

УДК: 624.131.37
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.2
EDN: ANQRMZ



Характеристики взаимодействия геосинтетического материала с песчаным грунтом при испытании на вытягивание

М.С. Казаков¹, В.Г. Офрихтер¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Армирование грунтов широко используется в современном строительстве. При проектировании геотехнических сооружений из грунта, армированного геосинтетическими материалами, требуется количественная оценка взаимодействия армирующих элементов с грунтом. Такое взаимодействие характеризуется контактными характеристиками, а именно углом трения и адгезией на контакте геосинтетического материала с грунтом. На сегодняшний день характеристики взаимодействия в большинстве случаев принимаются по таблицам и рекомендациям нормативных документов. В Российской Федерации не применяется на практике использование характеристик взаимодействия, полученных в результате лабораторных испытаний, несмотря на то что действует национальный стандарт, в котором изложены методика и требования к оборудованию для проведения лабораторных испытаний по определению этих характеристик.

Цель работы заключается в исследовании контактных характеристик, полученных в ходе проведения испытаний на вытягивание геосинтетического материала из грунта по методике, изложенной в нормативной документации. Выполненный комплекс работ: конструирование и изготовление установки для испытаний на вытягивание геосинтетика из грунта; определение характеристик вытягивания геосинтетического материала из грунта; анализ полученных результатов; исследование механизма работы армирующего геосинтетического элемента в грунте в процессе вытягивания.

Результаты. В статье представлены результаты испытаний на вытягивание тканого геосинтетического материала из песчаного грунта по методике национального стандарта. Значения коэффициентов трения, принимаемые по рекомендациям нормативных документов, превышают результаты экспериментальных значений, полученных при выполнении настоящих исследований на 40-70%. В процессе вытягивания выявлены и детально описаны три характерных стадии поведения армирования.

По результатам проведенных исследований составлены рекомендации по проведению испытаний на вытягивание тканого геосинтетического материала.

Выводы. Результаты исследования играют важную роль в проектировании и расчете армогрунтовых сооружений. Контактные характеристики взаимодействия грунта с армирующим материалом, полученные при испытаниях на вытягивание геосинтетика из грунта, способствуют повышению надежности, безопасности и экономической эффективности таких конструкций.

Ключевые слова: геосинтетические материалы, армирование грунтов, коэффициент трения, адгезия, вытягивание геотекстиля

Для цитирования: Казаков М.С., Офрихтер В.Г. Характеристики взаимодействия геосинтетического материала с песчаным грунтом при испытании на вытягивание // Известия КГАСУ, 2025, № 4(74), с. 19-29, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.2, EDN: ANQRMZ

Characteristics of the interaction of geosynthetic material with sandy soil during pulling tests

M.S. Kazakov¹, V.G. Ofrikhter¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Soil reinforcement is widely used in modern construction. In the course of designing geotechnical structures made of soil reinforced with geosynthetic materials it is necessary to quantify the interaction of the reinforcement elements with the soil. Such interaction is characterized by contact characteristics, namely the friction angle and adhesion at the contact of the geosynthetic material with the soil. Today, the interaction characteristics are in most cases accepted according to tables and recommendations of regulatory documents. In the Russian Federation, the engagement of interaction characteristics obtained during laboratory tests is not applied in practice despite the fact that the national standard is in force, and the methodology and requirements for equipment for conducting laboratory tests to determine these characteristics are set out in it.

The purpose of the work is to study the contact characteristics obtained during the tests on geosynthetic material pulling from the soil according to the regulatory documentation. The completed work includes: design and manufacture of a plant for testing the geosynthetic pulling from the soil; determination of the characteristics of geosynthetic material pulling from the soil; analysis of the obtained results; study of the mechanism of operation of the reinforcing geosynthetic element in the soil during the pulling process.

Results. The article presents the results of tests on pulling the woven geosynthetic material out of sandy soil according to the method of the national standard. The values of the friction coefficients adopted according to the recommendations of regulatory documents exceed the results of the experimental values obtained during the present studies by 40-70%. In the process of pulling out three characteristic stages of reinforcement behavior have been recorded and thoroughly described.

Based on the results of the conducted research, recommendations for conducting tests on pulling of woven geosynthetic material have been formulated.

Conclusions. The results of the study play an important role in the design and calculation of reinforced soil structures. The contact characteristics of the interaction of soil with the reinforcing material of reinforcement, obtained during tests for pulling geosynthetic material out of the soil, contribute to increasing the reliability, safety and economic efficiency of such structures.

Key words: geosynthetic materials, soil reinforcement, friction coefficient, adhesion, geotextile pulling

For citation: Kazakov M.S., Ofrikhter V.G. Characteristics of the interaction of geosynthetic material with sandy soil during pulling tests // News of KSUAE, 2025, № 4(74), p. 19-29, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.2, EDN: ANQRMZ

1. Введение

В современном строительстве и инженерной практике все большее значение приобретает использование геосинтетических материалов для укрепления грунтов. Особенно актуально применение геосинтетического армирования в конструкциях армогрунтовых сооружений, подпорных стен, насыпей, оснований фундаментов мелкого заложения. Армирующие геосинтетические материалы воспринимают растягивающие напряжения, которые развиваются в грунтовом массиве в результате нагрузки от собственного веса грунта, внешней нагрузки. Армирование взаимодействует с частицами окружающего грунта за счет механизма трения на контактной поверхности «грунт-геосинтетик». Устойчивость и продолжительный срок службы геотехнических сооружений напрямую зависят от того, насколько полно на стадии проектирования изучены принципы совместной работы геосинтетического материала и грунта.

Например, для проектирования армогрунтовых удерживающих сооружений необходимы контактные характеристики: угол трения в плоскости контакта геотекстиля с грунтом, адгезия между армирующим элементом и грунтом, коэффициент взаимодействия [1]. При отсутствии таких характеристик взаимодействия, в соответствии с правилами проектирования рекомендуется использование табличных значений. Такой подход не позволяет в полной мере оценить экономическую целесообразность применения геосинтетических материалов и не гарантирует безопасную и надежную эксплуатацию сооружений.

Вопросы взаимодействия арматуры и бетона в современных железобетонных конструкциях также сохраняют свою актуальность, аналогично исследованию взаимодействия грунта с геосинтетическими материалами. Авторы работ [2, 3] анализируют совместную работу арматуры и бетона при определении перемещений арматуры относительно бетона, а также описывают работу сталежелезобетонной балки с частичной заделкой двутаврового сечения в бетоне, учитывая механизмы контактного взаимодействия.

Научная литература содержит множество работ, посвященных механизму совместной работы грунта с армирующими элементами. Для определения характеристик взаимодействия применяются различные методы лабораторных испытаний. Среди ключевых методик – вытягивание элементов армирования из массива грунта: ученые работ [4, 5] провели оценку контактных характеристик тканого геосинтетика с грунтом; в работе [6] проводили испытания на вытягивание элементов старых автомобильных шин для последующего армирования грунтов; исследования [7, 8] описывают поведение георешеток при вытягивании. Испытания на прямой сдвиг позволяют оценить характеристики взаимодействия, например, в работе [9] авторы проводили ряд испытаний систем «грунт-геосинтетик», а авторы [10] изучили сдвиговое поведение на контакте с георешеткой при разных направлениях сдвига. Также широко применяются трёхосные испытания армированных грунтов: авторы работы [11] исследовали увеличение прочностных характеристик и влияние размеров образца на взаимодействие армирования с грунтом; авторы [12] провели трёхосные испытания гравелистых грунтов, армированных одним слоем георешетки; исследователи [13] использовали тканый геосинтетик для армирования песчаного грунта и оценили влияние количества слоёв армирования на характеристики армированного массива. Испытания на вытягивание моделируют наиболее реальные условия работы геосинтетического материала в грунте [14].

Исходя из анализа существующей литературы, при проведении испытаний на вытягивание тканого геосинтетического материала из грунта можно получить две основные характеристики взаимодействия: угол трения на контакте геотекстиля с грунтом и адгезию армирующего элемента к грунту (последняя применима для связных грунтов). Такие контактные характеристики зависят от различных факторов, которые можно разделить на две основные категории. Первая категория включает в себя физико-механические свойства геосинтетических материалов (геометрические характеристики, шероховатость, осевую жесткость, прочность на разрыв), а также характеристики грунта, используемого для засыпки. Ощутимое влияние оказывают характеристики грунта: плотность, влажность, гранулометрический состав и форма частиц. При более высокой плотности грунта угол трения на контакте армирования с грунтом возрастает, несмотря на материал армирования [15]. Вторая категория факторов связана с величиной вертикального давления на армированный массив, которая оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние. При больших значениях вертикальной нагрузки регистрируются более высокие значения угла трения на контакте «грунт-геотекстиль».

Авторы в работе [16] изучили, как длина и ширина армирующего элемента, так и толщина слоя грунта влияют на процесс вытягивания. При длине армирующего элемента более 0,65 м изменение усилия вытягивания незначительно. Ширина образца в интервале от 0,3 м до 0,6 м не влияет на силу вытягивания, но при её увеличении сопротивление вытягиванию возрастает. Толщина слоя грунта над армирующим элементом в диапазоне от 0,4 до 0,6 м не оказывает существенного изменения в результатах испытаний, однако сопротивление вытягиванию снижается с увеличением высоты слоя грунта. Грунт засыпки над армирующим элементом должен быть не менее 0,3 м по высоте.

При вытягивании геосинтетика из массива грунта на результаты испытаний существенно влияет трение армирования при вытягивании о переднюю стенку короба (о зазор из которого происходит вытягивание). Авторы [17] экспериментально установил, что наличие или отсутствие рукава на передней стенке не приводит к значимым изменениям. Для качественных испытаний поверхность армирующего элемента должна быть соосна положению зазора в коробе.

Авторы работы [18, 19] подробно описывают предложенную теоретическую модель вытягивания георешетки и геотекстиля из несвязного грунта. Геосинтетическое армирование рассматривается как упругий материал с осевой жесткостью. Учитывая линейную деформацию армирования при вытягивании и рассматривая элементарный армирующий элемент, из условия равновесия сил авторы предложили основное уравнение (1) взаимодействия армирования с грунтом.

$$Et \frac{d^2 u}{dx^2} - 2\tau(\varepsilon - 1) = 0 \quad (1)$$

где: E – модуль упругости элемента армирования, кПа; t – толщина элемента армирования, м; dx – длина элемента армирования, м; u – абсолютная величина деформации элемента, м; τ – касательное напряжение, действующее с двух сторон в плоскости армирования, кПа; ε – относительная деформация элемента армирования, д.е.

При анализе взаимодействия армирования с грунтом необходимо учитывать деформации слоёв армирования, разделяя упругие и пластические.

В Российской Федерации действует национальный стандарт ГОСТ Р 70037-2022 «Методика испытаний по определению сопротивления вытягиванию геосинтетических материалов из грунта», который описывает методику испытаний по определению контактных характеристик. В ходе испытания устанавливается заданное значение вертикального давления и с постоянной скоростью к армирующему элементу прикладывается усилие вытягивания. В ходе испытания регистрируются три параметра: вертикальное давление на образец; величина усилия вытягивания; перемещения вытягиваемого зажима. Предусматривается проведение минимум трех испытаний при различных вертикальных давлениях. Далее, по результатам испытаний строятся графики зависимости вытягивающих или касательных напряжений в плоскости контакта от нормальных напряжений. По построенным зависимостям рассчитывается угол трения и адгезия на поверхности «грунт-геосинтетический материал». Следующим шагом, имея прочностные характеристики грунта армирования, определяется коэффициент взаимодействия или коэффициент трения. В стандарте не содержатся требования по величине зазора в стенке короба, через который армирующий элемент вытягивается из грунта. Величина данного зазора должна быть регулируемой, чтобы не допустить трения армирующего элемента о стенки короба в процессе вытягивания. Также стандарт не учитывает влияния вертикального давления от грунта засыпки расположенного выше слоя армирования.

На основании вышеизложенного, характеристики взаимодействия армирующих элементов с окружающим грунтом непостоянны и зависят от множества факторов. В настоящее время результаты испытаний на вытягивание по методике ГОСТ Р 70037-2022 не опубликованы.

Цель работы заключается в исследовании контактных характеристик, полученных в ходе проведения лабораторных испытаний на вытягивание геосинтетического материала из грунта по методике ГОСТ Р 70037-2022. Поставленные задачи: проектирование и конструирование установки для испытаний на вытягивание геосинтетика из грунта; определение характеристик вытягивания геосинтетического материала из грунта; анализ полученных результатов; исследование механизма работы армирующего геосинтетического элемента в грунте в процессе вытягивания.

2. Методы и материалы

На сегодняшний день оборудование, позволяющее проводить испытания по вытягиванию геосинтетического материала из грунта по ГОСТ Р 70037-2022, в Российской Федерации не изготавливается. В целях выполнения лабораторных исследований было спроектировано и изготовлено оборудование для проведения испытаний на вытягивание

армирующих элементов из грунта согласно требованиям, изложенным в ГОСТ. Испытательное оборудование представляет силовую раму, состоящую из двух взаимно перпендикулярных замкнутых контуров, на которой установлены устройства вертикального нагружения и горизонтального вытягивания. В области пересечения замкнутых силовых контуров установлен короб размерами 700×400×300 мм с регулируемым зазором на центральной части передней стенки. Внутри короба укладывается образец грунта, горизонтальной армированный геосинтетиком свободный конец которого пропускается через зазор на передней стенке короба и закрепляется в зажиме, который соединяется с вытягивающим устройством. Устройство вертикального нагружения через штамп создаёт заданное вертикальное давление в армированном образце грунта. После стабилизации вертикальных перемещений армирующий элемент вытягивается из грунта с постоянной скоростью 2 мм/мин. Устройства нагружения, регистрирующее оборудование, датчики перемещений и программное обеспечение было предоставлено для испытаний ООО «НПП «Геотек». Фотография изготовленной опытной установки представлена на рисунке 1.

Для лабораторных испытаний использовался несвязный грунт. По классификации ГОСТ 25100 он относится к природным дисперсным грунтам и представляет собой однородный песок средней крупности с удельным весом твердых частиц 2,55 г/см³.



Рис. 1. Фото опытной установки по вытягиванию геосинтетического материала из грунта (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Photo of a pilot plant for extracting geosynthetic material from the soil (illustration by the authors)

Механические характеристики грунта в ходе испытаний на трёхосное сжатие образцов диаметром 100 мм и высотой 200 мм [20] по ГОСТ 12248.3-2020. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

Прочностные характеристики неармированного песка		
Боковое давление, кПа	Угол внутреннего трения, град.	Сцепление, кПа
50, 75, 100	32	1
50, 100, 150	34	0

В качестве армирующих элементов при исследовании контактных характеристик на опытной установке по вытягиванию был применен тканый геосинтетик «Армостаб ПЭТ 200/50» из полиэстера с прочностью на разрыв в продольном направлении 200 кН/м, в поперечном – 50 кН/м и толщиной 1 мм, предоставленный ООО «МИАКОМ СПб». Применялись полосовые образцы длиной 950 мм, шириной 200 мм.

В настоящем исследовании проводились испытания на вытягивание геотекстиля из песчаного грунта по ГОСТ Р 70037-2022. Испытания проводились при пяти значениях вертикального давления: 25, 50, 75, 100 и 125 кПа, с трёхкратным повторением.

Процесс подготовки образца для испытания на лабораторной установке выполнялся в следующем порядке. Высушенный песчаный грунт укладывался в короб установки на высоту 15 см слоями высотой по 3 см (5 слоев) до нижней грани технологического зазора

в передней стенке короба. Для каждого слоя задавалась требуемая влажность, по формуле (2) производился расчет необходимого объема воды, который составлял 1,5 литра.

$$V_{\text{воды}} = (m_{\text{г}} * 0,1) / \rho_{\text{w}} \quad (2)$$

Где $V_{\text{воды}}$ – объем воды, м³; $m_{\text{г}}$ – масса слоя грунта, кг; 0,1 – заданная влажность, д.е.; ρ_{w} – плотность воды, 1000 кг/ м³.

Для каждого отсыпанного слоя проводится уплотнение механическим способом с достижением коэффициента уплотнения не менее 0,95.

Для контроля влажности и плотности из верхнего слоя грунта отбирались три пробы методом режущего кольца по ГОСТ 5180-2015. Необходимая плотность 1,85 г/см³, влажность 10%.

Далее размещался армирующий элемент таким образом, чтобы крайняя часть армирования выходила через технологический зазор в передней стенке и закреплялась в зажиме, который в свою очередь соединялся с вытягивающим устройством. Поверх геотекстиля послойно укладывался грунт высотой 15 см по вышеописанной методике.

Для изучения механизма работы армирующего элемента в грунте было принято решение в процессе вытягивания контролировать перемещение трех точек геосинтетического материала. С этой целью были использованы металлические стержни диаметром 0,8 мм, на конце которых формировались крючки, для крепления к геосинтетику. Концы стержней выводились наружу через зазор в задней стенке и располагались над жестко закрепленным щитом с миллиметровой бумагой. Влияние трения и осевого удлинения контрольных стержней не учитывалось, поэтому перемещение стержней относительно миллиметровой разметки принималось за перемещение точек слоя армирования. Схема и положение точек контроля перемещения геосинтетического армирования представлено на рисунке 2.

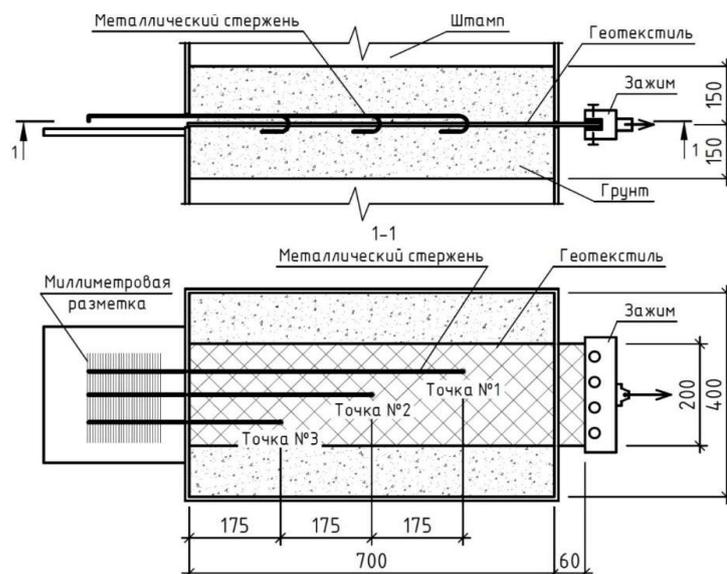


Рис. 2. Схема крепления металлических стержней к геотекстилю: точки №1, №2, №3 (иллюстрация авторов)

Fig. 2. The scheme of fastening metal rods to geotextile: points No.1, No.2, No.3 (illustration by the authors)

Результаты испытаний по определению контактных характеристик, а именно угла трения на контакте «грунт-геотекстиль» представлены в следующем разделе.

3. Результаты и обсуждение

В ходе проведения испытания регистрировались значения вертикальной нагрузки, усилия вытягивания и перемещения скользящего зажима. По полученным данным выполнены расчеты нормальных σ_n и вытягивающих τ напряжений по формулам (3) и (4).

$$\sigma_n = (P_{\text{пр}} + m_{\text{шт}}g) / S_{\text{шт}} + \gamma h_{\text{сл}} \quad (3)$$

где $P_{пр}$ – вертикальная нагрузка, создаваемая вертикальным актуатором, кН; $m_{шт}$ – масса штампа, т; g – ускорение свободного падения, м/с²; $S_{шт}$ – площадь штампа, м²; γ – удельный вес грунта, кН/м³; $h_{сл}$ – высота слоя грунта над материалом армирования, м.

$$\tau = F_B / 2S_{гео} \quad (4)$$

где F_B – максимальное значение вытягивающего усилия, кН; $S_{гео}$ – площадь геосинтетического элемента, располагающегося в грунте, м²; 2 – коэффициент, предусматривающий контакт грунта с нижней и верхней гранью армирования.

Результаты вычислений были представлены в виде графика, отображающего зависимость вытягивающих напряжений τ от нормальных σ_n в зоне контакта армирования с грунтом. Обработка данных методом наименьших квадратов позволила получить аппроксимирующие прямые. На их основе для трёх комбинаций нормального давления были определены углы трения на контакте геотекстиля с грунтом $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ (Рис. 3). При вертикальных давлениях 25, 50, 75 кПа угол трения составил 11,64°, при давлениях 50, 75, 100 кПа 12,52°, при давлениях 75, 100, 125 кПа составил 15,54°.

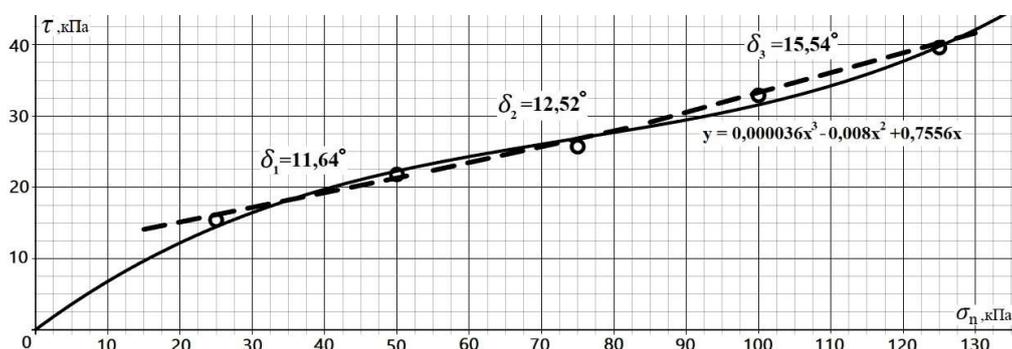


Рис. 3. Зависимость касательных (вытягивающих) напряжений от нормального давления в армированном массиве (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Dependence of tangential (pull-outs) stresses on the normal pressure in the reinforced mass (illustration by the authors)

Тангенс угла трения на контакте «грунт-армирование» является измеренным коэффициентом трения, который в дальнейшем может использоваться при расчетах армогрунтовых сооружений. На основании значений угла трения на контакте «грунт-армирование» и угла внутреннего трения грунта производится расчет понижающего коэффициента трения, представляющего собой отношение тангенсов указанных углов, для дальнейшего сравнения с понижающими коэффициентами, установленными нормативными документами. По полученным результатам при вертикальном давлении 100 кПа понижающий коэффициент составляет 0,41. В соответствии с СП 472.1325800.2019 п. 12.8.1 и ОДМ 218.3.120-2020 п. 24.7 предлагается принимать коэффициент трения геосинтетика по грунту путем умножения тангенса угла внутреннего трения грунта на понижающий коэффициент 0,7 для тканого материала армирования. Согласно рекомендациям ОДМ 218.2.027-2012 при расчете армогрунтовых конструкций предлагается использовать прямой коэффициент трения 0,58, соответствующий углу внутреннего трения грунта 30°, принятый по таблице 1 с аналогичными характеристиками грунта и армирования. Таким образом, коэффициент трения, рекомендуемый правилами и руководящими документами, больше измеренного и не в полной мере учитывает напряженно-деформированное состояние армогрунта.

Аппроксимация массива полученных результатов испытания, позволяет представить зависимость в виде полинома третьей степени (Рис. 3), выраженной формулой (5).

$$y = 0,000036x^3 - 0,008x^2 + 0,7556x \quad (5)$$

Полученная нелинейная зависимость проходит через начало координат, что свидетельствует об отсутствии адгезии (сцепления) на поверхности контакта, которая ожидаемо, может развиваться только в связных грунтах. Зависимость иллюстрирует нелинейное увеличение угла трения на контакте «грунт-геосинтетик» относительно увеличения вертикального напряжения в образце. При увеличении нормальных напряжений угол трения возрастает. При проектировании армогрунтовых конструкций

рекомендуется учитывать полученную зависимость, при назначении коэффициента трения, поскольку значения могут расходиться в интервале 35-45%.

Ранее в работе [20] была предложена и опробована методика по определению угла трения на контакте «грунт-геотекстиль» с использованием стабилметра. В испытаниях на трехосное сжатие применялся песчаный грунт и армирование как в настоящем исследовании. Полученные значения угла трения на контакте «грунт-геотекстиль» в испытаниях на приборе трехосного сжатия получились выше на 34% относительно результатов, полученных в ходе испытаний на вытягивание.

Для более детального рассмотрения механизма вытягивания аналогично [18], регистрировались перемещения точек №1, №2, №3 полосы геосинтетического армирования в процессе вытягивания (Рис. 2). Регистрация перемещений производилась по движению металлических стержней над миллиметровой разметкой с интервалом 30 секунд. Скорость вытягивания (движения зажима армирования) постоянна и составляет 2 мм/мин. На основании собранных данных строился график зависимости перемещения точек армирования №1, №2, №3 от перемещения зажима вытягивания (Рис. 4).

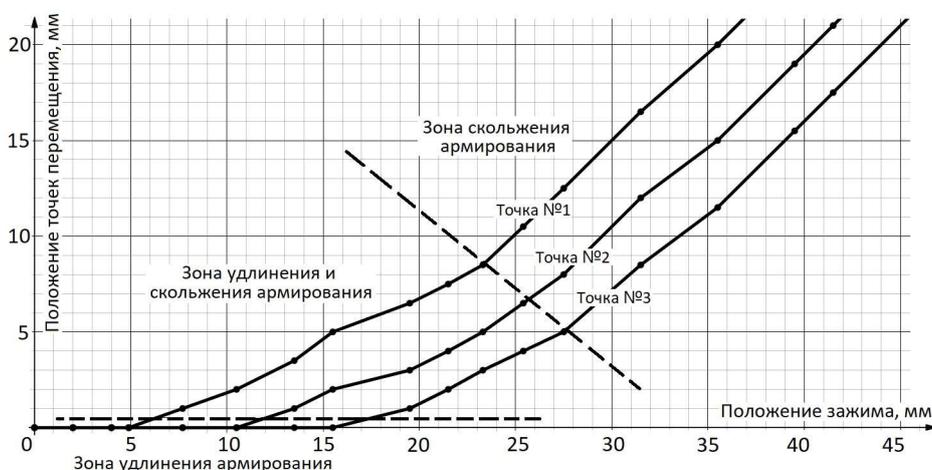


Рис. 4. Зависимость перемещения точек №1, №2, №3 от перемещения зажима (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Dependence of the movement of points No.1, No.2, No.3 on the movement of the clamp (illustration by the authors)

По графику (Рис. 4) отчетливо виден характер начала движения точек армирующего элемента. В момент начала вытягивания все точки оставались неподвижны. Когда зажим переместился на 5 мм, начала двигаться точка №1, которая располагалась ближе к зажиму. Далее начинали движение точки №2 и №3. Такое поведение объясняется удлинением геотекстиля по его длине, которое начинается в области точки приложения усилия вытягивания. Можно сделать вывод, что напряжения в геотекстиле развиваются и нарастают от зажима и далее распределяются до свободного конца аналогично цепной реакции. Когда напряжение в армирующем элементе преодолевает касательное напряжение (пиковое сопротивление сдвигу) на контакте с грунтом, происходит потеря сцепления с грунтом (остаточное сопротивление сдвигу) и геотекстиль начинает проскальзывать в грунте, при этом удлинение геосинтетика перестаёт возрастать. Данный процесс развивается «цепочкой» до потери сцепления геотекстиля с грунтом на всей длине, далее происходит движение в грунте всего армирующего элемента со скоростью движения зажима. Соответственно, на графике выделены три зоны работы армирующего элемента в грунте при вытягивании: зона удлинения армирования; зона удлинения и скольжения армирования; зона скольжения армирования. Характер вытягивания геосинтетического материала подтверждает теоретическую модель, согласно формуле (1).

В дальнейших исследованиях планируется учесть упругие и пластические деформации армирующего элемента при испытаниях на вытягивание, а также рассмотреть граничные условия для каждой стадии.

4. Заключение

1. Коэффициенты трения, используемые в расчетах армогрунтовых сооружений согласно руководящим документам Российской Федерации, требуют уточнения. В настоящее время ассортимент доступных геосинтетических материалов значительно расширяется. При проектировании армогрунтовых сооружений рекомендуется применять контактные характеристики, полученные в результате испытаний на вытягивание, что обеспечит надежность, безопасность, а также экономическую эффективность армогрунтовых сооружений.

2. Механизм вытягивания армирующего элемента из грунта зависит от множества факторов. Процесс вытягивания можно разделить на три стадии: удлинение армирующего элемента; удлинение и скольжение армирующего элемента; скольжение армирующего элемента. При выполнении расчетов необходимо принимать во внимание осевую жесткость армирования, которая существенно влияет на процесс вытягивания при различных стадиях.

3. Национальный стандарт ГОСТ Р 70037-2022 не регламентирует величину зазора, через который армирующий элемент выводится из испытательного короба для крепления к вытягивающему зажиму. Для получения достоверных значений характеристик взаимодействия необходимо задавать величину зазора минимум на 2 мм больше толщины армирующего элемента. Также в стандарте не учитывается влияние вертикального давления, оказываемого верхним слоем грунта на армирующий элемент. К заданному вертикальному давлению необходимо добавлять давление от грунта, уложенного поверх армирующего элемента.

Список литературы/References

1. Namjoo A.M., Soltani F., Toufigh V. Effects of Moisture on the Mechanical Behavior of Sand–Geogrid: An Experimental Investigation // *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 2021. Vol. 7. No. 5. DOI: 10.1007/s40891-020-00243-w.
2. Мирсяпов И.Т., Минзянов Р.И. Перемещение арматуры периодического профиля в заделке при статическом нагружении // *Известия КГАСУ.* 2022. № 4 (62). С.18-29. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_18. EDN TOADUE.
Mirsayapov I.T., Minzyanov R.I. Movement of the reinforcement of a periodic profile in the embedment under static load // *News KSUAE.* 2022. No. 4 (62). P. 18-29. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_18. EDN TOADUE.
3. Мирсяпов И.Т., Гиматдинов И.М. Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне // *Известия КГАСУ.* 2022. № 3(61). С. 56-66. DOI 10.52409/20731523_2022_3_56. EDN BQJDBU.
Mirsayapov I.T., Gimatdinov I.M. Study of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams with partial embedding of I-sections in concrete // *News KSUAE.* 2022. No. 3(61). P. 56-66, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_56. EDN: BQJDBU.
4. Vieira C., Ferreira F., Pereira P., Lopes M. L. Pullout behaviour of geosynthetics in a recycled construction and demolition material - Effects of cyclic loading // *Transportation Geotechnics.* 2020. Vol. 23. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100346.
5. Татьянников Д.А., Пономарев А.Б., Клевко В.И. Исследования механических характеристик геосинтетических материалов для разработки методики расчета несущей способности армированных фундаментных подушек // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН.* 2015. № 1. С. 71-73.
Tat'yannikov D.A., Ponomarev A.B., Kleveko V.I. Studies of mechanical characteristics of geosynthetic materials for the development of a methodology for calculating the bearing capacity of reinforced foundation pads // *Academic bulletin of "UralNIIProyekt" research institute of Russian academy of architecture and construction sciences.* 2015. No. 1. P. 71-73.
6. Tajabadipour M., Khaleghi M., Portelinha F.H.M. The Use of Scrap Tire Strips to Improve the Pullout Behavior of Geotextiles // *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 2023. Vol. 9. No. 65. DOI: 10.1007/s40891-023-00481-8.

7. Ferreira F.B., Vieira C.S., Mendonça G., Lopes M.L. Effect of Sustained Loading on the Direct Shear Behaviour of Recycled C&D Material–Geosynthetic Interfaces // *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 1722. DOI: 10.3390/ma16041722.
8. Barajas S.R., Pedrosa G.O.M., Ferreira F.B., Lins da Silva J. Influence of Apparatus Scale on Geogrid Monotonic and Cyclic/Post-Cyclic Pullout Behavior in Cohesive Soils // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 5861. DOI: 10.3390/app14135861.
9. Muluti S.S., Kalumba D., Sobhee-Beetul L., Chebet F. Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing // *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 2023. Vol. 9. No. 33. DOI: 10.1007/s40891-023-00450-1.
10. Jia Y., Zhang J.W., Chen X., Miao C., Zheng Y. DEM study on shear behavior of geogrid-soil interfaces subjected to shear in different directions // *Computers and Geotechnics*. 2023. Vol. 156. No. 105302. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105302.
11. Anjos R., Carlos D.M., Gouveia S., Pinho-Lopes M., Powrie W. Soil–Geosynthetic Interaction Under Triaxial Conditions: Shear Strength Increase and Influence of the Specimen Dimensions // *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 2023. Vol. 9. No. 83. DOI: 10.1007/s40891-023-00502-6.
12. Zakarka M., Skuodis S., Dirgeliene N. Triaxial Test of Coarse-Grained Soils Reinforced with One Layer of Geogrid // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 12480. DOI: 10.3390/app132212480.
13. Hakimelahi N., Bayat M., Ajalloeian R., Nadi, B. Effect of woven geotextile reinforcement on mechanical behavior of calcareous sands // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02014.
14. Подковыров И.А., Казаков М.С., Офрихтер В.Г. Контактные характеристики взаимодействия геосинтетического материала с грунтом // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2024. Т. 1. С. 52-58.
Podkovyrov I.A., Kazakov M.S., Ofrikhter V.G. Contact characteristics of the interaction of geosynthetic material with soil // *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2024. Vol. 1. P. 52-58.
15. Palmeria E.M., Milligan G.W.E. Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand // *Geotechnique*. 1989. Vol. 39. Iss. 3. P. 511-542. DOI: 10.1680/geot.1989.39.3.511.
16. Lopes M., Ladeira M. Role of Specimen Geometry, Soil Height, and Sleeve Length on the Pull-Out Behaviour of Geogrids // *Geosynthetics International*. 1996. Vol. 3. No. 6. P. 701-719. DOI: 10.1680/gein.3.0081.
17. Huang B., Bathurst R. J. Evaluation of Soil-Geogrid Pullout Models Using a Statistical Approach // *Geotechnical Testing Journal*. 2009. Vol. 32. No. 6. P. 489-504. DOI: 10.1520/GTJ102460.
18. Du C., Yi F. Analysis of the Elastic-Plastic Theoretical Model of the Pull-Out Interface between Geosynthetics and Tailings // *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020. DOI: 10.1155/2020/5680521.
19. Mirzaalimohammadi A., Ghazavi M. Analytical Prediction of Pullout Behavior of Geotextiles with Varying Width // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 48. No. 13737. DOI: 10.1007/s13369-023-07963-x.
20. Офрихтер В.Г., Казаков М.С. Определение контактных характеристик на границе "грунт - геотекстиль" в приборе трехосного сжатия // *Construction and geotechnics*. 2024. Т. 15. № 4. С. 59-77. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.06.
Ofrikhter V.G., Kazakov M.S. Determination of contact characteristics at the soil-geotextile interface in a triaxial compression device // *Construction and Geotechnics*. 2024. Vol. 15. No. 4. P. 59-77. DOI: 10.15593/2224-9826/2024.4.06.

Информация об авторах

Казаков Максим Сергеевич, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация
E-mail: cazakow23@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-0994-8027

Офрихтер Вадим Григорьевич, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация
E-mail: ofrikhter@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0803-2392

Information about the authors

Maksim S. Kazakov, post-graduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

E-mail: kazakow23@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-0994-8027

Vadim G. Ofrikhter, doctor of Technical Science, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

E-mail: ofrikhter@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0803-2392

Дата поступления: 15.08.2025

Дата принятия: 24.12.2025