

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ
БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
НА ОСНОВЕ КЕРАМЗИТА**

Канд. техн. наук **Ю.Г. Борисенко**,
аспирант **С.В. Рудак**
(Северо-Кавказский федеральный университет)
Контактная информация: borisenko2005@yandex.ru;
s-rudak@mail.ru

Проведен анализ деформационного и термонапряженного состояния битумоминеральных дорожных покрытий, и показаны направления улучшения их качества. Представлены результаты экспериментальных исследований физико-механических и эксплуатационных свойств битумоминеральных композиций с включением керамзитового гравия. В результате сравнительного анализа экспериментальных данных установлены оптимальные составы битумоминеральных композиций, обладающих пониженной плотностью и весом, высокими прочностными показателями и эксплуатационными характеристиками. Показано, что снижения битумоемкости битумоминеральных композиций на основе пористых заполнителей можно достичь за счет применения в рациональных соотношениях керамзитового гравия фракции 5-20 мм.

Ключевые слова: битумоемкость, битумоминеральная композиция, зерновой состав, керамзит, легкий пористый заполнитель, физико-механические и эксплуатационные свойства.

Одна из основных причин снижения несущей способности и сокращения межремонтных сроков эксплуатации покрытий нежестких дорожных одежд – несоответствие нормативным требованиям качества применяемых дорожно-строительных материалов. Эффективным направлением решения этой актуальной проблемы является повышение эксплуатационных характеристик покрытий дорог за счет совершенствования применяемых композиционных материалов на основе органических вяжущих.

Как известно, одним из существенных недостатков асфальтобетонных и битумоминеральных композиций является высокая зависимость их прочности и деформативных свойств от температуры. Так как при повышении температуры вязкость битума, содержащегося в асфальтобетоне, понижается – связи между минеральными частицами ослабевают, что влечет за собой уменьшение прочности. При понижении темпе-

ратуры происходит обратный процесс: вязкость битума, а с нею и прочность повышаются. С изменением показателей прочности изменяется и деформационное поведение асфальтобетона. Условиями работы дорожных покрытий определяются требования к такому материалу, а именно: достаточная деформационная устойчивость при высоких летних температурах (т.е. теплоустойчивость) и достаточная деформативная способность при низких температурах (т.е. высокая трещиностойкость) [1].

Наиболее характерными деформациями, возникающими в летнее время в асфальтобетонных покрытиях, являются сдвиговые: волны, наплывы и т.п. Устойчивость против возникновения сдвигающих деформаций, как указывается в [1], тесно связана с прочностью асфальтобетона – повышенной прочностью асфальтобетона при высоких летних температурах сопутствует и повышенная сдвигоустойчивость дорожных покрытий.

Согласно теории Мора, предельные сопротивления одноосному сжатию и растяжению материала связаны со сцеплением его частиц между собой и внутренним трением, возникающим между ними, что можно описать в виде следующих формул:

– сопротивление сжатию:

$$R_c = 2c \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) ; \quad (1)$$

– сопротивление растяжению:

$$R_p = \frac{2c}{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} , \quad (2)$$

где

c – сцепление, МПа;

φ – угол внутреннего трения.

Сопротивление асфальтобетона сдвигу, согласно теории Н.Н. Иванова [1, 2], основывающейся на известном уравнении Кулона, выражается зависимостью:

$$\tau = P \cdot \operatorname{tg} \varphi + C + \Sigma , \quad (3)$$

где

P – нормальное давление на площадке сдвига, МПа;

φ – угол внутреннего трения материала;

C – зацепление минеральных зерен, МПа;

Σ – сцепление, обусловленное битумными связями, МПа.

Таким образом, чем выше угол внутреннего трения φ и сцепление Σ , тем выше прочность и, следовательно, сдвигоустойчивость материала.

При понижении температуры (в зимний период) в асфальтобетонах происходит обратный процесс: вязкость битума повышается, а с нею и повышается прочность покрытия. Вследствие влияния отрицательных температур возникают растягивающие температурные напряжения, приводящие в определенных условиях к образованию трещин в дорожном покрытии. Как указывается в работе [3], одной из основных задач при разработке конструкций, чувствительных к температурным деформациям, является сведение к минимуму температурных напряжений.

Исследованиями напряженного состояния дорожных покрытий и условий трещинообразования в них [4] установлено следующее:

- при линейном напряженном состоянии при охлаждении на ΔT в дорожном покрытии, работающем в условиях невозможности свободного перемещения, возникает температурное напряжение σ_T :

$$\sigma_T = E_1(\alpha_a - \alpha_0)\Delta T ; \quad (4)$$

- при объемном напряженном состоянии:

$$\sigma_T = E_1(\alpha_a - \alpha_0)\Delta T / (1 - C_x\mu) , \quad (5)$$

где

E_1 , α_a , μ – модуль упругости, коэффициент линейного теплового расширения и коэффициент Пуассона асфальтобетонного покрытия соответственно;

α_0 – коэффициент линейного теплового расширения материала основания;

C_x – коэффициент, учитывающий ограничение в свободном температурном деформировании (принимает значения 0; 1 или 2 в зависимости от того, имеется ли ограничение в свободном температурном деформировании в одном, двух или трех направлениях).

Анализ этого выражения позволяет выбрать пути регулирования показателей свойств асфальтобетонов и битумоминеральных композиций дорожных покрытий с целью снижения температурных напряжений, что очень важно при выборе путей повышения трещиностойкости материала. Таким образом, повысить трещиностойкость можно, снижая модуль упругости E , коэффициент Пуассона μ и коэффициент теплового расширения α_a материала покрытия.

Комплексное и качественное решение проблемы повышения температурной и деформативной устойчивости битумоминеральных материалов для дорожных покрытий – сложная многоуровневая задача, и одним из эффективных направлений ее решения, по нашему мнению, является разработка и применение битумоминеральных материалов на основе легких пористых заполнителей (в частности, на основе керамзи-

тового гравия).

В ряде работ отечественных авторов [4-9 и др.] проанализировано влияние пористых минеральных материалов на свойства битумо-минеральных композиций. Эффективность использования пористых минеральных заполнителей (вулканических туфов, керамзита, перлита и др.) обусловлена их высокой теплоизолирующей способностью, низкотемпературной трещиностойкостью, невысокими плотностью и весом. Несмотря на обеспечение повышенных показателей прочности, водостойкости, теплостойкости, трещиностойкости и деформативности битумо-минеральных смесей на основе пористых минеральных материалов, их существенным недостатком является повышенная битумоемкость. Кроме того, в ряде случаев недостаточно высокие эксплуатационные показатели предлагаемых битумо-минеральных композиций ограничивают их внедрение.

В работах [8, 10 и др.], в патенте [9] предлагаются способы снижения битумоемкости битумо-минеральных композиций на основе пористого заполнителя (керамзитового гравия и песка), сущность которых заключается в следующем:

- модификации битумного вяжущего менее дорогостоящими остаточными продуктами нефтепереработки (остаточными гудронами);
- применении двухстадийной технологии приготовления битумо-минеральных смесей;
- предварительной двукратной обработке заполнителя (керамзита или вулканического туфа) перед приготовлением смеси вязкими дорожными битумами;
- предварительной гидрофобизации пористого заполнителя тяжелой смолой пиролиза.

Несмотря на то, что всеми выше перечисленными способами обеспечивается снижение битумоемкости, в то же время при этом усложняется технология приготовления битумо-минеральных смесей, что соответственно ведет к перерасходу энергии, материалов и удорожанию получаемого продукта.

Анализ публикаций, посвященных разработке и исследованию битумо-минеральных композиций на основе пористых заполнителей, показывает, что имеется достаточно высокий потенциал развития и совершенствования таких материалов путем оптимизации их зерновых составов. Наиболее перспективным пористым заполнителем, позволяющим комплексно решать проблемы температурной и деформационной

устойчивости нежестких дорожных покрытий, по нашему мнению, является керамзит, сочетающий в себе: невысокую плотность и вес, низкую теплопроводность, высокую прочность, деформативность и демпфирующую способность, стабильность химического и зернового состава, стоимость, сопоставимую с качественным плотным наполнителем.

В настоящей статье представлены результаты исследования влияния фракций керамзитового гравия на физико-механические и эксплуатационные характеристики битумоминеральных композиций.

Были разработаны составы горячих битумоминеральных композиций непрерывной гранулометрии типа Б, в которых замещали фракции крупного плотного заполнителя (5-20 мм) на аналогичные фракции керамзитового гравия (**табл. 1**). В предложенных составах битумоминеральных композиций (составы №№ 1–7, **табл. 1**) варьировали содержание крупных фракций легкого пористого заполнителя. Для фракций менее 5 мм использовали отсеы дробления плотных горных пород. Применение керамзитового песка (особенно дробленого) для песчаных фракций, по мнению авторов данной статьи, неэффективно вследствие значительного увеличения удельной поверхности пористого заполнителя, что, безусловно, будет способствовать повышению битумоемкости смеси.

При проектировании зерновых составов битумоминеральных смесей исходили из равенства объемов долей проектируемого состава и зернового состава-прототипа на плотном наполнителе. За состав-прототип была принята стандартная мелкозернистая асфальтобетонная смесь типа Б (ГОСТ 9128-2013) на плотном минеральном наполнителе (состав № 8, **табл. 1**).

В разработанных составах битумоминеральных смесей использовали: керамзитовый гравий марки 600 фракции 5-20 мм; гранитный щебень и отсеы его дробления фракции 0,16-20 мм; активированный известняковый минеральный порошок. Свойства керамзитового гравия и гранитного щебня представлены в **табл. 2**. В качестве вяжущего применяли дорожный нефтяной битум марки БНД 60/90.

Из разработанных битумоминеральных смесей были изготовлены образцы-цилиндры 71,4×71,4 мм, которые затем были испытаны, согласно ГОСТ 12801-98. При подборе оптимального содержания битума в композициях ориентировались на максимальные прочностные характеристики (R_0 , R_{20} и R_{50}) и приемлемые показатели водостойкости (k_6 , k_{60} и W). Коэффициенты теплопроводности λ композиций определяли методом стационарного теплового потока, согласно ГОСТ 7076-99, с помощью измерителя теплопроводности ИТС-1.

Таблица 1

*Зерновые составы исследуемых
битумо-минеральных композиций, % масс.*

№ состава	Фракции керамзита (К*) и щебня (Щ**) в составе смеси, мм			Содержание битума С, % масс.	Размер зерен, мм, не более									
	15-20	10-15	5-10		20	15	10	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
1	К	Щ	Щ	5,5	100,0	95,5	90,2	58,3	45,6	35,0	25,5	19,1	13,8	5,3
2	Щ	К	Щ	5,5	100,0	89,7	87,6	56,7	44,3	34,0	24,7	18,5	13,4	5,2
3	Щ	Щ	К	6,0	100,0	88,3	82,4	64,5	50,5	38,7	28,2	21,1	15,3	5,9
4	К	К	Щ	5,5	100,0	95,3	93,1	60,2	47,1	36,1	26,3	19,7	14,2	5,5
5	Щ	К	К	6,5	100,0	87,8	85,3	66,8	52,3	40,1	29,2	21,9	15,8	6,1
6	К	Щ	К	6,5	100,0	94,6	88,3	69,2	54,1	41,5	30,2	22,7	16,4	6,3
7	К	К	К	6,5	100,0	94,4	91,7	71,8	56,2	43,1	31,4	23,5	17,0	6,5
8	Щ	Щ	Щ	5,5	100,0	90,0	85,0	55,0	43,0	33,0	24,0	18,0	13,0	5,0
<i>Гранулометрия минеральной части асфальтобетона типа Б (согласно ГОСТ 9128-2013)</i>														
<i>Размер зерен, мм, мельче</i>					90-100	80-100	70-100	50-60	38-48	28-37	20-28	14-22	10-16	6-12
<i>Примечание: К* – керамзитовый гравий; Щ** – гранитный щебень.</i>														

Физико-механические свойства предложенных составов битумо-минеральных композиций и состава-прототипа на плотном заполнителе с оптимальным содержанием битума представлены в **табл. 3**.

В результате экспериментальных исследований выявлено следующее. Замена только одной фракции щебня на керамзит в составе композиции практически не влияет на содержание битума в смеси (составы №№ 1, 2), и лишь в смеси с фракцией керамзита 5-10 мм (состав № 3) содержание битума выше на 0,5 % масс., что можно объяснить высоким содержанием данной фракции (17,9 % масс.). Установлено, что битумоемкость композиций возрастает с увеличением количества керамзита. Тем не менее, содержание битума в предложенных композициях на ос-

нове керамзитового гравия составило 5,5-6,5 % масс., что укладывается в требования ГОСТ для асфальтобетонов типа Б.

Таблица 2

Свойства щебня и керамзитового гравия

<i>Используемый заполнитель</i>	<i>Фракции заполнителя, мм</i>	<i>Насыпная плотность, кг/м³</i>	<i>Марка по прочности при сдавлива- нии в цилиндре</i>
<i>Гранитный щебень (ГУП СК «Кочубеевский карьер», Ивановское месторождение, Ставропольский край)</i>	15-20	1100	-
	10-15	1200	-
	5-10	1300	-
<i>Керамзитовый гравий (ОАО «Комбинат производствен- ных предприятий», г. Ипатово, Ставропольский край)</i>	15-20	600	100
	10-15	600	100
	5-10	700	100

С увеличением содержания керамзита в смеси снижается плотность битумоминеральных композиций. При замене фракций 5-20 мм на керамзитовый гравий плотность минимальна и на 23,1 % ниже плотности прототипа на плотном заполнителе.

Кроме того, с увеличением содержания керамзита увеличиваются показатели прочности при сжатии при 20 и 50 °С и достигают максимума при полной замене фракций 5-20 мм плотного заполнителя на керамзитовый гравий (состав № 7). При содержании керамзита в смеси 21,01 % масс. и выше прочность и теплостойкость предложенных композиций (составы №№ 5-7) превышают аналогичные показатели состава-прототипа (состав № 8).

Теплопроводность композиций с увеличением содержания керамзита в смеси устойчиво снижается. Значительное снижение теплопроводности наблюдается при содержании керамзита более 17,85 % масс. (составы №№ 3, 5-7). Минимальное значение коэффициента теплопроводности λ зафиксировано при содержании керамзита в смеси 28,15 % масс. (состав № 7), которое составило 0,615 Вт/(м·°С) и более чем на 33 % ниже λ композиции-прототипа на плотном заполнителе.

Показатели коэффициентов водостойкости k_e и $k_{од}$ предложенных композиций с увеличением содержания керамзита в смеси снижаются незначительно, несколько уступают аналогичным показателям состава-прототипа на плотном заполнителе, но полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ. Водонасыщение W составов с содержанием керамзитового гравия выше 17,85 % масс. (составы №№ 3, 5-7) не удовлетворяет требованиям ГОСТ. Однако судить о негативном влиянии пористого заполнителя на водостойкость этих композиций преждевременно. Безусловно, высокая пористость керамзитового гравия играет определенную роль в увеличении этого показателя, но в целом не ухудшает сопротивление композиции к агрессивному воздействию влаги. Так, повышенное водонасыщение (8-10 %) наблюдается у битумоминеральных композиций и асфальтобетонов на основе различных пористых материалов (например, на пористых гранулированных шлаках и др.). Однако это, как указывается в [11], не следует считать недостатком.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что наиболее значительное влияние на структуру композита, а значит и на его свойства, оказывает высокое содержание в смеси фракции керамзитового гравия 5-10 мм. Составы с содержанием этой фракции (составы №№ 3, 5-7) характеризуются пониженными плотностью и теплопроводностью при соответствующих высоких показателях прочности и теплостойкости. Поэтому эти составы были выбраны как наиболее оптимальные для дальнейших исследований влияния пористого заполнителя на эксплуатационные свойства предложенных композиций.

Эксплуатационные свойства исследуемых составов битумоминеральных композиций (включая стандартный состав-прототип на плотном заполнителе № 8) оценивали по следующим показателям:

- теплостойкость (прочность при сжатии при 50 °С R_{50} (табл. 3));
- сдвигустойчивость (коэффициент внутреннего трения $tg\varphi$ и показатель сцепления C_π);
- трещиностойкость (прочность при сжатии при 0 °С R_0 (табл. 3) и прочность при растяжении при расколе R_p);
- термостабильность (коэффициент температурной чувствительности $k_{m.ч.}$);
- износостойкость (показатель истираемости G). Показатели R_{50} , R_0 , $tg\varphi$, C_π и R_p определяли в соответствии с ГОСТ 12801-98.

Таблица 3

Физико-механические свойства битумо-минеральных композиций

№ состава	Тип смеси – мелкозернистая, тип Б, размер фракции, мм			Содержание керамзитового гравия в смеси, $C_{кз}$, % масс.	Содержание битума С, % масс.	Содержание битума С, об. %	Плотность, ρ , кг/м ³	Теплопроводность, λ , Вт/(м·°С)	Прочность при сжатии, МПа			Водонасыщение, W , %	Коэффициенты водостойкости	
	15-20	10-15	5-10						R_0	R_{20}	R_{50}		k_e	k_{60}
1	К	Щ	Щ	4,52	5,5	12,91	2,34	0,876	9,85	4,60	1,73	3,8	0,97	0,76
2	Щ	К	Щ	2,14	5,5	12,71	2,38	0,898	9,45	4,69	1,68	2,5	0,98	0,76
3	Щ	Щ	К	17,85	6,0	13,81	2,10	0,683	9,98	5,32	1,92	7,2	0,95	0,78
4	К	К	Щ	6,94	5,5	13,06	2,29	0,795	10,07	5,99	2,03	3,5	0,91	0,77
5	Щ	К	К	21,01	6,5	14,28	1,95	0,640	9,65	5,31	2,11	7,6	0,96	0,77
6	К	Щ	К	24,50	6,5	14,46	1,94	0,625	9,80	5,64	2,17	7,3	0,95	0,77
7	К	К	К	28,15	6,5	14,64	1,87	0,615	10,30	6,06	2,36	8,8	0,95	0,77
8	Щебень			-	5,5	12,67	2,43	0,930	11,02	5,20	2,06	1,5	0,98	0,78
<i>Требования ГОСТ 9128-2013 для асфальтобетона Тип Б; IV, V дорожно-климатические зоны</i>														
<i>I марка</i>				-	5-6,5	-	-	≤13	≥2,5	≥1,3	1,5-4	≥0,85	≥0,75	
<i>II марка</i>									≥2,2	≥1,2		≥0,80	≥0,70	
<i>III марка</i>									≥2,0	≥1,1		≥0,70	≥0,60	

Коэффициенты температурной чувствительности $k_{т.ч.}$ рассчитывали по формуле:

$$k_{т.ч.} = R_0/R_{50} . \quad (6)$$

Для оценки износостойкости покрытий из исследуемых битумо-минеральных композиций на плотном и пористом заполнителях использовали прибор для определения истираемости (G) бетона и износостойкости неглазурованных керамических плиток ЛКИ-3М.

Результаты испытаний представлены в **табл. 4**.

Данные результатов испытаний показали, что с увеличением содержания керамзитового гравия в битумо-минеральной смеси показатели теплостойкости R_{50} устойчиво повышаются (**табл. 3**) и при содержании керамзита в смеси 21,01 % масс. (состав № 5) превышают теплостойкость состава-прототипа на плотном заполнителе. При максимальном содержании керамзита в смеси (состав № 7) прочность при сжатии при 50 °С достигает максимального значения и почти на 15 % превышает аналогичный показатель состава-прототипа.

Показатели сцепления C_{π} предложенных композиций на пористом заполнителе значительно превышают аналогичный показатель состава-прототипа на плотном заполнителе (**табл. 4**). Коэффициенты внутреннего трения составов №№ 6, 7 также превышают $tg\varphi$ прототипа, и лишь $tg\varphi$ составов №№ 3 и 5 ему уступает. Испытаниями на сдвигоустойчивость также выявлено, что с увеличением содержания керамзитового гравия в разработанных составах сдвигоустойчивость битумо-минеральных композиций повышается.

Установлена повышенная трещиностойкость битумо-минеральных композиций на основе керамзитового гравия. Так, показатели прочности при сжатии при 0 °С композиций на пористом заполнителе (составы №№ 3, 5-7, **табл. 3**) несколько ниже R_0 прототипа на плотном заполнителе (состав №8, **табл. 3**), что свидетельствует о более высокой деформативности предложенных материалов при низких температурах, а, следовательно, и о более высокой их трещиностойкости. Это также подтверждают данные испытаний образцов при определении показателей прочности при растяжении при расколе R_p (**табл. 4**). Установлено, что с увеличением количества керамзита в композиции показатели прочности R_0 устойчиво повышаются, а показатели R_p – снижаются.

Таблица 4

Эксплуатационные показатели битумоминеральных композиций

№ состава	Содержание керамзитового гравия в смеси, $S_{кз}$, % масс.	Коэффициент внутреннего трения, $tg\phi$	Показатель сцепления, $C_{сп}$, МПа	Прочность при растяжении при расколе, R_p , МПа	Коэффициент температурной чувствительности, $k_{т.ч.}$	Показатель истираемости, G , z/cm^2
3	17,85	0,830	0,632	4,75	5,20	2,07
5	21,01	0,841	0,683	4,58	4,57	1,98
6	24,50	0,975	0,687	4,44	4,52	1,95
7	28,15	0,983	0,752	4,36	4,36	1,90
8	-	0,885	0,385	5,34	5,35	2,60
<i>Требования ГОСТ 9128-2013 для асфальтобетона Тип Б; IV, V дорожно-климатические зоны</i>						
<i>I марка</i>		$\geq 0,83$	$\geq 0,38$	4,0-6,5	-	-
<i>II марка</i>				3,5-7,0	-	-
<i>III марка</i>		$\geq 0,81$	$\geq 0,36$	3,0-7,0	-	-

Как известно, композиционные материалы на основе битумных вяжущих способны в большой степени изменять свои свойства в интервале эксплуатационных температур. Повышение термостабильности битумоминеральных материалов, т.е. устойчивости к образованию сдвиговых деформаций при высоких летних температурах и трещинообразованию при низких является актуальной задачей, и включение в состав композиций пористого заполнителя отчасти может ее решить. Анализируя термостабильность исследуемых композиций, необходимо отметить, что композиции на пористом заполнителе обладают более высокой термостабильностью по сравнению с составами на плотном заполнителе. С увеличением содержания керамзита в составе смеси коэффициенты температурной чувствительности $k_{т.ч.}$ предложенных составов (составы №№ 3, 5-7, табл. 4) устойчиво снижаются, что свидетельствует о повышении температурной деформационной устойчивости материала, т.е. повышении его термостабильности.

Износ дорожных покрытий, особенно асфальтобетонных, является сложным процессом, его параметры трудно поддаются количественному определению. В настоящее время не существует строго нормируемых методов определения износа асфальтобетонных покрытий. Нами предложено оценивать фактор износа по величине показателя истираемости G , который определяли на приборе ЛКИ-3М по изменению массы испытуемых образцов битумоминеральных композиций при трении о вращающийся в горизонтальной плоскости истирающий диск с абразивным материалом. Разумеется, по полученным данным испытаний весьма приближенно можно судить о характере и величине износа покрытия, но можно сделать ряд определенных выводов на основе каче-

ственного сравнительного анализа. Согласно полученным данным испытаний (табл. 4), для предложенных битумоминеральных композиций на основе пористого заполнителя (составы №№ 3, 5-7) потери в массе составили на 20,4-26,9% меньше в сравнении с композицией-прототипом на плотном заполнителе (состав № 8). С увеличением содержания керамзитового гравия в составе битумоминеральной смеси значения показателя истираемости G снижаются. Наличие керамзита в составе битумоминеральных композиций позволяет существенно снизить истираемость материала, и, следовательно, улучшает износостойкость покрытия.

Следует отметить, что наиболее оптимальными по составу являются композиции с содержанием керамзитового гравия 24,50-28,15% масс. (составы №№ 6, 7). Составы № 3 и № 5 (содержание керамзитового гравия 17,85 и 21,01% масс.) по некоторым показателям (коэффициенту внутреннего трения $tg\varphi$, теплостойкости R_{50}) уступают битумоминеральной композиции-прототипу на плотном заполнителе.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа теоретических представлений о деформационном и термонапряженном состоянии дорожных покрытий и данных экспериментальных исследований применения пористых материалов в составе битумоминеральных композиций выявлены направления повышения физико-механических и эксплуатационных показателей таких материалов путем применения в их составах керамзитового гравия. Комплекс свойств этого пористого материала при применении его в составах битумоминеральных смесей позволит повысить деформационную устойчивость покрытия при высоких летних температурах и обеспечить деформативную способность при низких.
2. Выявлено, что снижение битумоемкости битумоминеральных смесей на основе пористых заполнителей (в частности керамзитового гравия), возможно за счет замещения наиболее крупных фракций плотного заполнителя на пористый. Такая замена не приводит к излишнему расходу битума в смеси за счет сопоставимых показателей удельной поверхности минеральных материалов.
3. В результате проведенных экспериментальных исследований физико-механических и эксплуатационных свойств предложенных составов горячих мелкозернистых (типа Б) битумоминеральных смесей с включением керамзитового гравия различных фракций (15-20, 10-15 и 5-10 мм) определено оптимальное содержание ке-

рамзитового гравия в смеси для получения эффективных композиций для дорожных покрытий. Благодаря применению керамзитового гравия в предложенных составах в рациональных соотношениях (в сравнении со стандартными составами на плотном минеральном заполнителе) удалось: снизить на 20-23 % плотность и на 33-34 % теплопроводность материала; повысить на 9-16 % прочность и на 5-14 % теплостойкость; значительно улучшить сдвигоустойчивость, трещиностойкость, износостойкость и снизить чувствительность к температурному влиянию. Оптимальное содержание керамзитового гравия (фракции 5-20 мм) в разработанных составах битумо-минеральных смесей составило 24,50-28,15 % масс., а содержание битумного вяжущего – 6,5 % масс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дорожный асфальтобетон* / Под ред. Л.Б. Гезенцева. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
2. *Иванов Н.Н. О работоспособности асфальтобетона в дорожном покрытии* / Н.Н. Иванов, Л.Т. Ефремов // *Тр. МАДИ.* – 1973. – Вып. 63. – С. 52-59.
3. *Исследование температурных напряжений* / Под ред. Н.И. Пригоровского. – М.: Наука, 1972. – 152 с.
4. *Печеный Б.Г. Битумы и битумные композиции* / Б.Г. Печеный. – М.: Химия, 1990. – 256 с.
5. *Высоцкая М.А. Особенности структурообразования битумо-минеральных композиций с применением пористого сырья* / М.А. Высоцкая, Д.А. Кузнецов, Д.Е. Барабаш // *Строительные материалы.* – 2014. – № 1-2. – С. 68-71.
6. *Прокопец В.С. Асфальтобетоны на основе пористых заполнителей Западной и Восточной Сибири* / В.С. Прокопец, В.Д. Галдина, Г.А. Подрез // *Строительные материалы.* – 2009. – № 11. – С. 26-28.
7. *Печерский С.А. Использование вулканического туфа в горячих асфальтобетонах* / С.А. Печерский, А.В. Битуев, Н.В. Архиничева и др. // *Строительные материалы.* – 2010. – № 2. – С. 32-33.
8. *Борисенко Ю.Г. Пути снижения битумоемкости битумо-минеральных композиций с заполнителем на основе керамзита* / Ю.Г. Борисенко, В.В. Лынный, О.А. Борисенко, Е.В. Гордиенко // *Строительные материалы.* – 2013. – № 5. – С. 24-26.
9. *Патент 2470048 РФ. Битумо-минеральная смесь* / Печеный Б.Г., Галдина В.Д.; патентообладатель ГОУ ВПО «Сибирская госу-

дарственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)»; заявл. 30.05.2011; опубл. 20.12.2012. – Бюл. № 35. – 11 с. – URL: <http://www.freepatent.ru/images/patents/147/2470048/patent-2470048.pdf> (дата обращения 20.08.2018).

10. Литвинова Т.В. Битумоемкость дорожного керамзита / Т.В. Литвинова, Ю.В. Соколов, Л.С. Петрова / Асфальтовые и цементные бетоны для условий Сибири: сб. науч. тр. – Омск: ОмПИ, 1989. – С. 66-67.
11. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Дорожные покрытия / [В.П. Подольский, П.И. Поспелов, А.В. Глагольев, А.В. Смирнов]; под ред. В.П. Подольского. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 304 с.

L I T E R A T U R A

1. *Dorozhnyj asfal'tobeton* / Pod red. L.B. Gezencveja. – М.: Transport, 1985. – 350 s.
2. *Ivanov N.N. O rabotosposobnosti asfal'tobetona v dorozhnom pokrytii* / N.N. Ivanov, L.T. Efremov // Tr. MADI. – 1973. – Vyp. 63. – S. 52-59.
3. *Issledovanie temperaturnyh naprjazhenij* / Pod red. N.I. Prigorovskogo. – М.: Nauka, 1972. – 152 s.
4. *Pechenyj B.G. Bitумы i bitumnye kompozicii* / B.G. Pechenyj. – М.: Himija, 1990. – 256 s.
5. *Vysockaja M.A. Osobnosti strukturoobrazovanija bitumominal'nyh kompozicij s primeneniem poristogo syr'ja* / M.A. Vysockaja, D.A. Kuznecov, D.E. Barabash // *Stroitel'nye materialy*. – 2014. – # 1-2. – S. 68-71.
6. *Prokopec V.S. Asfal'tobetonу na osnove poristyh zapolnitelej Zapadnoj i Vostochnoj Sibiri* / V.S. Prokopec, V.D. Galdina, G.A. Podrez // *Stroitel'nye materialy*. – 2009. – # 11. – S. 26-28.
7. *Pecherskij S.A. Ispol'zovanie vulkanicheskogo tufa v gorjachih asfal'tobetonah* / S.A. Pecherskij, A.V. Bituev, N.V. Arhinicheva i dr. // *Stroitel'nye materialy*. – 2010. – # 2. – S. 32-33.
8. *Borisenko Ju.G. Puti snizhenija bitumoemkosti bitumominal'nyh kompozicij s zapolnitelem na osnove keramzita* / Ju.G. Borisenko, V.V. Ljunnik, O.A. Borisenko, E.V. Gordienko // *Stroitel'nye materialy*. – 2013. – # 5. – S. 24-26.
9. *Patent 2470048 RF. Bitumominal'naja smes'* / Pechenyj B.G., Galdina V.D.; *patentoobladatel' GOU VPO «Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobil'no-dorozhnaja akademija (SibADI)»; zajavl.* 30.05.2011; *opubl.* 20.12.2012. – *Bjul.* # 35. – 11 s. – URL:

<http://www.freepatent.ru/images/patents/147/2470048/patent-2470048.pdf> (data obrashhenija 20.08.2018).

10. Litvinova T.V. Bitumoemkost' dorozhnogo keramzita / T.V. Litvinova, Ju.V. Sokolov, L.S. Petrova / Asfal'tovye i cementnye betony dlja uslovij Sibiri: sb. nauch. tr. – Omsk: OmPI, 1989. – S. 66-67.
11. Tehnologija i organizacija stroitel'stva avtomobil'nyh dorog. Dorozhnye pokrytija / [V.P. Podol'skij, P.I. Pospelov, A.V. Glagol'ev, A.V. Smirnov]; pod red. V.P. Podol'skogo. – M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2012. – 304 s.

**RESEARCH AND OPTIMIZATION OF FORMULATIONS OF
BITUMEN AND MINERAL COMPOSITIONS BASED
ON EXPANDED CLAY AGGREGATE**

*Ph. D. (Tech) Yu.G. Borisenko,
Postgraduate student S.V. Rudak
(North-Caucasian Federal University)
Contact information: borisenko2005@yandex.ru;
s-rudak@mail.ru*

The analysis of the strain and thermo-stress state of bitumen and mineral road pavements is carried out and the directions of improvement of their quality are shown. The results of experimental researches of physical-mechanical and operational properties of bitumen and mineral compositions with the use of expanded clay gravel are presented. As a result of a comparative analysis of the experimental data, optimal formulations of bitumen and mineral compositions having reduced density and weight, high strength characteristics and performance characteristics are determined. It is shown that it is possible to reduce the bitumen content of bitumen and mineral compositions on the basis of porous aggregates by using expanded clay gravel fractions of 5-20 mm in the rational proportions.

Key words: *bitumen content; bitumen and mineral composition; grain composition; expanded clay; light porous filler; physical, mechanical and operational properties.*

Рецензент: канд. техн. наук Л.А. Горельшева (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 31.05.2018 г.