

Эффективность армирования щебня с помощью геоячеек¹

А.Е.Мерзликин, канд. техн. наук, заведующий лабораторией ФГУП «РОСДОРНИИ»

Предисловие

Несмотря на многочисленные примеры практического применения геоячеек (объёмных георешёток) для армирования слоёв оснований из несвязных зернистых материалов использование этого вида армирующего материала ограничено из-за отсутствия приемлемого метода проектирования таких конструкций. Существующие методы проектирования не дают возможности оценить эффективность использования геоячеек. Существующая расчётная схема дорожной одежды не отражает изменений напряжённо-деформированного состояния при применении геоячеек. Штамповые испытания на крупномасштабных моделях, проводимые для оценки жёсткости слоя из несвязного зернистого материала, армированного геоячейками, показывают, что наличие геоячеек в слое повышает жёсткость слоя из зернистого материала. При этом эффективный модуль упругости композита «геоячейка + зернистый материал» зависит от множества параметров эксперимента, например, от вертикальной нагрузки, приложенной к дорожной конструкции, от гранулометрического состава зернистого материала, от высоты геоячеек и т.п.

Цель данной работы - продемонстрировать, что эффективность армирования щебня геоячейками с точки зрения общей жёсткости дорожной одежды значительно отличается от эффективности армирования с позиции сдвигоустойчивости нижележащего грунта.

Эксперименты по армированию зернистого материала геоячейками

Армирование зернистого материала геоячейками приводит к увеличению жёсткости слоя. Если предположить, что этот слой представляет собой новый композитный материал, то его модуль упругости больше модуля упругости исходного зернистого материала в $K_{эф}$ раз. Эксперименты показывают, что $K_{эф}$ имеет различные значения в зависимости от выбранного для исследования критерия прочности (i) дорожной конструкции. Например: по упругому прогибу покрытия при заданной нагрузке; по нагрузке, при которой дос-

¹ Статья опубликована в кн.: Применение геосинтетических и геопластиковых материалов в транспортном строительстве/Труды СОЮЗДОРНИИ, вып. 212, М., 2010, с. 57-67

тигается заданный прогиб или по напряжённому состоянию слоя, лежащего под армированным слоем. Назовём $K_{эф}^i$ – коэффициентом экспериментальной эффективности армирования слоя по i -ой характеристике, например, $K_{эф}^u$ – коэффициентом экспериментальной эффективности по прогибу.

Далее для исключения влияния на эффективность армирования таких факторов как деформационные характеристики материала, наличие перфорации и текстуры на стенках, образующих геоячейки, рассмотрели эксперименты, в которых применялись геоячейки из полиэтилена толщиной 1,53 мм с перфорацией, занимающей 16% площади стенок одной геоячейки, и имеющие на поверхностях стенок текстуру.

При ремонте и реконструкции дорог К-637 и К-23 в Германии построены участки со слоями из щебня, армированного геоячейками. На этих экспериментальных, а также на контрольных участках установили датчики давления. Конструкции дорожных одежд представлены на рис. 1.

На дороге К-637 при движении транспортных средств измеряли одновременно вертикальные сжимающие напряжения под исследуемыми слоями и прогибы покрытия [1]. Эффективность армирования щебня геоячейками по прогибу покрытия составила +25% ($K_{эф}^u = 1,25$), а для вертикального сжимающего напряжения +56% ($K_{эф}^\sigma = 1,56$). Следует заметить, что вертикальное сжимающее напряжение может служить упрощённой заменой активного напряжения сдвига при расчёте дорожной конструкции на прочность по сдвигустойчивости грунта или песчаного слоя.

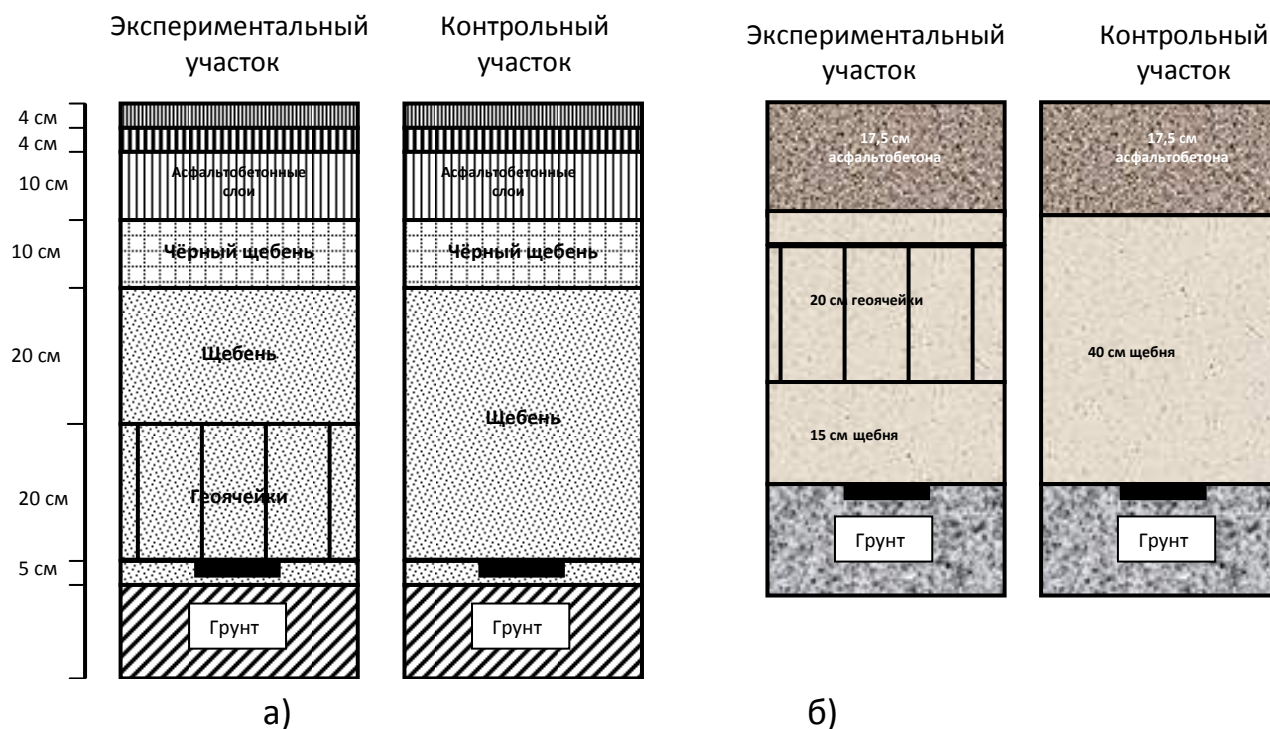



Рис. 1. Экспериментальные и контрольные конструкции на дорогах К-637 (а) [1] и К-25 (б) [3] Германии, оборудованные датчиками давления ()

На дороге К-23 вертикальные сжимающие напряжения измеряли не только в процессе эксплуатации готовой дорожной конструкции, но и в процессе строительства участков. Перед устройством асфальтобетонного покрытия при движении грейдера по щебёночному основанию установили эффективность армирования щебня геоячейками по вертикальному сжимающему напряжению +45% ($K_{эф}^{\sigma} = 1,45$) [3]. После устройства асфальтобетонного покрытия под движущейся со скоростью 40 км/ч нагрузкой от тяжёлого грузовика эффективность армирования щебня по вертикальным сжимающим напряжениям составила +30% ($K_{эф}^{\sigma} = 1,3$) [3]. На экспериментальном и опытном участках упругие прогибы дорожных конструкций определяли с помощью установки динамического нагружения (Диаметр штампа – 30 см, максимальная нагрузка – 50 кН). Эффективность армирования щебня геоячейками по прогибу покрытия составила +15% ($K_{эф}^u = 1,15$).

Испытания крупномасштабных моделей также дают возможность оценить коэффициенты экспериментальной эффективности армирования слоя зернистого материала геоячейками по прогибу и вертикальному нормальному напряжению. В табл. 1 представлены результаты экспериментов некоторых авторов.

На рис. 2 показана эффективность армирования геоячейками щебня и песка в дорожных одеждах переходного типа (Щебень «П» и песок «П») и капитального типа (Щебень «К»). В экспериментах по армированию щебня геоячейками высотой 20 см, расположенного непосредственно под штампом (модель дорожной одежды переходного типа), можно увидеть тенденцию увеличения эффективности армирования как по прогибу от +30% до +110% ($K_{эф}^u = 1,3; 2,1$), так и по нормальному сжимающему напряжению от +45% до +140% ($K_{эф}^{\sigma} = 1,45; 2,4$) с увеличением удельной нагрузки на штамп ($p \approx 100, 300$ кПа). Эта тенденция подтверждается в экспериментах с армированным геоячейками щебнем, расположенным под слоями асфальтобетонного покрытия (модели дорожной одежды облегчённого и капитального типов) при $p \approx 50, 100-200$ кПа: от +15% до +25% ($K_{эф}^u = 1,15; 1,25$) по прогибу и от +30% до +56% ($K_{эф}^{\sigma} = 1,3; 1,56$) по нормальному сжимающему напряжению.

Армирование песка геоячейками высотой 20 см в модели дорожной одежды переходного типа показывает аналогичную картину – при повышении удельного давления на штамп от 200 до 300 кПа коэффициенты эффективности возрастают: по прогибу от +100% до +290% ($K_{эф}^u = 2,0; 3,9$) и по нормальному сжимающему напряжению от +30% до +60% ($K_{эф}^{\sigma} = 1,3; 1,6$).

Однако, как видно на рис. 2, имея одинаковую тенденцию к возрастанию коэффициентов армирования песка и щебня при повышении вертикальных

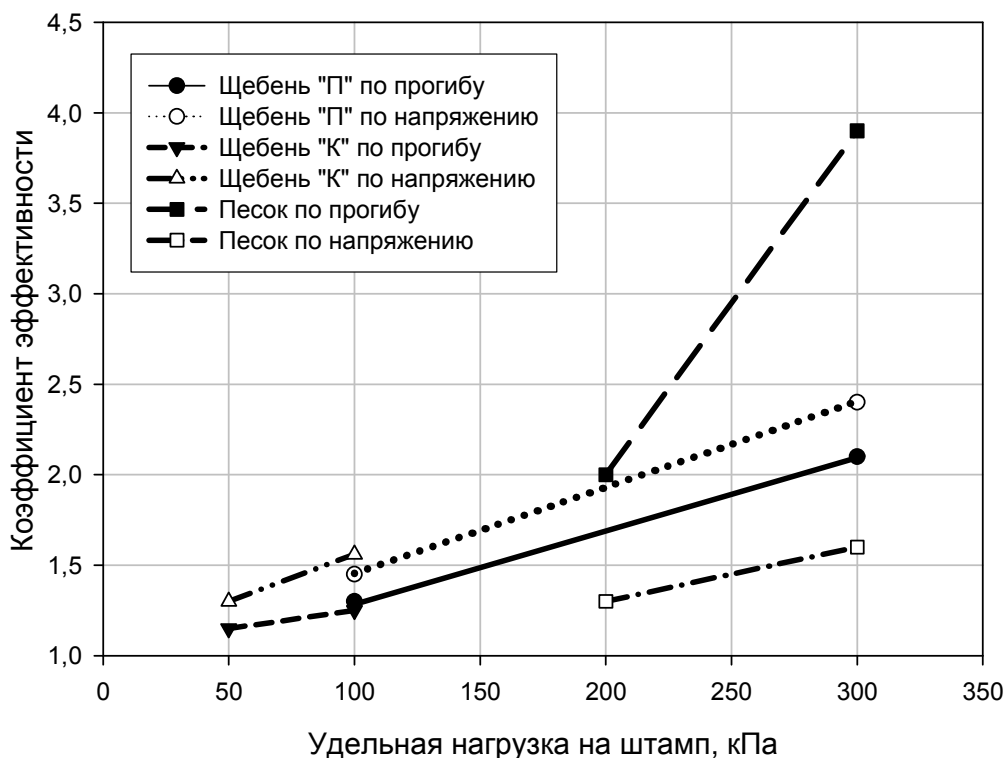


Рис. 2. Эффективность армирования щебня и песка в зависимости от удельной нагрузки на штамп (по данным экспериментов на крупномасштабных моделях)

сжимающих напряжений, при армировании песка $K_{эф}^u$ больше $K_{эф}^\sigma$, а при армировании щебня $K_{эф}^u$ меньше $K_{эф}^\sigma$. Противоречивость этих результатов указывает на необходимость дополнительно поставить экспериментальные работы по армированию песка с помощью геоячеек, измеряя при этом напряжения под армированным слоем и вертикальные перемещения его поверхности.

Влияние высоты геоячеек на эффективность армирования песка показано на примере испытаний крупномасштабных моделей дорожных одежд [3]. В этих экспериментах прослеживается сильное влияние напряжённого состояния исследуемого слоя на результаты испытаний. При давлении на штамп 100 кПа эффективность армирования песка геоячейками высотой 10 см по прогибу проявляется больше, чем при армировании геоячейками, имеющими высоту 20 см (см. табл. 1). Увеличение давления на штамп до 200 кПа приводит к тому, что эффективность геоячеек высотой 10 см снижается

примерно в 2 раза и их применение становится не эффективным по сравнению с геоячейками высотой 20 см.

Таблица 1. Эффективность армирования зернистых материалов с помощью геоячеек на основании результатов штамповых испытаний крупномасштабных моделей дорожных конструкций

Реквизиты эксперимента			Значения реквизитов по источникам информации											
			[1]	[2]	[2]			[3]	[3]			[4]	[5]	
Модель дорожной одежды	Покрытие	Материал	-	Песок	Песок			Песок	Песок			-	Песок	
		Толщина, см	-	2	2			2	2			-	3	
	Зернистое основание армированное и неармированное	Материал	Песок	Щебень	Щебень			Песок	Песок			Песчано-гравийная смесь	Песок	
		Толщина, см	20	20	20			20	20	10		10	20	
	Подстилающие слои	Материал	Песок	Щебень	Щебень			Песок	Песок			Суглинок	Супесь пылеватая	
		Толщина, см	15	15	15			15	15	20		∞	200	
		Материал	Glyben ²	Glyben	Glyben			Glyben	Glyben			-	-	
		Толщина, см	100	100	100			100	100			-	-	
Нагрузка на круглый штамп	Диаметр штампа, см		30	30	30			30	30			37	28	
	Удельная нагрузка, кПа (кН/м ²)		200-400	300	100	200	300	300	100	200	100	200	300	130-300
Коэффициент эффективности по критериям	Прогиб				1,3	1,7	2,1	-	2,0	2,0	2,7	1,2	1,35	3,9
	Максимальное вертикальное напряжение под основанием		1,3-1,6	2,4	-	-		1,6	-	-	-	-	1,5	-

² Бентонит + глицерин

Таким образом, экспериментально установлено, что эффективность армирования щебня геоячейками в основании дорожных одежд капитального типа (I – IV категории дорог), значительно ниже, чем эффективность его армирования в дорожных одеждах переходного типа (V категория дороги). При этом эффективность армирования щебня геоячейками по критерию сдвигоустойчивости выше, чем эффективность по критерию общей жёсткости дорожной одежды (по прогибу).

Численные эксперименты

Для подтверждения этих выводов расчётным путём провели две серии численных экспериментов. При этом модели дорожных одежд рассчитывали с помощью программы АЛГОФОРТ, которая реализует строгое решение теории упругости для многослойного полупространства А.К.Приварникова [6].

Во-первых, рассчитали экспериментальные и контрольные конструкции, которые испытывались на дорогах К-637 [1] и К-25 [3] Германии (см. рис. 1). В связи с тем, что на дороге К-637 испытания проводились с использованием штампа, то модули упругости асфальтобетонов назначили в диапазоне от 1800 до 1200 МПа. На дороге К-25 испытания проводились с использованием движущегося автомобиля и установки динамического нагружения, поэтому модули упругости асфальтобетонов назначили в диапазоне от 2600 до 2100 МПа. В контрольных конструкциях модуль упругости щебня назначили равным 300 МПа. В экспериментальных конструкциях модуль упругости композита «щебень+геоячейки» назначали в пределах от 600 до 13500 МПа.

Численный эксперимент над моделью дорожной конструкции, которая испытывалась на дороге К-637, показал, что для получения эффективности армирования щебня геоячейками по прогибу покрытия +25% и для вертикального сжимающего напряжения +56% (определённые экспериментально) необходимо назначить модуль упругости армированного щебня от 4700 до 13500 МПа, т.е. модуль упругости композита в 16...45 раз больше модуля упругости неармированного щебня.

Численный эксперимент над моделью дорожной конструкции, которая испытывалась на дороге К-23, показал, что для получения эффективности армирования щебня геоячейками по прогибу покрытия +30% и для вертикального сжимающего напряжения +45% (определённые экспериментально) необходимо назначить модуль упругости армированного щебня 3300 МПа, т.е. модуль упругости композита в 11 раз больше модуля упругости неармированного щебня.

Во-вторых, рассмотрели 3 типовых конструкции дорожных одежд, применяемых на дорогах II, III и IV категорий во II дорожно-климатической зоне с основанием из щебня, имеющего модуль упругости 300 МПа (см. рис. 3) и подобные конструкции с основанием из условного композита, имеющего модуль упругости 1800 МПа. Результаты расчётов представлены в табл. 2 и

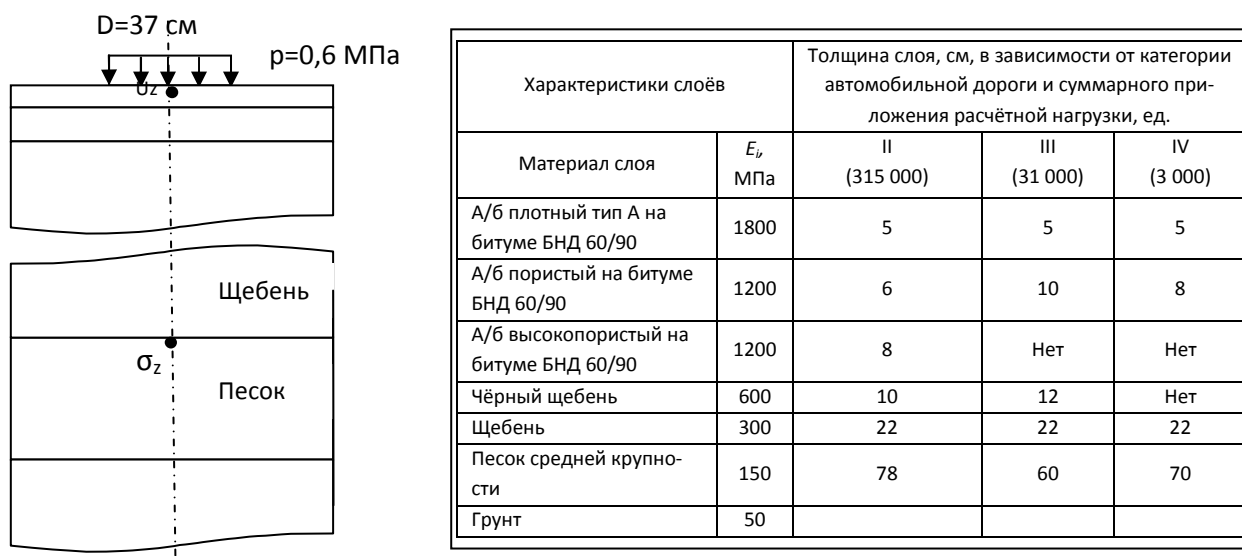


Рис. 3. Расчётная схема и характеристики дорожных одежд для оценки влияния модуля упругости условного композита на значения: U_z – максимального вертикального перемещения поверхности покрытия и σ_z – максимального вертикального сжимающего напряжения под слоем композита

на рис. 4. На рис. 4 видно, что, с уменьшением капитальности дорожной одежды эффективность повышения модуля упругости основания (в наших примерах в 6 раз) растёт:

- от +16% до +42% - по критерию общей жёсткости дорожной одежды;
- от +36% до +59% - по критерию сдвигоустойчивости нижележащего слоя.

Таблица 2. Результаты расчётов

Компоненты напряжённо-деформированного состояния (НДС)	Значения компонентов НДС в конструкции для дорог категории					
	II		III		IV	
	для модулей упругости основания из щебня и замещающего его композита					
	300	1800	300	1800	300	1800
U_z , см	0,0558	0,0482	0,0667	0,0517	0,0766	0,0540
σ_z , МПа	0,0528	0,0387	0,0618	0,0414	0,1073	0,0674

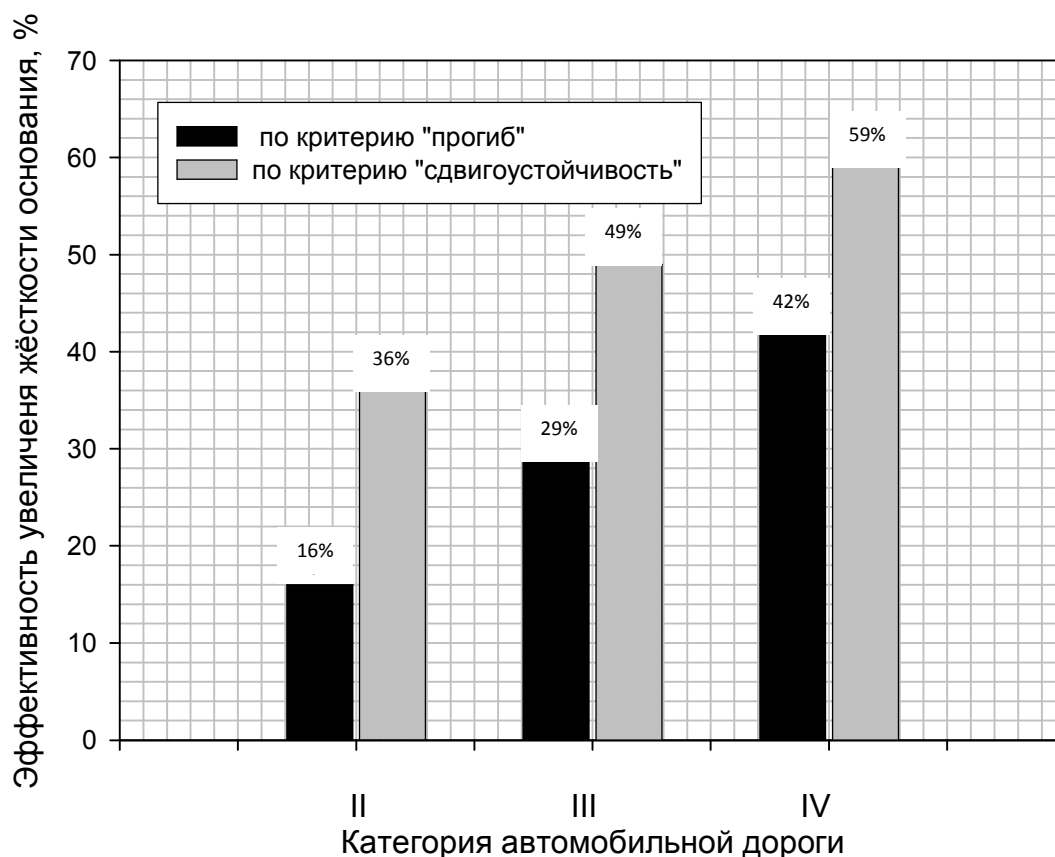


Рис. 4. Эффективность увеличения модуля упругости щебня в 6 раз по критериям "прогиб" и "сдвигоустойчивость" для дорожных одежд, предназначенных для различных категорий дорог

Общие выводы

Как экспериментальные работы на автомобильных дорогах, так и теоретические расчеты дорожных одежд показали, что эффективность армирования щебня геоячейками с точки зрения общей жёсткости дорожной одежды отличается от эффективности армирования с позиции сдвигоустойчивости нижележащего слоя из песка или грунта.

Армировать щебень геоячейками целесообразно в дорожных конструкциях, в которых нижележащие слои из песка или грунта находятся в предельном состоянии по условию сдвига.

Наибольший эффект от армирования щебня с помощью геоячеек проявляется в дорожных одеждах облегчённых и переходного типа.

Расчётный модуль упругости композита «щебень+геоячейки», применяемого в дорожных одеждах капитального типа, следует назначать не менее 1800 МПа.

Литература

1. Emersleben A., Meyer N. The use of geocells in road constructions over soft soil: vertical stress and falling weight deflectometer measurements. - Euro-Geo4 Paper number 132. – pp. 1-8.
2. Meyer N. Determination of the bearing capacity of geocell reinforced soil over soft subgrade with static and dynamic plate load tests. Institute of Geotechnical Engineering and Mine Surveying, TU Clausthal, June, 2007.
3. Emersleben A., Meyer N. Bearing Capacity Improvement of Gravel Base Layers in Road Constructions using Geocells. - The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 1-6 October, 2008, Goa, India.- pp. 3537-3544.
4. Лыщик П.А., Красковский С.В. Усиление лесных дорог объёмными георешётками.- На сайте: <http://www.smolkom.ru/geotest.html>
5. Пшеничникова Е.С., Хусаинов И.Ж., Жигур Ю.Л. Исследование деформаций слоя, состоящего из объёмной георешётки, заполненной песком. – В кн.: Научно-информационный сб. ИНФОРМАВТОДОР, № 3, 2006, с. 16-18.
6. Приварников А.К. Пространственная деформация многослойного основания // Устойчивость и прочность элементов конструкций.- Днепрпетровск, 1973.- с. 27-45.