

УДК 625.855.52

## ХОЛОДНЫЕ РЕГЕНЕРИРОВАННЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ВЕРХНИХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Д-р техн. наук, профессор **В.А. Веренько**,  
канд. техн. наук **В.В. Занкович**,  
(ООО «Хэнаньская технологическая компания  
Гаоюань по содержанию автомагистралей»),  
руководитель **Е.О. Зайцев**,  
начальник отдела, магистр **С.В. Лира**,  
зам. начальника отдела, магистр **И.Г. Насонова**  
(ГКУ «Краснодаравтодор»),  
научный сотрудник, магистр **Шан Бо**,  
зам. начальника, магистр **Хоу Дехуа**  
(Ключевая лаборатория высокого уровня  
провинции Хэнань по диагностике  
и содержанию автомагистралей)  
Конт. информация: [otlk.avtodor@bk.ru](mailto:otlk.avtodor@bk.ru)

---

*В статье рассмотрены способы модификации бетонов на органо-гидравлических вяжущих водными дисперсиями эпоксидной смолы и стирол-акрилатами с точки зрения достижения ими расчетных характеристик типовых асфальтобетонов. Предложен также новый способ оценки свойств такого рода бетонов к восприятию циклических нагрузок и накоплению усталости.*

**Ключевые слова:** усталостная устойчивость, циклическая устойчивость, асфальтогранулят, модифицированная холодная регенерированная смесь, структурная прочность, стирол-акриловая водная дисперсия, водная дисперсия эпоксидной смолы, соевое масло эпоксидированное.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Повторное использование материалов конструктивных слоев дорожных одежд – это актуальная проблема дорожной отрасли большинства стран мира.

В связи с этим все больше внимания уделяется повышению качества композитных материалов, получаемых при переработке существующих дорожных одежд и их повторном использовании при ремонте и строительстве новых дорожных одежд [1, 2].

В настоящее время для улучшения свойств холодных регенерированных смесей на основе органических (битумных эмульсий, вспененного битума) и минеральных вяжущих (цементов) используется большое количество улучшающих компонентов (добавок):

- полимерные и другие добавки (например, эпоксидные смолы, стирол-акрилаты и т.д.);
- специальные эмульсии с повышенными характеристиками и восстанавливающие вещества (в большинстве своем компоненты (в том числе эмульсии), содержащие в своем составе различные масла биологического происхождения (например, соевое эпоксидированное масло), минеральные, синтетические (в том числе отработанные), а также растворители).

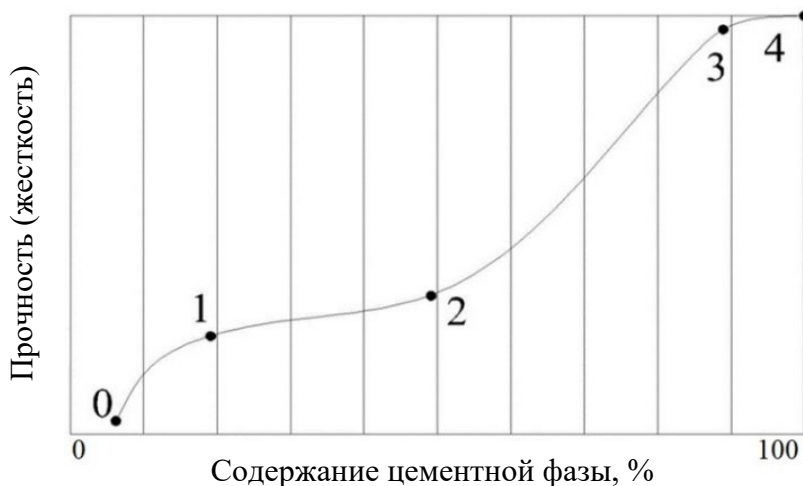
Одним из наиболее эффективных способов повышения надежности и долговечности композитов на основе гранулятов от переработанных асфальтобетонных дорожных покрытий в процессе холодного ресайклинга является использование для их приготовления вспененных битумов.

Однако на настоящий момент отсутствует однозначный и четкий вариант (технология) холодной регенерации асфальтобетонных покрытий, обеспечивающий максимальное восстановление прочностных и деформационных свойств до значений, которые позволили бы использовать бетоны на основе холодных регенерированных смесей для устройства верхних слоев покрытий. Связано это в первую очередь с отсутствием эффективных методологий оценки качества композиционных материалов на основе асфальтогранулятов от фрезерования существующих асфальтобетонных покрытий, содержащих органические и минеральные вяжущие, что не позволяет направленно выполнять регулирование свойств с прогнозированием их во времени. Отсутствуют четкие методологии оценки эффективности различного рода добавок на улучшение надежности холодных регенерированных бетонов, работающих в сложных условиях воздействия тяжелых транспортных нагрузок и климатических факторов.

### **Особенности оценки прочностных и деформативных свойств композитов на основе гранулятов из переработанных асфальтобетонных дорожных покрытий**

В общем случае прочностные и деформационные характеристики бетона на органо-гидравлическом вяжущем (бетона на ОГВ) зависят от

свойств гранулята (асфальтовой составляющей) и цементного раствора (бетонной составляющей). Свойства бетонов зависят от количества цементного раствора в виде S-образной кривой (**рис. 1**).



*Рис. 1. Обобщенная (феноменологическая) зависимость свойств бетона на ОГВ от содержания цементного раствора в объеме материала*

На данной кривой можно выделить следующие характерные точки и участки. Точка **1** – содержание цемента, при котором весь гранулят вовлекается в работу (битумные пленки покрыты цементом). На участке «**0-1**» происходит постепенное покрытие частиц гранулята цементом. Рост свойств материала на данном участке довольно эффективный. Прочность в точке **1** характеризует свойства когезионной составляющей и ее можно считать прочностью «асфальтовой составляющей» при построении структурной модели композита.

Точка **2** – характеризует появление фазовых (перколяционных) контактов между разрозненными агрегатами цементного раствора. На участке «**1-2**» происходит постепенное заполнение пор и пустот цементным раствором. На данном участке может наблюдаться незначительное увеличение свойств за счет роста плотности.

Между точками «**2-3**» наблюдается переходная зона от фазы асфальтовой составляющей к фазе цементной составляющей.

Точка **3** – характеризует появление сплошного фазового каркаса цементной фазы. Бетонная составляющая становится преобладающей в структуре материала. Асфальтогранулят выступает в роли наполнителя цементной фазы. На участке «**3-4**» происходит переход к цементобетону.

Положение точки **1** определяется свойствами асфальтогранулята, его удельной поверхностью, площадью частиц, покрытых битумом.

В среднем ее положение проявляется при 2-4 % цемента или 8-12 % цементного раствора.

Пороговые концентрации гидравлического вяжущего можно определить, например, используя теорию перколяции [3].

Введение полимерных и других модификаторов способствует значительному изменению кривой деформирования, что существенно сказывается на поведении композитов, приготовленных на основе модифицированных холодных регенерированных смесей, в том числе на асфальтогранулятах, пластифицированных различными маслами, например, соевым эпоксицированным маслом (ESBO) [4, 5].

Исходя из особенностей структурообразования модифицированных холодных регенерированных смесей на основе асфальтогранулятов, полученных путем фрезерования дорожных покрытий, для достижения их высоких прочностных и деформационных характеристик, обеспечивающих надежную работу не только в нижних, но и в верхних слоях новой дорожной конструкции, на стадии проектирования их составов целесообразно реализовать ряд мероприятий, направленных на регулирование и оптимизацию физико-механических свойств, а именно:

- оценку способности к образованию при добавлении цемента и/или модификации прочных фазовых контактов в структуре композита;
- оценку способности к вовлечению в работу вязких связей в структуре композита при использовании модифицированных битумных эмульсий;
- оптимизацию соотношения упругих и вязких связей в структуре композита и регулирования их прочностных характеристик.

С целью рассмотрения процессов структурообразования модифицированных эпоксидной смолой холодных регенерированных смесей на основе асфальтогранулятов (для исследований был принят асфальтогранулят с зерновым составом по **табл. 1**) и изучения особенностей их релаксационных процессов в широком температурно-временном диапазоне (с учетом распределения количества упругих и вязких связей и величины их прочности) был выполнен ряд испытаний как по стандартным методикам, так и с использованием нестандартных методов.

Таблица 1

*Зерновой состав асфальтогранулята*

<i>Полный проход через сито, мм, в %</i>										
19	16	13,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
100	98,0	94,7	81,6	48,9	26,9	14,2	8,4	4,4	3,4	1,9

В настоящее время довольно значительный интерес исследователей холодных регенерированных смесей проявляется к модификаторам на основе эпоксидных смол [6, 7] и стирол-акрилатов [8, 9].

В связи с этим, в качестве модификаторов, принятых для исследований, использовали:

- водную дисперсию эпоксидной смолы + отвердитель (ER+H);
- стирол-акриловую водную дисперсию (SA).

Добавление битумной эмульсии (в том числе совместно с водными дисперсиями) при приготовлении смесей производилось после предварительного перемешивания асфальтогранулята с цементом и водой. Водные дисперсии (в том числе эпоксидной смолы совместно с водным раствором отвердителя) предварительно перед подачей в смеситель вручную перемешивались совместно с битумной эмульсией до получения однородной консистенции. Добавление соевого эпоксидированного масла к асфальтогрануляту производилось предварительно за 3 суток до окончательного приготовления смеси и образцов, затем выполнялось перемешивание до визуальной гомогенизации и хранение смеси при комнатной температуре.

Изготовление образцов-цилиндров производилось по методу Маршалла с уплотнением 75 ударами по каждой стороне образца, а образцов-балочек размеров 40×40×160 мм – методом статического прессования в течение 3 мин в специальных формах под давлением 10 МПа после вибрирования в течение 3 мин с приложенной нагрузкой 0,03 МПа. После этого образцы, не извлекая из форм, хранили при комнатной тем-

пературе 1 сутки, после извлечения из форм на 3 сутки помещали в сушильный шкаф с температурой 60 °С. Подготовленные таким образом образцы до испытаний еще 3 суток хранили при комнатной температуре.

В результате проведенной ранее работы установлено [10], что для практического использования наиболее приемлема водная дисперсия смолы NPEL 127 (Тайвань) при соотношении «смола:вода» = 3:1 с содержанием в качестве эмульгатора 2 % масс. высокомолекулярного блоксополимера в бутилдигликоле от массы смолы, которую и использовали для исследований. В качестве отвердителя применяли водный раствор аминового аддукта, выпускаемого под торговой маркой Telalit 180 (Чехия), дополнительно разбавленного водой в соотношении 1:1.

Для сравнительного анализа влияния модификаторов на свойства ВССРМ использовалась также готовая стирол-акриловая водная дисперсия WANOL (Германия).

В качестве регенератора асфальтогранулята применяли соевое масло эпоксицированное (ESBO), выпускаемое компанией INTERFAT (Испания). В настоящее время все чаще обращают внимание на данный вид биомасла, которое при определенных условиях проявляет свойства не только пластификатора (регенератора), но и эффективного модифицирующего агента, в том числе для холодных смесей на основе битумных вяжущих [4, 5].

Итоговая матрица экспериментальных составов холодных регенерированных смесей представлена в **табл. 2**.

На **рис. 2** иллюстрируется внешний вид модифицированной холодной регенерированной смеси на основе асфальтогранулята и структура композитов с различным компонентным составом.

В зависимости от температуры, режима нагружения, состава холодных регенерированных смесей на комплексных органо-гидравлических вяжущих в процесс деформирования композита будет вовлекаться различное число упругих  $n_r$  и вязкопластических связей  $n_v$ . Соответственно такой композит в различной степени будет проявлять свойства упругого или вязкого тела. В целом прочностные характеристики с увеличением объемной концентрации гидравлического вяжущего в той или иной степени увеличиваются. Однако это имеет под собой основание, если речь идет только лишь о работе материала в стадии, близкой к упругой (когда количество упругих связей  $n_r$  приближается к 1, а количество

вязких связей – к 0), которую можно охарактеризовать величиной максимальной структурной прочности  $R_{\zeta}$  [11-14].

**Таблица 2**

*Компонентные составы экспериментальных смесей*

<i>№ смеси</i>	<i>Компонентный состав смеси, %</i>						
	<i>RAP</i>	<i>Сверх 100 % асфальтогранулята (RAP)</i>					
		<i>Цемент (С)</i>	<i>Битумная эмульсия (BE)</i>	<i>Водная дисперсия эпоксидной смолы + отвердитель (ER+H)</i>	<i>Водная стирол-акриловая дисперсия (SA)</i>	<i>Соевое масло эпоксицированное (ESBO)</i>	<i>Вода (W)</i>
<i>01</i>	100	1	-	-	-	-	7,0
<i>02</i>	100	3	-	-	-	-	7,0
<i>03</i>	100	5	-	-	-	-	7,0
<i>1</i>	100	2,5	5,0	-	-	-	5,0
<i>2</i>	100	2,5	3,5	1,5	-	-	4,9
<i>3</i>	100	2,5	1,5	3,5	-	-	4,7
<i>4</i>	100	2,5	3,5	-	1,5	-	4,9
<i>5</i>	100	2,5	1,5	-	3,5	-	4,7

6	100	-	2,5	2,5	-	0,5	-
---	-----	---	-----	-----	---	-----	---



*Рис. 2. Структура композитов и модифицированная холодная регенерированная смесь на основе асфальтогранулята*

В табл. 3 представлены результаты испытания холодных регенерированных смесей серии «0», на основании которых устанавливалось оптимальное содержание цемента. В качестве параметра оптимизации было выбрано исследование величины максимальной структурной прочности, поскольку, во-первых, это показывает способность такого рода композитов к образованию пространственной кристаллической решетки за счет минерального вяжущего и, во-вторых, свидетельствует об уровне формирования структуры и достижения максимальной плотности.

Расчет показателя максимальной структурной прочности  $R_s$  производили, принимая температуру испытания, равную 3-5 °С, и скорость деформирования – 10 и 60 мм/мин. Надежность такого способа определения максимальной структурной прочности в очередной раз было подтверждено предварительными испытаниями с прямым расчетом экстремальных значений прочности в координатах «прочность-скорость деформирования» для трех скоростей деформирования (1, 50, 150 мм/мин) и температуры 3-5 °С при испытаниях более 10 различных составов хо-



лодных регенерированных смесей. Относительная погрешность рассчитанных значений в сравнении с полученными по результатам прямого испытания составляла не более 1 %, что свидетельствует о высокой точности.

**Таблица 3**

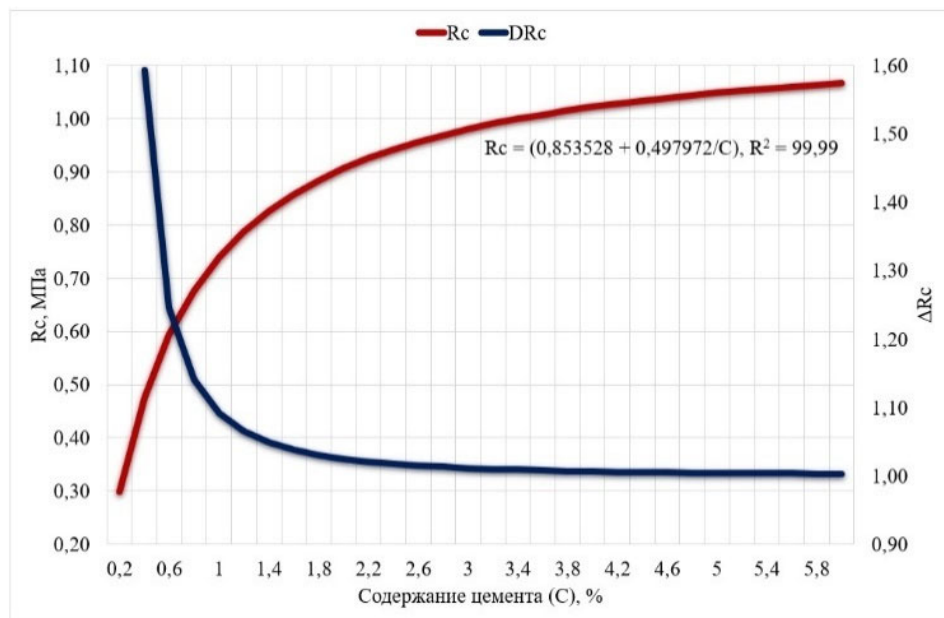
*Результаты испытаний образцов серии «0»*

<i>№ смеси</i>	<i>Температура испытания, 3-5 °С (возраст 7 суток)</i>		<i>Расчетная величина максимальной структурной прочности, <math>R_c</math></i>
	<i>Предел прочности на растяжение при расколе при скорости деформирования, 10 мм/мин (<math>ITS_{10}^5</math>), Мпа</i>	<i>Предел прочности на растяжение при расколе при скорости деформирования, 10 мм/мин (<math>ITS_{60}^5</math>), МПа</i>	
<i>01</i>	0,28	0,59	0,74
<i>02</i>	0,74	0,95	0,98
<i>03</i>	0,87	1,03	1,05

На **рис. 3** представлена интерпретация результатов испытаний, полученных в процессе оптимизации содержания цемента в холодных регенерированных смесях серии «0».

Как видно из данных, представленных на **рис. 3**, отмечается увеличение структурной прочности композита ( $R_c$ ) в возрасте 7 суток с увеличением содержания цемента. Однако, если рассматривать интенсивность нарастания прочности от повышения содержания цемента ( $\Delta R_c$ ) с шагом 0,2 %, то при его добавлении свыше 2-3 % уже не отмечается более или менее значительного роста прочностных характеристик, как и роста плотности структуры (происходит приближение к точке **2** на кривой деформирования (**рис. 1**)). В связи с этим для дальнейших исследований

приняли содержание цемента, равное 2,5 %. В целом такой подход согласуется и с методологией оценки оптимального содержания минерального вяжущего по величине изменения показателя предела прочности при одноосном сжатии с учетом величины предела прочности при расколе [15].



**Рис. 3. Интерпретация результатов испытаний холодных регенерированных смесей серии «0»**

Установление особенностей изменения прочности при изгибе балочки размером 160×40×40 мм производили на упругом основании при циклическом прикладывании постоянной деформации 0,2 мм со скоростью 10 мм/мин при температуре 5 °С с определением количества циклов до разрушения  $N_m$ .

Для моделирования упругой реакции основания балочку в процессе испытания располагали на каучуковой плите толщиной 60 мм с модулем ( $\frac{\Delta h}{S, mm^2}$ ) от 20 %-ой деформации при температуре 5 °С, равным

190. При этом свободное перемещение концов балочки было ограничено специальной формой.

Как указывалось выше, максимальная долговечность материала наблюдается при некотором оптимальном соотношении упругих и вязко-пластических связей, т.е. при оптимальном соотношении величины максимальной структурной прочности  $R_c$  и доли упругих связей  $n_r$ .

Условия испытания, а именно скорость деформирования образцов 10 мм/мин и температура 5 °С, приняты исходя из того, что это соответствует условиям максимального накопления повреждаемости в структуре композита (работающего в условиях *сжатия-растяжения*, а не упругого прогиба) при его работе под колесом расчетного транспортного средства при низкой скорости движения.

В **табл. 4** представлены результаты испытаний бетонов на органо-гидравлических вяжущих экспериментальных составов.

**Таблица 4**

***Результаты испытаний бетонов на ОГВ  
экспериментальных составов***

<i>№ смеси</i>	<i>ITS<sub>10</sub><sup>5</sup>, МПа</i>	<i>ITS<sub>60</sub><sup>5</sup>, МПа</i>	<i>MS<sub>50</sub><sup>60</sup>, кН</i>	<i>MF<sub>50</sub><sup>60</sup>, мм</i>	<i>N<sub>m</sub></i>
<b>1</b>	1,18	1,59	11,23	4,02	76
<b>2</b>	1,41	2,01	18,44	3,98	88
<b>3</b>	2,01	3,32	26,14	3,72	225
<b>4</b>	1,10	1,74	16,17	4,44	133
<b>5</b>	1,17	2,24	20,32	5,69	355
<b>6</b>	0,56	1,17	6,43	6,84	572

Расчетные значения показателей, характеризующих усталостную устойчивость и структурную прочность композитов, приготовленных из смесей экспериментальных составов, представлены в **табл. 5**.

**Таблица 5**

*Расчетные показатели свойств композитов*

<i>Наименование показателя</i>	<i>Значение показателя для составов смеси</i>					
	<i>№ 1</i>	<i>№ 2</i>	<i>№ 3</i>	<i>№ 4</i>	<i>№ 5</i>	<i>№ 6</i>
$R_c$ , МПа	1,66	2,13	3,70	1,91	2,67	1,47
$n_r$	0,69	0,63	0,51	0,55	0,40	0,35
$R_c (1-n_r)$ , МПа	0,52	0,78	1,81	0,87	1,60	0,96
$MQ_{50}^{60*}$ , кН/мм	22,57	36,70	48,62	35,90	57,81	21,99
* <i>Индекс Маршалла – <math>MQ_{50}^{60} = \frac{MS_{50}^{60}}{MF_{50}^{60}}</math></i>						

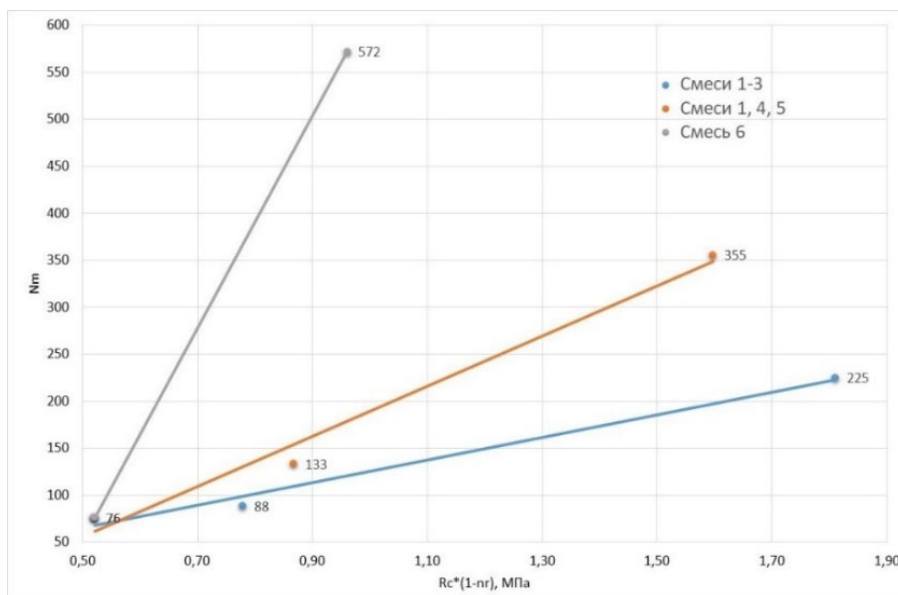
**Особенности свойств композитов, приготовленных на основе модифицированных холодных регенерированных смесей и перспективы их применения**

Результаты проведенных исследований по представленной выше схеме свойств композитов на основе холодных регенерированных смесей однозначно указывают на эффективность использования эпоксидной и стирол-акриловой водных дисперсий для повышения их циклической долговечности. Так, количество циклов до разрушения при использовании эпоксидной дисперсии в количестве 30 % от общей массы модифицированной таким образом битумной эмульсии возрастает на 15,8 % в сравнении с составом на чистом вяжущем, а в количестве 70 % – в 3 раза; при использовании стирол-акриловой дисперсии, соответственно на 75 % и в 4,7 раза.

В то же время стандартный показатель прочности композита на раскол при температуре +5 °С и скорости деформирования 10 мм/мин возрастает для указанных выше концентраций эпоксидной дисперсии соответственно на 19,5 % и 70 %, а для стирол-акриловой дисперсии – практически не изменяется; при температуре +5 °С и скорости деформирования 60 мм/мин данный показатель возрастает для указанных выше концентраций эпоксидной дисперсии соответственно на 26,4 % и 108,8 %, а для стирол-акриловой дисперсии – на 9,4 % и 40,9 %. Более значительно растет и максимальная структурная прочность  $R_c$  композитов, приготовленных на модифицированных эпоксидной смолой вяжущих. Данный показатель однозначно определяет способность материала сопротивляться накоплению непосредственно усталости в структуре. Для принятых концентраций рост  $R_c$  составляет 28,3 % и 122,9 %, а при модификации стирол-акриловой дисперсией – 15,1 % и 60,8 %.

Однако при всех преимуществах в части роста прочностных показателей, как показали выполненные испытания на циклическую долговечность, модификация стирол-акриловой дисперсией представляется более перспективной. Связано это с тем, что композиты, приготовленные на основе холодных регенерированных смесей, модифицированные сополимерами стирола с акрилатами, проявляют лучшую релаксационную способность, что выражается в снижении доли вовлеченных в процесс деформирования упругих связей  $n_r$ . Это однозначно зависит как от природы и свойств модификатора, так и от особенностей межконтактного взаимодействия между частицами асфальтогранулята в структуре модифицированного композита. В любом случае для всех партий смесей однозначно можно отметить увеличение показателя циклической долговечности  $N_m$  от роста условной доли структурной прочности композита, обеспечиваемой вязкопластическими связями –  $R_c \cdot (1 - n_r)$  (рис. 4).

Представляют особый интерес результаты, полученные для состава смеси № 6, в котором отсутствовало цементное вяжущее, при этом осуществлялась предварительная пластификация поверхности частиц асфальтогранулята, покрытых старым битумом.



**Рис. 4. Особенности изменения свойств модифицированных композитов, определяющих их циклическую долговечность**

Отсутствие цемента обусловлено тем, что его эффективность в присутствии эпоксидированного соевого масла незначительна в части создания кристаллической решетки, в связи с чем была выполнена попытка структурирования композита за счет эпоксидной смолы, что в принципе в той или иной степени удалось добиться. Для композита на основе такого рода модифицированной холодной регенерированной смеси значительно вырос показатель циклической долговечности применительно к принятой схеме испытания ( $N_m = 572$ ). В то же время, в сравнении с немодифицированным составом № 1, произошло не критическое падение показателя максимальной структурной прочности  $R_c$  на 11,5 %, более серьезно снизилось значение прочности на растяжение при расколе по образующей ( $ITS$ ), на 52,5 % и 26,4 % соответственно при скорости деформирования 10 и 60 мм/мин. С учетом полученных результатов можно сделать заключение, что при модификации эпоксидной смолой через ее водную дисперсию холодных регенерированных смесей на основе асфальто-

гранулятов, полученных путем фрезерования дорожных асфальтобетонных покрытий, для достижения большей эффективности необходима предварительная подготовка асфальтогранулята для улучшения гомогенности при перемешивании, повышения сцепления с поверхностью его полимерных частиц и пластификации старого битума. Модификация водной дисперсией эпоксидной смолы, по мнению авторов данной статьи, не имеет в прямом применении достаточных показателей технико-экономической эффективности.

С целью уточнения особенностей деформирования композитов на основе модифицированных холодных регенерированных смесей во всем диапазоне температур и скоростей нагружения, в том числе выяснения изменения их структурных особенностей в зоне, где в значительной степени проявляются вязкопластические свойства, были выполнены исследования устойчивости по методологии Маршалла при температуре 60 °С. Результаты испытаний представлены **табл. 4, 5**.

Как показали результаты испытаний, модификация композитов эпоксидной смолой способствует более резкому нарастанию их жесткости (рост  $MS$  в 1,64 и 2,33 раза в зависимости от концентрации; некоторое снижение  $MF$  – в 1,01 и 1,08 раза), что, в принципе, абсолютно сходится с данными, полученными и при испытании на циклическую устойчивость. За счет такого рода модификации в структуре образуется дополнительная разветвленная кристаллическая решетка, наряду с образуемой минеральным вяжущим (цементом). Однако, с учетом невозможности обеспечения из-за сравнительно небольшого времени перемешивания идеальной гомогенности и особенностей свойств эпоксидной смолы в части адгезии к органическим поверхностям, в том числе к покрытым пылью, водой, некоторыми маслами и т.д., снижается ее активность в составе холодных регенерированных смесей на основе асфальтогранулятов. Следует отметить, что кристаллическая решетка, образуемая эпоксидной смолой, работает относительно самостоятельно, а образуемая минеральным вяжущим – самостоятельно. При этом способность эпоксидной смолы вовлекать в общую работу полимерные частицы асфальтогранулята не является высокой, а количество слабых контактов достаточно велико. Это приводит к снижению релаксационной способности модифицированных композитов, наряду с ростом структурной прочности. В некоторой степени влияние эпоксидной смолы схоже с влиянием цемента на свойства бетонов на органо-гидравлических вяжущих, когда только определенная часть цемента взаимодействует через битумные пленки с частицами заполнителя, а при определенной концентрации минерального вяжущего свойства асфальтогранулята практически не влияют на

свойства бетона. То есть свойства композита определяют свойства кристаллической решетки, создаваемой минеральным вяжущим. Поэтому к модификации холодных регенерированных смесей эпоксидными смолами следует подходить с большой осторожностью, так как использование достаточно дорогостоящей процедуры повышения расчетных характеристик композитов может не дать должного технико-экономического эффекта.

Совсем по-другому ведут себя при высокой температуре композиты, приготовленные на холодных регенерированных смесях, модифицированных стирол-акрилом. При несколько меньшем уровне роста стабильности по Маршаллу (в 1,44 и 1,81 раза) текучесть по Маршаллу наоборот возрастает (в 1,1 и 1,42 раза). В связи с чем возрастает и работа разрушения, оцениваемая по индексу MQ. В сравнении с модификацией эпоксидной смолой при максимальной концентрации, принятой для исследований, данный показатель увеличивается на 19 %. Как отмечалось выше, возрастает и количество циклов до разрушения при испытании на циклическую устойчивость. Это свидетельствует о том, что структура композита, модифицированного водной стирол-акриловой дисперсией, является более однородной, в сравнении с модифицированным эпоксидной смолой. При этом полимер эффективнее взаимодействует с компонентами холодной регенерированной смеси; полимерные частицы асфальтогранулята значительно лучше вовлекаются в совместную работу; общая сила межконтактного взаимодействия выше и обеспечивается за счет более значительного вовлечения в процесс деформирования вязкопластических связей (доля упругих связей  $n_r$  составляет 0,40 при максимальной концентрации, принятой для исследований). То есть такого рода модифицированные композиты обладают более высокой релаксационной способностью, что и отражается в увеличении количества циклов до разрушения при испытании на циклическую устойчивость.

В то же время регенерация поверхности частиц асфальтогранулята соевым эпоксидированным маслом позволила значительно повысить циклическую устойчивость композитов на основе модифицированных эпоксидной смолой холодных регенерированных смесей. С учетом отсутствия минерального вяжущего и пластификации старого битума понизились показатели высокотемпературных свойств, в сравнении с немодифицированным составом № 1. Так, показатель стабильности по Маршаллу снизился 1,75 раза, а текучесть по Маршаллу увеличилась в 1,7 раза. При этом работа разрушения, оцениваемая через индекс MQ, практически не изменилась. При некотором снижении (на 13 %) максималь-



ной структурной прочности, циклическая устойчивость выросла по количеству циклов до разрушения в 7,53 раза. В рамках эксперимента в летний период 2019 г. был устроен опытный участок на городской улице (рис. 5), на котором уложили верхний слой покрытия из холодной регенерированной смеси на битумной эмульсии и цементе толщиной 4 см (полоса 1) и из холодной, модифицированной эпоксидной смолой, регенерированной смеси на основе асфальтогранулята, обработанного эпоксидированным соевым маслом толщиной 4 см (полоса 2). Результаты первых 2-х месяцев эксплуатации при высокой летней температуре показали достаточно высокую надежность модифицированного композита. Движение было открыто на следующий день, из-за чего имеют место некоторые вмятины от отдельных колес на покрытии в районе въезда во двор, связанные с недостаточным набором прочности. Однако в дальнейшем покрытие сохраняло свою текстуру, не отмечено появления чрезмерного повышения плотности на полосах наката. Наблюдение за покрытием продолжается. Также идет подготовка к закладке нескольких опытных участков с покрытиями, устроенными из модифицированных различными способами холодных регенерированных смесей на основе асфальтогранулятов, на региональных автомобильных дорогах Краснодарского Края.



*Рис. 5. Схема расположения опытных участков, устроенных на модифицированных регенерированных холодных смесях:  
1 – BE + C; 2 – BE, ER+H, ESBO*

Таким образом, проведенные исследования показывают, что различными способами модификации возможно добиться достаточно высоких показателей циклической долговечности и структурной прочности композитов, приготовленных на основе холодных регенерированных смесей, которые могут применяться в верхних слоях дорожных покрытий. Однако нужно четко понимать, в каких условиях воздействия транспорта и погодно-климатических факторов возможно такое применение.

Рекомендуется принять во внимание полученные результаты исследований и требования к величине максимальной структурной прочности  $R_c$  в зависимости от категории дороги (при расчете предела прочности на растяжение при расколе по методологии):

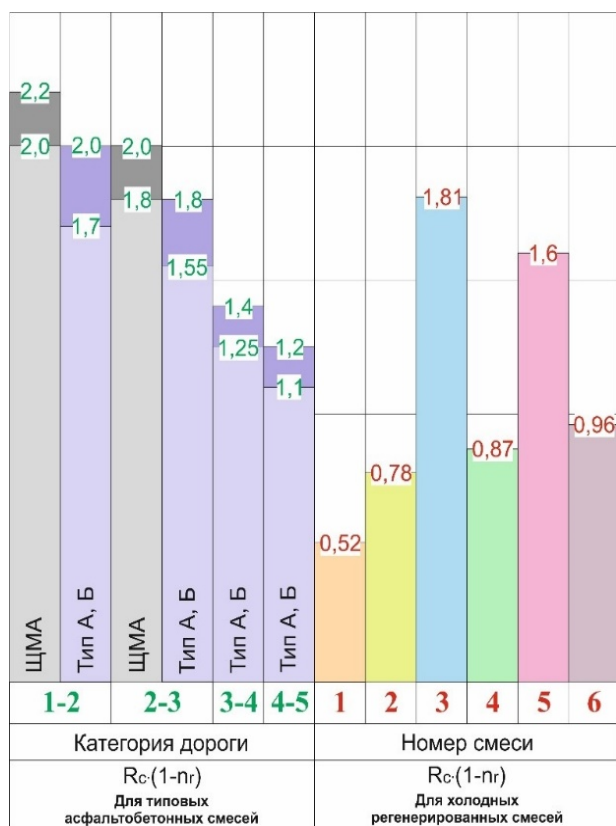
1-2 кат. – 3,4 МПа;

2-3 кат. – 3,1 МПа;

3-4 кат. – 2,5 МПа;

4-5 кат. – 2,2 МПа.

С учетом требуемой максимальной доли упругих связей  $n_r$ , равной для асфальтобетонов 0,5, может быть выполнено сравнение полученных результатов, определяющих циклическую (усталостную) устойчивость композитов из холодных регенерированных смесей, с аналогичными для асфальтобетонных смесей. Поскольку расчет доли упругих связей  $n_r$  для композитов на основе холодных регенерированных смесей выполняли по усредненному коэффициенту  $m$  (показателя структуры), равному 0,9 [11-14], то с учетом соответствующих значений доли структурной прочности  $R_c \cdot (1 - n_r)$ , обеспечиваемой вязкопластическими связями для асфальтобетонных смесей типа ШМА, А и Б (рис. 6) также получали коэффициент  $m$ , равный 0,9. Данный коэффициент составляет для асфальтобетона типа ШМА порядка 0,75-0,8, а для асфальтобетонов типа А и Б – порядка 0,8-0,9.



**Рис. 6. Сравнительные характеристики асфальтобетонов и композитов на основе холодных регенерированных смесей экспериментальных составов**

Расчетные данные, представленные на **рис. 6**, позволяют сделать следующие выводы.

*Во-первых*, однозначно подтверждается известная в мировой практике позиция, что композиты на основе холодных регенерированных смесей, приготовленные с использованием битумной эмульсии, цемента и 100 % асфальтогранулята, не могут применяться для устройства верхнего слоя покрытий дорожных одежд, воспринимающих воздействие транспорта и погодно-климатических факторов. Значения показателей свойств, характеризующих усталостную (циклическую) устойчивость таких композитов значительно ниже даже значений соответствующих показателей асфальтобетонов типа А и Б низких марок, применяемых для

устройства покрытий на дорогах 4-5 категории. Очевидно, что повышение содержания вяжущего (битумной эмульсии) приведет к серьезному повышению показателей циклической устойчивости композитов, однако кристаллическая решетка, образованная цементом, будет очень сильно ослаблена, что обусловит значительное уменьшение структурной прочности. В связи с этим снизятся показатели сдвигоустойчивости, прочности на изгиб, растяжение, сжатие, модули упругости и т.д. То есть такие смеси недопустимо применять для устройства верхнего конструктивного слоя покрытия толщиной более 2-3 см, их рекомендуется использовать только для устройства защитных тонких слоев по широкоизвестным технологиям – технологиям Микросюрфейсинг и Сларри-Сил (литых эмульсионно-минеральных смесей).

*Во-вторых*, модификация холодных регенерированных смесей полимерами (в нашем случае эпоксидной смолой и стирол-акрилатами) обеспечивает повышение всех основных показателей физико-механических свойств композитов, приготовленных на их основе.

*В-третьих*, при определенной концентрации показатели свойств такого рода композитов достигают соответствующих свойств асфальтобетонов типа А и Б, применяемых для устройства покрытий на дорогах 3-4 технических категорий.

В-четвертых, выполненная работа позволила наметить некоторые направления развития методологических основ оценки циклической и усталостной устойчивости композитов. Так, результаты исследований, представленные на **рис. 4**, указывают на однозначную взаимосвязь между критерием релаксационной способности  $R_c \cdot (1 - n_r)$  и количеством циклов до разрушения. В то же время данная тенденция правомерна только для однородных по типу и свойствам материалов (кривые на **рис. 3** имеют различный наклон к оси абсцисс). Кроме того, использование постоянной величины коэффициента  $m$  даже для сравнительных испытаний самым значительным образом отражается на конечной расчетной величине показателей циклической устойчивости. Такая ситуация требует дополнительных исследований, которые позволили бы с большей достоверностью учитывать влияние процессов ползучести и релаксации на свойства композитов и механику их разрушения в широком диапазоне температур и скоростей деформирования. Для прикладных целей необходимы простые методологические принципы оценки модулей релаксации композитов для различных фактических условий их работы в дорожной конструкции, разработке которых будут посвящены дальнейшие исследования.

## Признательность

Данное исследование выполнено при поддержке Henan Center for Outstanding Overseas Scientists (номер гранта № GZS2018006).

Авторы выражают благодарность ГКУ КК «Краснодаравтодор» за оказанную помощь в проведении части экспериментальных исследований и обработки данных эксперимента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что различными способами модификации возможно добиться достаточно высоких показателей циклической долговечности и структурной прочности композитов, приготовленных на основе холодных регенерированных смесей, которые могут применяться даже в верхних слоях дорожных покрытий. Однако на настоящий момент отсутствует узкоспециализированная методология оценки их общей долговечности и надежности. Поэтому при выборе наиболее эффективных материалов и составов необходимо дополнительно учитывать устойчивость к пластическим деформациям при высоких температурах и экономические показатели.

На основании результатов исследований можно с достаточной достоверностью заключить, что модификация холодных регенерированных смесей эпоксидной смолой обеспечивает значительное повышение расчетных характеристик композитов, приготовленных на их основе. В то же время простое увеличение ее содержания не решает проблемы повышения их циклической (усталостной) устойчивости кардинально. Связано это с тем, что нарастание жесткости композита (максимальной структурной прочности  $R_c$ ) происходит значительно более сильно в сравнении с повышением его релаксационной способности (доля вязкопластических связей  $1 - n_r$ ), что не позволяет сделать вывод о целесообразности повышения концентрации эпоксидной смолы в процессе модификации как с технической, так и с экономической точек зрения. Эффективность модификации холодных регенерированных смесей эпоксидными смолами значительно повышается при предварительной подготовке асфальтогранулята, например, путем пластификации поверхности полизернистых частиц, покрытых старым битумом.

Более перспективным способом модификации такого рода холодных смесей, приготавливаемых на основе асфальтогранулятов, получен-

ных в результате фрезерования дорожных покрытий, представляется использование водных стирол-акриловых дисперсий, компонентный состав которых можно направленно регулировать с целью оптимизации упругих и вязкопластических свойств модифицированных композитов.

В результате сравнительной оценки показателей свойств модифицированных бетонов на органогидравлических вяжущих на основе 100 % асфальтогранулятов с аналогичными показателями асфальтобетонных смесей типа А и Б, используемых для устройства верхних слоев покрытий дорожных одежд на дорогах 3-4 категорий, можно утверждать, что при правильной оптимизации компонентного состава, выборе способа модификации и оценке технико-экономических показателей, такого рода композиты могут также эффективно применяться.

В то же время с целью окончательного обоснования возможности применения холодных модифицированных регенерированных смесей для устройства верхних слоев покрытий необходимо рассмотрение и других показателей, в первую очередь определяющих потребительские свойства дорожных покрытий (например, износостойкость, сцепление с колесом, сохранение ровности и т.д.), а также показателей, влияющих на конструкционные особенности (например, сцепление с нижележащими слоями, температурное расширение и т.д.) их использования. Кроме того, требуется дополнительно изучить влияние гранулометрического состава и свойств асфальтогранулятов на надежность достижения требуемых показателей прочности и деформативности модифицированных композитов, что может стать объектом дальнейших исследований.

## *ЛИТЕРАТУРА*

1. *Mollenhauer K. Mix designs for cold recycled pavement materials considering local weather and traffic conditions / K. Mollenhauer, D. Simnofske, J. Valentin, Z. Čížková, J. Suda, F. Batista, C. McNally // Proc. of 6<sup>th</sup> Euroasphalt & Eurobitume Congress: selected papers. – 1-3 June 2016. – Prague, Czech Republic. – Czech Technical University in Prague. – Электрон. данные. – URL: <https://dx.doi.org/10.14311/EE.2016.357> (дата обращения: 25.11.2020).*
2. *Giani M.I. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling / M.I. Giani, G. Dotelli, N. Brandini, L. Zampori // Resources, Conservation and Recycling 104. – 2015. – P. 224-238. – Электрон. данные. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006> (дата обращения: 25.11.2020).*

3. Li Z. *Fatigue resistance of asphalt concrete pavements. Peculiarity and assessments of potentials* / Z. Li, T. Liu, J. Shi, U. Veranko, V. Zankavich // *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2017. – Vol. 12. – № 4. – P. 270-275. – Электрон. данные. – URL: <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2017.34> (дата обращения: 25.11.2020).
4. Радовский Б.С. *Вероятностно-геометрический подход к структуре и оценке физико-механических свойств материалов дорожной конструкции* / Б.С. Радовский // *Актуальные вопросы механики дорожных одежд*. – 1992. – С. 4-36.
5. Si J. *Improving the compatibility of cold-mixed epoxy asphalt based on the epoxidized soybean oil* / J. Si, Y. Li, J. Wang, A.R., X. Yu, R. Jiang // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 243. – May. – Электрон. данные. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118235> (дата обращения: 25.11.2020).
6. Yu X. *Research on compatibility mechanism of biobased cold-mixed epoxy asphalt binder* / X. Yu, J. Wang, J. Si, J. Mei, G. Ding, J. Li // *Construction and Building Materials* 250: 118868. – 2020. – Электрон. данные. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118868> 118235 (дата обращения: 25.11.2020).
7. Khroustalev B. *Estimation and methods of prediction for the structural and mechanical properties of RAP-composites* / B. Khroustalev, T. Liu, A. Busel, Zh. Li, U. Veranko, V. Zankavich, B. Shang // *News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. – 2020. – Vol. 2. – № 44. – P. 187-197. — Электрон. данные. – URL: <http://geolog-technical.kz/images/pdf/g20202/187-197.pdf> (дата обращения: 25.11.2020).
8. Khroustalev B.M. *Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders* / B.M. Khroustalev, U.A. Veranko, V.V. Zankavich, G. Yu. Aliakseyeu, X. Yue, B. Shang, J. Shi. // *Science and Technique*. – 2020. – Vol. 19. – № 3. – С. 181-194. – Электрон. данные. – URL: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194> (дата обращения: 25.11.2020).
9. Zhang Z. *Properties of new cold patch asphalt liquid and mixture modified with waterborne epoxy resin* / Z. Zhang, S. Wang, G. Lu // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2019. – January. – 21(6). – С. 1-11. – Электрон. данные. – URL: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1559314> (дата обращения: 25.11.2020).
10. Shihua P. *Study on Cold Repair Mixture of Epoxy Resin Modified Emulsion Asphalt* / P. Shihua, C. Zhongda, H. Dandan // *Petroleum*

- Asphalt*. – 2012. – 26(4). – С. 46-49. – Электрон. данные. – URL: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotal-OILE201204014](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-OILE201204014) (дата обращения: 25.11.2020).
11. Berkak H. *Physico-mechanical and microstructural properties of an eco-friendly limestone mortar modified with styrene-polyacrylic latex* / H. Berkak, M. Bederina, Z. Makhloufi // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – 32(5): 101463. — Электрон. данные. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101463> (дата обращения: 25.11.2020).
  12. Wang T. *Comparative Study on the Effects of Various Modified Admixtures on the Mechanical Properties of Styrene-Acrylic Emulsion-Based Cement Composite Materials* / T. Wang, J. Xu, C. Zhu, W. Ren // *Materials*. – 2020. – 13(1). – С. 8. – Электрон. данные. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma13010008> (дата обращения: 25.11.2020).
  13. Liu T. *Optimization of the epoxy resin water dispersion for modification of the RAP cold recycled mixes* / T. Liu, J. Shi, A. Busel, Q. Zhang, D. Busel, U. Veranko, V. Zankavich, B. Shang, Zh. Li, J. Wang, T. Yin, Zh. Han // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* – 2019. – 330 (4): 042029. – doi:10.1088/1755-1315/330/4/042029.
  14. Веренько В.А. *Прогнозирование расчетных характеристик бетонов на органогидравлических вяжущих в широких диапазонах температур и скоростей деформирования* / В. А. Веренько, А. А. Макаревич // *Наука и техника*. – 2010. – 3.– С. 20-27. – Электрон. данные. – URL: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/460> (дата обращения: 25.11.2020).
  15. Cox B. *Cold In-Place Recycling Characterization Framework and Design Guidance for Single or Multiple Component Binder Systems* / B. Cox, I. Howard // *Report No. FHWA/MS-DOT-RD-15-250. – Vol. 2. / Mississippi State University (Civil and Environmental Engineering Department)*. – Starkville. – 2015. – 184 p.

## L I T E R A T U R A

1. Mollenhauer K. *Mix designs for cold recycled pavement materials considering local weather and traffic conditions* / K. Mollenhauer, D. Simnofske, J. Valentin, Z. Čížková, J. Suda, F. Batista, C. McNally // *Proc. of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress: select-ed papers*. – 1-3 June 2016. – Prague, Czech Republic. – Czech Technical University in Prague. – Электрон. данные. – URL: <https://dx.doi.org/10.14311/EE.2016.357> (дата обращения: 25.11.2020).



2. *Giani M.I. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling / M.I. Giani, G. Dotelli, N. Brandini, L. Zampori // Resources, Conservation and Recycling 104. – 2015. – P. 224-238. – Elektron. dannye. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006> (data obrashcheniya: 25.11.2020).*
3. *Li Z. Fatigue resistance of asphalt concrete pavements. Peculiarity and assessments of potentials / Z. Li, T. Liu, J. Shi, U. Veranko, V. Zankavich // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2017. – Vol. 12. – № 4.– P. 270-275. – Elektron. dannye. – URL: <http://dx.doi.org/10.3846/bjrbe.2017.34> (data obrashcheniya: 25.11.2020).*
4. *Radovskij B.S. Veroyatnostno-geometricheskij podhod k strukture i ocenke fiziko-mekhanicheskikh svojstv materialov dorozhnoj konstrukcii / B.S. Radovskij // Aktual'nye voprosy mekhaniki dorozhnyh odezhd. – 1992. – S. 4-36.*
5. *Si J. Improving the compatibility of cold-mixed epoxy asphalt based on the epoxidized soybean oil / J. Si, Y. Li, J. Wang, A.R. Niyigena, X. Yu, R. Jiang // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 243. – May. – Elektron. dannye. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118235> (data obrashcheniya: 25.11.2020).*
6. *Yu X. Research on compatibility mechanism of biobased cold-mixed epoxy asphalt binder / X. Yu, J. Wang, J. Si, J. Mei, G. Ding, J. Li // Construction and Building Materials 250: 118868. – 2020. – Elektron. dannye. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118868> (data obrashcheniya: 25.11.2020).*
7. *Khroustalev B. Estimation and methods of prediction for the structural and mechanical properties of RAP-composites / B. Khroustalev, T. Liu, A. Busel, Zh. Li, U. Veranko, V. Zankavich, B. Shang // News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2020. – Vol. 2. – № 44. – P. 187-197. — Elektron. dannye. – URL: <http://geolog-technical.kz/images/pdf/g20202/187-197.pdf> (data obrashcheniya: 25.11.2020).*
8. *Khroustalev B.M. Structure Formation and Properties of Concrete Based on Organic Hydraulic Binders / B.M. Khroustalev, U.A. Veranko, V.V. Zankavich, G. Yu. Aliakseyeu, X. Yue, B. Shang, J. Shi. // Science and Technique. – 2020. – Vol. 19. – № 3. – S. 181-194. – Elektron. dannye. – URL: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-181-194> (data obra-shcheniya: 25.11.2020).*

9. Zhang Z. *Properties of new cold patch asphalt liquid and mixture modified with waterborne epoxy resin* / Z. Zhang, S. Wang, G. Lu // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2019. – January. – 21(6). – S. 1-11. – Elektron. dannye. – URL: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1559314> (data obrashcheniya: 25.11.2020).
10. Shihua P. *Study on Cold Repair Mixture of Epoxy Resin Modified Emulsion Asphalt* / P. Shihua, C. Zhongda, H. Dandan // *Petroleum Asphalt*. – 2012. – 26(4). – S. 46-49. – Elektron. dannye. – URL: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotal-OILE201204014](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-OILE201204014). (data obrashcheniya: 25.11.2020).
11. Berkak H. *Physico-mechanical and microstructural properties of an eco-friendly limestone mortar modified with styrene-polyacrylic latex* / H. Berkak, M. Bederina, Z. Makhloufi // *Journal of Building Engineering*. – 2020. – 32(5): 101463. — Elektron. dannye. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101463> (data obrashcheniya: 25.11.2020).
12. Wang T. *Comparative Study on the Effects of Various Modified Admixtures on the Mechanical Properties of Styrene-Acrylic Emulsion-Based Cement Composite Materials* / T. Wang, J. Xu, C. Zhu, W. Ren // *Materials*. – 2020. – 13(1). – S. 8. – Elektron. dannye. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma13010008> (data obrashcheniya: 25.11.2020).
13. Liu T. *Optimization of the epoxy resin water dispersion for modification of the RAP cold recycled mixes* / T. Liu, J. Shi, A. Busel, Q. Zhang, D. Busel, U. Veranko, V. Zankavich, B. Shang, Zh. Li, J. Wang, T. Yin, Zh. Han // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* – 2019. – 330 (4): 042029. – doi:10.1088/1755-1315/330/4/042029.
14. Veren'ko V.A. *Prognozirovanie raschetnykh karakteristik betonov na organogidravlicheskih vyazhushchih v shirokih diapazonah temperatur i skorostej deformirovaniya* / V. A. Veren'ko, A. A. Makarevich // *Nauka i tekhnika*. – 2010. – 3.– S. 20-27. – Elektron. dannye. – URL: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/460> (data obrashcheniya: 25.11.2020).
15. Cox B. *Cold In-Place Recycling Characterization Framework and Design Guidance for Single or Multiple Component Binder Systems* / B. Cox, I. Howard // *Report No. FHWA/MS-DOT-RD-15-250*. – Vol. 2. / *Mississippi State University (Civil and Environmental Engineering Department)*. – Starkville. – 2015. – 184 p.

.....  
**COLD RECLAIMED MIXES BASED ON ASPHALT GRANULATES  
FOR CONSTRUCTION OF UPPER LAYERS  
OF ROAD PAVEMENTS**

*Doctor of Science (Tech.), Professor V.A. Verenko,  
Ph. D. (Tech.) V.V. Zankavich,  
(Henan Gaoyuan Highway Maintenance  
Technology Co. Ltd.),  
Chief Executive Officer E.O. Zaytsev,  
Head of Section, Master of Science (Tech.) S.V. Lira,  
Deputy Head of Section, Master of Science (Tech.) I.G. Nasonova  
(State Government Institution of  
the Krasnodar Region «Krasnodaravtodor»),  
Research Scientist, Master of Science (Tech.) Shang Bo,  
Deputy Head of Section, Master of Science (Tech.) Hou Dehua  
(Henan Provincial Key Laboratory of Highway  
Detection and Maintenance)  
Contact information: otlk.avtodor@bk.ru*

*In this article the methods of modifying concretes based on organo-hydraulic binders by water dispersions of epoxy resin and styrene-acrylates are considered in terms of achieving by them the design characteristics of typical asphalt concretes. A new method for evaluating the properties of this type of concretes to cyclic loading and fatigue accumulation is also proposed.*

**Key words:** *fatigue resistance, cyclic stability, asphalt granulate, modified cold reclaimed mix, structural strength, styrene-acrylic water dispersion, water dispersion of epoxy resin, epoxidized soybean oil.*

---

Рецензент: канд. техн. наук М.А. Славуцкий (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 11.08.2020.