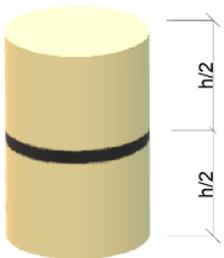
Для подготовки образца упрочненного геосетками применяется аналогичная методика. Геосетка используется во время уплотнения в соответствии с программой испытаний в таблице.

Геосетка для исследований использовалась в упрощенном варианте. Изготавливалась под диаметр образца $d=10\text{см}$. Должна укладываться в горизонтальном положении, не теряя своей формы.

3.3 ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА СДВИГОВОМ ПРИБОРЕ

Таблица 3

Программа испытаний образцов цилиндрической формы в сдвиговом приборе

Вариант, №	1	2
Описание испытаний	Без геосетки	С 1 геосеткой посередине
Иллюстрация		

Сдвиговой прибор (срезающий прибор) используется для определения прочностных характеристик всех видов грунтов, таких как угол внутреннего трения и сцепление. Этот метод является важным в геотехнической инженерии для оценки устойчивости грунтовых массивов и проектирования различных инженерных сооружений. Основные компоненты сдвигового прибора включают срезающую коробку, систему загрузки, механизм сдвига и датчики нагрузки и деформации. Срезающая коробка состоит из двух половин, в которых размещается образец грунта: верхняя половина подвижна относительно нижней. Система загрузки используется для приложения вертикальной нагрузки к образцу, механизм сдвига обеспечивает горизонтальное перемещение верхней половины срезающей коробки относительно нижней, а датчики измеряют вертикальную нагрузку, горизонтальную силу сдвига и деформации образца (Болдырев, Г. Г. 2014)

Процедура испытания согласно программе испытаний (Таблица 3). начинается с отбора проб песчаного грунта с места проведения испытаний и изготовления образцов путем трамбовки или прессования в срезающей коробке. Образец грунта помещается в срезающую коробку и уплотняется для достижения необходимой плотности. Затем к образцу прикладывается вертикальная нагрузка с помощью системы загрузки, моделирующая давление вышележащих слоев грунта. Верхняя половина срезающей коробки начинает перемещаться горизонтально относительно нижней половины с постоянной скоростью, создавая сдвиговое напряжение в образце. В процессе испытания постоянно измеряются вертикальная нагрузка, горизонтальная сила сдвига и деформации образца, а данные фиксируются автоматически при помощи датчиков и регистрирующего устройства. Испытания в кинематическом режиме нагружения позволяют получить параметры, характеризующие пиковую и остаточную прочность грунта (Мирный А. Ю., 2021).

Анализ данных включает построение графиков зависимости касательного напряжения от горизонтальной деформации и определение предельного касательного напряжения, при котором происходит разрушение образца. Из результатов испытаний определяются основные параметры прочности грунта, такие как угол внутреннего трения и сцепление, используя уравнение предельного состояния Мора-Кулона. Испытание сдвиговым прибором является важным инструментом в геотехнической инженерии для определения прочностных характеристик песчаного грунта. Эти данные необходимы для проектирования и строительства различных инженерных сооружений, таких как фундаменты, насыпи, подпорные стенки и другие конструкции, где важна оценка устойчивости грунтовых массивов.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

4.1 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ С НЕСВЯЗАННЫМ МАТЕРИАЛОМ

В первом варианте был испытан образец без использования геосеток. В результате выяснилось, что образец без геосеток способен выдержать груз весом $m=1.85$ кг. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $m=0,76$ кг.

Во втором варианте был испытан образец с использованием одной геосетки посередине. Геосетка размещалась ровно посередине, то есть на высоте $h=10$ см. Разрушающая нагрузка образца составляет $N=2.620$ кг. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=1,93$ кг.

В третьем варианте был испытан образец с использованием двух геосеток. Геосетки были размещены на высоте $h=6,66$ и $h=13,4$. Образец выдержал нагрузку весом $N=3.420$ кг. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=2,69$ кг (Таблицы 4,5).

Таблица 4

Испытание без геосеток по границам (1 испытания)

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	Без георешеток	20	10	1,89	1,85
2	С 1 георешеткой	20	10	1,89	2,62
3	С 2 георешетками	20	10	1,88	3,42
4	С 3 георешетками	20	10	1,88	4,62

Таблица 5

Испытание без геосеток по границам (2 испытания)

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	Без георешеток	20	10	1,72	0,76
2	С 1 георешеткой	20	10	1,83	1,93
3	С 2 георешетками	20	10	1,77	2,69
4	С 3 георешетками	20	10	1,84	3,69

Таблица 6

Испытание с геосетками по границам (1 испытания)

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	С георешеткой сверху и снизу	20	10	1,89	1,85
2	С 1 георешеткой, сверху и снизу	20	10	1,88	2,62
3	С 2 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,85	3,62
4	С 3 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,86	4,62

Таблица 7

Испытание с геосетками по границам (2 испытания)

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	С георешеткой сверху и снизу	20	10	1,70	0,83
2	С 1 георешеткой, сверху и снизу	20	10	1,67	2,31
3	С 2 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,73	3,31
4	С 3 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,89	6,70

В четвертом варианте испытаний был образец с тремя геосетками. Геосетки размещались на высоте $h=5\text{см}$, $h=10\text{см}$, $h=15\text{см}$. Разрушающая нагрузка составляет $N=4,620\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=3,69\text{кг}$.

В пятом варианте испытаний был образец с геосетками по границам, то есть геосетка размещалась снизу и сверху. В результате выяснилось, что образец без геосеток способен выдержать груз весом $N=1,858\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=0,83\text{кг}$

В шестом варианте был испытан образец с геосетками по границам и посередине. Геосетка размещалась снизу образца, на высоте $h=10\text{см}$, также сверху. Образец был разрушен при нагрузке весом $N=2,620\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=2,31\text{кг}$.

В седьмом варианте был испытан образец с использованием двух геосеток и геосеток по границам. Геосетки размещались в том же порядке, что при третьем варианте испытаний. Разрушающая нагрузка составляет $N=3,620\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=3,31\text{кг}$

В последнем, восьмом варианте испытаний был образец с 3 геосетками и геосетками по границам. Геосетки размещались в том же порядке, что и в четвертом варианте испытаний. Образец выдержал нагрузку весом $N=4,620\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=6,70\text{кг}$ (Таблицы 6,7).

В графическом виде результаты испытаний указаны на **Рисунках 2-9**.

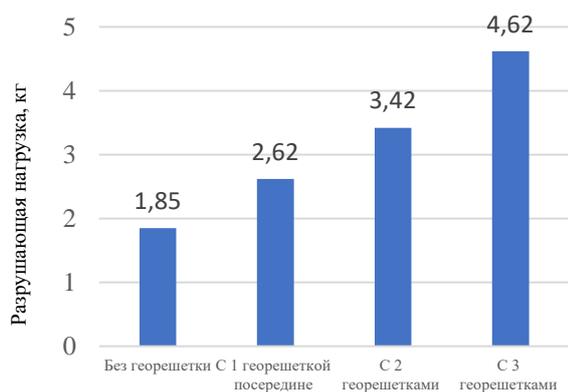


Рисунок 2 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по границам (1- испытания) (материал авторов)

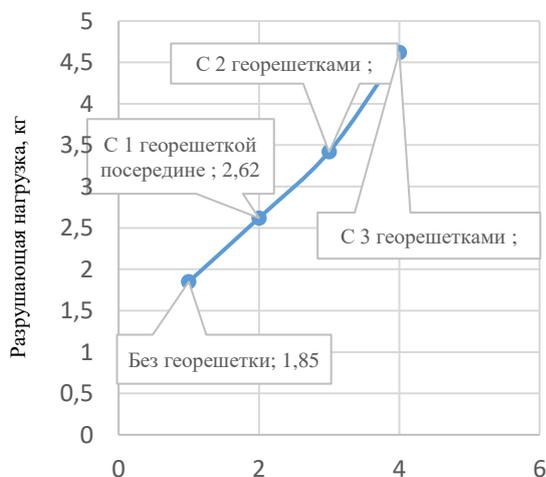


Рисунок 4 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по граница (1 испытания) (материал авторов)

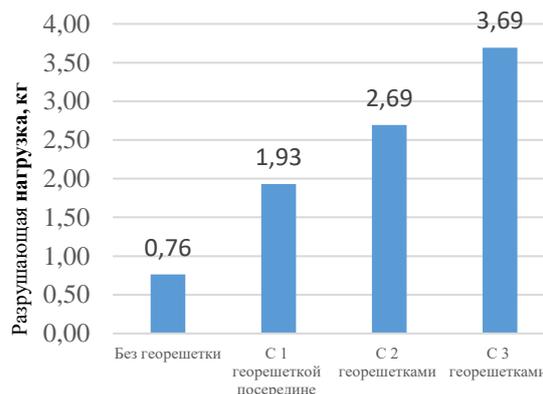


Рисунок 3 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по границам (2 испытания) (материал авторов)

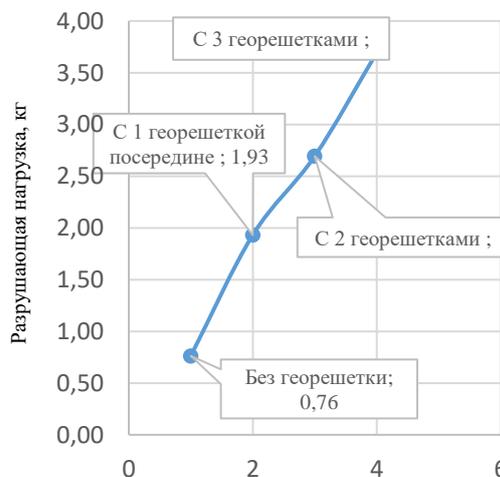


Рисунок 5 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по границам (2 испытания) (материал авторов)

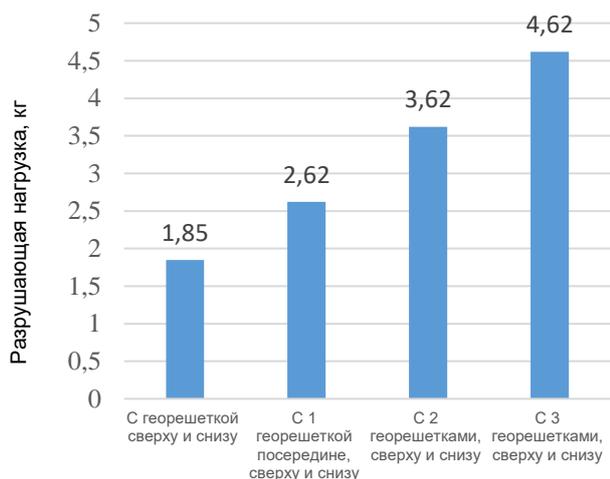


Рисунок 6 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (1 испытания) (материал авторов)

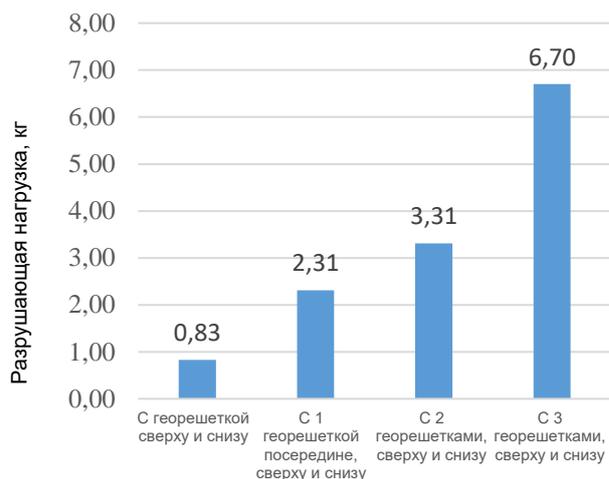


Рисунок 7 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (2 испытания) (материал авторов)

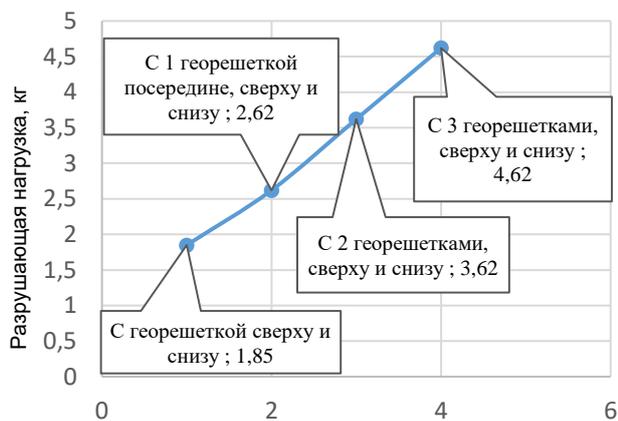


Рисунок 8 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (1 испытания) (материал авторов)

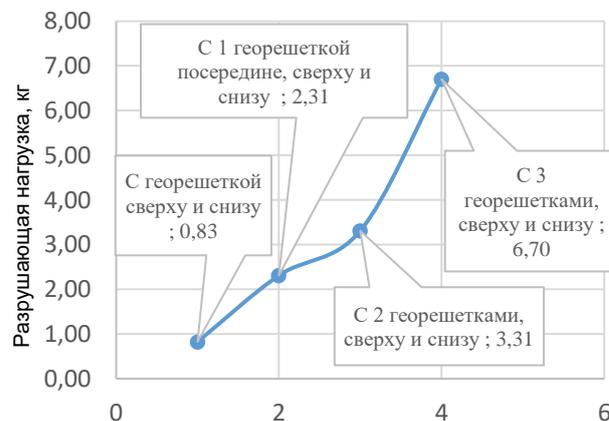


Рисунок 9 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (2 испытания) (материал авторов)

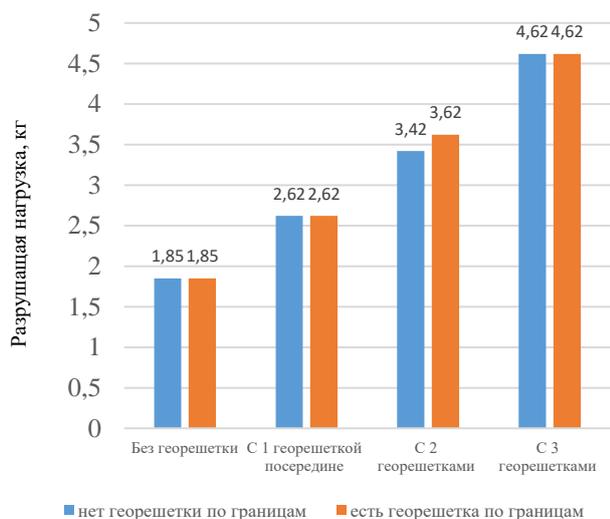


Рисунок 10 – Сравнительный график испытаний с геосетками и без (1 испытания) (материал авторов)

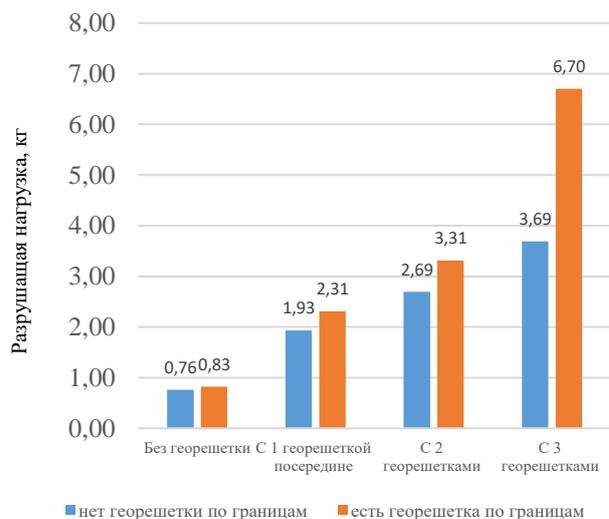


Рисунок 11 – Сравнительный график испытаний с геосетками и без (2 испытания) (материал авторов)

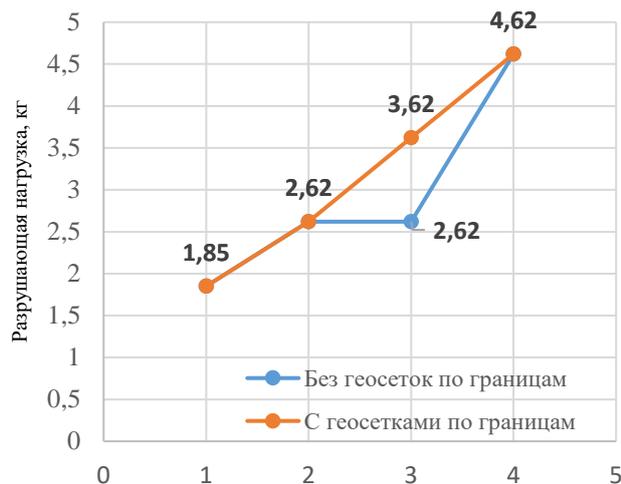


Рисунок 12 – Сравнительный график испытаний с геосетками и без (1 испытания) (материал авторов)

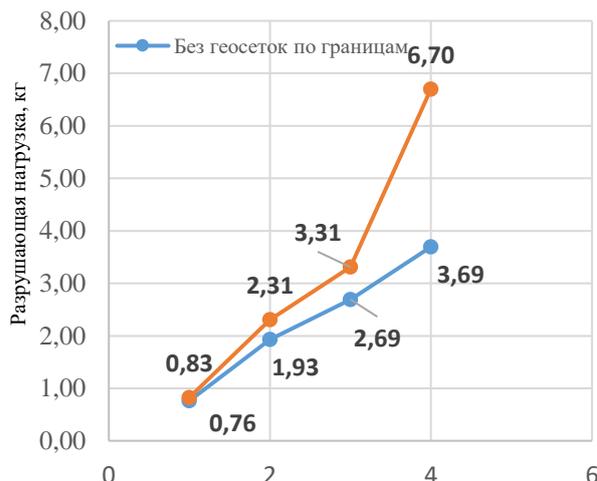


Рисунок 13 – Сравнительный график испытаний с геосетками и без (2 испытания) (материал авторов)

Исследование составляло 8 вариантов испытаний согласно программе. Кратность проведения испытаний составляла не менее два раза. В результате испытаний было выявлено, что при отсутствии геосетки по границам образца прочности повышается на 149,7% в первом варианте, на 385% во втором варианте. Испытания с использованием геосеток по торцам образца показали следующие результаты: в первом варианте процент прочности повышается на 151%, во втором варианте – на 707%. Из чего следует сделать вывод, что благодаря геосеткам по границам процент прочность повышается. Сравнительный анализ в графическом виде представлен на **Рисунках 10-13**.

В ходе испытаний было выявлено, что геосетки играют важную роль в формировании прочности образца. Кроме того, использование геосеток способствует снижению деформативности и разрушению под воздействием вертикальных нагрузок. Присутствие геосетки способствуют более равномерному распределению нагрузки, предотвращая образование колеи и трещин (**Рисунки 14,15**).

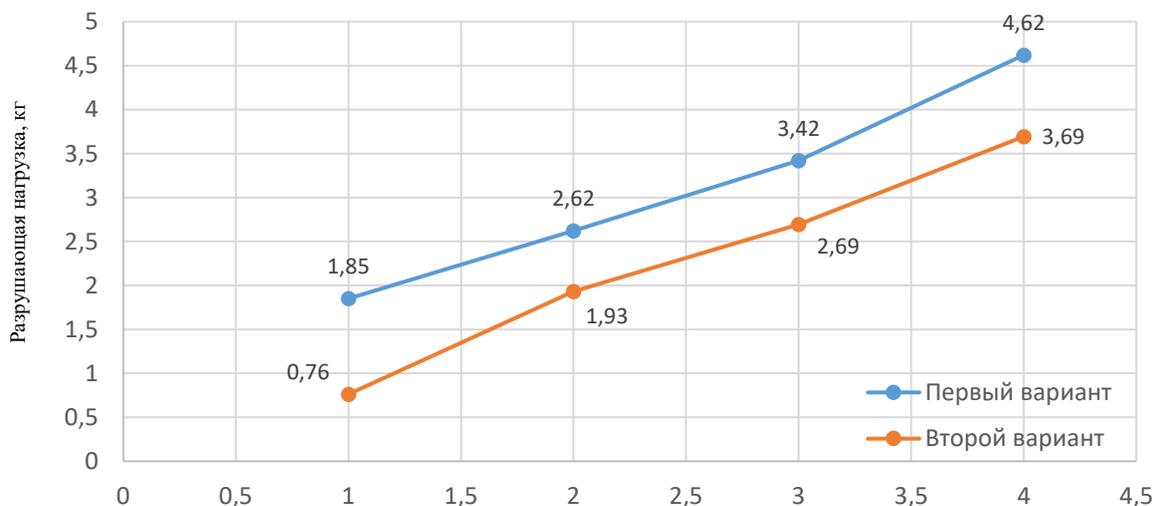


Рисунок 14 – Сравнительный график результатов испытаний двух вариантов без геосеток по границам (материал авторов)

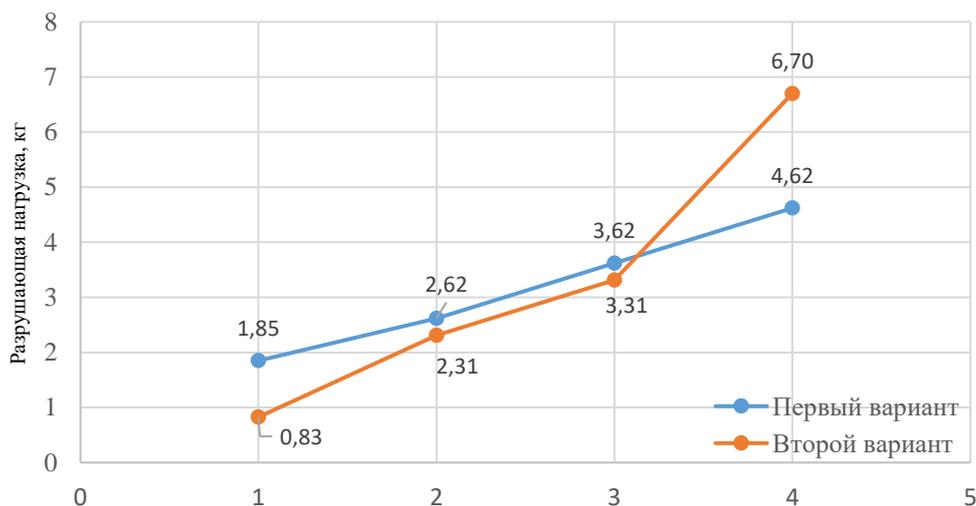


Рисунок 15 – Сравнительный график результатов испытаний двух вариантов с геосеткой по границам (материал авторов)

Результаты испытаний показали, что применение геосеток повышает прочность грунта. В первом испытании без использования геосеток максимальное значение разрушающей нагрузки упрочненного грунта оказалось близким к теоретическому. Из чего можно заключить: применение геосеток в дорожном и гражданском строительстве повышает прочность грунта и способствует применению более эффективных решений в процесс упрочнения грунтов в строительстве.

Данный упрочняющий материал требует дальнейших исследований в применении в гражданском строительстве.

4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СО СВЯЗНЫМ МАТЕРИАЛОМ

В первом варианте был испытан образец без использования геосеток. В результате выяснилось, что образец без геосеток способен выдержать груз весом $N=2,0$ кг (Таблица 10).

Во втором варианте был испытан образец с использованием одной геосетки посередине. Геосетка размещалась ровно посередине, то есть на высоте $h=10$ см. Разрушающая нагрузка образца составляет $N=2,60$ кг (Таблица 10).

В третьем варианте был испытан образец с использованием двух геосеток. Геосетки были размещены на высоте $h=6,66$ и $h=13,4$. Образец выдержал нагрузку весом $N=3,0$ кг (Таблица 10).

В четвертом варианте испытаний был образец с геосетками по границам, то есть геосетка размещалась снизу и сверху. В результате выяснилось, что образец без геосеток способен выдержать груз весом $N=2,0$ кг (Таблица 11).

В пятом варианте был испытан образец с геосетками по границам и посередине. Геосетка размещалась снизу образца, на высоте $h=10$ см, также сверху. Образец был разрушен при нагрузке весом $N=2,70$ кг (Таблица 11).

Таблица 10

Испытание без геосеток по границам

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	Без георешеток	20	10	1,89	2,0
2	С 1 георешеткой посередине	20	10	1,89	2,6
3	С 2 георешетками	20	10	1,88	3,0

Таблица 11

Испытание с геосетками по границам

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	С георешеткой сверху и снизу	20	10	1,89	2,0
2	С 1 георешеткой, сверху и снизу	20	10	1,88	2,7
3	С 2 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,85	3,2

В шестом варианте был испытан образец с использованием двух геосеток и геосеток по границам. Геосетки размещались в том же порядке, что при третьем варианте испытаний. Разрушающая нагрузка составляет $N = 3,2$ кг (Таблица 11). На Рисунках 16 и 17 указаны результаты испытаний в графическом виде.

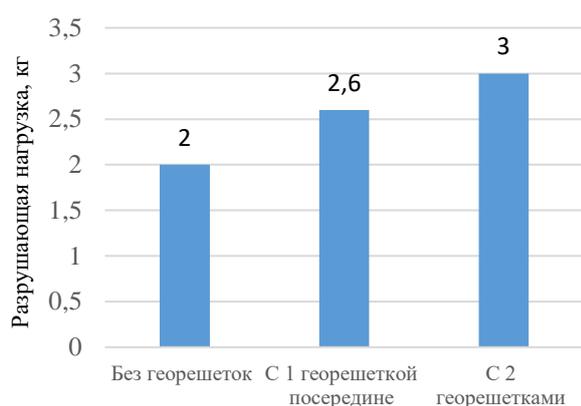


Рисунок 16 - Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по границам (1 испытания) (материал авторов)

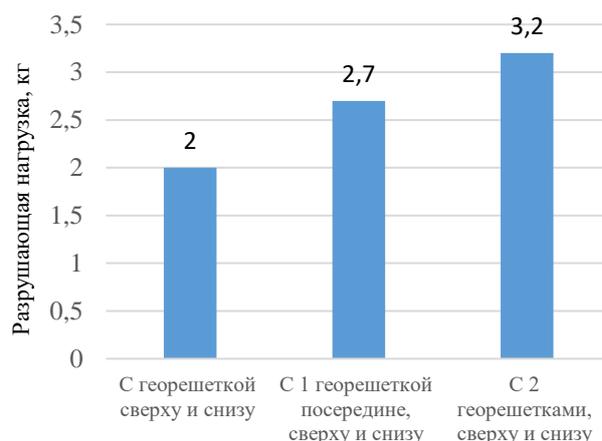


Рисунок 17 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (2 испытания) (материал авторов)

Проведенные исследования показывают, что наличие георешеток по краям конструкции не оказывает значительного влияния на её упрочнение при отсутствии георешеток в середине. При использовании одной георешетки, размещенной в середине конструкции, эффект упрочнения остается минимальным, независимо от наличия георешеток по краям. Существенный рост разрушающей нагрузки (на 15%) наблюдается только при использовании двух георешеток, расположенных в середине конструкции. Таким образом, небольшая разница в упрочнении наблюдается лишь при наличии или отсутствии георешеток по краям, тогда как ключевым фактором является наличие двух георешеток в середине (Рисунок 18)

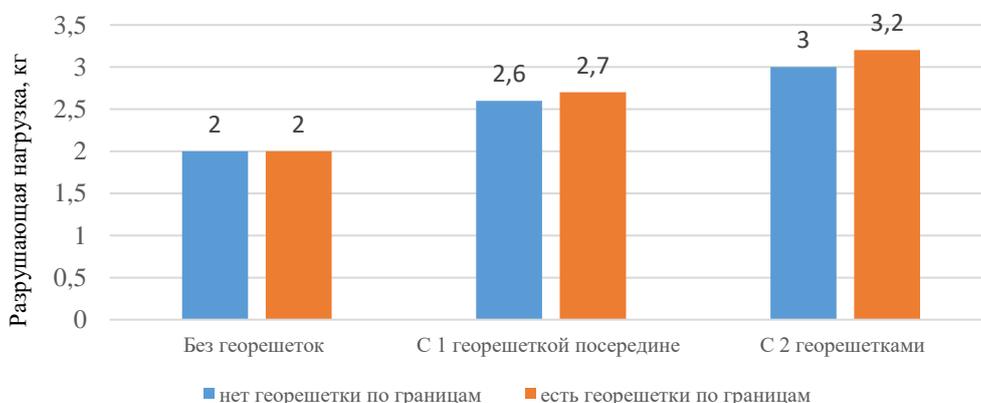


Рисунок 18 – Результаты испытаний: сравнение испытаний без георешеток по границам и с георешетками по границам (материал авторов)

4.3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ НА СДВИГОВОМ ПРИБОРЕ

В испытании используется псевдосвязный грунт, состав которого описан был ранее. Для упрочнения данного образца используется геосетка с ячейками 5x5 мм и размерами в плане не более диаметра испытуемого образца. Исследование составляло 6 вариантов испытаний.

Таблица 12

Результаты испытания на одноплоскостной срез

Описание испытаний	Без геосетки	С одной геосеткой посередине
Угол внутреннего трения, φ (полная)	31,1	29,3
Угол внутреннего трения, φ (остаточная)	32,8	31,2
Сцепление, с кПа (полная)	38,23	17,9
Сцепление, с кПа (остаточная)	28,08	8,33

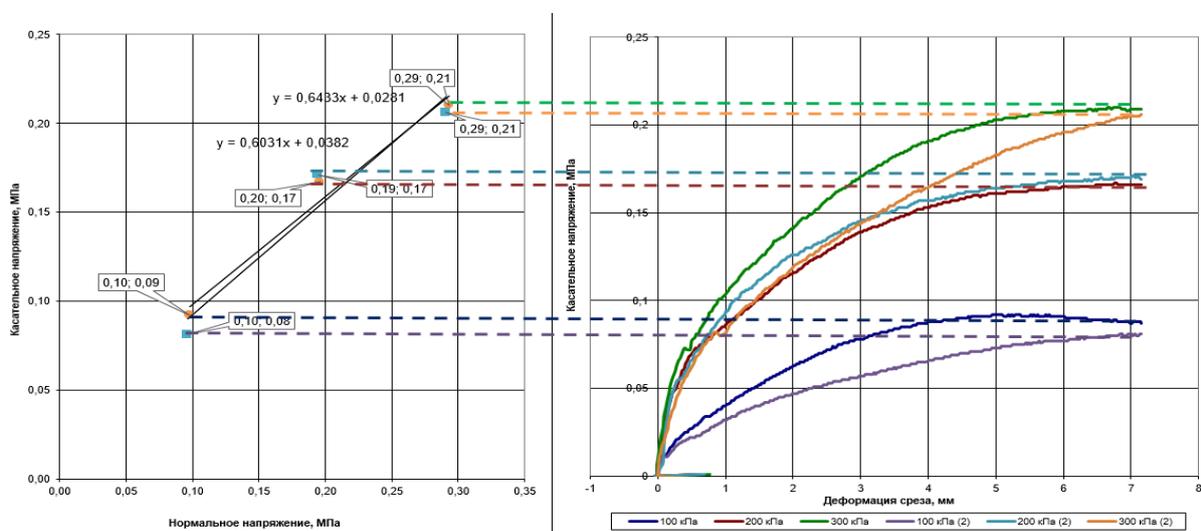


Рисунок 19 – Результаты испытаний на одноплоскостной срез в образце без использования геосеток (материал авторов)

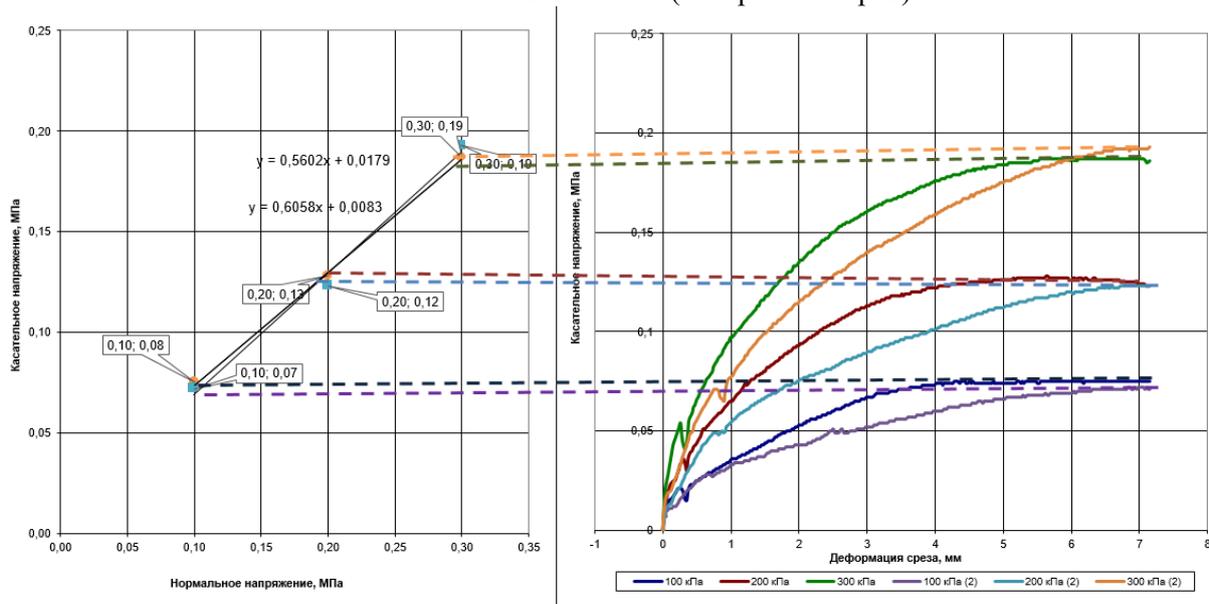


Рисунок 20 – Результаты испытаний на одноплоскостной срез в образце с использованием геосетки (материал авторов)

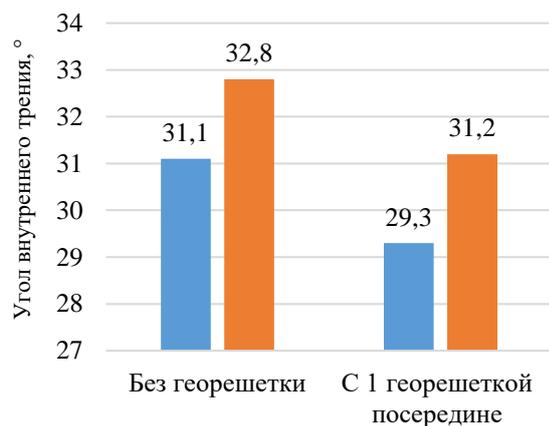


Рисунок 21 – Угол внутреннего трения грунта (материал авторов)

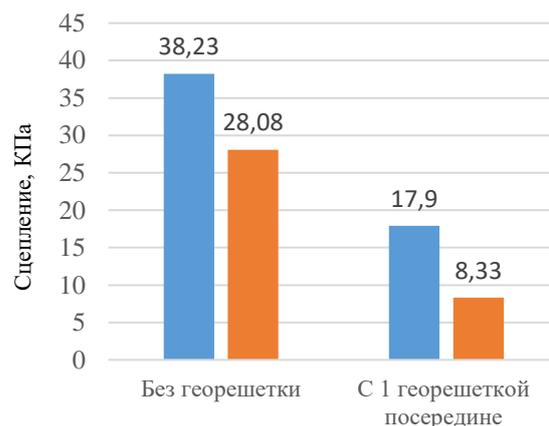


Рисунок 22 – Сцепление грунта (материал авторов)

По результатам испытаний отмечено, что использование 1 геосетки посередине дает разницу в 1,3 раза.

В результате испытаний было выявлено, что без геосетки сцепление и угол внутреннего трения равны $C=38,23$ кПа, $\phi=31,1^\circ$, при использовании геосетки посередине в горизонтальном положении значение сцепления и угла внутреннего трения меняется на $C=17,9$ кПа, $\phi=29,3^\circ$. Такое снижение сопротивления сдвигу закономерно, поскольку в плоскости сдвига присутствует разделительный слой в виде сетки согласно ГОСТ 12248.1-2020.

Данный метод упрочнения основания требует дальнейших исследований в части количества слоев геоматериалов, применяемых для при упрочнении грунта.

5 ВЫВОДЫ

Использование геосинтетических материалов для повышения несущей способности слабых грунтов является перспективным методом, обеспечивающим улучшение прочностных характеристик и снижение деформируемости засыпки. Испытания для рыхлого песка и псевдосвязного грунта показали, что добавление геосеток по границам и их сочетание с внутренними слоями геосеток приводит к улучшению прочности образцов. Наибольший эффект достигается при использовании двух или трёх геосеток, что подтверждает эффективность данного подхода.

В первом испытании на рыхлом песке добавление геосеток по границам показало ограниченный эффект, однако их комбинация с внутренними геосетками значительно увеличила разрушающую нагрузку, особенно при применении трёх геосеток. Во втором испытании прочность также заметно возросла при использовании трёх геосеток, что демонстрирует улучшение свойств грунта за счёт армирования.

Испытания на псевдосвязном грунте показали, что добавление одной геосетки посередине незначительно улучшает прочность образца, тогда как комбинация с геосетками по границам приводит к увеличению разрушающей нагрузки. При использовании двух геосеток внутри и геосеток по границам наблюдалось дальнейшее улучшение прочностных характеристик.

Таким образом, применение геосеток по границам в сочетании с внутренними слоями позволяет достичь значительного повышения прочности, особенно в комбинации с двумя или тремя геосетками. Однако, использование геосеток также сопровождается снижением сцепления и угла внутреннего трения, что требует дальнейших исследований для оптимизации их конструкции и расположения. Это позволит достичь оптимального соотношения между повышением прочности и снижением деформируемости оснований при использовании геосинтетических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shukla, S. K.** (2016). An introduction to geosynthetic engineering. CRC Press/Balkema P.O. Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherlands, pp. 449. <https://doi.org/10.1201/b21582>
2. **Shukla, S.K., Yin, J.H.** (2016). Fundamentals of geosynthetic engineering. Taylor & Francis e-Library, pp. 403. <https://doi.org/10.1201/9781482288445>
3. **Li, G., Chen, Y., Tang, X.** (2008). Geosynthetics in civil and environmental engineering. geosynthetics Asia. Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics in Shanghai, China, 289. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-69313-0>
4. **Cook, D.I.** (2003). Geosynthetics. iSmithers Rapra Publishing, pp. 120 <https://www.google.kz/books/edition/Geosynthetics/59ZTAMX0f0cC?hl=ru&gbpv=0>
5. **G.P.T.M.van Santvoort** (2017). Geosynthetics in Civil Engineering, pp. 116 <https://doi.org/10.1201/9780203753378>
6. **Boldyrev, G.G.** (2014). Methods for determining the mechanical properties of soils [Metody opredeleniya mekhanicheskikh svojstv gruntov] <https://clck.ru/3DNw3m> (In Russ.).
7. **Mirny, A.Y.** (2021). Axisymmetric triaxial compression in the practice of engineering surveys [Ijesimmetrichnoe trekhosnoe szhatie v praktike inzhenernyh izyskanij]. Moscow, Russia. clck.ru/3DTBEr (In Russ.).
8. **Alotaibi, E., Omar, M., Shanableh, A., Zeiada, W., Fattah, M.Y., Tahmaz, A., Arab, M.G.** (2021). Geogrid bridging over existing shallow flexible PVC buried pipe – Experimental study. Tunnelling and Underground Space Technology, 113. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103945>
9. **Cuelho, E.V., Perkins, S.W., Maubeuge, K.** (2011). Full-scale field study of geosynthetics used as subgrade stabilization. Advances in Geotechnical Engineering, [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)481](https://doi.org/10.1061/41165(397)481)
10. **Hasen, N.A., Abbas, J.K.** (2024). Experimental study of shallow foundation settlement under dynamic load in reinforced sandy soil. Proceedings on Engineering Sciences, 6 (1). <https://doi.org/10.24874/PES06.01.019>
11. **Maegawa, K., Yokota, T., Van, P T.** (2011). Experiments on rockfall protection embankments with geogrids and cushions. International Journal of GEOMATE, 1 (1), 19-24. <https://doi.org/10.21660/2011.1e>
12. **Razeghi, H.R., Ensani, A.** (2023). Clayey sand soil interactions with geogrids and geotextiles using large-scale direct shear tests. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 9 (2). <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00443-0>
13. **Sadat Taghavi, S.H., Mosallanezhad, M.** (2017). Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems. Canadian Geotechnical Journal, 54 (5). <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0365>
14. **Tatliso, N., Edil, T.B., Benson, C.H.** (1998). Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124 (11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1998\)124:11\(1109\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1998)124:11(1109))
15. **Zakarka, M., Skuodis, Š., Dirgėlienė, N.** (2023). Triaxial test of coarse-grained soils reinforced with one layer of geogrid. Applied Sciences (Switzerland), 13 (22). <https://doi.org/10.3390/app132212480>
16. **Zhao, Y., Xu, D., Liu, H.** (2018). Study of interaction behavior between geogrids and sand with simple shear test. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2016.0687>