

# КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ДОРОЖНЫЙ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫЙ АСФАЛЬТОБЕТОН ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

**В. И. Братчун**<sup>1</sup>, д.т.н., профессор; **А. М. Саткоева**<sup>2</sup>; **Е. А. Ромасюк**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент;  
**В. Л. Беспалов**<sup>1</sup>, д.т.н., профессор; **В. В. Жеванов**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup> ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

<sup>2</sup> Юго-Осетинский государственный университет им. А. А. Тибилова



*Братчун  
Валерий Иванович*



*Саткоева  
Алана Маурбеговна*



*Ромасюк  
Евгений Александрович*



*Беспалов  
Виталий Леонидович*



*Жеванов  
Вячеслав Владимирович*

**Аннотация.** С использованием метода экспериментально-статистического моделирования определена оптимальная концентрация этиленглицидилакрилата марки Elvaloy-AM и полифосфорной кислоты ПФК-105 в нефтяном дорожном битуме (2 % мас. и 0,2 % мас. соответственно), а поверхности минеральных материалов механо-активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата; при данных концентрационных соотношениях модификаторов обеспечиваются оптимальные физические и деформационно-прочностные характеристики комплексно-модифицированного дорожного асфальтобетона. Установлено, что усталостная долговечность комплексно-модифицированного асфальтобетона в 1,5-2 раза выше, чем у немодифицированного.

**Ключевые слова:** щебеночно-мастичный асфальтобетон; комплексная модификация; деформационно-прочностные свойства; долговечность.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Расчётный срок службы покрытий асфальтобетонных дорог 1-а и 1-б технических категорий до капитального ремонта (10-12 лет) в Донецкой Народной Республике и в Российской Федерации не выдерживается. После пяти лет эксплуатации они нуждаются в капитальном ремонте [1].

Свойства дорожного асфальтобетона – композиционного материала с коагуляционным типом контактов, определяется, прежде всего, физико-механическими свойствами органического вяжущего, рациональным сочетанием типов микроструктуры минерального остова, а также энергией взаимодействия на поверхности раздела фаз «органическое вяжущее – минеральный материал» [2-5].

Таким образом, необходимо разрабатывать такие способы направленного регулирования структуры и свойств нефтяных дорожных битумов и повышения энергетического взаимодействия на поверхности раздела фаз «органическое вяжущее – минеральный материал», которые бы позволили асфальтобетону, эксплуатируемому в покрытиях нежестких дорожных одежд, определяющих нормативные значения деформационно-прочностных характеристик, обеспечивающих долговечность нежестких дорожных одежд.

В научно-исследовательских работах, выполненных в ГОУ ВПО «ДОННАСА» [6,7], установлено,

что эффективным способом повышения долговечности покрытий нежестких дорожных одежд является комплексная модификация микро-, мезо- и макро-структуры дорожного асфальтобетона одновременной поверхностной активацией щебня, песка и минерального порошка этиленглицидилакрилатом, и модификацией нефтяного дорожного битума этиленглицидилакрилатом Элвалой-2 в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК-2. [8,9]. В то же время оптимальные концентрационные соотношения в системе «нефтяной дорожный битум – модификатор нефтяного дорожного битума» и поверхности минеральных материалов (Элвалой АМ) не установлены. В связи с этим не изучены технологические свойства модифицированных асфальтобетонных смесей, физические и деформационно-прочностные характеристики комплексно-модифицированного асфальтобетона.

**Целью исследования** являются экспериментальное определение оптимальных концентрационных соотношений в системе «нефтяной дорожный битум – этиленглицидилакрилат (Элвалой-АМ) – известняковый минеральный порошок, активированный Элвалой АМ» и изучение физико-механических свойств комплексно-модифицированных асфальтобетонов и, прежде всего, дорожных щебеночно-мастичных асфальтополимербетонов.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования приняты дорожные битумы БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, отвечающие требованиям ГОСТ Р 58406.2-20. Для комплексной модификации микро-, мезо- и макро-структуры асфальтобетонов использованы этиленглицидилакрилат, отвечающий требованиям сертификата качества концерна-производителя «DUPON», совместно с полифосфорной кислотой ПФК-105 следующего состава (%):  $H_3PO_4$  – 51,  $H_4P_2O_7$  – 42,  $H_5P_3O_{10}$  – 6,  $H_6P_4O_{13}$  – 1: температура плавления –  $T_{пл} = 16-31$  °С. Температура кипения –  $T_{кип} = 310$  °С; эффективная вязкость при 25 °С –  $\eta = 840$  сПз при 105 °С; при 105 °С  $\eta = 35$  сПз; плотность при 25 °С –  $\rho = 1920$  кг/м<sup>3</sup> [6].

В этиленглицидилакрилате этиленовая основа модифицирована глицидилакрилатом ( $CH_2 = CH - COOR$ ) и придает системе эластичность, а глицидиловая (эпоксидная) группа обеспечивает стабильность системы в результате взаимодействия с компонентами битума. Для Элвалой характерны растворимость в нефтяном дорожном битуме и взаимодействие эпоксидной группы этиленглицидилакрилата с асфальтогеновыми кислотами битума [6].

В качестве наполнителя асфальтобетонной смеси использован известняковый минеральный порошок (МП): содержание  $CaCO_3$  – 99 %; удельная поверхность  $S_{1,2} = 400$  м<sup>2</sup>/кг; средняя плотность под нагрузкой 40МПа – 1880 кг/м<sup>3</sup>; пустотность – 31,8 %;

битуемость – 50%. Минеральный порошок поверхностно-активирован этиленглицидилакрилатом из раствора в бензине.

Щебень и песок получены дроблением и рассевом гранита Каранского карьера (Донецкая область) со следующими показателями качества: дробимость – 6,2 % (марка щебня по прочности – 1400); истираемость щебня в полочном барабане – 2,3 %; насыпная плотность щебня – 1410 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность – 2700 кг/м<sup>3</sup>; морозостойкость, F > 200 циклов; содержание зерен лещадной и игольчатой формы – 6,5 %.

Составы асфальтобетонов приняты типов А, Б, В и ШМА-10 состава, фракций, %: 15...10 – 50 %; 10...5 – 25 %; 5...2,5 – 5 %; 2,5...1,25 – 2 %; 1,25...0,63 – 2 %; 0,63...0,315 – 2 %; 0,315...0,14 – 2 %; 0,14...0,071 – 2 %; минеральный порошок – 10 %.

При выполнении экспериментальных исследований использованы как стандартные, так и специальные: калориметрический (микрокалориметр ДАК-1-1А); термогравиметрический (ДТА-Т).

Исследование усталостной долговечности асфальтобетонов при действии статических и динамических нагрузок выполнено на разработанной на кафедре «Автомобильные дороги и аэродромы» ГОУ ВПО «ДОННАСА» установке, которая позволяет выполнять исследования асфальтобетонных образцов-балочек (16Ч4Ч4 см) в режиме постоянных циклических нагружений с определением количества циклов до разрушения и замеров величин прогиба образца.

Режимы циклического нагружения: нагрузка – от 0,1 до 0,5 с, отдых – от 0,2 до 0,9 с. Величина циклической нагрузки – 10...50 % от разрушающей. Температуры испытаний: -20 °С, -10 °С, 0 °С, 10 °С, 20 °С. Схема приложения нагрузки – двухточечная с целью создания зоны постоянного изгибающего момента в образце-балочке для обеспечения чистого изгиба образца – прогиб по линии окружности.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Оптимизация асфальтовяжущего вещества состава «битум – Elvaloy-АМ и ПФК-105 – минеральный порошок, поверхностно активированный Elvaloy-АМ»**

В связи с тем, что совокупность факторов (табл. 1), действующих на комплексно-модифицированное асфальтовяжущее вещество, а именно массовая концентрация модифицированного дорожного битума, концентрация полимера-активатора (Elvaloy-АМ) на поверхности МП является сложным сочетанием, то был применен метод планирования эксперимента, позволяющий определить оптимальное содержание полимерного активатора на поверхности, обеспечивающего требуемые физико-механические свойства (среднюю плотность и предел прочности при сжатии асфальтовяжущих при 0 °С).

Таблица 1.

**Значение факторов варьирования, которые действуют на систему «битум – активированный минеральный порошок»**

№ п/п	Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни фактора		
					-1	0	+1
1	$X_1$	Содержание модификатора на поверхности МП	%	0,5	0,25	0,75	1,25
2	$X_2$	Массовая концентрация битума	%	2,5	12	14,5	17

Использовался композиционный несимметричный план на трех целочисленных уровнях (-1; 0; +1) с коэффициентом корреляции между факторами  $g_i$ ,  $j < 0,1; i, j = 1, 2, 3$  и  $i \neq j$  [6].

В таблицах 2 и 3 приведены параметры оптимизации системы «битум – Elvaloy-AM и ПФК-105 – минеральный порошок, активированный Elvaloy-AM», а также матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 2.

Параметры оптимизации и их предельные значения

№ п/п	Код параметра	Физический смысл параметра оптимизации	Ед. изм.	Предельные значения функции отклика
1	Y1	Предел прочности при сжатии при 0 °С	МПа	не более 6,50
2	Y2	Средняя плотность	г/см <sup>3</sup>	не менее 2,21

Таблица 3.

Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	В кодируемых значениях		В натуральных значениях		Средние значения экспериментальных данных	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> , % Elvaloy в МП	X <sub>2</sub> , % битума	Y <sub>1</sub> , R <sub>о,скт</sub> , МПа	Y <sub>2</sub> , ρ <sub>ср</sub> , г/см <sup>3</sup>
1	0	0	0,75	14,5	6,46	2,21
2	+	+	1,25	17	5,89	2,19
3	-	-	0,25	12	5,67	2,18
4	0	+	0,75	17	5,44	2,17
5	0	-	0,75	12	5,33	2,16
6	+	0	1,25	14,5	5,84	2,19
7	-	0	0,25	14,5	6,35	2,23
8	+	-	1,25	12	5,16	2,15
9	-	+	0,25	17	4,99	2,16

В программе MathCAD 14.0 for Windows выполнен расчет математических моделей с построением графиков функций отклика (рис. 1).

Получены математические модели в виде неполных полиномов второй степени:

$$Y_1(X_1, X_2) = -25,858 + 4,501x_1 + 1,982x_2 - 0,159x_1^2 - 10,044x_2^2 + 0,234x_1x_2 - 0,018x_1^2x_2 + 0,592x_1x_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2(X_1, X_2) = -0,247 + 0,345x_1 - 1,306x_2 - 0,012x_1^2 - 0,116x_2^2 - 0,186x_1x_2 + 0,0064x_1^2x_2 - 0,008x_1x_2^2 \quad (2)$$

Анализируя данные, приведенные на рис. 1, можно установить, что оптимальное содержание Elvaloy-AM на поверхности минерального порошка составляет 0,65 – 0,7 %. При больших концентрациях (1,25 %) наблюдается явный избыток активатора Elvaloy-AM, выраженный в явлении слипания частиц МП между собой в виде «горошинок» и снижению прочности из-за появления плоскостей скольжения по полимолекулярным слоям этиленглицидилакрилата.

Усталостная долговечность асфальтобетонов в логарифмической системе координат в зависимости от температуры испытаний приведена на рис. 2 а, б действия кратковременной нагрузки: 0,1 с – нагружение; 0,9 с – отдых, т.е. циклическая нагрузка с частотой в 1 Гц.

В качестве критерия отказа (критической выносливости) асфальтобетонного образца под действием кратковременных циклических и статических нагрузок был принят прогиб балки величиной 4 мм. Как показали наблюдения, такой прогиб достаточен для

появления магистральных усталостных трещин в диапазоне температур от +20 °С до минус 20 °С [6].

Исходя из полученных зависимостей (рис. 2 а, б) установлено, что большим количеством циклов до разрушения по сравнению со стандартными асфальтобетонами при всех температурах испытания характеризуется ЩМА, несмотря на повышенное содержание крупных фракций щебня. Это свидетельствует о том, что структура ЩМА имеет более жесткий пространственный каркас, который способен более эффективно воспринимать динамические напряжения. Повышенное содержание асфальтовяжущего вещества в ЩМА приводит к снижению остаточной пористости и, следовательно, источников концентраторов напряжений и повышению усталостной долговечности. Но, в то же время, на всех зависимостях (рис. 2 а, б) заметно, что линия наклона усталостной долговечности к линии абсцисс имеет более пологий угол по сравнению с другими асфальтобетонами, поэтому коэффициент  $m$  для ЩМА оказался самым высоким из всех типов асфальтобетонов. Следовательно, при большом количестве циклов динамической нагрузки усталостные разрушения в материале будут развиваться быстрее, чем в обычном асфальтобетоне. Это связано с тем, что слабоструктурированный битум раздвигает зерна минерального остова ЩМА. Присутствие слабоструктурированного битума в ЩМА способствует некоторому увеличению пластической деформативности при растяжениях (особенно при отрицательных температурах), а также снижению когезионной прочности материала при положительных температурах. Это подтверждается в работе [7], в которой показано, что в результате испытаний на прочность при сжатии ЩМА имел более низкие показатели в сравнении с горячими

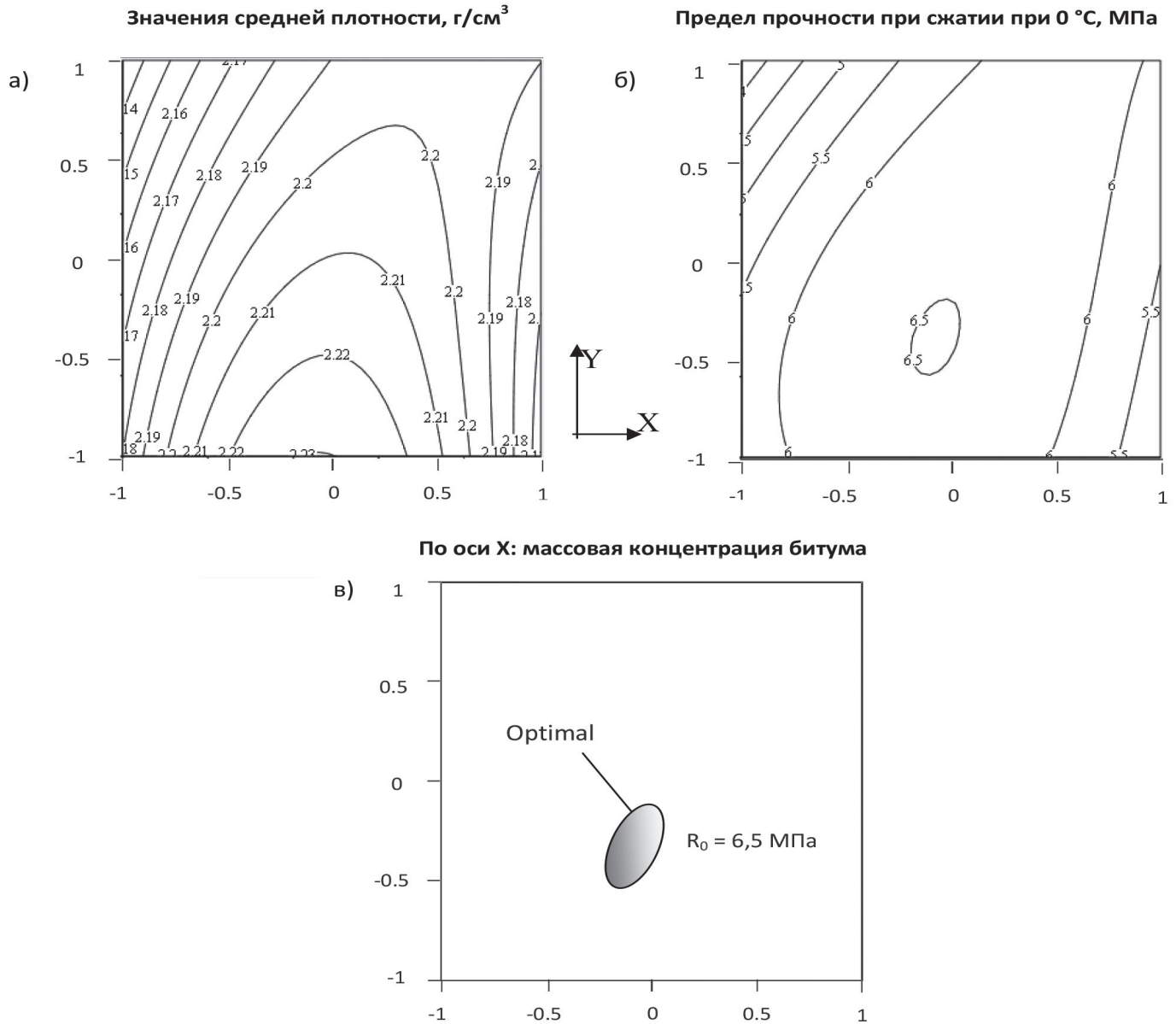


Рис. 1. Графики функций: а) средней плотности; б) предела прочности при сжатии; в) область оптимальных значений

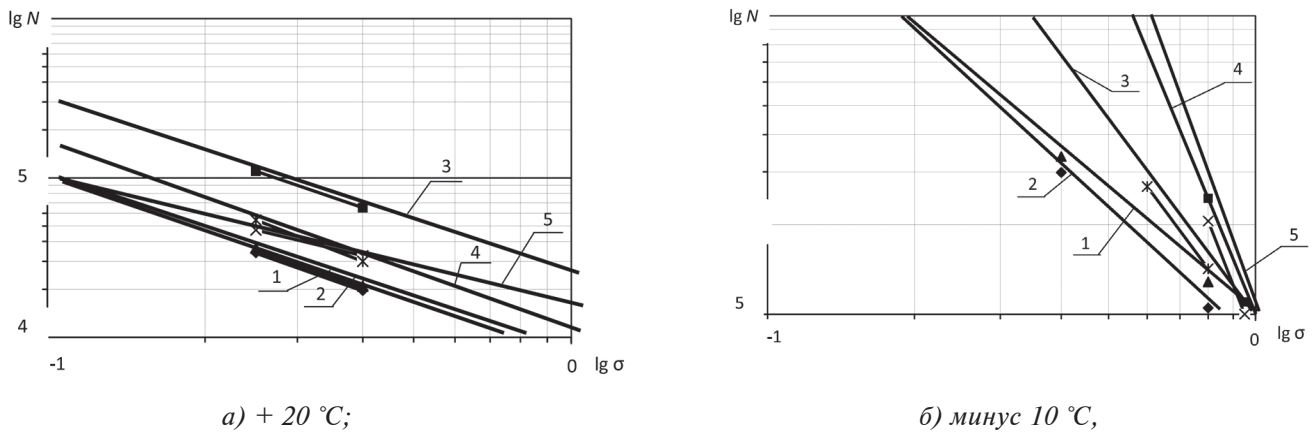


Рис. 2. Усталостная долговечность асфальтобетонов: 1 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «А»); 2 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»); 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»), с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM; 4 – литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной микроструктурой СКМС-30. 5 – ЩМА-10 с добавкой Antrocel-G

асфальтобетонами типов «А» и «Б», тогда как предел прочности при изгибе достаточно высок (выше, чем у типов «А» и «Б»).

Данные, приведенные на рис. 3, свидетельствуют об усилении однородности коагуляционных контактов в ЩМА с комплексно-модифицированной микро-, мезо-, макроструктурой и более высокой адгезионной прочностью и меньшей величиной относительной деформации пленочного модифицированного органического вяжущего. В частности, модифицированный этиленглицидилакрилатом (2 % мас.) нефтяной дорожный битум БНД 130/200 ( $P_{25} = 151$  град.) имеет интервал пластичности 78 °С против ИП БНД 130/200 57 °С, эластичность при 0 °С – 62 %, против 0 %, а при 25 °С  $\mathcal{E}_{25} = 77$  % против 0 %, адгезия по ДСТУ Б.В.2.7-81-98 составляет 89 % против 18 %, когезия – 0,039 МПа против 0,022 МПа.

Характеристикой, которая позволяет косвенно оценить прочность асфальтобетона при высоких положительных температурах является испытание по методике Маршалла на устойчивость, условную пластичность и условную жесткость (табл. 4) [8, 9].

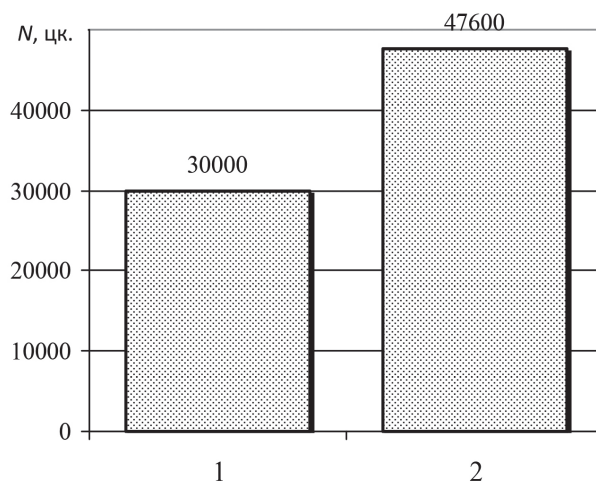


Рис. 3. Сравнительные данные усталостной долговечности (20 °С, 0,4 – 0,45 МПа): 1 – стандартный ЩМА-10; 2 – ЩМА-10 с комплексно-модифицированной структурой Elvaloy-AM

Таблица 4.

Значение показателей, характеризующих сдвигустойчивость бетонов (тип «Б») по Маршаллу (температура испытания 60 °С)

№ п/п	Состав асфальтобетонной смеси	Условная пластичность, l / 10, мм	Устойчивость, P, Н	Условная жесткость, А, Н/мм
1	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип «Б»), приготовленная на битуме БНД 60/90; минеральный порошок – известняковый неактивирован.	46	15256	3316
2	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип «Б»), приготовленная на битумополимерном вяжущем (БНД 60/90 с 2,0 % бутадиенметилстирольного каучука СКМС-30 и 30 % технической серы); минеральный порошок – известняковый поверхностно активирован 0,5 % СКМС-30.	39	22981	5892
3	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип Б), приготовленная на битуме БНД 60/90, который модифицирован 2,0 % этиленглицидилакрилата в комбинации с 0,2 % полифосфорной кислоты ПФК-105; минеральные материалы поверхностно активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата.	37	30000	8108
4	Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь, приготовленная на битуме БНД 60/90; минеральные компоненты поверхностно неактивированы.	46	12580	2735
5	Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь, приготовленная на битуме БНД 60/90, который модифицирован 2,0 % этиленглицидилакрилата в комбинации с 0,2 % полифосфорной кислоты ПФК-105; минеральные материалы поверхностно активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата.	42	20100	4786

## ВЫВОДЫ

Установлено, что при различных температурах испытания усталостная долговечность асфальтобетон с комплексно-модифицированной структурой значительно выше, по сравнению с обычными асфальтобетонами.

Рост усталостной выносливости в 1,5 – 2 раза наблюдается у асфальтобетона, в котором «битум модифицирован 2,0 % мас. этиленглицидилакрилатом марки Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105, а минеральные материалы, поверхностно активированы 0,7 % мас. Elvaloy-AM» и в 1,1 – 1,5 раз у литого асфальтополимербетона, в котором битум модифицирован 2,0 % мас. бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 + 30 % технической серы, минеральный порошок, поверхностно активирован 0,5 % мас. СКМС-30».

## Список литературы:

1. Доля, А. Г. Эффективное использование вторичных ресурсов Донбасса в дорожном строительстве [Текст] / А. Г. Доля, Р. А. Доля // Харьков: Изд-во АГНТ, 2015. – 171 с.
2. Дорожный асфальтобетон / Гезенцев Л. Б., Горельшев Н. В., Богуславский А. М., Королев И. В. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
3. Золотарев, В. А. Дорожные асфальтобетоны. Избранные труды, том 3 [Текст] / В. А. Золотарев. – С.Пб: Славутич, 2015. – 184 с.
4. Иваньски, М. Основы улучшения и регулирования эксплуатационных свойств асфальтобетона: дис. доктора тех. наук: 05.23.05, 05.23.11 / М. Иваньски. – М., 2004. – 541 с.

5. Илиополов, С. К. Усталостное разрушение асфальтобетона в широком частотном диапазоне / С. К. Илиополов, Е. В. Углова, О. В. Дровалева // Дороги и мосты. – М.: РосдорНИИ, 2007. – № 17 (1). – С. 245–251.
6. Братчун, В. И. Теоретико-экспериментальные принципы получения модифицированных дорожных асфальтобетонов повышенной долговечности / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, Е. А. Ромасюк // Донецк: Изд-во ООО НПП «Фолиант», 2020. – 244 с.
7. Ромасюк, Е. А. Усталостная долговечность модифицированных асфальтобетонов при динамическом нагружении / Е. А. Ромасюк, В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, А. А. Стукалов // Современное промышленное и гражданское строительство. – Макеевка, 2015. – Т.11, №1. – С.15-25.
8. Братчун, В. И. Асфальтополимербетонные смеси, модифицированные этиленглицидилакрилатом [Текст] / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, А. А. Стукалов, Е. А. Ромасюк // Международный научно-технический журнал «Наука и Техника в дорожной отрасли». РФ: Москва, ЗАО «Издательство «Дороги», 2015 (71) № 1. – С. 33-36
9. Химические процессы и формирование сетчатой структуры в битуме, модифицированном «Элвалоем АМ» – шлам нейтрализации травильных растворов (ШН), активированный полимерсодержащим отходом производства эпоксидных смол (ПОЭС) / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, Е. Э. Самойлова, Л. Д. Карат, М. К. Пактер // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры «Современные строительные конструкции и материалы» – 2006. – Т. 23. – С. 4-10.