

АВТОМОБИЛЬНІ ДОРОГИ



УДК 625.85

- © В.А. Золотарев, докт. техн. наук, проф.
- © Р.А. Хамад (ХНАДУ)

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ БИТУМА ПОЛИМЕРОМ ТИПА СБС НА УСТОЙЧИВОСТЬ АСФАЛЬТОПОЛИМЕРБЕТОНОВ В ЖИДКИХ АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Аннотация. Рассмотрены закономерности изменения времени жизни асфальтобетонов и асфальтополимербетонов при чистом изгибе в условиях одновременного действия нагрузок и жидких агрессивных сред. Установлено, что сравнимые результаты могут быть получены при одинаковых уровнях напряженного состояния различных асфальтобетонов. Показано влияние консистенции вяжущих и способа модификации битума полимером на устойчивость асфальтобетонов в жидких агрессивных средах.

Ключевые слова: автомобильная дорога, битум, битум модифицированный полимером, чистый изгиб, уровень напряженно-деформированного состояния, агрессивные среды, средостойкость.

Анотація. Розглянуто закономірності зміни часу життя асфальтобетонів й асфальтополімербетонів при чистому згині в умовах одночасної дії навантажень і рідких агресивних середовищ. Встановлено, що сумірні результати можуть бути отримані при однакових рівнях напруженого стану різних асфальтобетонів. Показано вплив консистенції в'язучих і способу модифікації бітуму полімером на стійкість асфальтобетонів в рідких агресивних середовищах.

Ключові слова: автомобільна дорога, бітум, бітум модифікований полімером, чистий згин, рівень напружено-деформованого стану, агресивні середовища, стійкість до дії середовища.

Annotation. The paper considers lifetime variation mechanisms of asphalt concretes and polymer-modified asphalt concretes subjected to pure bending under loading in aggressive liquid environments. It has been determined that comparable results for different asphalt concretes can be obtained under equal stress states. The effect of the binding agent's consistency and the method of bitumen modification by a polymer on bitumen stability in aggressive liquid environments has been determined.

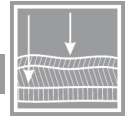
Keywords: road, bitumen, bitumen modified by polymerization, pure binding, the level of binding deformation state, aggressive environments, environment durability.

Вступление

Изучение устойчивости асфальтополимербетонов против действия жидких агрессивных сред имеет большое значение для прогнозирования долговечности асфальтобетонных покрытий. Естественно считать, что в этом случае могут быть использованы методы и критерии, разработанные для традиционных асфальтобетонов.

Первый, действующий поныне, метод определения средоустойчивости асфальтобетона заключается в установлении соотношения между прочностью на сжатие асфальтобетона, выдержанного в течение 7-и

или 15-и дней в воде к прочности асфальтобетона, столько же времени хранившегося на воздухе [1, 2]. Этому классическому методу (он распространен в Европе, как метод Дюрьеца) присущи существенные недостатки. Прежде всего, это касается схемы напряженно-деформированного состояния. Сравнение показателей длительной средоустойчивости, предпринятое в [3], показало, что эффективной может быть схема, при которой в образце возникают растягивающие напряжения (на этом основан эффект адсорбционного понижения прочности П. А. Ребиндера). При этом возможны две простые



схемы напряженного состояния, вызывающие такие напряжения – не прямое растяжение по образующей цилиндрического образца и изгиб балки.

Кроме того, условия испытания (предварительное выдерживание в исследуемой среде, затем нагружение при испытании) не соответствует эксплуатационным условиям работы асфальтобетона в дорожном покрытии, где жидкие агрессивные среды и механические нагрузки, зачастую, действуют одновременно. Попытки разрушать асфальтобетон непосредственно в жидких средах показали, что ее разрушающее влияние зависит от скорости деформирования, увеличиваясь с ее понижением. При стандартной (3 мм/мин), и даже гораздо меньшей (в 10 раз) скорости деформирования, коэффициенты средоустойчивости изменяются незначительно, в пределах 0,92 – 0,99, оставаясь слишком высокими. Чтобы получить объективное представление о средоустойчивости асфальтобетона этим методом необходимо проводить испытания при недоступно малой, для применяемых в лабораториях прессов, скорости деформирования.

Выходом из этой ситуации является использование методики испытания, обоснованной в теории долговременной прочности твердых тел [4]. Она заключается в определении времени жизни (ВЖ) образцов под серией постоянных нагрузок и построение кривых долговременной прочности. Использование этого метода позволило раскрыть многие особенности взаимосвязи между напряжением и временем жизни асфальтобетона [5], в том числе и в отношении одновременного действия нагрузок и различных жидких агрессивных сред [6].

В процессе углубленных исследований в этом направлении стало очевидным, что испытания различных видов асфальтобетонов под действием серии одинаковых постоянных нагрузок (напряжений – σ_d) приводит к получению несопоставимых результатов [7]. Действительно, напряжение, равное 1 МПа, для асфальтобетона на битуме БНД 40/60 составляет 0,28 от разрушающего ($R_{изг}$) при 20 °С, а для асфальтобетона на битуме БНД 130/200 – 0,65. Естественно, время жизни до разрушения в первом случае в 155 раз больше, чем во втором. Отсюда следует, что метод определения коэффициента устойчивости в агрессивных средах должен предусматривать одинаковые для разных асфальтобетонов уровни напряженного состояния, определяемые как отношение создаваемого в асфальтобетоне под нагрузкой напряжения к его прочности. Приемлемой для этого, по чувствительности к дефектам структуры асфальтобетона, является схема чистого изгиба двумя равноудаленными от краев и друг от друга сосредоточенными нагрузками.

Эти обстоятельства отвечают условиям конструирования нежестких дорожных одежд с учетом категории дороги и схемы напряженного состояния асфальтобетонного покрытия в дорожной одежде. Получаемые при такой схеме значения коэффициентов средоустойчивости существенно ниже, тех которые, получают по схеме непрямого растяжения по образующей. Так, для асфальтобетона типа “Г” с оптимальным содержанием битума БНД 60/90 при уровнях напряженного состояния 0,20; 0,24; 0,32 при непрямом растяжении коэффициенты средоустойчивости равны 0,75; 0,79 и 0,94 соответственно, а при

Таблица 1

Свойства вяжущих, принятых в исследовании

Состав вяжущего	Индекс*	$P_{25},$ 0,1 мм	$T_p,$ °С	$D_{25},$ °С	$\Theta_{25},$ %	$T_{xp},$ °С
БНД 40/60	Б (43)	43	56,0	30,3	–	-18,0
БНД 60/90	Б (64)	64	49,3	> 100	–	-19,0
БНД 60/90 + 3 % СБС	$B_{64}^{3п}$ (52)	52	58,5	53,7	83	-19,5
БНД 60/90 + 10 % МР	B_{64}^{10MP} (102)	102	52,5	47,0	88	-24,5
БНД 90/130	Б (103)	103	43,7	> 100	–	-21,5
БНД 90/130 + 3 % СБС	$B_{103}^{3п}$ (74)	74	55,0	84,4	88	-19,5
БНД 90/130 + 6 % СБС	$B_{103}^{6п}$ (53)	53	76,4	63,8	98	-33,0
БНД 130/200	Б (160)	160	40,6	> 100	–	-23,0
БНД 130/200 + 3 % СБС	$B_{160}^{3п}$ (107)	107	59,0	40,6	91	-23,0
БНД 130/200 + 6 % СБС	$B_{160}^{6п}$ (66)	66	77,0	66,2	98	-30,0

Примечание. Индекс вяжущего содержит информацию о пенетрации исходного битума и полученного из него модифицированного битума, количество и способ введения полимера: непосредственно в битум (П) или из маточного раствора (МР)

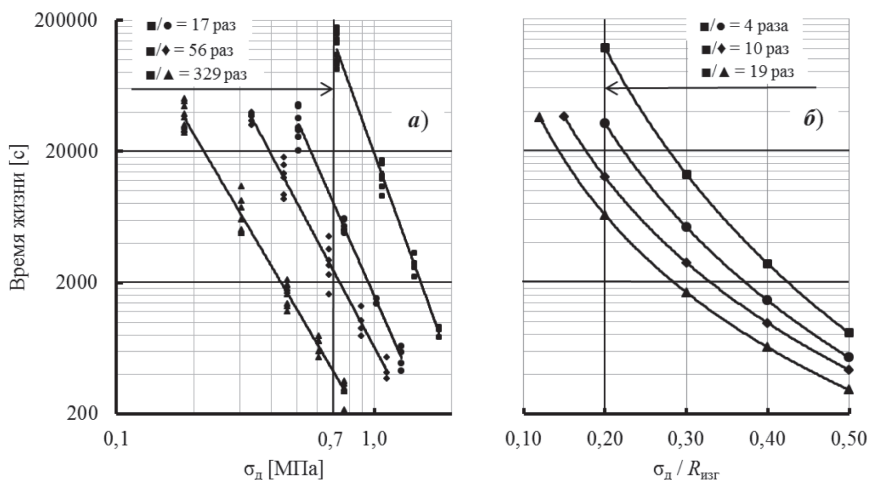
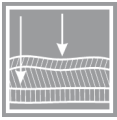


Рис. 1. Зависимости времени жизни асфальтобетона типа “Г” на битумах различной пенетрации от напряжения, создаваемого постоянной нагрузкой (а) и уровня напряженного состояния (б): ■ – Б (43); ● – Б (64); ◆ – Б (103); ▲ – Б (160)

изгибе – 0,64; 0,68 и 0,81. С учетом этого для оценки средоустойчивости асфальтополимербетонов был принят метод испытания по схеме чистого изгиба при заданных уровнях напряженного состояния и одновременном действии нагрузок и агрессивных сред.

Основная часть

В качестве жидких агрессивных сред приняты: вода питьевая; 5-ти % раствор NaCl; 2-х % раствор H_2SO_4 и зимнее дизельное топливо (ДТ). Объектами исследования служили асфальтобетон и асфальтополимербетон с гранулометрическим составом типа “Г”, содержащим 5,5 % вяжущего. Свойства этих бетонов оценивали по показателям: средней плотности; водонасыщения; прочности на сжатие ($R_{сж}$) и изгиб ($R_{изг}$); времени жизни под нагрузкой, отвечающий равному уровню напряженного состояния ($\sigma_d / R_{изг}$). Испытания всех объектов были выполнены при температуре 22 °С.

В качестве вяжущих приняты: битумы марок БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, БНД 130/200; битумы, модифицированные прямым введением в них 3 % полимера KRATON D-1101, и битум, модифицированный полимером, введенным из 30 %-го маточного раствора полимера KRATON D-1101 в индустриальном масле И-40А (табл. 1).

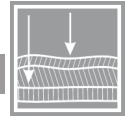
Как показали результаты исследований, приведенные дальше, использование асфальтополимербетона, содержащего столько же БМП (битум модифицированный полимером) с 6 % полимера сколько и в асфальтополимербетона на БМП с 3 % полимера, не позволило в полной мере раскрыть положительную роль этого модификатора. Содержание полимера типа СБС больше 3,5 – 5,0 % приводит к образованию БМП, в котором полимер является средой. В этом случае вязкость полимера растет

и для получения оптимального состава асфальтополимера, содержание БМП в нем должно быть, по крайней мере, на 0,8 – 1,2 % больше, чем в асфальтобетоне на чистом исходном битуме [8].

Специально проведенный эксперимент для оценки соотношений времен жизни под нагрузкой при равных напряжениях и сопоставимых уровнях напряженного состояния показал (рис. 1), что при напряжении 0,7 МПа долговечность асфальтобетона типа “Г” на основе битума с пенетрацией $43 \times 0,1$ мм в 329 раз больше, чем асфальтобетона на битуме с пенетрацией $160 \times 0,1$ мм (рис. 1, а), а при $\sigma_d / R_{изг} = 0,20$ – только в 19 раз (рис. 1, б). Это гораздо ближе к реальному превышению долговечности асфальтобетонного покрытия при переходе от высоковязкого битума к маловязкому. Тем не менее, оно гораздо выше, чем соотношение показателей прочностей на изгиб этих асфальтобетонов, которое равно 2,3. Это же подтверждается и для асфальтополимербетона на БМП с 3 % полимера. При напряжении 0,5 МПа увеличение времени жизни в случае БМП на основе битумов Б (64) и Б (160) составило 9,5 и 15,4 раза соответственно, а при уровне напряженного состояния 0,20 – 2,1 и 3,2 раза соответственно.

В [7], на основе приведения времен жизни к одному уровню напряженного состояния, было сделано предположение о том, что зависимости “время – уровень напряженного состояния” должны трансформироваться в одну обобщенную кривую. Однако характер расположения экспериментальных зависимостей, полученных при выполнении настоящей работы (рис. 1), показывают, что они сближаются по мере повышения уровня напряженного состояния ($\sigma_d / R_{изг}$) и расходятся по мере его понижения. В зоне малого значения $\sigma_d / R_{изг}$ асфальтобетон приближается к области линейно-деформированного состояния. Эта область, характеризующаяся критическим напряжением линейности ($\sigma_{кр}^l$), как показано в [9], существенно различна как для самих битумов разных марок, так и для асфальтобетонов на их основе. При переходе от асфальтобетона на битуме БНД 40/60 к асфальтобетону на битуме БНД 130/200 она уменьшается в 4,5 раза, а при переходе от битума типа “гель” к битуму типа “золь” в 6,0 раза.

Превышение действующим напряжением величины критического напряжения линейного деформирования соответствует переходному участку кривой ползучести от условно-мгновенного



Сравнение показателей времени жизни при заданных напряжениях (0,5 МПа) и уровне (0,20) напряженного состояния

Индекс вяжущего	Время жизни, с	
	$\sigma_d = 0,5 \text{ МПа}$	$\sigma_d/R_{изг} = 0,20$
Б (160)	$1,26 \times 10^3 / 1$	$6,50 \times 10^3 / 1$
Б (103)	$8,25 \times 10^3 / 6,5$	$12,56 \times 10^3 / 1,9$
Б (64)	$32,15 \times 10^3 / 25,5$	$32,17 \times 10^3 / 4,9$
Б (64)	$35,15 \times 10^3 / 1$	$32,17 \times 10^3 / 1$
Б ₆₄ ^{3п} (52)	$333,42 \times 10^3 / 9,5$	$69,34 \times 10^3 / 2,1$
Б (103)	$8,25 \times 10^3 / 1$	$12,56 \times 10^3 / 1$
Б ₁₀₃ ^{3п} (74)	$58,28 \times 10^3 / 7,1$	$26,49 \times 10^3 / 2,1$
Б (160)	$1,26 \times 10^3 / 1$	$6,5 \times 10^3 / 1$
Б ₁₆₀ ^{3п} (107)	$19,46 \times 10^3 / 15,4$	$21,07 \times 10^3 / 3,2$
Б ₁₀₃ ^{3п} (74)	$58,28 \times 10^3 / 1$	$26,49 \times 10^3 / 1$
Б ₆₄ ^{3п} (52)	$333,42 \times 10^3 / 5,7$	$69,34 \times 10^3 / 2,6$
Б ₁₆₀ ^{3п} (107)	$19,46 \times 10^3 / 1$	$21,07 \times 10^3 / 1$
Б ₁₀₃ ^{3п} (74)	$58,28 \times 10^3 / 3,0$	$26,49 \times 10^3 / 1,3$
Б (103)	$8,25 \times 10^3 / 1$	$12,56 \times 10^3 / 1$
Б ₁₆₀ ^{3п} (107)	$19,46 \times 10^3 / 2,4$	$21,07 \times 10^3 / 1,7$
Б ₆₄ ^{10MP} (102)	$18,52 \times 10^3 / 2,2$	$23,94 \times 10^3 / 1,9$

Примечание. В знаменателе приведено отношение значений показателя времени жизни

Таблица 2 6,5 и 25,5. Эти соотношения для них при $\sigma_d/R_{изг} = 0,20$ равны: 1,0; 1,9; 4,9.

Обращает на себя внимание огромная разница соотношений между пенетрацией битума и временем жизни соответствующих асфальтобетонов. Увеличение пенетрации в 3,7 раза (от $43 \times 0,1$ мм до $160 \times 0,1$ мм), сопровождается уменьшением времени жизни соответствующих асфальтобетонов на воздухе в 18,6 раз, в воде в 19,4 раз, а ДТ в 10,4 раза. При этом различие в прочности на сжатие составляет 1,84 раза, а прочности на изгиб в 2,33 раза. Эти соотношения являются весомыми аргументами в пользу узкой по пенетрации маркировки битумов (20/30, 30/45, 35/50, 40/60, 50/70, 70/100, 100/50, 160/200), принятой в стандарте EN 12591 “Bitumen and bituminous binder – Specification for paving grade bitumen’s”.

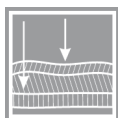
Модификация битума Б (160) 3 % полимера увеличивает ВЖ асфальтополимербетона при $\sigma_d = 0,5$ МПа в 15,4 раза, а при $\sigma_d/R_{изг} = 0,20$ лишь в 3,2 раза. Эти соотношения для бетонов на битуме Б (103) и модифицированном Б₁₀₃^{3п}(74) соответственно равны 7,1 и 2,1. Они существенно уменьшаются, если сравниваются асфальто- и асфальтополимербетоны на битумах и БМП близкой пенетрации. Так, асфальтобетоны на битуме Б (103) всего лишь в 2,4 раза менее долговечны, чем асфальтополимербетон на БМП Б₁₆₀^{3п}(107) при $\sigma_d = 0,5$ МПа и в 1,7 раза при $\sigma_d/R_{изг} = 0,20$. Близкие соотношения времен жизни получены и в отношении асфальтобетона на том же битуме и асфальтополимербетона на битуме, модифицированном теми же 3 % полимера, введенного из маточного раствора в индустриальном масле. Эти результаты подтверждают часто встречающееся (но не аргументированное количественно) в публикациях утверждение о том, что модификация существенно повышает усталостную выносливость асфальтобетонов. Принимая во внимание подобие закономерностей циклической и статической усталости (время жизни – уровень напряженного состояния) [10] можно предположить, что приведенные здесь результаты найдут свое подтверждение данными по циклической выносливости.

Хотя приведенные выше времена жизни относятся к асфальто- и асфальтополимербетонам, испытанным на воздухе, они дают основание считать, что и испытание в жидких агрессивных средах будут более объективными, если в качестве схемы напряженного состояния использовать чистый изгиб, а его уровень оценивать по предлагаемому соотношению задаваемых и предельных напряжений (пределах прочности).

Хотя приведенные выше времена жизни относятся к асфальто- и асфальтополимербетонам, испытанным на воздухе, они дают основание считать, что и испытание в жидких агрессивных средах будут более объективными, если в качестве схемы напряженного состояния использовать чистый изгиб, а его уровень оценивать по предлагаемому соотношению задаваемых и предельных напряжений (пределах прочности).

деформирования к линейному течению с постоянной вязкостью и последующему лавинному разрушению асфальтобетона. Исходя из этого и учитывая данные рис. 1, можно считать, что даже выравнивание уровня напряженного состояния через соотношение действующих напряжений и прочности не позволяет в полной мере осуществить условия сопоставимости долговечности для различных по составу и структуре асфальтобетонов. Вероятно, этого можно достичь за счет установления уровня напряженного состояния по отношению действующего напряжения к величине $\sigma_{кр}^I$. Кроме того, учет индивидуального $\sigma_{кр}^I$ для каждого вида и типа асфальтобетона при конструировании дорожных одежд должен способствовать более объективному прогнозированию несущей способности дорожных одежд.

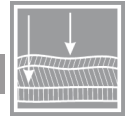
Приведенные в табл. 2 данные иллюстрируют уменьшение времени жизни при переходе от абсолютных напряжений к $\sigma_d/R_{изг}$ для всех исследованных здесь объектов. Для группы асфальтобетонов на битумах Б (160), Б (103) и Б (64) соотношение ВЖ при $\sigma_d = 0,5$ МПа равны соответственно: 1,0;



Показатели времени жизни и средоустойчивости асфальто- и асфальтополимербетонов типа "Г" в жидких агрессивных средах

Индекс вяжущего	$R_{сж}/R_{изг}$, МПа	$W_{ц}/W_6$, %	Среда	$\sigma_d/R_{изг} = 0,20$			$K_{изг}^{15}$	$K_{сж}^{15}$
				ВЖ на воздухе, с	ВЖ в среде, с	$K_{ср}^{0,2}$		
Б (43)	4,83 / 3,57	5,3 / 3,5	Вода	120,72×10 ³	106,93×10 ³	0,89	0,65	0,80
			2 % р-р H ₂ SO ₄		101,86×10 ³	0,84	0,71	0,84
			ДТ		23,47×10 ³	0,19	—	0,32
Б (64)	3,91 / 2,55	5,5 / 3,9	Вода	32,17×10 ³	27,55×10 ³	0,86	0,73	0,82
			2 % р-р H ₂ SO ₄		26,92×10 ³	0,84	0,76	0,84
			ДТ		7,78×10 ³	0,24	—	0,38
Б ₆₄ ^{3п} (52)	4,80 / 3,48	5,0 / 3,0	Вода	69,34×10 ³	59,24×10 ³	0,85	0,87	0,92
			2 % р-р H ₂ SO ₄		58,34×10 ³	0,84	0,96	0,96
			ДТ		23,04×10 ³	0,33	—	0,36
Б ₆₄ ^{10MP} (102)	3,34 / 2,34	4,9 / 3,3	Вода	23,94×10 ³	20,26×10 ³	0,85	0,73	0,76
			2 % р-р H ₂ SO ₄		—	—	0,81	0,82
			ДТ		5,94×10 ³	0,25	—	0,20
Б (103)	3,41 / 2,23	5,7 / 4,5	Вода	12,56×10 ³	10,73×10 ³	0,86	0,73	0,81
			2 % р-р H ₂ SO ₄		10,56×10 ³	0,84	0,76	0,83
			ДТ		4,39×10 ³	0,35	—	0,32
Б ₁₀₃ ^{3п} (74)	4,22 / 3,01	4,1 / 2,9	Вода	26,49×10 ³	23,87×10 ³	0,90	0,88	0,92
			2 % р-р H ₂ SO ₄		23,45×10 ³	0,89	0,92	0,93
			ДТ		10,18×10 ³	0,38	—	0,25
Б ₁₀₃ ^{6п} (53)	4,51 / 3,09	4,6 / 3,2	Вода	22,45×10 ³	20,92×10 ³	0,93	0,86	0,88
			2 % р-р H ₂ SO ₄		—	—	0,92	0,92
			ДТ		10,83×10 ³	0,48	—	0,25
Б (160)	2,63 / 1,53	5,4 / 3,5	Вода	6,50×10 ³	5,50×10 ³	0,85	0,69	0,72
			2 % р-р H ₂ SO ₄		5,32×10 ³	0,82	0,64	0,71
			ДТ		2,25×10 ³	0,35	—	0,27
Б ₁₆₀ ^{3п} (107)	3,56 / 2,45	4,9 / 3,3	Вода	21,07×10 ³	18,51×10 ³	0,88	0,86	0,88
			2 % р-р H ₂ SO ₄		18,18×10 ³	0,86	0,90	0,91
			ДТ		7,52×10 ³	0,36	—	0,19
Б ₁₆₀ ^{3п+0,7ПАВ} (102)	3,34 / 2,34	4,9 / 3,3	Вода	24,99×10 ³	23,51×10 ³	0,94	0,96	0,95
			2 % р-р H ₂ SO ₄		—	—	0,99	0,97
Б ₁₆₀ ^{6п} (66)	4,13 / 2,60	5,0 / 2,9	Вода	19,36×10 ³	17,93×10 ³	0,93	0,88	0,86
			2 % р-р H ₂ SO ₄		—	—	0,90	0,89
			ДТ		8,64×10 ³	0,45	—	0,22

Примечание. $W_{ц}$ и W_6 – соответственно водонасыщение цилиндрических образцов, испытанных на сжатие, и образцов-балок, испытанных при изгибе



С учетом предыдущих результатов в отношении действия на средоустойчивость NaCl (практически адекватного действию воды) [3] последующие сравнения касаются воды, серной кислоты и дизельного топлива. В качестве критериев средоустойчивости приняты коэффициенты, отвечающие $\sigma_d/R_{изг} = 0,20$ ($K_{ср}^{0,2}$) и установленные после 15-и суток выдерживания в среде и разрушения при сжатии ($K_{сж}^{15}$) и изгибе ($K_{изг}^{15}$). Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Они свидетельствуют о том, что для всех объектов значения коэффициента средоустойчивости на 15 сутки при сжатии больше, чем при изгибе, что объясняется направленным развитием трещин по наиболее слабым плоскостям и смачиванием их средой. Значения коэффициентов средоустойчивости асфальтобетонов при изгибе (при $\sigma_d/R_{изг} = 0,20$) в случае испытаний в воде и в растворе серной кислоты, всегда выше или, по крайней мере, равны значениям коэффициентов ($K_{изг}^{15}$), определенным после 15 суток выдерживания в среде. Это свидетельствует о том, что принятый уровень напряженного состояния излишне высок для асфальтобетонов и вклад агрессивной среды в разрушение ниже, чем вклад механической нагрузки при ползучести.

Представленные здесь времена жизни асфальто- и асфальтополимербетонов, как правило, не выходят за пределы 10 – 15 часов. Это гораздо меньше, чем 15-и суточное предварительное выдерживание объектов в среде при стандартном испытании на водоустойчивость. Характер зависимостей и экстраполяция времен жизни до значений, при которых коэффициенты, определяемые при одновременном действии нагрузки и среды, станут сопоставимыми с $K_{изг}^{15}$, позволяют предположить, что этого можно достичь в случае длительности испытаний в пределах 1 – 3 суток. Это может быть положено в основу экспресс-метода оценки средоустойчивости асфальтобетонов при изгибе в воде и других неорганических средах.

В случае асфальтополимербетонов на БМП с пенетрацией $52 \times 0,1$ мм при испытаниях в воде коэффициенты средоустойчивости при совместном воздействии воды и нагрузки меньше, чем $K_{изг}^{15}$. Существенная разница между $K_{ср}^{0,2}$ и $K_{изг}^{15}$ наблюдается для результатов, полученных после испытаний образцов в растворе кислоты. Это же относится к асфальтополимербетону на БМП, составленном из битума с пенетрацией $103 \times 0,1$ мм и 3 % полимера, а также битума с пенетрацией $160 \times 0,1$ мм и 3 % полимера. С понижением консистенции исходных битумов наблюдается прирост коэффициентов $K_{ср}^{0,2}$ и $K_{изг}^{15}$ после введения в них полимера.

Асфальтополимербетон на основе БМП, полученного из маточного раствора, уступает по водоустойчивости асфальтобетону на чистом битуме Б (103)

и битуме, модифицированном полимером $B_{160}^{3п}$ (107) близкой пенетрации, несмотря на то, что исходным вяжущим для него был битум Б (64) с низкой пенетрацией. Это может свидетельствовать о неоднородности таких компаундированных БМП, меньшем сцеплении их с минеральной поверхностью.

Возникает неопределенность в принятии решения о долговечности того или иного вида асфальтобетона, поскольку асфальтобетон с меньшим на 0,02 – 0,05 значением коэффициента средоустойчивости может дольше сопротивляться разрушению в среде, чем асфальтобетон с большим коэффициентом средоустойчивости, поскольку первый обладает гораздо большей долговечностью в воздушной среде. Например, асфальтобетон на битуме Б (103) имеет ВЖ на воздухе, равное $12,56 \times 10^3$ с и $K_{ср}^{0,2}$, равное 0,86. Асфальтополимербетон на составленном B_{64}^{10MP} (102) характеризуется временем жизни на воздухе $23,94 \times 10^3$ с и $K_{ср}^{0,2}$, равным 0,85. Традиционно можно заключить, что асфальтополимербетон, по крайней мере не более водоустойчив, чем асфальтобетон. В рассматриваемом случае время жизни асфальтобетона в воде будет равно $10,8 \times 10^3$ с, а асфальтополимербетона $20,35 \times 10^3$ с. Однако показатели времени их жизни станут одинаковыми тогда, когда $K_{ср}^{0,2}$ асфальтополимербетона будет близким к 0,5.

Асфальтобетон на БМП $B_{160}^{3п+0,7ПАВ}$ (102), в составе которого содержится 0,7 % поверхностно-активного вещества (WETFIX VE), по показателям длительной водоустойчивости ($K_{сж}^{15}$ и $K_{изг}^{15}$) превосходит асфальтобетоны на близких по пенетрации битумах, модифицированных полимером, полученных по технологии прямого введения полимера в битум – $B_{160}^{3п}$ (107) и по технологии компаундирования битума с маточным раствором полимера – B_{64}^{10MP} (102).

Модификация битума Б (103) полимером в количестве 6 % существенно повышает водоустойчивость асфальтополимербетона не только по сравнению с асфальтобетоном на исходном битуме, но и асфальтобетонами на битумах близкой пенетрации с полимером и без него. То же относится и к асфальтополимербетону на БМП $B_{160}^{6п}$ (66), модифицированному 6 % полимера. Это хорошо согласуется с установленной ранее [11] зависимостью нарастания сцепления БМП с минеральной поверхностью по мере увеличения содержания в нем полимера. Водоустойчивость асфальто- и асфальтополимербетонов преимущественно связана со сцеплением вяжущего с поверхностью минеральных материалов. Устойчивость в 2 % растворе H_2SO_4 , кроме того, может зависеть от возможного увеличения сцепления за счет химического упрочнения битума при длительном выдерживании в кислой среде [12]. Об этом свидетельствуют разные тенденции изменения показателей $K_{ср}^{0,2}$ с одной

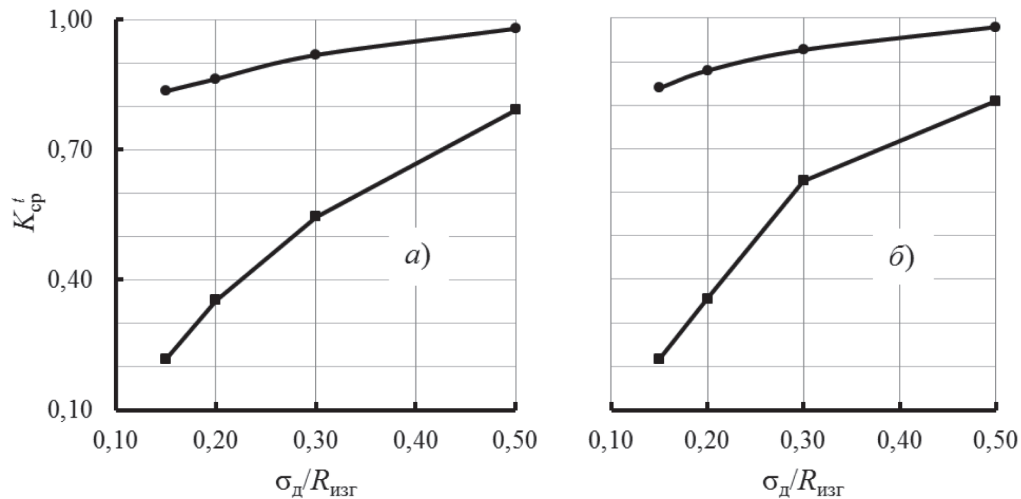
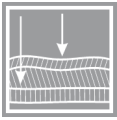


Рис. 2. Устойчивость асфальтобетонов типа “Г” на битуме Б (103) (а) и БМП Б₁₆₀^{3п} (107) (б) в зависимости от уровня напряженного состояния при температуре 22 °С в воде (●) и дизельном топливе (■)

стороны и $K_{изг}^{15}$, $K_{сж}^{15}$ с другой. В первом случае водоустойчивость выше, чем в кислотном растворе, а во втором наоборот.

В случае органической среды (дизельное топливо) механизм снижения времени жизни и коэффициентов средоустойчивости обусловлен растворяющим ее действием. В связи с этим для участков покрытий, подверженных действию горюче-смазочных материалов (ГСМ) применяют специальные вяжущие, часто каменноугольного происхождения.

В странах Европейского Союза для оценки действия ГСМ принят метод [13], сущность которого заключается в определении потери массы образца после выдерживания (в течение 24-и и 72-х часов соответственно для асфальтобетонов на чистых битумах и битумах, модифицированных полимерами) в органическом топливе и последующего истирания под определенным давлением пропитанной топливом части образца специальными щетками. Влияние ГСМ на устойчивость асфальтобетонов и асфальтополимербетонов в настоящей работе изучено на примере зимнего дизельного топлива с использованием критериев, описанных выше.

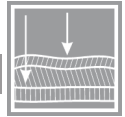
Из-за быстрого растворения вяжущего в межзерновом пространстве определение длительной средоустойчивости по схеме изгиба ($K_{изг}^{15}$) трудно выполнимо, а при сжатии ($K_{сж}^{15}$) ненадежно, поскольку прочность образцов падает на 65 – 75 %, они теряют свою форму и становятся непригодными для испытаний. Таким образом, и для этой среды более приемлемым становится показатель средоустойчивости (K_{cp}^t), определяемый при одновременном воздействии среды и напряжения.

Представленные на рис. 2 зависимости показывают, что с ростом уровня напряженного состояния при испытании в дизельном топливе K_{cp}^t увеличи-

вается намного быстрее, чем при испытаниях в других средах, когда разрушение, из-за отслаивания пленки вяжущего, обусловленного процессами смазывания, развивается по межфазным поверхностям (минеральный материал – вяжущее) в течение длительного времени, тогда как в случае ДТ идут процессы пластификации и растворения углеводородной среды битумных вяжущих, значительно опережающие межфазное отслоение. В результате этого при малом $\sigma_d/R_{изг}$, равном 0,2, среднее уменьшение времени жизни при испытаниях в воде, растворе H_2SO_4 и в дизельном топливе соответственно составляет 6,7; 14 и 65 %, тогда как при $\sigma_d/R_{изг}$, равном 0,5, снижение времени жизни в воде равно 1,7 %, в растворе H_2SO_4 – 3 %, в дизельном топливе – 19 %. Таким образом, прирост K_{cp}^t с повышением $\sigma_d/R_{изг}$ составляет для воды около 5 %, раствора H_2SO_4 – 11 %, а для дизельного топлива 46 %.

Из результатов испытаний следует, что с повышением пенетрации битума от 43 до 64, 103 и $160 \times 0,1$ мм показатель $K_{cp}^{0,2}$ соответственно изменяется от 0,19 до 0,24; 0,35 и 0,35. Полученные данные, на первый взгляд, являются парадоксальными: чем выше вязкость битума, тем хуже устойчивость асфальтобетона в углеводородной среде. Тем не менее, такое снижение прочности, вероятно, можно объяснить зависимостью степени растворения разных по молекулярной массе органических жидкостей низкомолекулярным растворителем [14]. Аналогия с асфальтобетоном состоит в том, что средняя молекулярная масса битума уменьшается с повышением его пенетрации и степень снижения его прочности может уменьшаться.

Введение в битум более устойчивого против растворения в дизельном топливе 3 % полимера приводит к повышению K_{cp}^t асфальтобетона: в случае битума Б (64) он растет от 0,24 до 0,33, а при



модификации Б (103) – от 0,35 до 0,38. При введении в битум 6 % полимера K_{cp}^t растет: для битума Б (103) от 0,35 до 0,48; для битума Б (160) от 0,35 до 0,45.

Таким образом, полимер, введенный непосредственно в битум, повышает устойчивость асфальтобетона в агрессивной органической среде. Однако, уровень защитного действия среды снижается по мере понижения вязкости битума: для битума Б (64) с 3 % полимера приращение составляет 0,11, а в случае битума Б (160) оно практически отсутствует (0,03). При введении 6 % полимера в битум Б (103) разница $K_{cp}^{0,2}$ по сравнению с чистым битумом составляет 0,13, а в случае БМП на битуме Б (160) – 0,10.

Такое изменение значений $K_{cp}^{0,2}$ асфальтополимербетон по мере повышения пенетрации БМП от 52 до 74, а затем до $107 \times 0,1$ мм противоположно тому, что установлено для асфальтобетон на чистых битумах по мере повышения их пенетрации. В связи с этим можно предположить, что набухающий в мальтеновой (наиболее подверженной растворению ГСМ) битумной среде полимер уменьшает ее содержание и усиливает ее сопротивление растворению в углеводородной среде [11].

В то же время сравнение асфальтобетон и асфальтополимербетон на битуме и БМП близкой пенетрации показывает, что для пар Б (64) и $B_{64}^{3п}$ (52); Б (64) и $B_{103}^{3п}$ (74); Б (103) и $B_{160}^{3п}$ (107); Б (64) и $B_{103}^{6п}$ (53); Б (64) и $B_{160}^{6п}$ (66) коэффициенты $K_{cp}^{0,2}$ соответственно равны 0,24 и 0,33; 0,24 и 0,38; 0,35 и 0,36; 0,24 и 0,48; 0,24 и 0,45. Следовательно, устойчивость асфальтобетон на основе БМП на вяжущем с прямым введением полимера в органической среде значительно повышается, хотя степень этого превосходства снижается со снижением консистенции исходного битума.

Длительное время актуальным остается вопрос эффективности влияния полимера в зависимости от способа его введения в битум – непосредственно или из маточного раствора. В дискуссиях по этому вопросу активно участвуют СоюздорНИИ, БашНИИ и ООО “Испытательный центр Дорсервис” (Россия) [15 – 17]. Очевидно, что исторически первая (начало 70-ых годов прошлого столетия) разработанная в СоюздорНИИ технология введения полимера ДСТ в битум из маточного раствора была технологически оправдана (не было порошкового и гранулированного полимера, не было специальных мешалок). Она обладала преимуществами в отношении: температуры совмещения битума с полимером; обеспечения низких температур хрупкости за счет снижения консистенции битума при использовании разжижителя (сначала бензина, потом гудрона, а затем индустриального масла) [16] и более высоких температур размягчения при относительно высокой пенетрации полученного БМП. Именно ориентация на высокую температуру размягчения привела разработчиков такой технологии получения БМП в заблуждение

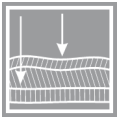
относительно сдвигоустойчивости асфальтобетона, поскольку температура размягчения не всегда является объективным критерием теплоустойчивости БМП и сдвигоустойчивости асфальтобетон. Асфальтобетон на БМП с температурой размягчения 90°C и пенетрацией $218 \times 0,1$ мм имеет сопротивление сдвигу гораздо меньше, чем асфальтобетон на битуме с температурой размягчения 43°C и пенетрацией $145 \times 0,1$ мм [18].

Последующее инновационное развитие технологий привело к повсеместному приоритету БМП, полученных прямым введением полимера в битум. При этом качество БМП регулируется сознательным выбором пары “битум – полимер”. Полученные в отношении устойчивости асфальтополимербетон на БМП B_{64}^{10MP} (102), составленном из битума и маточного раствора полимера, данные обнаруживают один его недостаток. Асфальтобетон на таком БМП по показателю $K_{cp}^{0,2}$, равном 0,25, существенно уступает асфальтобетон на битуме Б (103) с $K_{cp}^{0,2} = 0,35$ и на БМП $B_{160}^{3п}$ (107) с $K_{cp}^{0,2} = 0,36$. Это можно объяснить лучшей растворимостью мальтеновой среды составленного БМП по сравнению со средой, образуемой при непосредственном введении полимера в битум, для которого характерно уменьшение содержания масел, из-за их участия в процессе пластификации и набухания полимера типа СБС, соответственно повышение вязкости и плотности мальтеновой составляющей БМП.

Выводы

- Оценку времени жизни асфальтобетон и асфальтополимербетон на воздухе и в жидких агрессивных средах целесообразно производить при сопоставимых уровнях напряженного состояния, определяемых как отношение напряжения, вызываемого в них нагрузкой, к прочности при чистом изгибе. При этом соотношения времен жизни сравниваемых объектов (на битумах и БМП с разной пенетрацией) существенно ниже, получаемых при одном фиксированном напряжении. По мере роста уровня напряженного состояния это различие уменьшается. Для получения объективных данных о степени агрессивности среды уровень напряженного состояния должен быть не выше 0,1–0,2. В будущем, по мере развития техники установления напряжений, отвечающих границе линейного вязкоупругого поведения, его целесообразно определять по отношению $\sigma_d / \sigma_{кр}^d$.

- Время жизни асфальтобетона существенно зависит от консистенции битума: с переходом от асфальтобетона на битуме с пенетрацией $103 \times 0,1$ мм и $160 \times 0,1$ мм, оно соответственно уменьшается в 2,6 и в 4,9 раза. При этом соотношение значений пенетрации составляет 1,6 и 2,5 раза. Модификация битумов 3 % полимера увеличивает ВЖ асфальтобетон в 2,1 раза и 3,2 раза по сравнению с асфальтобето-



нами на исходных битумах с пенетрацией соответственно $64 \times 0,1$ мм и $160 \times 0,1$ мм. Различие в значениях ВЖ асфальтобетонов и асфальтополимербетонов на битумах и БМП с близкой пенетрацией снижается еще больше: в случае битума с пенетрацией $103 \times 0,1$ мм и БМП прямого введения с пенетрацией $107 \times 0,1$ мм соотношение ВЖ равно 1,7.

- Коэффициенты устойчивости в воде и в растворе серной кислоты при $\sigma_d/R_{изг}$, равном 0,2, в меньшей мере, чем времена жизни, зависят от марки используемого битума. Так, их разница для асфальтобетонов на битумах с пенетрацией $64 \times 0,1$ мм и $160 \times 0,1$ мм находится в пределах 0,04 – 0,05. Прямое введение в битум 3 % полимера повышает значение этих коэффициентов на 0,03 – 0,04. Асфальтополимербетон на битуме с 6 % полимера более водостойчив, чем асфальтобетон на исходном битуме и асфальтобетон на битуме близкой пенетрации ($64 \times 0,01$ мм), хотя его ВЖ на воздухе меньше.

- Асфальтополимербетон на основе составленного БМП характеризуется $K_{ср}^{0,2}$ на 0,02 – 0,03 меньшим, чем асфальтобетон на чистом битуме и БМП прямого введения, близких по глубине проникания иглы. Ведение поверхностно-активной добавки WETFIX VE резко повышает коэффициенты устойчивости в воде и в водном растворе H_2SO_4 по сравнению с асфальтобетоном на битуме равной пенетрации без ПАВ и асфальтополимербетоном на БМП прямого введения полимера, а также БМП из маточного раствора без ПАВ.

- Введение в битумы полимера (3 %) повышает устойчивость асфальтобетона в дизельном топливе от 0,03 до 0,11. При этом степень защитного действия полимера уменьшается по мере повышения пенетрации битума. Увеличение содержания полимера до 6 % повышает коэффициент устойчивости в ДТ до 0,48 против 0,33 для асфальтобетона на исходном битуме с пенетрацией $103 \times 0,1$ мм и до 0,45 против 0,35 для асфальтобетона на битуме с пенетрацией $160 \times 0,1$ мм. В то же время, устойчивость асфальтополимербетона на БМП из маточного раствора становится гораздо меньшей (0,25), чем асфальтобетона на битуме равной пенетрации (0,35) и БМП прямого введения (0,36) той же пенетрации.

- Значения коэффициентов устойчивости асфальтобетона в дизельном топливе увеличиваются при переходе от битума с пенетрацией $43 \times 0,1$ мм к битуму с пенетрацией $160 \times 0,1$ мм от 0,19 до 0,36. Подобное этому изменение $K_{ср}^{0,2}$ (0,33 и 0,38) получено для асфальтополимербетонов на БМП с 3 % полимера и пенетрациями $52 \times 0,1$ мм и $74 \times 0,1$ мм. Эти результаты трудно объяснить с позиций традиционного подхода к растворению битумов в горюче-смазочных жидкостях. Объяснение такого факта, вероятно, следует искать в физико-химии растворов органических систем многокомпонентного состава с учетом параметров растворимости масел, смол и асфальтенов битума в различных органических средах.

ЛІТЕРАТУРА

1. ESSAI : B14. Matériaux enrobés. Essai de stabilité Duriez. – Paris: LCPC, 1961. – 15 p.
2. ГОСТ 12801-77. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний.
3. Золотарев В.А. Устойчивость асфальто-и асфальтополимербетонов в жидких агрессивных средах при сжатии и изгибе / В.А. Золотарев, Р.А. Хамад, Д.В. Калашник // Автошляховик України. – 2013. – С. 32-37.
4. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / Регель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
5. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов – Харьков: Вища школа. Из-во при ХГУ, 1977. – 116 с.
6. Патент № 105561. Способ определения коррозионной стойкости асфальтобетона / В.А. Золотарев, С.В. Эфремов, В.В. Маляр – 2014.
7. Золотарев В.А. Долговечность асфальтобетона при совместном действии нагрузок и агрессивных сред // Дорожная техника. – 2011. – С. 30-39.
8. Золотарев В.А., Чугуенко С.А. Влияние консистенции модифицированного битума и содержания щебня на сдвигоустойчивость асфальтополимербетонов / Битумы модифицированные полимерами и добавками. Избранные труды. Том 2. В.А. Золотарев. – Санкт-Петербург: Славутич, 2013. – С. 81-88.
9. Золотарев В.А. Фундаментальные показатели линейного вязкоупругого деформирования асфальтобетона // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2010. – № 3. – С. 24-27.
10. Золотарев В.А. Время как критерий оценки долговечности асфальтовых материалов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 1, 2. – С. 10-12, 14-17.
11. Золотарев В.А., Кудрявцева С.В., Эфремов С.В. Влияние совместного введения полимеров и адгезионных добавок на свойства битумов и асфальтобетонов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2007. – С. 33-35.
12. Куринов Б.С. Долговечность асфальтобетонов в агрессивных средах. – Элиста: Изд. гос. университета, 1976. – 155 с.
13. BS EN 12697-43. Bituminous mixtures-Test methods for hot mix asphalt Part 43: Resistance to fuel.
14. Энциклопедия полимеров. Том 3. – М.: “Советская энциклопедия”. – 1977. – С. 283-291.
15. Теляшев Э., Кутьин Ю. Универсальных рецептов не бывает // Автомобильные дороги. – 2003. – № 8. – С. 75-77.
16. Гохман Л.М. Пластификатор. “За” и “Против” – полимерно-битумное вяжущее на основе блоксополимеров типа СБС // Автомобильные дороги. – 2003. – № 4. – С. 56-58.
17. Худякова Т.С. О роли российских нормативных требований к полимерно-битумным вяжущим в обеспечении долговечности полимерасфальтобетонных покрытий // Мир дорог. – 2013. – № 67. – С. 34-41.
18. Золотарев В.А. Влияние свойств битумополимерных вяжущих на сдвигоустойчивость асфальтобетонов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2004. – № 2. – С. 27-30.