

УДК 624.138.9

ТАТЬЯННИКОВ Д. А.
ПОНОМАРЕВ А. Б.
КЛЕВЕКО В. И.



**Татьянников
Даниил
Андреевич**

ассистент кафедры СПГ
Пермского национального
исследовательского поли-
технического университета
(ПНИПУ), аспирант
e-mail: danco777@mail.ru



**Пономарев
Андрей
Будимирович**

профессор, доктор техни-
ческих наук, зав. кафедрой
СПГ ПНИПУ
e-mail: andreypab@mail.ru



**Клевеко
Владимир
Иванович**

кандидат
технических наук,
доцент кафедры СПГ
ПНИПУ

Исследования механических характеристик геосинтетических материалов для разработки методики расчета несущей способности армированных фундаментных подушек

Рассматриваются экспериментальные исследования по определению механических характеристик геосинтетических материалов. Исследования проводились совместно — строительным факультетом Hochschule Magdeburg-Stendal (Германия) и кафедрой «Строительное производство и геотехника» ПНИПУ (Россия). Также в статье оценивается важность проводимых авторами экспериментов для разработки на последующих этапах исследований методики расчета несущей способности армированных фундаментных подушек в инженерно-геологических условиях Пермского края.

Ключевые слова: несущая способность, коэффициент трения, выдерживающее сопротивление, касательное напряжение, нормальное напряжение, коэффициенты эффективности, армированная фундаментная подушка.

TATYANNIKOV D. A., PONOMAREV A. B., KLEVEKO V. I.
INVESTIGATIONS ABOUT MECHANICAL CHARACTERISTICS OF GEOSYNTHETICS FOR DESIGN METHOD COMPUTATION OF CARRYING CAPACITY OF REINFORCED FOUNDATION PADS

Considered experimental studies to determine the mechanical properties of geosynthetics. The studies were conducted jointly — Civil Engineering Faculty Hochschule Magdeburg-Stendal (Germany) and the Department of «Construction industry and geotechnics» PNRPU (Russia). Also in the article the importance of experiments conducted by the authors to develop at later stages of research methodology of calculation of the bearing capacity of the reinforced foundation pads in engineering-geological conditions of the Perm region.

Keywords: bearing capacity, friction, resistance to pull out, the shear stress, normal stress coefficients of efficiency, reinforced foundation pad.

Среди множества существующих технологий устройства фундаментов на слабых грунтах наиболее простым и популярным решением является применение грунтовых подушек [1, 10]. В традиционном исполнении конструкция таких оснований предусматривает замену части слабого грунта на слой из стабильного минерального

материала (ПГС, щебень, песок). Основными недостатками этого способа являются: относительно высокая материалоемкость, большие объемы земляных работ, а также несовершенство существующих методов расчета, дающих заниженные прочностные характеристики данных конструкций. Существенно сократить финансовые затраты и оптимизировать конструкцию

подушки позволяет применение в подобных конструкциях эффекта армирования.

Армирование является одним из самых распространенных способов увеличения несущей способности и снижения осадок основания, в качестве армирующих материалов широкое применение нашли геосинтетические материалы.

Однако в настоящее время на территории России отсутствует инженерная методика расчета несущей способности армированных фундаментных подушек, которая отражала бы изменения прочностных и деформационных свойств грунтов в условиях совместной работы армирующих элементов и грунта под действием полезных нагрузок. Для решения данной проблемы авторы настоящей статьи поставили перед собой задачу на первом этапе исследований изучить механические характеристики армирующих геосинтетических материалов для разработки в дальнейшем такой методики расчета [4, 6].

Экспериментальные исследования геосинтетических материалов

Известно [5, 7, 12], что значительное влияние на несущую способность армированных фундаментных подушек оказывают следующие механические характеристики армирующих материалов (геосинтетики).

Основными механическими характеристиками геосинтетических материалов являются:

- 1 Прочность материала на разрыв:
 - 1.1. Кратковременная прочность;
 - 1.2. Длительная прочность (ползучесть).
- 2 Относительное удлинение материала при соответствующей нагрузке.
- 3 Сопrotивление материала выдергиванию из армогрунтовой конструкции.
- 4 Коэффициент трения между геосинтетическим материалом и грунтом.

Поэтому авторами с целью изучения данных механических характеристик были проведены серии соответствующих испытаний для различных типов геосинтетических материалов, которые описаны ниже.

Прочность материала на разрыв

Основной характеристикой геосинтетических материалов, применяемых для армирования, является прочность на разрыв [8], поскольку она является первой характеристикой при выборе геосинтетических материалов в качестве армирующих элементов [1, 12]. При отсутствии значения данной характеристики армирующего материала невозможно рассчитывать несущую способность армированных фундаментных подушек, поскольку она играет ключевую роль в любой известной методике расчета.

Так как основой геосинтетических материалов являются полимерные материалы, разрывную прочность классифицируют по EBGEО на кратковременную прочность и длительную прочность (ползучесть). Кратковременная прочность определяется путем проведения испытаний на разрыв. Длительная прочность определяется путем проведения испытания на ползучесть. Используя в качестве расчетного значения прочности длительную прочность, возможно наиболее точно определить несущую способность, которая будет у армированной фундаментной подушки. Однако, как показали проведенные нами исследования [8, 14], в некоторых случаях не обязательно проводить испытания на ползучесть, которые требуют наличия специального оборудования, можно воспользоваться понижающими коэффициентами для кратковременной прочности, которые представлены в EBGEО.

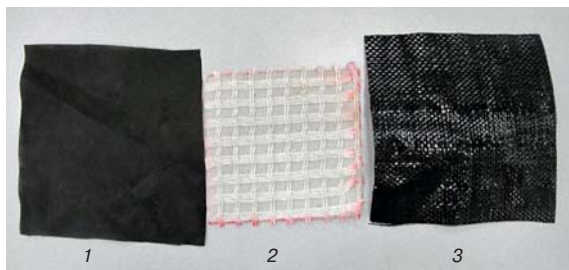


Иллюстрация 1. Образцы геосинтетических материалов для испытаний на разрыв: 1 — нетканый геосинтетический материал; 2 — геокомпозит (комбинация нетканого геотекстиля с полиэфирными нитями); 3 — геотекстиль тканый двухосный (Геоспан ТН-50). Автор Д. А. Татьянников

Несмотря на большое количество аналитических методов расчета, как показывают исследования, проведенные другими авторами [1–3, 5] при решении задач, связанных с определением несущей способности армированных оснований, наиболее достоверным является метод конечных элементов, представленный в расчетных программах (Plaxis, ANSYS, FLAC, FEMmodels, GeoSoft, midas GTS, Z-soil и др.) [2]. Наиболее распространенной среди них является программа Plaxis, которая позволяет моделировать работу системы «основание — фундамент» с учетом различных факторов [2]. Для проведения расчетов при помощи Plaxis необходимо знать относительное удлинение геосинтетического материала при соответствующей нагрузке [7]. Жесткость G может определяться при разрыве геосинтетического материала и при различном удлинении (обычно от 2 до 5%) в зависимости от типа материала и конкретного его применения.

Для определения прочностных характеристик и жесткости проведена серия экспериментов с тремя типами геосинтетических материалов, представленными на Иллюстрации 1.

Методика проведения испытаний и обработка экспериментальных данных представлена в работах [7, 8].

Обработка результатов испытаний

В результате проведенных испытаний были получены данные о разрывных характеристиках геосинтетических материалов (см. Таблицу 1) и построены зависимости «деформация — линейная жесткость», представленные на Иллюстрации 2.

Из анализа графика на Иллюстрации 2,а можно сделать вывод о том, что значение жесткости нетканого геосинтетического материала уменьшается при увеличении деформации. То есть данный материал обладает слабыми прочностными характеристиками.

Из анализа графика на Иллюстрации 2,б можно сделать вывод о том, что значение жесткости геокомпозита увеличивается пропорционально деформации до пикового значения (максимума), а затем уменьшается. Полученная зависимость обусловлена структурой материала, так как изначально в работу вступают полиэфирные нити, после разрыва которых происходит вступление в работу нетканого геотекстиля.

Из анализа графика на Иллюстрации 2,в можно сделать вывод о том, что значение жесткости тканого геотекстиля увеличивается пропорционально деформации до пикового значения (максимума), а затем уменьшается. Таким образом, для расчета следует принимать значение жесткости в диапазоне в зависимости от установленной деформации.

В Таблице 1 приведены значения максимальных нормальных жесткостей и соответствующие им оптимальные значения относительной деформации.

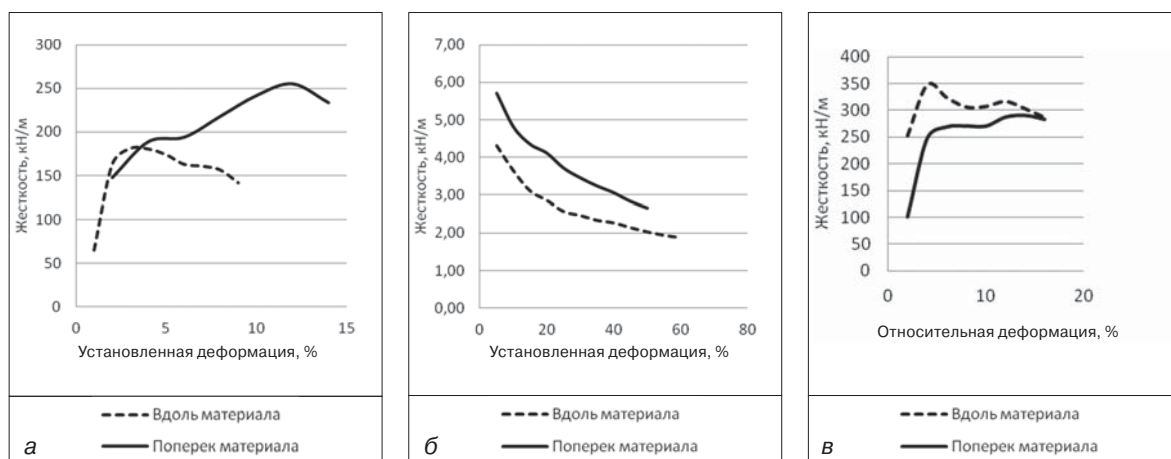


Иллюстрация 2. График зависимости «деформация — линейная жесткость» вдоль и поперек рулона: а — тканого геотекстиля; б — нетканого геосинтетического материала; в — геокompозита. Автор Д. А. Татьянников

Таблица 1. Сводная таблица оптимальных значений линейных жесткостей и относительных деформаций геосинтетических материалов Автор Д. А. Татьянников

Материал	Максимальное значение линейной жесткости, кН/м		Оптимальные значения относительной деформации, %		Разрывное усилие, кН/м	
	Вдоль	Поперек	Вдоль	Поперек	Вдоль	Поперек
Геокompозит	176	252	2–6	5–10	29	67,8
Нетканый геосинтетический материал	4,31	5,7	5–10	5–10	2,6	3,2
Тканый геотекстиль	350	282	3–6	10–16	47,4	46,6

Характеристики взаимодействия геосинтетических материалов с грунтом

Не менее важными механическими характеристиками геосинтетических материалов являются характеристики взаимодействия с грунтом. Такими характеристиками являются значение трения армирующего материала по грунту и сопротивление армирующего материала выдергиванию.

При проведении испытания на сдвиг использовалось два типа геосинтетических материалов: георешетка Secugrid (NAUE GmbH & Co, Германия) и тканый геотекстиль Геоспан (Гекса, Россия) (см. Иллюстрацию 3, Таблицу 2).

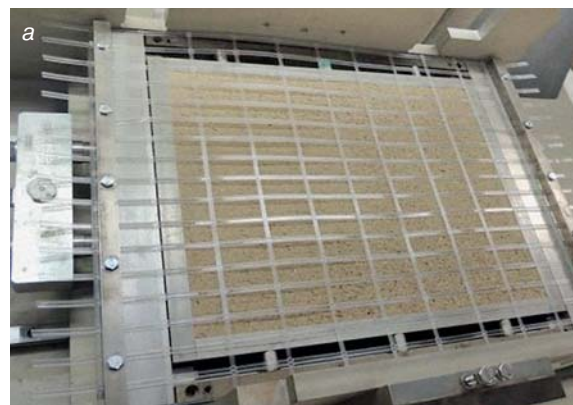


Таблица 2. Паспортные физико-механические характеристики геосинтетических материалов

Характеристика	Значение	
	Георешетка	Геотекстиль
Поверхностная плотность	415 г/м ²	275 г/м ²
Максимальная нагрузка при испытании на растяжение вдоль/поперек	400 кН/м	50 кН/м
Относительное удлинение при максимальной нагрузке вдоль/поперек	9%	17/15%

Иллюстрация 3. Геосинтетические материалы: а — георешетка; б — тканый геотекстиль. Автор Д. А. Татьянников

Таблица 3. Схема испытаний. Автор Д. А. Татьянников

Нормальное напряжение	Испытание на сдвиг (система)			Испытание на выдергивание	
	Песок — песок	Песок — георешетка	Песок — геотекстиль	Песок — георешетка	Песок — геотекстиль
20	—	—	—	+	+
30	—	—	—	—	+
40	—	—	—	+	+
50	+	+	+	—	+
60	—	—	—	+	—
100	+	+	+	+	—
200	+	+	+	—	—

Методика проведения сдвиговых испытаний и испытаний на выдергивание принята стандартной согласно немецким нормативным документам DIN EN ISO 12957-1 и DIN 60009. Схема экспериментальных работ для сдвиговых испытаний и испытаний на выдергивание представлена в Таблице 3 [9].

Обработка результатов испытаний

Одной из основных задач экспериментальных исследований являлось установление закономерности развития касательного напряжения от смещения материала для различных типов систем.

По результатам проведенных экспериментов получены графики зависимости смещения от касательного напряжения (см. Иллюстрации 4–5). Полученные данные являются исходным материалом при изучении взаимодействия грунт — геосинтетик.

В результате проведенных сдвиговых испытаний в используемых материалах (геотекстиль и георешетка) необратимые деформации не обнаружены.

При использовании геосинтетических материалов в качестве армирующих материалов растягивающие усилия передаются на геосинтетику благодаря трению материала по грунту. Количественно оценить способность материалов воспринимать растягивающие усилия от грунта возможно при помощи коэффициента трения для сдвигов [11], который определяется по формуле (1). Без знания данного коэффициента невозможно оценить несущую способность армированных фундаментных подушек.

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

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

$\tau_s^{\max}(\sigma)$ — максимальное касательное напряжение, возникающее при соответствующем нормальном напряжении σ при испытании на сдвиг системы грунт — грунт, кПа.

Полученные значения коэффициента трения сведены в Таблицу 4.

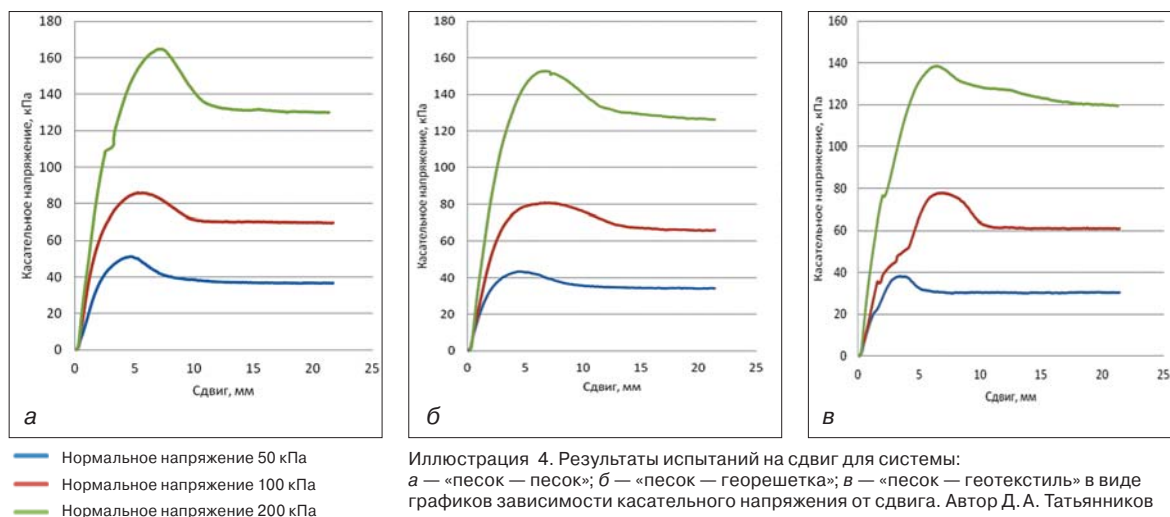
Таблица 4. Значения коэффициентов трения. Автор Д. А. Татьянников

Тип системы	Нормальное напряжение, кПа	Коэффициент трения
Песок — георешетка	50	0,846
	100	0,939
	200	0,927
Песок — геотекстиль	50	0,745
	100	0,907
	200	0,841

Коэффициент трения грунта по геосинтетике можно также определить расчетным путем по формуле (2):

$$f_{sg,d} = 0,50 \operatorname{tg} \phi'_d, \quad (2)$$

где ϕ'_d — расчетное значение угла внутреннего трения. Как видно из данной формулы, если определять коэффициент трения расчетным путем, то он будет сильно занижен.



Кроме того, имея результаты испытаний на сдвиг, возможно получить коэффициент сдвига ($f_{sg,k}$). Но так как данный коэффициент не учитывается при определении несущей способности армированных фундаментных подушек, он не отражен в данной статье.

Согласно [15], для данных типов испытаний по закону Мора – Кулона возможно определить прочностные характеристики (угол внутреннего трения и сцепление) для систем песок – песок и песок – геосинтетический материал. А для сравнения данных характеристик при двух системах вводятся следующие коэффициенты эффективности [13, 16]:

$$E_c = \frac{c_a}{c} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$E_\phi = \frac{tg\delta}{tg\phi} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где E_c – коэффициент эффективности по сцеплению;

E_ϕ – коэффициент эффективности по трению;

c_a – сцепление для системы грунт – геосинтетический материал, кПа;

c – сцепление для системы грунт – грунт, кПа;

δ – угол внутреннего трения для системы грунт – геосинтетический материал;

ϕ – угол внутреннего трения для системы грунт – грунт.

Полученные результаты сведены в Таблицу 5.

В результате проведенных испытаний на выдергивание геотекстиля из грунта получена информация о том, что при вертикальных напряжениях выше 60 кПа в геотекстиле возникают необратимые деформации, в результате которых происходит его разрыв, в случае георешетки деформаций не наблюдалось.

При испытаниях на выдергивание основным параметром взаимодействия геосинтетического материала с грунтом является максимальное

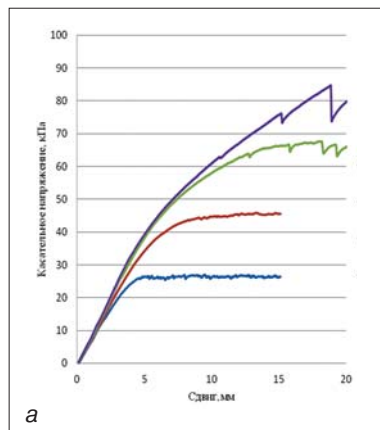


Таблица 5. Результаты испытаний на сдвиг. Автор Д. А. Татьянников

Тип системы	Сравнение угла внутреннего трения		Сравнение сцепления	
	Значение угла внутреннего трения	Коэффициент эффективности по трению, %	Значение сцепления, кПа	Коэффициент эффективности по сцеплению, %
Песок – песок	32,1	100	5,85	100
Песок – георешетка	31,7	98,7	3,5	60
Песок – геотекстиль	30	93	2,87	49,5

Таблица 6. Значения сопротивления выдергиванию для различных типов систем Автор Д. А. Татьянников

Тип системы	Нормальное напряжение, кПа	Сопротивление выдергиванию, кН/м
Песок – георешетка	20	54
	40	91,6
	60	135,36
Песок – геотекстиль	20	51,04
	40	110,32
	50	121,84

сопротивление выдергиванию [9], которое определяется по формулам (4), (5). Данный параметр делает возможным оценить устойчивость, сопротивление сдвигу конструкции, и способность армированного грунта к расширению также позволяет использовать огромное количество методик расчета несущей способности армированных фундаментных подушек, среди которых европейские нормы проектирования армогрунтовых конструкций EBGEО.

Для геотекстильных материалов по формуле (5):

$$T_{HV,max} = \frac{F_{HV,max}}{b_{GTX}} \quad (5)$$

Для георешеток по формуле (6): $T_{HV,max} = F_{HV,max} \cdot n_{GGR} / N_{GGR}$ (6)

где $T_{HV,max}$ – максимальное сопротивление выдергиванию, кН;

$F_{HV,max}$ – максимальное усилие, возникающее при испытании на выдергивание геосинтетического материала из грунта, кН;

b_{GTX} – ширина геотекстильного материала, м;

n_{GGR} – минимальное число элементов 1 м ширины испытуемого образца;

N_{GGR} – число элементов образца для испытания.

Полученные значения сопротивления выдергиванию сведены в Таблицу 6.

Если следовать требованиям европейских норм проектирования армогрунтовых конструкций EBGEО,

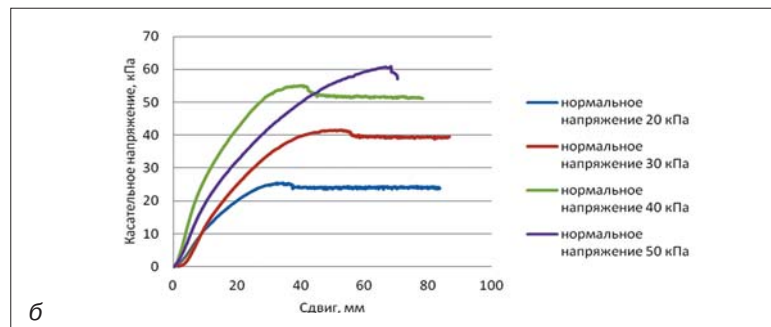


Иллюстрация 5. Результаты испытаний на выдергивание для системы: а – «песок – георешетка»; б – «песок – геотекстиль» в виде графиков зависимости касательного напряжения от сдвига. Автор Д. А. Татьянников

то несущая способность армированных фундаментных подушек рассчитывается по формуле (7):

$$R_{n,k} = R'_{n,k} + \Delta R_{n,k}, \quad (7)$$

где $R'_{n,k}$ — несущая способность неармированной подушки основания;

$\Delta R_{n,k}$ — увеличение несущей способности из-за применения армирования.

Получить данный параметр, не имея результатов испытаний на сдвиг и на выдергивание, невозможно, то есть, в случае отсутствия данных испытаний точное значение несущей способности будет сильно занижено.

Заключение

По итогам выполненных авторами экспериментальных исследований по определению механических характеристик геосинтетических материалов можно сделать следующие выводы:

1. Полученные экспериментальные графики зависимости «деформация — линейная жесткость» геосинтетических материалов позволяют определить оптимальный интервал относительно удлинения геосинтетических материалов (см. Таблицу 2). При данном интервале достигается максимальная жесткость геосинтетических материалов. Данный интервал следует использовать при расчетах армированных фундаментных подушек.
2. При проектировании армированных фундаментных подушек рекомендуется использовать геосинтетические материалы с наиболее высокими значениями линейной жесткости.
3. Исходя из анализа экспериментальных зависимостей на Иллюстрациях 3–5 видно, что система песок — песок способна воспринимать большие касательные напряжения (164,8 кПа), чем системы песок — георешетка (152,7 кПа) и песок — геотекстиль (138,5 кПа) соответственно. Таким образом, при проектировании конструкций, воспринимающих значительные сдвиговые усилия, необходимо использовать другие типы материалов.
4. Полученные коэффициенты эффективности (Таблица 4) означают, что введение армирования уменьшает прочностные характеристики грунтов по контакту с армирующими материалами.
5. В геотехнических конструкциях из армированного грунта, которые воспринимают значительные сдвиговые усилия, использование георешеток целесообразней, чем использование геотекстильных материалов. Данный вывод подтверждается полученными коэффициентами трения и коэффициентами эффективности.
6. Отсутствие данных по испытаниям на сдвиг и на выдергивание сильно занижает значение несущей способности армированных фундаментных подушек, что приводит к ошибкам строительства еще на стадии проектирования.

Список использованной литературы

1. Бай В. Ф., Краев А. Н. Исследование работы песчаной армированной по контуру подушки с криволинейной подошвой в условиях слабых глинистых грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 107–110.
2. Клевеко В. И., Татьянаников Д. А., Драчева Е. О. Сравнение модельных штамповых испытаний и расчетов по методу конечных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Строительство и архитектура.

2014. № 4. С. 170–179. URL: dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2014.4.16.

3. Мащенко А. В., Пономарев А. Б. К вопросу использования армированных сезоннопромерзающих пучинистых грунтов в качестве оснований фундаментов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Строительство и архитектура. 2012. № 1. С. 64–80.
4. Мирсаяпов И. Т., Попов А. О. Экспериментально-теоретические исследования работы армированных грунтовых массивов // Известия КГАСУ. 2008. № 2 (10). С. 75–80.
5. Пономарев А. Б., Золотозубов Д. Г. Влияние заложения армирующего материала на несущую способность основания при провалах грунта // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 2. С. 100–103.
6. Пономарев А. Б., Кузнецова А. С., Богомолова О. А. Результаты исследований фиброармированного песка // Актуальные проблемы геотехники : сб. статей, посвященный 60-летию проф. А. Н. Богомолова. Волгоград, 2014. С. 140–147.
7. Пономарев А. Б., Татьянаников Д. А., Клевеко В. И. Определение линейной жесткости геосинтетических материалов // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. Политематическая. 2013. Вып. 2 (27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PonomarevTatyannikovKleveko-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PonomarevTatyannikovKleveko-2013_2(27).pdf).
8. Пономарев А. Б., Клевеко В. И., Татьянаников Д. А. Анализ изменения прочностных характеристик геосинтетических материалов в процессе эксплуатации // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2014. № 3 (35). С. 11–16.
9. Татьянаников Д. А., Клевеко В. И. Определение характеристик взаимодействия геосинтетических материалов с грунтом // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2014. Т. 1. С. 526–529.
10. Татьянаников Д. А., Клевеко В. И., Пономарев А. Б. Анализ работы армированного песчаного основания на основе штамповых модельных испытаний // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Прикладная экология. Урбанистика. 2012. № 4 (8). С. 92–102.
11. Татьянаников Д. А., Пономарев А. Б., Клевеко В. И., Schlömp S. H., Schwerdt S. Определение характеристик трения для двух типов геосинтетических материалов путем проведения испытаний на сдвиг // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Строительство и архитектура. 2014. № 1. С. 174–186. URL: dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2014.1.15.
12. Тимофеева Л. М. Армирование грунтов (теория и практика применения) / Перм. политехн. ин-т. Пермь, 1991.
13. Alfaro M. C., Miura N. and Bergado D. T. Soil Geogrid Reinforcement Interaction by Pullout and Direct Shear Tests. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ. Vol. 18, No. 2, June 1995. P. 157–167.
14. Tatiannikov D. A., Kleveko V. I. Analysis of changes in the strength characteristics in operation // 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin, 2014. Vol. 4.
15. D.L. A. Melo & E.C. G. Santos. Shear strength of RCDW/nonwoven geotextile interface // 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin, 2014. Vol. 7.
16. Robert M. Koerner. Designing with Geosynthetics. Upper Saddle River. New Jerse, 1999.