

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ВЕСТНИК  
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
АРХИТЕКТУРНО СТРОИТЕЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**Выпуск**                      **Серия Строительство и архитектура**                      **2013**  
Научно-теоретический и производственно-практический  
журнал

Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta  
Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura  
(Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering  
Series: Civil Engineering and Architecture)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1999 г.

Волгоград

ВолГАСУ

**С о д е р ж а н и е**

**ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТЫ ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ**

- Богомолов А. Н., Калиновский С. А., Богомолова О. А., Прокопенко А. В., Иванов А. А.** Оценка величины коэффициента запаса устойчивости однородного нагруженного откоса на основе анализа напряженного состояния грунтового массива при различных значениях коэффициента бокового давления грунта 7
- Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А., Соловьев А. В., Прокопенко А. В., Калиновский С. А.** Определение глубины развития областей пластических деформаций в однородном основании заглубленного ленточного фундамента на основе анализа напряженного состояния грунтового массива при помощи методов теории функций комплексного переменного 13
- Богомолов А. Н., Бартоломей И. Л., Богомолова О. А., Прокопенко А. В.** Несущая способность связного основания составного плитного фундамента 27
- Богомолова О. А., Бабаханов Б. С., Калашников С. Ю., Калиновский С. А., Прокопенко А. В., Иванов А. А.** Влияние коэффициента бокового давления грунта на степень устойчивости однородного откоса 39
- Богомолова О. А., Богомолов А. Н., Бартоломей И. Л., Качурин Я. В., Якименко И. В.** К вопросу о взаимном влиянии близко расположенных параллельных незаглубленных ленточных (плитных) фундаментов на связном основании 50

УДК

*В П Матуа СВ Сизонец Р В Матуа*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ УКРЕПЛЕННЫХ ШЕБЕНОЧНО ПЕСЧАНЫХ СМЕСЕЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

Посвящена снижению остаточных деформаций в укрепленных щебеночно-песчаных смесях (ЩПС) под воздействием динамических нагрузок. Показано, что при введении добавок ANT и nanoSTAB в укрепленных ЩПС возрастают прочностные показатели, что свидетельствует об увеличении деформативности и как следствие, происходит уменьшение остаточных деформаций.

**Ключевые слова:** укрепленная щебеночно-песчаная смесь, добавки ANT и nanoSTAB, остаточная деформация, динамическая нагрузка, предел прочности на сжатие, предел прочности на растяжение при изгибе.

The article is devoted to the decrease of permanent strain in strengthened crushed-stone-sand mixtures (CSSM) under the influence of dynamic loadings. It is shown that when adding ANT and nanoSTAB in strengthened CSSM strength indexes increase that testifies the increase of strains and a result the decrease of permanent strain.

**Key words:** strengthened crushed-stone-sand mixtures, ANT and nanoSTAB additives, permanent strain, dynamic loading, pressure strength limit, bend stretching strength limit.

В последние годы, в связи с быстрым ростом интенсивности, скорости движения и осевых нагрузок как на дорогах федерального, так и местного значения, наблюдается значительное повышение скорости накопления остаточных деформаций в элементах дорожных конструкций. Под воздействием многократно повторяющихся нагрузок уже на ранней стадии их эксплуатации наблюдается накопление необратимых (остаточных) деформаций как в грунте земляного полотна, так и в слоях оснований и покрытий дорожных одежд [1]. Накопление остаточных деформаций в слое из укрепленной щебеночно-песчаной смеси (ЩПС) приводит на начальном этапе к образованию микротрещин, постепенное увеличение которых способствует образованию сплошной трещины с разрушением конструктивного слоя. Таким образом разрушение происходит постепенно. Вначале возникают перенапряжения, а затем микротрещины в отдельных микрообъектах. Развитие этого процесса сопровождается перераспределением напряжений и вовлечением в трещинообразование все большего объема материала, вплоть до возникновения сплошного разрыва. При действии сжимающих напряжений разрушение обусловлено вначале прогрессирующим развитием микротрещин отрыва, ориентированных преимущественно параллельно направлению максимального сжимающего напряжения. На следующих стадиях, в частности при неустойчивом пути деформирования, внутри разрушающегося тела возникают зоны сосредоточенного сдвига. Разрушение в конечном итоге вызывается локальным сдвигом и дилатансией в этих зонах [2]. При растяжении для слоя из укрепленных ЩПС характерно образование микротрещин, перпендикулярных направлению главного растягивающего напряжения, и более хрупкое и быстрое разрушение.

Одним из основных критериев, позволяющих судить о надежности и долговечности укрепленных ЩПС, может служить критерий минимума накопления остаточных деформаций. В напряженно-деформированном состоя-

нии материалы в слое из укрепленных ЦПС проявляют ряд сложных свойств: упругость, пластичность, ползучесть, релаксацию напряжений, изменение прочности в зависимости от скорости деформирования, накопление деформаций при многократных приложениях нагрузки и т. д. Наиболее полно свойства смеси можно определить при решении практических задач методами реологии — науки, рассматривающей общие законы течения, т. е. образование и развитие деформаций во времени, которая позволяет наиболее полно исследовать дорожно-строительные материалы и приблизить их испытания к реальным условиям эксплуатации дороги. Используемые в слоях оснований дорожно-строительные материалы, как правило, представляют собой сложную многокомпонентную систему. Эта сложность обусловлена, главным образом, особенностями их структуры, а также большой зависимостью свойств от многообразных факторов. Например, укрепленная ЦПС резко меняет свойства в зависимости от температуры. При высоких положительных температурах происходит пересушивание и появление трещин, а отрицательные могут повлиять на процессы схватывания и твердения. Помимо температуры, на свойства укрепленной ЦПС большое влияние оказывает прочность и деформативность, которые определяются, главным образом, структурой и свойствами цемента, который скрепляет зерна заполнителя в монолит. Структура и свойства смеси зависят от его минералогического состава, водоцементного отношения, тонкости помола цемента, возраста, условий приготовления и твердения, введенных добавок. Проведенные в последнее время исследования показывают, что путем применения тех или иных технологических приемов или введения добавок можно значительно изменить прочность и деформативность слоя из ЦПС: в отдельных случаях прочность увеличивается в несколько раз.

Свойства всякого материала определяются теми условиями, в которых он работает. При весьма кратковременных нагрузках укрепленные ЦПС в зависимости от величины нагрузок находятся в «почти» упругом или упруго-пластическом состоянии. Если поставить их в условия длительного нагружения, что фактически и происходит на автомобильной дороге при высокой интенсивности движения, то деформации растут с течением времени, — укрепленные ЦПС, как говорят, ползут под нагрузкой.

В настоящее время экспериментально установлено, что ползучесть укрепленных ЦПС зависит от большого числа факторов, которые, согласно И. И. Улицкому [3], можно разбить на группы и, за некоторым изменением, представить в следующем виде:

- 1) факторы, зависящие от свойств и соотношения образующих материалов, т. е. от марки;
- 2) факторы, зависящие от окружающей среды, в частности от температуры и влажности;
- 3) факторы, зависящие от характера нагрузки, т. е. от ее величины, длительности действия и количества приложений.

Исходя из вышеизложенного, применение к укрепленным ЦПС теории ползучести видится плодотворным, поскольку она, в отличие от теорий упругости и пластичности, оперирует дополнительно независимой переменной — временем. Для исследования этого процесса в ДорТрансНИИ РГСУ были подобраны оптимальные составы щебеночно-песчаных смесей, укрепленных следующими вяжущими и добавками:

1) цемент ССПЦ 500-Д20 — сульфатостойкий портландцемент марки 500;  
2) битумная эмульсия, состоящая: битум БНД 60/90 + эмульгатор «Асфер» + вода;

3) ионный стабилизатор АНТ, представляющий собой водорастворимую активную органо-минеральную добавку, содержащую амфотерные поверхностно-активные вещества и микроэлементы [4];

4) полимерная эмульсия nanoSTAB, представляющая собой водную дисперсию стирол-бутадиен-полимера SiO<sub>2</sub> [5].

Составы этих смесей представлены в табл. 1.

Таблица 1

*Составы укрепленных щебеночно-песчано-цементных смесей*

Состав смесей, %					Содержание добавок от цемента, %	
Щебень М800	Песок	Цемент	Вода	Битумная эмульсия	АНТ	nanoSTAB
62	35	3	2,5	—	—	—
60	35	5	4,0	—	—	—
62	35	3	3,5	—	0,3	—
62	35	3	2,5	—	—	11
62	35	3	1,25	3	—	—
62	35	3	1,0	5	—	—
60	35	5	1,25	3	—	—
62	35	3	1,25	3	0,3	—
62	35	3	1,25	3	—	11

Образцы из исследуемых смесей изготавливались методом прессования под нагрузкой 20 МПа в течение 3 минут. Образцы из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных минеральным вяжущим, изготавливались в соответствии с ГОСТ 23558—94, а образцы из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных комплексным вяжущим (битумная эмульсия совместно с цементом) по ГОСТ 30491—97. После чего образцы извлекались и хранились в условиях естественного термо-влажностного режима необходимое до испытаний время (28 суток). Перед испытанием образцы подвергались в течение 72 часов капиллярному водонасыщению. Капиллярное водонасыщение образцов проводилось через слой влажного песка. Далее по ГОСТ 10180 определялась прочность образцов на сжатие и растяжение при изгибе.

Результаты физико-механических показателей укрепленных образцов из щебеночно-песчаных смесей представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

*Физико-механические показатели образцов из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных минеральным вяжущим по ГОСТ 23558—94*

Наименование показателей	Составы ЩПС, укрепленных минеральным вяжущим			
	ЩПС + 3 % цемента	ЩПС + 5 % цемента	ЩПС + 3 % цемента + АНТ	ЩПС + 3 % цемента + nanoSTAB
Предел прочности на сжатие $R_{сж}$ , МПа	4,75	6,81	7,29	6,25

Окончание табл. 2

Наименование показателей	Составы ЩПС, укрепленных минеральным вяжущим			
	ЩПС + 3 % цемента	ЩПС + 5 % цемента	ЩПС + 3 % цемента + ANТ	ЩПС + 3 % цемента + nanoSTAB
Марка по прочности	M40	Марка по прочности	M40	Марка по прочности
Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$ , МПа	0,83	1,24	1,37	1,29
Водонасыщение, %	1,9	1,5	1,1	1,3
Морозостойкость (количество циклов попеременного замораживания и оттаивания) $F$	15	25	45	39

Таблица 3

Физико-механические показатели образцов из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных комплексным вяжущим по ГОСТ 30491—97

Наименование показателей	Составы ЩПС, укрепленных комплексным вяжущим					Требования ГОСТ 30491—97 к органоминеральным смесям для оснований
	ЩПС + 3 % цемента + 3 % Б.Э.	ЩПС + 3 % цемента + 5 % Б.Э.	ЩПС + 5 % цемента + 3 % Б.Э.	ЩПС + 3 % цемента + 3 % Б.Э. + nano STAB	ЩПС + 3 % цемента + 3 % Б.Э. + ANТ	
Предел прочности на сжатие, МПа, при температурах, °С, не менее:						
20	1,85	1,50	2,52	3,20	4,05	1,4
50	0,74	0,61	0,95	1,22	1,41	0,5
Водонасыщение, % по объему, не более	5,0	6,0	4,5	4,0	3,8	10
Набухание, % по объему, не более	1,3	1,4	1,2	1,0	0,9	2,0

Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что образцы из щебеночно-песчаных смесей, укрепленных 3 % цемента в 28-суточном возрасте, согласно ГОСТ 23558—94 соответствуют марке по прочности М40 ( $R_{сж} \geq 4,0$  МПа;  $R_{изг} \geq 0,8$  МПа), а укрепленных 5 % цемента соответствуют марке по прочности М60 ( $R_{сж} \geq 6,0$  МПа;  $R_{изг} \geq 1,2$  МПа). При введении стабилизатора

папоСТАВ в составе укрепленного материала возрастает предел прочности на сжатие до 24 %. Также возрастает предел прочности на растяжение при изгибе до 36 %, что свидетельствует об увеличении деформативности полученного материала. Наибольший прирост прочности при сжатии наблюдается у щебеночно-песчано-цементных смесей (ЩПЦС) со стабилизатором АНТ (до 35 %). С введением данного стабилизатора прочность укрепленного материала повышается с М40 до М60 по ГОСТ 23558—94. Повышение прочности на сжатие при модификации стабилизатором АНТ объясняется образующимся адсорбционным слоем на поверхности зерен цемента, что положительно влияет на рост прочности укрепленных ЩПЦС [6]. Введение стабилизатора также способствует приросту прочности на растяжение при изгибе до 40 % и обеспечивает снижение расхода цемента на 30 %, без уменьшения при этом марки по прочности. Аналогичные результаты увеличения прочностных показателей были получены и для ЩПС, укрепленных комплексным вяжущим (см. табл. 3). Так же по результатам испытаний был выявлен критерий предела выносливости  $R_{изг}/R_{сж}$ , с помощью которого видно, что образцы из ЩПС, укрепленные цементом, имеют критерий предела выносливости 0,17. При введении добавок в состав укрепленного материала этот показатель возрастает до 0,21 или на 20 %. Повышение отношения  $R_{изг}/R_{сж}$  свидетельствует о пониженной склонности смеси к трещинообразованию [7].

Далее проводились экспериментальные исследования укрепленных образцов из ЩПС на воздействие динамических нагрузок такой частоты и времени воздействия, которые были бы максимально приближены к реальным условиям эксплуатации дороги. Испытания проводились на лабораторном оборудовании под воздействием кратковременно повторяющейся расчетной циклической нагрузки (рис. 1). На лабораторное оборудование получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель от 29 августа 2011 г. [8].



Рис. 1. Общий вид лабораторной установки для оценки устойчивости дорожно-строительных материалов на накопление остаточных деформаций под воздействием динамических нагрузок: 1 — инфракрасные нагреватели; 2 — образец испытываемого материала в обойме для обеспечения бокового обжатия; 3 — подъемный стол; 4 — датчик силы; 5 — опико-электронные растровые преобразователи линейных перемещений; 6 — температурный регулятор; 7 — частотный регулятор

Образец помещался в стальную форму бокового обжатия, промежуток между стенками формы и образца заполнялся гипсовым раствором. Подготовленный к испытанию образец в форме для бокового обжатия помещался на подъемный стол, в камеру установки. По центру образца располагался штамп, который через стальной шарнир приводился в соприкосновение с толкателем. В пружинном блоке производилось заневоливание пружины до необходимой величины передаваемой на образец нагрузки, которая фиксируется датчиком силы. На частотном регуляторе устанавливалось необходимое число оборотов двигателя главного привода. Включался электродвигатель и все контрольно-измерительное оборудование установки. Замеры остаточных и упругих деформаций производились в автоматическом режиме, запись данных осуществлялась непосредственно на компьютере и в дальнейшем производилась обработка данных в автоматическом режиме, по специально разработанной для этих целей программе.

Ползучесть укрепленных образцов из ЦПС определялась при нагрузке  $P = 0,4$  МПа (соответствующей реальному напряженно-деформируемому состоянию материала под воздействием расчетной динамической нагрузки), передаваемой на образец через металлический штамп. Частота приложения нагрузки составляла 15 Гц при среднем времени воздействия нагрузки 0,016 с. Размер штампа был принят диаметром 7 см при диаметре образца 20 см. Образцы перед испытанием подвергались капиллярному водонасыщению в течение 72 часов по ГОСТ 23558—94.

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены кривые ползучести как для ЦПС, укрепленных минеральным вяжущим, так и для ЦПС, укрепленных комплексным вяжущим, которые представлены на рис. 2, 3.

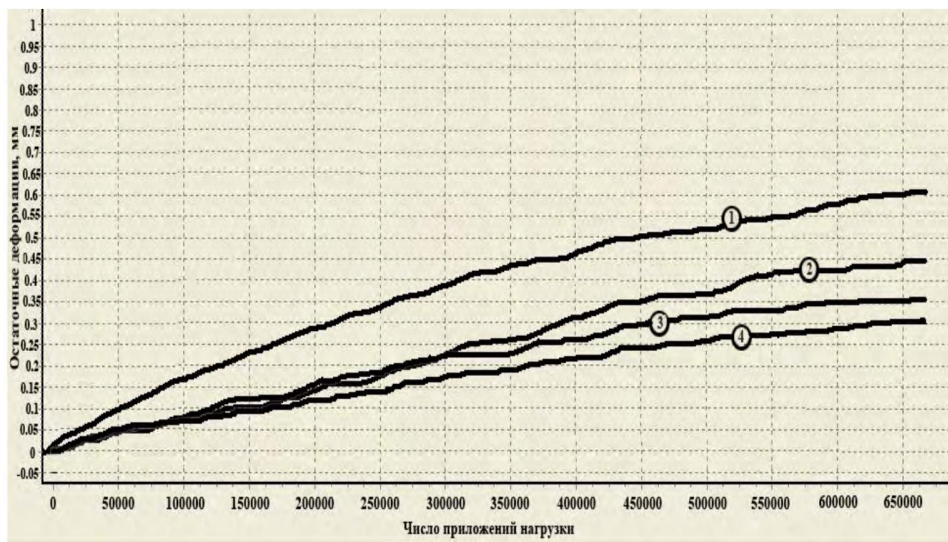


Рис. 2. Накопление остаточных деформаций в щебеночно-песчаных смесях, укрепленных минеральным вяжущим: 1 — ЦПС, укрепленная 3 % цемента; 2 — ЦПС, укрепленная 5 % цемента; 3 — ЦПС, укрепленная 3 % цемента + nanoSTAB; 4 — ЦПС, укрепленная 3 % цемента + ANT

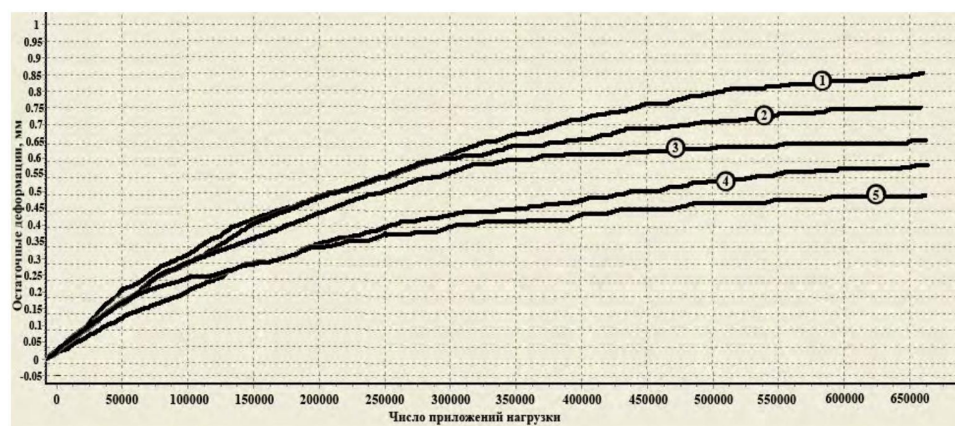


Рис. 3. Накопление остаточных деформаций в щебеночно-песчаных смесях, укрепленных комплексным вяжущим: 1 — ЦПС, укрепленная 3 % цемента + 5 % битумной эмульсии; 2 — ЦПС, укрепленная 3 % цемента + 3 % битумной эмульсии; 3 — ЦПС, укрепленная 5 % цемента + 3 % битумной эмульсии; 4 — ЦПС укрепленная 3 % цемента + 3 % битумной эмульсии + папоСТАВ; 5 — ЦПС, укрепленная 3 % цемента + 3 % битумной эмульсии + АНТ

В образцах щебеночно-песчаных смесей, укрепленных минеральным вяжущим (см. рис. 2), после 650 000 приложений расчетной нагрузки наблюдается накопление остаточных деформаций (в пределах от 0,36 до 0,61 мм). Ползучесть этих смесей объясняется их структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением количества геля при твердении цементного камня. Под нагрузкой происходит перераспределение напряжений с испытываемой вязкое течение гелевой структурной составляющей. Одновременно развитию деформаций ползучести способствуют капиллярные явления, связанные с перемещением в микропорах и капиллярах избыточной воды под нагрузкой. В то же время при введении в состав органического вяжущего совместно с минеральным (см. рис. 3) структура материала становится более пластичной и происходит более интенсивное накопление остаточных деформаций (в пределах 0,64...0,86 мм). Прочность и деформативность укрепленных ЦПС определяется, главным образом, структурой и свойствами цементного камня, который скрепляет зерна заполнителя в монолит. Структура и свойства укрепленных ЦПС, как отмечалось выше, зависят: от минералогического состава, водоцементного отношения, тонкости помола цемента, возраста, условий приготовления и твердения или введения добавок. При введении добавок можно значительно изменить прочность и деформативность укрепленных ЦПС. При введении стабилизатора папоСТАВ в составе укрепленной смеси увеличивается деформативность, а следовательно, происходит уменьшение остаточных деформаций до 26 %. Росту динамической прочности способствует повышение однородности и равномерности полей напряжений и деформаций. Наименьший прирост остаточных деформаций наблюдается у смеси со стабилизатором АНТ. С введением данного стабилизатора остаточные деформации снижаются до 50 %, это объясняется тем, что происходит быстрое образование первичного структурного каркаса [9]. Наличие структурного каркаса резко облегчило замену  $-\text{OH}(\text{H}_2\text{O})$  из составляющих цемента на  $-\text{OH}(\text{аромат})$ , входящий в состав стабилизатора АНТ.



Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что введение добавок в смеси обеспечивает:

повышение предела выносливости  $R_{изг}/R_{сж}$ , и как следствие, повышение сопротивления смеси многократным динамическим нагрузкам;

повышение физико-механических показателей, а следовательно, увеличение срока службы и долговечности дорожных конструкций;

снижение расхода цемента на 30 %, без уменьшения при этом марки по прочности, что в конечном итоге будет способствовать получению более качественных смесей с увеличенными деформативными свойствами, позволит сократить время и затраты на строительство и увеличить срок службы дорожной конструкции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матуа В. П., Панасюк Л. Н. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях. — Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2001. — 372 с.
2. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении. — М., 1970. — 264 с.
3. Улицкий И. И. Потери предварительного напряжения от ползучести и усадки бетона в железобетонных конструкциях. — Киев: Госстройиздат УССР, 1962. — 207 с.
4. ТУ. Теплая регенерация асфальтобетонов с использованием препарата «стабилизатор грунтов» и органоминеральных смесей АНТ для дорожного строительства. — Ставрополь, 2011. С. 1—20.
5. ТС. Технология создания полимермодифицированных стабилизированных цементом несущих слоев. — Дармштадт, 2008. — С. 1—19.
6. Баженов Ю. М. Технология бетона. — М.: Изд-во АСВ, 2002. — 500 с.
7. Schumann D. Putz für Bauwerke Arbeit // Baugewerbe. 1981. № 22. С. 28—34.
8. Пат. 100260 МПК G01N 3/36. Устройство для определения деформаций динамической ползучести дорожно-строительных материалов.
9. Рамачандран В. С. Добавки в бетон: справочное пособие. — М.: Стройиздат, 1988. — С. 99—144.

1. Matus V. P., Panasyuk L. N. Prognozirovanie i uchet nakopleniya ostatocnykh deformatsiy v dorozhnykh konstruksiyakh. — Rostov n/D: Rost. gos. stroit. un-t, 2001. — 372 s.
2. Bazhenov Yu. M. Beton pri dinamicheskom nagruzenii. — M., 1970. — 264 s.
3. Ulitskiy I. I. Poteri predvaritel'nogo napryazheniya ot polzuchesti i usadki betona v zhelezobetonnykh konstruksiyakh. — Kiev: Gosstroyizdat USSR, 1962. — 207 s.
4. TU. Teplaya regeneratsiya asfal'tobetonov s ispol'zovaniem preparata «stabilizator gruntov» i organomineral'nykh smesey ANT dlya dorozhnogo stroitel'stva. — Stavropol', 2011. S. 1—20.
5. TS. Tekhnologiya sozdaniya polimermodifitsirovannykh stabilizirovannykh tsementom nesushchikh sloev. — Darmshtadt, 2008. — S. 1—19.
6. Bazhenov Yu. M. Tekhnologiya betona. — M.: Izd-vo ASV, 2002. — 500 s.
7. Schumann D. Putz für Bauwerke Arbeit // Baugewerbe. 1981. № 22. S. 28—34.
8. Pat. 100260 MPK G01N 3/36. Ustroystvo dlya opredeleniya deformatsiy dinamicheskoy polzuchesti dorozhno-stroitel'nykh materialov.
9. Ramachandran V. S. Dobavki v beton: spravocnoe posobie. — M.: Stroyizdat, 1988. — S. 99—144.

Матуа В П Сизонец С В Матуа Р В

Поступила в редакцию  
в декабре г

Ссылка для цитирования

Матуа В. П., Сизонец С. В., Матуа Р. В. Исследование укрепленных щебеночно-песчаных смесей на накопление остаточных деформаций под воздействием динамических нагрузок // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. 2013. Вып. 30(49). С.154—161.