

УДК 625

**Мошенжал Андрей Вячеславович**

ООО «Миакон Спб»

Россия, Санкт-Петербург <sup>1</sup>

Инженер-проектировщик; аспирант кафедры

«железнодорожный путь, основания и фундаменты» ДВГУПС

E-Mail: [a.moshenzhal@gmail.com](mailto:a.moshenzhal@gmail.com)

## **Учет механизма взаимодействия геосинтетических материалов с сыпучими грунтами в расчетах сдвигоустойчивости дорожных одежд с позиции теории о механике зернистых сред**

**Аннотация.** Обозначена актуальная проблема отсутствия в отечественных расчетных методиках возможности в полной мере учитывать наличие армирующих прослоек, при проверке условия сдвигоустойчивости конструктивных слоев дорожных одежд из зернистого грунта. Этот факт вызывает определенное непонимание у проектировщиков и накладывает некоторые ограничения на обоснование в расчетах использование различных по свойствам геосинтетических материалов, что может приводить к не всегда обоснованным решениям. Понимание процессов происходящих в массиве армированного грунта под действием поверхностной нагрузки позволит оценивать необходимость повышения прочностных и деформационных свойств слоев. В данной статье на основе анализа влияния армирующих прослоек на распределение вертикальных и горизонтальных напряжений в массиве грунта описан, с позиции теории зернистых сред, механизм взаимодействия геосинтетического материала с сыпучим грунтом через коэффициент распределительной способности среды. Приведены результаты собственных экспериментальных исследований автора статьи по влиянию армирующих прослоек на напряженное состояние сыпучего грунта, а также результаты исследований других авторов. Даны общие рекомендации по перспективным направлениям в расширении поля применимости теории о механике зернистых сред в отрасли дорожного проектирования.

**Ключевые слова:** геосинтетические материалы; сдвигоустойчивость; сыпучие грунты; дорожные одежды; механика зернистых сред; коэффициент распределительной способности.

---

<sup>1</sup> 197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 4

## Введение

Повышение безопасности и увеличение надежности дорожных одежд являются одними из приоритетных задач решаемых на стадии проектирования. Для достижения этих целей необходимо принятие эффективных инженерных решений обеспечивающих изменение в большую сторону прочностных и деформационных свойств зернистых грунтов, из которых преимущественно состоят конструктивные слои. При чем эти решения должны обязательно назначаться расчетом, учитывающим конструктивные особенности материалов дорожной одежды и условия её эксплуатации.

Одним из основных критериев надежности дороги является условие обеспечения сдвигоустойчивости конструктивных слоев и основания дорожной одежды. Наиболее распространенным и эффективным способом повышения сдвигоустойчивости является применение армирующих прослоек. Анализ многочисленных экспериментальных исследований различных авторов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] позволяет сделать вывод об увеличении прочностных и деформационных свойств грунтов для разных областей транспортного строительства, таких как железнодорожное и автодорожное. Но, к сожалению, при всех положительных сторонах применения армирующих прослоек назначение тех или иных проектных решений с ними, на сегодняшний день, выполняется на основе опыта прошлых лет или на расчетных методиках не учитывающих в полной мере механизм взаимодействия зернистого грунта и геосинтетического материала. Некорректность некоторых предлагаемых решений с использованием теории упругости, например, в методике ОДН 218.046-01<sup>2</sup>, исключает возможность реально оценивать целесообразность применения того или иного мероприятия по усилению дорожной одежды. При этом, как отмечено в [8], также вызывает сомнение правильность расчетов по допускаемому упругому прогибу и условию сдвигоустойчивости, что, как следствие, может привести к проблемам при строительстве и в период эксплуатации.

На сегодняшний день перспективным направлением в исследовании распределения напряжений и решения контактных задач между слоями из зернистых материалов является теория о механике зернистых сред [9]. В данной статье рассмотрены вопросы учета армирующих прослоек в расчетах по условию сдвигоустойчивости конструктивных слоев.

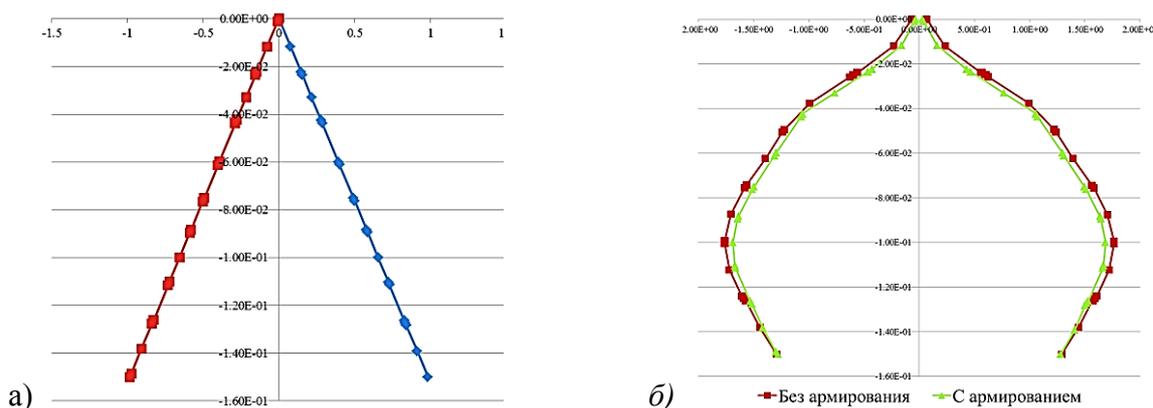
## Основная часть

Для исследования влияния армирующих прослоек на слой зернистого грунта, в рамках данной статьи, был выполнен ряд экспериментов на основе компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм» (разработчик ООО "Вычислительная механика", г. Брянск).

В теории упругости слой зернистого материала рассматривается как сплошной и изотропный, а связь между вертикальными и горизонтальными напряжениями выражается через коэффициент бокового давления грунта, зависящий от коэффициента Пуассона, не учитывающего всех особенностей природы дискретной среды. Эпюры распределения по глубине горизонтальных напряжений по боковым граням модели представлены на рисунке 1. При этом наличие армирующих прослоек никак не влияет на характер распределения горизонтальных напряжений от собственного веса грунта (рис. 1 а).

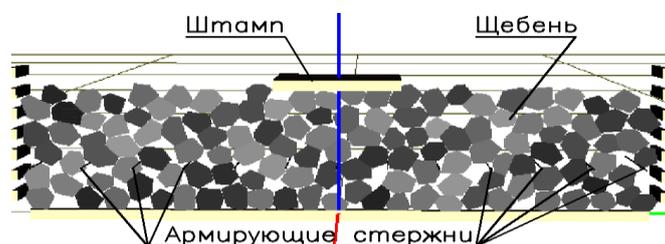
---

<sup>2</sup> ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд

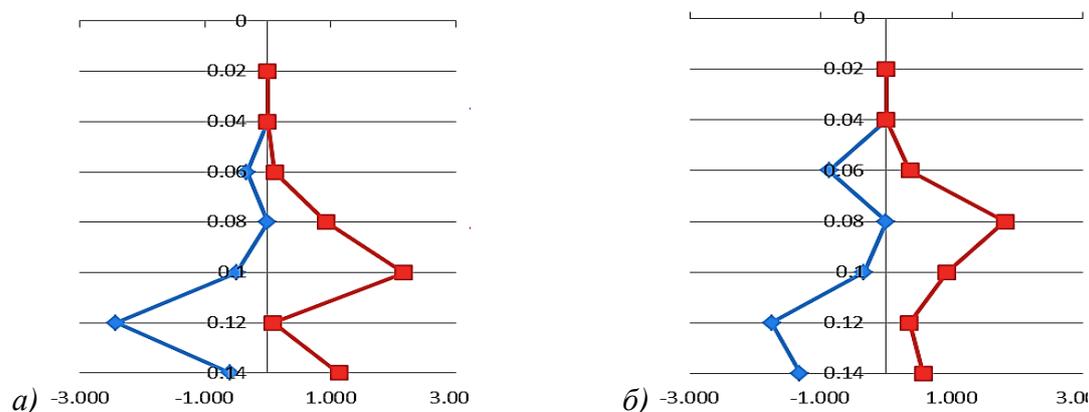


**Рис. 1.** Распределение горизонтальных напряжений в сплошной среде на границах модели (на основе моделирования в программном комплексе Plaxis 2D): а) – до приложения нагрузки; б) – после приложения нагрузки

Согласно теории И.И. Кандаурова о дискретных средах [9] горизонтальные напряжения связаны с вертикальными в общем виде тоже через коэффициент бокового давления, но изменяющийся по глубине. Это связано с тем, что в массиве частицы не имеют одинаковой геометрической формы, «упакованы» друг относительно друга случайным образом и между ними возникают силы трения разные по величине. Таким образом, частица передает усилия не на две нижележащие частицы, а на их большее количество. Очевидно, что при учете особенностей структуры зернистого слоя эпюра горизонтальных напряжений будет выглядеть иначе (рис. 3). На рисунке 2 представлена компьютерная модель зернистой среды, выполненная в программе «Универсальный механизм».



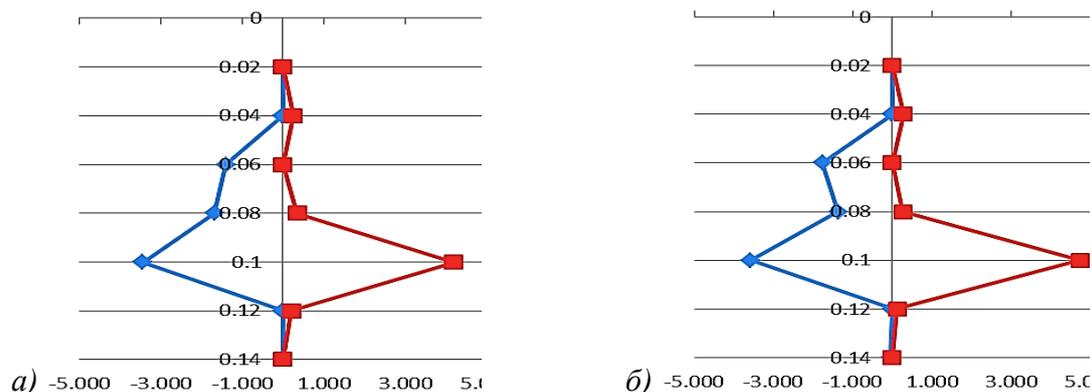
**Рис. 2.** Компьютерная модель дискретной среды



**Рис. 3.** Распределение горизонтальных напряжений в неармированной дискретной среде на границах модели (на основе моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм»): а) – до приложения нагрузки; б) – после приложения нагрузки

На рисунке 3 а) представлена фаза сформированной случайным образом структуры зернистого слоя с эпюрами распределения горизонтальных напряжений от собственного веса по боковым граням модели. Напряжения распределяются не линейно как в сплошных средах. После приложения нагрузки произошла переупаковка частиц, вследствие чего возникло изменение величин горизонтальных напряжений (рис. 3 б).

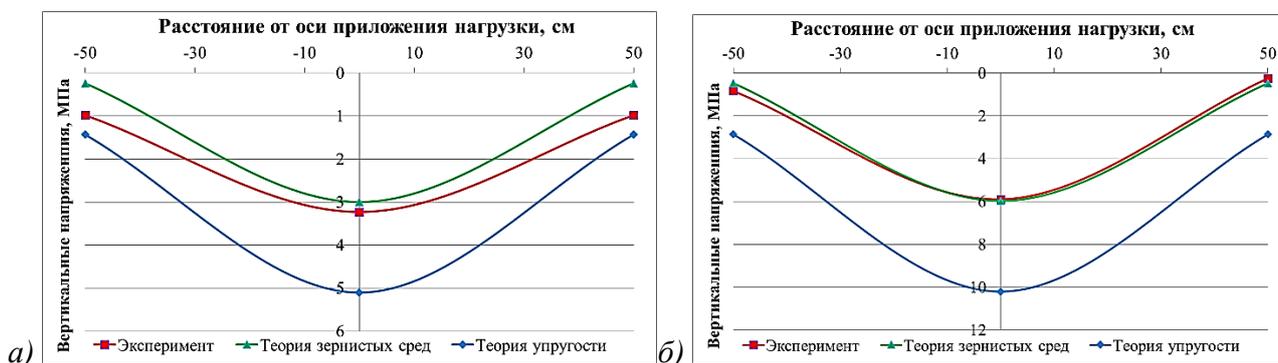
При добавлении армирующих элементов в компьютерную модель зернистой среды были получены эпюры горизонтальных усилий на боковых гранях модели (рис. 4) качественно отличающиеся от эпюр, полученных в экспериментах с неармированной средой (рис. 3).



**Рис. 4.** Распределение горизонтальных усилий в армированной дискретной среде на границах модели: а) – до приложения нагрузки; б) – после приложения нагрузки

Анализируя эпюры распределения горизонтальных усилий до и после приложения вертикальной нагрузки в неармированной (рис. 3) и армированной (рис. 4) сыпучих средах можно сделать вывод, что во втором случае обеспечивается большая устойчивость среды к изменению структуры. Таким образом подтверждается предположение высказанное в работе [10] о создании геосинтетическими материалами более устойчивой структуры слоя к горизонтальным деформациям под действием вертикальной нагрузки.

В ходе выполнения экспериментов с компьютерной моделью армированного слоя зернистого материала были также получены эпюры распределения вертикальных напряжений по горизонтали (рис. 5) от действия нагрузки на штамп.



**Рис. 5.** Распределение вертикальных напряжений по горизонтальному сечению на глубине 50см в армированном песчаном грунте: а) при приложении нагрузки 14.15кН/м<sup>2</sup>; б) – 28.29кН/м<sup>2</sup>

Кривые распределения вертикальных напряжений, полученные с использованием решений теории И.И. Кандаурова [9], показывают большую сходимость с результатами эксперимента, в отличие от значений, полученных по теории упругости.

В работе [11] изучалось влияние армирующих прослоек на изменение свойств слабых грунтов. По результатам выполненных экспериментально-аналитических исследований оказалось – наличие армирующих прослоек позволяет повысить прочностные характеристики и уменьшить деформируемость слоя зернистой среды. Данный факт подтверждается результатами выполненных штамповых испытаний, полученных специалистами компаний ООО «Миакон СПб» и ОАО «Ленаэропроект» [12], согласно которых наличие армирующей прослойки позволяет быстрее добиться постоянного модуля деформации при циклическом приложении одинаковой максимальной нагрузки (рис. 6). Этот эффект обусловлен формированием георешетки более устойчивой к деформациям структуры дискретной среды. Часть усилий передающихся путем контакта от частицы к частице по горизонтали георешетка забирает на себя через эти же частицы, «застрявшие» в её ячейках. Снижаются перемещения зерен и, как следствие, быстрее достигается требуемое уплотнение и модуль деформации.

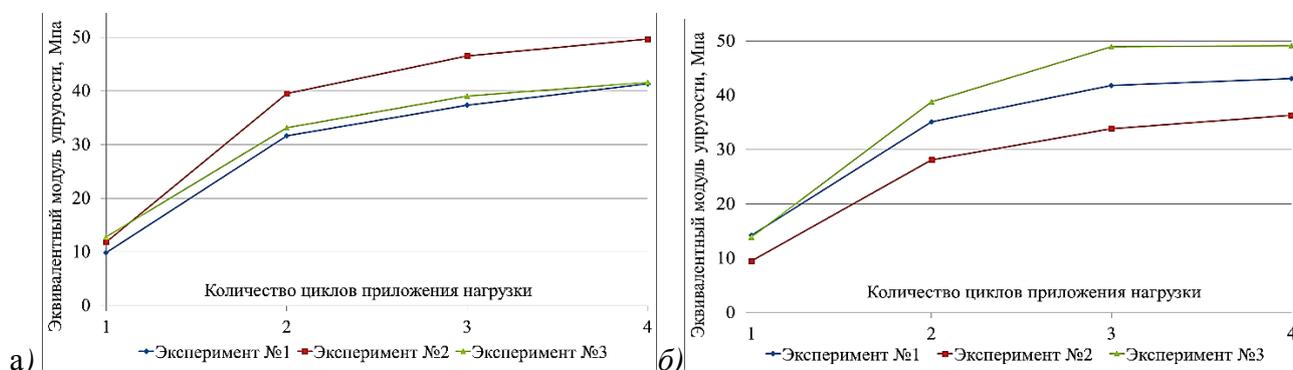


Рис. 6. Изменение эквивалентного модуля упругости с увеличением циклов приложения нагрузки: а) – без армирования; б) – с армированием

В традиционных расчетных методиках не рассматриваются вопросы распределения вертикальных и горизонтальных компонент напряжений в зависимости от структуры слоя из зернистого материала, а это значительный недостаток, поскольку, очевидно, что при наличии прослоек распределение напряжений в массиве грунта будет иметь другой характер в отличие от неармированного слоя.

В теориях сплошных сред величины напряжений определяются по формулам (1, 2) [13]:

$$\sigma_z := \frac{P}{\pi} \cdot \left( \operatorname{atan} \left( \frac{a-x}{z} \right) + \operatorname{atan} \left( \frac{a+x}{z} \right) \right) - \frac{2 \cdot a \cdot P}{\pi} \cdot \frac{z \cdot (x^2 - z^2 - a^2)}{(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4 \cdot a^2 \cdot z^2} \quad (1)$$

$$\sigma_x := \frac{P}{\pi} \cdot \left( \operatorname{atan} \left( \frac{a-x}{z} \right) + \operatorname{atan} \left( \frac{a+x}{z} \right) \right) + \frac{2 \cdot a \cdot P}{\pi} \cdot \frac{z \cdot (x^2 - z^2 - a^2)}{(x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4 \cdot a^2 \cdot z^2} \quad (2)$$

где,  $x$  и  $z$  – координаты исследуемой точки в массиве в осях  $XOZ$ ;  $P$  – интенсивность равномерно распределенной нагрузки;  $a$  – половина ширины полосы загрузки.

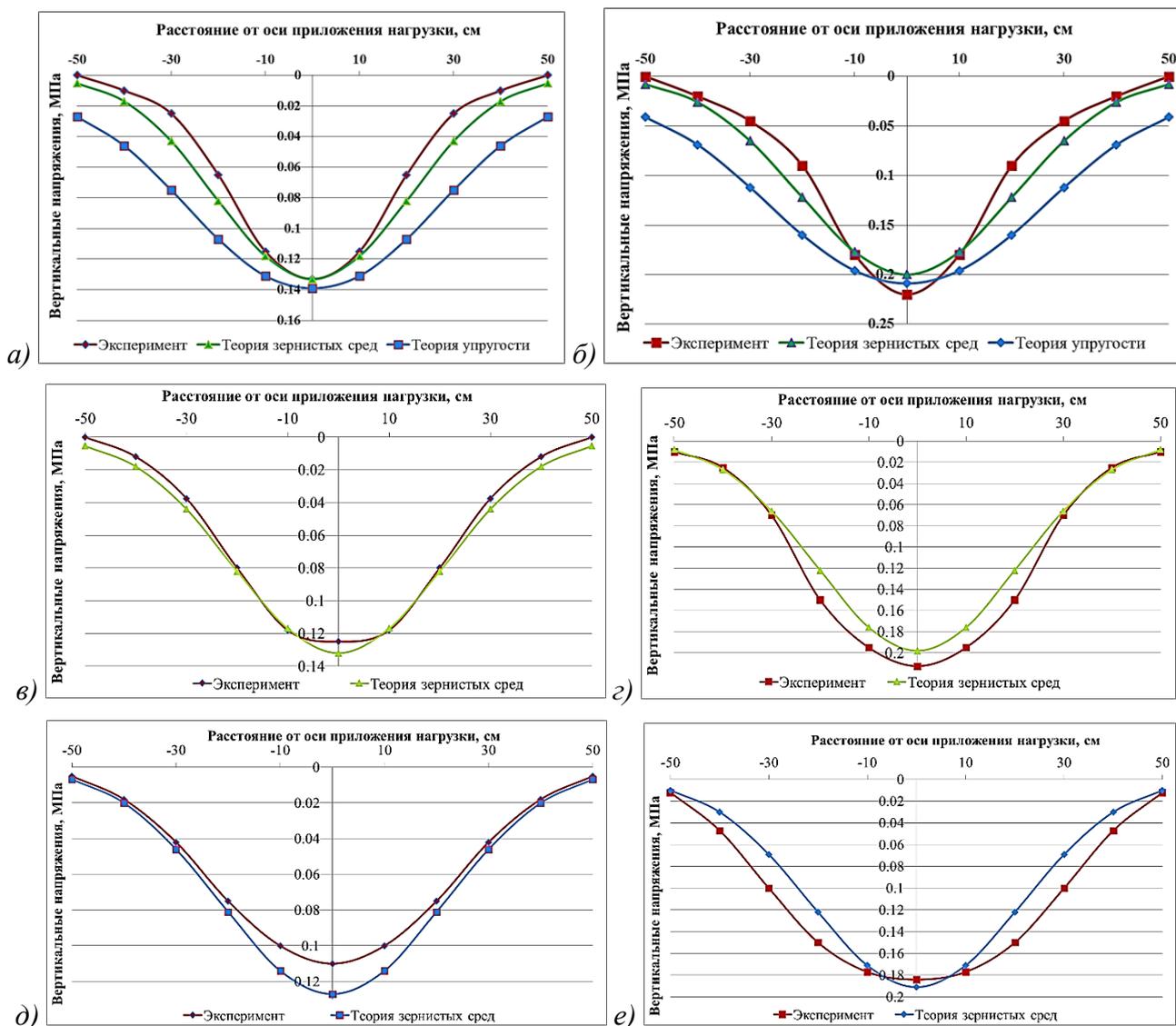
Существенным допущением в классической механике грунтов, основанной на предпосылках теории упругости, является рассмотрение дискретного слоя как изотропного и упругого. При определении всех компонент тензора напряжений не учитывается структура формируемого слоя, форма частиц, их взаимодействие друг с другом под нагрузкой, а также отсутствует величина, учитывающая эффект от армирующих прослоек и системный подход, позволяющий определять, например, горизонтальные напряжения как сопутствующие для вертикальных, являющихся – ведущими. В теории упругости вопросы распределения вертикальных и горизонтальных напряжений решаются как отдельные задачи, не зависимо друг от друга.

Для сравнения результатов расчета вертикальных напряжений по теории упругости (1) и механике зернистых сред (3) воспользуемся экспериментальными исследованиями выполненными специалистами Гипродорнии с участием НИИОСП им. Н. М. Герсеванова [14]. Испытания выполнялись в лотке размером 4x14x6м. Поведение армированных песчаных грунтов изучали статическим нагружением их через жесткий металлический штамп диаметром 50см нагрузкой до 0,45МПа, которую, прикладывали ступенями 0,025-0,05МПа. На рисунке 7 представлены графики распределения вертикальных напряжений по горизонтали в неармированном и армированном песчаном слое. Для определения вертикальных напряжений по теории зернистых сред использовалась формула (3) для нагрузки распределенной по полосе по параболическому закону при двухмерной постановке задачи [9].

$$\sigma_z = \frac{P}{z\sqrt{2\pi v}} \int_{-b}^b \left(1 - \frac{\xi^2}{b^2}\right) \exp\left[-\frac{(x-\xi)^2}{2vz^2}\right] d\xi \quad (3)$$

где, P – наибольшая ордината параболического давления; z, x - координаты исследуемой точки в массиве в осях X0Z; b – половина ширины полосы загрузки; v – коэффициент структуры зернистой среды.

В формуле (3) неизвестной величиной является v – коэффициент распределительной способности зернистого грунта. В своих работах автор теории зернистых сред [9] определяет v экспериментальным путем, по величине вертикального напряжения  $\sigma_z$ , измеренного на датчике давления, размещенном в грунте, по которому, решая обратную задачу, получает искомый коэффициент. В данной статье неизвестная величина v определялась для трех случаев – не армированного  $v^{\sigma/a} = 0.214$ , армированного фильтровальным полотном  $v^{арм. ф.н.} = 0.219$  и армированного нетканым материалом  $v^{арм. н.м.} = 0.245$  песка.



**Рис. 7.** Распределение вертикальных напряжений по горизонтальному сечению на глубине 35 см в неармированном песчаном грунте: а) – при приложении нагрузки 0,2 МПа (без армирования); б) – 0,3 МПа (без армирования); в) – 0,2 МПа (с армированием фильтровальным полотном); г) – 0,3 МПа (с армированием фильтровальным полотном); д) – 0,2 МПа (с армированием нетканым материалом); е) – 0,3 МПа (с армированием нетканым материалом)

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы.

- Кривые, построенные по решениям теории зернистых сред, показывают большую сходимость с экспериментальными данными в отличие от значений полученных с использованием решений теории упругости;
- Значения коэффициента распределительной способности в случаях а) – б) и в) – г) не существенно отличаются друг от друга. Этот факт указывает на незначительное влияние армирующих прослоек на характер распределения вертикальных напряжений.
- В случае д) – е) при использовании нетканого материала «полифелт ТС» происходит увеличение  $\nu$ , что соответствует уменьшению концентрации вертикальных напряжений на датчике.

Последние два вывода достаточно полно объясняются положениями теорий И.И. Кандаурова [9] и П. Роу [15]. Рассмотрим механизм распределения напряжений в массиве сыпучего грунта. Каждое зерно среды имеет свою форму и определенное положение в пространстве, определяемое начальными условиями формирования структуры. При уплотнении между частицами возникают силы трения и увеличивается число контактов. Следовательно при приложении нагрузки на одну частицу передача напряжений происходит не на две ниже лежащие частицы, а на большее количество, поскольку включаются в процесс соседние по горизонтали зерна. При увеличении нагрузки, нарушающей предельное равновесие в массиве, происходят повороты, перемещения либо отдельно взятых частиц, либо группы. Это приводит к изменению числа контактов и связей, т.е. происходит осадка массива грунта, обусловленная не только вертикальным сжатием, но и горизонтальными смещениями. Поскольку произошла переупаковка частиц – величина  $\nu$  изменилась. Следует отметить, что увеличение контактов между частицами приводит к возрастанию площади распространения вертикальных напряжений, а это, в свою очередь, приводит к их более быстрому затуханию по глубине. Применяв геотекстильные полотна, в эксперименте было обеспечено более быстрое снижение вертикальных напряжений за счет проскальзывания частиц песка по материалу в горизонтальном направлении, при этом величина  $\nu$  увеличилась. Таким образом, можно сделать обратный вывод – чем меньше будет поворотов и перемещений зерен, тем больше будет происходить концентрация вертикальных напряжений в массиве, при этом величина  $\nu$  будет уменьшаться. Для достижения последнего возможно применение в качестве армирующих прослоек различных по типу производства плоских георешеток<sup>3</sup>, обеспечивающих фиксацию частиц в массиве при приложении нагрузки, т.е. добиваться более устойчивой структуры слоя к горизонтальным деформациям под действием вертикальной нагрузки. В этом случае повышается актуальность проверки обеспечения сдвигоустойчивости основания, поскольку происходит концентрация напряжений под армированным слоем зернистого грунта. При выполнении условия, в период производства строительных работ, по обеспечению требуемой величины упругого модуля деформации сыпучего грунта, например, щебня армированного георешеткой, можно полагать что отдельный конструктивный слой дорожной одежды будет иметь приблизительно одинаковый коэффициент распределительной способности по всей высоте.

Подход описанный выше позволит применять решения теории о механике зернистых сред при определении всех компонент тензора напряжений, с целью проверки условия обеспечения сдвигоустойчивости нижележащих слоев. Очевидно, что геометрические характеристики, прочностные и иные свойства армирующих прослоек будут оказывать воздействие на коэффициент распределительной способности. Поэтому для решения этой задачи необходимо выполнение натуральных экспериментальных исследований.

Основываясь на представленных в данной статье результатах можно утверждать, что инструментарий теории о механике зернистых сред в полной мере объясняет механизм взаимодействия геосинтетических материалов с сыпучими грунтами конструктивных слоев дорожных одежд.

---

<sup>3</sup> Наименования даны в соответствии с ГОСТ 55028-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства»

## Заключение

Необходимость армирования конструктивных слоев дорожной одежды во многом обусловлена выполнением условия сдвигоустойчивости. В настоящее время геосинтетический рынок представлен большим количеством производителей, выпускающих различные по назначению материалы, но к сожалению отсутствуют способы учета в полной мере свойств прослоек в подобных расчетах. Это связано, как уже отмечалось ранее, с недостатками теории упругости, на которой основаны действующие отечественные нормы по проектированию. Теория И.И. Кандаурова [9] имеет другие параметры, в большей степени учитывающие особенности природы армированной среды, позволяющие корректно оценивать напряженно-деформированное состояние зернистых грунтов. В связи с этим наиболее перспективными исследованиями в данной области, по мнению автора статьи, являются:

1. Экспериментальное определение зависимостей коэффициента распределительной способности от модуля упругой деформации с учетом типа зернистого материала (подобная постановка задачи была сформулирована Р.А. Муллером [16] в 1972г.);
2. Учет в действующих расчетных методиках влияния армирующих прослоек на распределение всех компонент тензора напряжений в конструкциях дорожных одежд с учетом параметров зернистой среды, характеристик геосинтетических материалов, таких как: жесткость, размер ячеек, повреждаемость, степень деформативности, а также способа формирования структуры слоя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Спицин А. Испытание в лабораторных условиях дорожных одежд с прослойкой из геотекстилей TYPAR® SF // Дорожная держава. 2008. № 14. С. 78-79.
2. Фомин А.П., Коренков А.Б. Экспериментальные исследования по применению полимерных геосеток (плоских георешеток) для армирования слоев дорожных одежд из крупнозернистых материалов // Дороги и мосты. Сборник ст. / ФГУП «РОСДОРНИИ». 2008. № 19/1. С. 123-133.
3. Корпусов С.В., Иванов П.В., Петряев А.В. Георешетки для усиления основания пути // Путь и путевое хозяйство. 2000. № 6. С. 25-30.
4. Ашпиз Е.С. Усиление площадки земляного полотна железных дорог // Инновации в строительстве. Дороги. – 2012. – № 16.
5. Indraratha B., Nimbalkar S.. Deformation Characteristics of Railway Ballast Stabilised with Geosynthetics. Testing and consulting Report. New Delhi, India. 2010
6. Das B. M. Use of Geogrid in Subgrade-Ballast System of Railroads Subjected to Cyclic Loading for Reducing Maintenance. California State University, Sacramento, USA. 2010
7. Klotzinger E. // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2008. – № 1/2. – S. 34–41. – № 3. – S. 120–125.
8. Мерзлякин А.Е. Эволюция дорожных одежд / Дороги. Инновации в строительстве. 2013. № 25. С. 26-28.
9. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1988. 280 с.
10. Журавлев И.Н. Оценка влияния геоматериалов на напряженно-деформированное состояние железнодорожного земляного полотна: дис. ...канд. техн. наук / Петербургский государственный университет путей сообщения. СПб., 2005. 197 с.
11. Мельников А.В. Исследование прочности и деформируемости слабых грунтов оснований, усиленных армированием: дис. ... магистра техники и технологии строительства / Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Пенза, 2012. 216 с.
12. Мошенжал А.В. Рекомендации по учету решеток «ГЕО Газон» в расчетах нежестких аэродромных покрытий. СПб.: МИАКОМ, 2014. 40 с.
13. Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. пособ. / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, С.Н. Чернышев. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. 528 с.
14. Полуновский А.Г., Казарновский В.Д. Синтетические текстильные материалы в транспортном строительстве. М.: Транспорт, 1984. 159 с.
15. Роу П. Теоретический смысл и наблюдаемые величины деформационных параметров грунта // Механика. Новое в зарубежной науке. Ч.2, Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С.76-143.
16. Муллер Р.А. Дискретные механические модели оснований гидротехнических сооружений / Труды координац. Совещ. По гидротехнике. Л.: Энергия, 1972. вып. 77.

**Рецензент:** Овчинников Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии транспорта, заместитель Председателя Поволжского отделения Российской академии транспорта.

**Andrey Moshenzhal**  
LLC «Miakom spb»  
Russia, Saint Petersburg  
E-Mail: [a.moshenzhal@gmail.com](mailto:a.moshenzhal@gmail.com)

## **Accounting for the interaction mechanism geosynthetics with granular soils in the calculation of shear strength road pavements from a position of the theory the mechanics granular media**

**Abstract.** Denotes the actual problem of absence of settlement methods in domestic opportunity to fully to take into account the presence of the reinforcing layers, in verifying shear strength the design pavement layers of granular soil. This fact causes a misunderstanding of the designers defined and imposes some restrictions based on calculations, using different properties geosynthetics, which may not necessarily lead to decisions. Understanding of the processes taking place in the array of reinforced soil under surface load will assess the need to improve the strength and deformation properties of the layers. In this article by analyzing the effect of reinforcing layers in the vertical and horizontal distribution of stresses in the soil body is described, from a position the theory granular media, the mechanism of interaction of geosynthetic material with granular media through the distribution coefficient of the medium. Contains the results of experimental studies of the author on the influence of reinforcement layers on the stress state of granular soils, as well as the results of other authors. General recommendations are given in the promising areas in the extension of the applicability of the theory the mechanics granular media in the field of road design.

**Keywords:** Geosynthetics; shear strength; granular soils; pavements; mechanics of granular media; coefficient of distribution capacity.

## REFERENCES

1. Spicin A. Ispytanie v laboratornyh uslovijah dorozhnyh odezhd s proslojkoj iz geotekstilej TYPAR® SF // Dorozhnaja derzhava. 2008. № 14. S. 78-79.
2. Fomin A.P., Korenkov A.B. Jeksperimental'nye issledovaniya po primeneniju polimernyh geosetok (ploskih georeshetok) dlja armirovaniya sloev dorozhnyh odezhd iz krupnozernistykh materialov // Dorogi i mosty. Sbornik st. / FGUP «ROSDORNII». 2008. № 19/1. S. 123-133.
3. Korpusov S.V., Ivanov P.V., Petrjaev A.V. Georeshetki dlja usilenija osnovanija puti // Put' i putevoe hozjajstvo. 2000. № 6. S. 25-30.
4. Ashpiz E.S. Usilenie ploshhadki zemljanogo polotna zheleznyh dorog // Innovacii v stroitel'stve. Dorogi. – 2012. – № 16.
5. Indraratha B., Nimbalkar S.. Deformation Characteristics of Railway Ballast Stabilised with Geosynthetics. Testing and consulting Report. New Delhi, India. 2010
6. Das B. M. Use of Geogrid in Subgrade-Ballast System of Railroads Subjected to Cyclic Loading for Reducing Maintenance. California State University, Sacramento, USA. 2010
7. Klotzinger E. // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2008. – № 1/2. – S. 34–41. – № 3. – S. 120–125.
8. Merzlikin A.E. Jevoljucija dorozhnyh odezhd / Dorogi. Innovacii v stroitel'stve. 2013. № 25. S. 26-28.
9. Kandaurov I.I. Mehanika zernistykh sred i ee primenenie v stroitel'stve. L.: Strojizdat, Leningr. otделение, 1988. 280 s.
10. Zhuravlev I.N. Ocenka vlijaniya geomaterialov na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie zheleznodorozhnogo zemljanogo polotna: dis. ...kand. tehn. nauk / Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija. SPb., 2005. 197 s.
11. Mel'nikov A.V. Issledovanie prochnosti i deformiruемости slabych gruntov osnovanij, usilennyh armirovanijem: dis. ... magistra tehniki i tehnologii stroitel'stva / Penzenskij gosudarstvennyj universitet arhitektury i stroitel'stva. Penza, 2012. 216 s.
12. Moshenzhal A.V. Rekomendacii po uchetu reshetok «GEO Gazon» v raschetah nezhestkih ajerodromnyh pokrytij. SPb.: MIAKOM, 2014. 40 s.
13. Mehanika gruntov, osnovanija i fundamenty: ucheb. posob. / S.B. Uhov, V.V. Semenov, V.V. Znamenskij, S.N. Chernyshev. M.: Izdatel'stvo Associacii stroitel'nyh vuzov, 2005. 528 s.
14. Polunovskij A.G., Kazarnovskij V.D. Sinteticheskie tekstil'nye materialy v transportnom stroitel'stve. M.: Transport, 1984. 159 s.
15. Rou P. Teoreticheskij smysl i nabljudajemye velichiny deformacionnyh parametrov grunta // Mehanika. Novoe v zarubezhnoj nauke. Ch.2, Opredel'jajushhie zakony mehaniki gruntov. M.: Mir, 1975. S.76-143.
16. Muller R.A. Diskretnye mehanicheskie modeli osnovanij gidrotehnicheskikh sooruzhenij / Trudy koordinac. Soveshh. Po gidrotehnikе. L.: Jenergija, 1972. vyp. 77.