

УДК 665.775.4

DOI: 10.15372/ChUR2021347

Влияние адгезионных присадок на старение окисленного битума дорожного назначения

И. И. МУХАМАТДИНОВ¹, П. С. ФАХРЕТДИНОВ¹, А. Ф. КЕМАЛОВ¹, И. Н. ГАЛИМУЛЛИН²¹Институт геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань (Россия)

E-mail: iimuhamatdinov@gmail.com

²ООО “Квалитех”, Казань (Россия)

(Поступила 22.12.20; после доработки 12.03.21)

Аннотация

Представлены экспериментальные данные физико-химических характеристик образцов окисленного битума марок БНД 60/90 производства нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) ОАО “ТАИФ-НК” и ОАО “Сызранский НПЗ” до и после старения в тонкой пленке с добавлением разработанной присадки “Адгезолин”, а также в композиции с полимерно-битумными вяжущими, полученными на основе этих битумов. Для сравнения использовали отечественные адгезионные присадки БП-КСП, “Адгезол-6” и зарубежную присадку Wetfix (Швеция). Установлено, что наиболее значительное изменение температуры (ΔT) хрупкости (5.1 °С) наблюдается у битумов, модифицированных присадками 0.35 мас. % “Адгезол-6” или 0.5 мас. % Wetfix, что не соответствует отраслевому дорожному методическому документу (ОДМ 218.2.004–2006). Исследование качественных характеристик полимерно-битумных вяжущих по сравнению с исходными битумами выявило, что добавки полимеров в исследуемые битумы оказывают положительное влияние на ΔT размягчения после прогрева, этот показатель находится в пределах стандартов ГОСТ (не более 5 °С). Введение присадок также улучшает устойчивость битумов к старению: введение 0.8 мас. % присадки “Адгезолин” заметно снижает параметр ΔT размягчения. Сравнительный анализ эффективности с промышленно освоенными отечественными и зарубежной присадками позволяет отметить высокое качество модифицированных битумов на основе присадки “Адгезолин”. Малакометрические показатели оценки качества битумов, модифицированных разработанной присадкой “Адгезолин”, характеризуют менее интенсивное старение битумных вяжущих по сравнению с рассмотренными присадками, что позволяет рекомендовать ее для промышленной апробации.

Ключевые слова: окисленный битум, минеральный материал, адгезионные присадки, полимерно-битумные вяжущие, старение

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что качество битумного вяжущего напрямую влияет на свойства асфальтобетона, в большей степени на низкотемпературные свойства, эксплуатационную долговечность, коррозионную стойкость, адгезию, в меньшей – на его высокотемпературные характеристики. Понимание свойств битума и их влияния на качественные характеристики асфальтобетона является

определяющим при выборе материалов для устройства слоев асфальтобетона с высоким сроком службы и долговечностью.

Срок службы асфальтобетонных покрытий в большинстве случаев меньше нормативного. Уменьшение долговечности обусловлено разного рода деформациями и разрушениями: выкрашиванием, волнами, продольными и поперечными трещинами, наплывами, сдвигами, шелушением, выбоинами и т. д. Все эти дефекты появляются

вследствие погодных-климатических и механических факторов. Однако основным фактором, ответственным за разрушение асфальтобетонного полотна в процессе эксплуатации, – старение битума.

Асфальтобетонная смесь изготавливается путем перемешивания битума с каменным материалом при высоких температурах (160–170 °С). Как правило, при этом битум взаимодействует с кислородом воздуха, что приводит к его охрупчиванию и интенсивному старению [1, 2].

Старение битума – это все обратимые и необратимые изменения его химического состава и структуры, которые появляются при хранении, технологической переработке и эксплуатации [3–6]. Обычно это происходит на двух этапах – технологическом (преимущественно) и эксплуатационном. На первом этапе величины изменения свойств битума зависят от трех основных факторов:

- 1) температуры и продолжительности нагрева;
- 2) отношения объема нагреваемого битума к его свободной поверхности;
- 3) разновидности битума (по вязкости, исходному сырью и способу получения).

Второй этап – старение битума в процессе эксплуатации асфальтобетонного покрытия [3]. Основные факторы, которые вызывают старение битума при эксплуатации:

- 1) взаимодействие компонентов битума с кислородом воздуха и водой;
- 2) температурные воздействия;
- 3) действие поверхностей минеральных материалов, солей металлов переменной валентности и металлоорганических соединений битума;
- 4) воздействие инфракрасного и ультрафиолетового излучений;
- 5) механические нагрузки.

В процессе старения битума также происходит испарение. При этом битум теряет легколетучие компоненты, протекают химические превращения составляющих битума, которые сопровождаются образованием свободных радикалов и процессами дегидрополиконденсации [7, 8].

Выявлено, что результатом старения битума является изменение его состава, которое сопровождается увеличением вязкости, уменьшением пластичности и ростом хрупкости [8].

Именно на этапе технологического старения битума происходит наиболее интенсивное изменение его свойств. Длительный нагрев битума до высоких температур при приготовлении асфальтобетонной смеси приводит к существенным изменениям его состава и сопровождается

потерей битумом вяжущих свойств и значительным их ухудшением [9].

В существующих стандартах ГОСТ 22245–90 и ГОСТ Р 52056–2003 на дорожные битумы и полимерно-битумные вяжущие (ПБВ) среди фиксируемых показателей есть лишь один, который косвенно характеризует долговечность битумного вяжущего, – изменение температуры (ΔT) размягчения после прогрева в течение 5 ч при температуре 163 °С. При этом термическое старение битумов можно представить в виде двух составляющих: 1) термодистилляция – испарение легких фракций из битума под действием высоких температур, которое приводит к увеличению концентрации тяжелых компонентов и охрупчиванию; 2) термоокисление, протекающее в основном по радикальному механизму. Известно, что недостатком некоторых типов поверхностно-активных веществ, используемых в качестве адгезионных присадок, является их низкая термостабильность [10, 11].

Цель работы – изучение влияния адгезионных присадок на устойчивость битумов к старению, а также сопоставительная оценка влияния промышленно освоенных адгезионных добавок на температурную деградацию модифицированного вяжущего.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе исследования использовали следующие материалы:

– щебень Первоуральского месторождения (диорит, Свердловская обл.) и Биянковского щебеночного завода (карбонат, Челябинская обл.), фракция 20–40 мм;

– окисленные битумы марок БНД 60/90 производства нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) ОАО “ТАИФ-НК” (Республика Татарстан) и ОАО “Сызранский НПЗ”;

– присадки: “Адгезолин” (Казань, Россия), “Адгезол-6” (Казань, Россия), БП-КСП (Уфа, Россия) и Wetfix (Швеция) [12–14];

– полимерно-битумные вяжущие (ПБВ) на основе битумов БНД 60/90 ОАО “ТАИФ-НК” и ОАО “Сызранский НПЗ” и СКЭПТ с ДЦПД (синтетический каучук этиленпропилендиеновый с дициклопентадиеном) [15].

Присадки вводились в битум в оптимальных дозировках, рекомендуемых организациями-разработчиками, мас. %: БП-КСП 0,8, Wetfix 0,5, “Адгезолин” 0,8, “Адгезол-6” 0,35.

Оценка адгезии битумного вяжущего с минеральным материалом проводилась по ГОСТ

11508–76 методом А (“пассивное” сцепление), суть которого заключается в определении способности вязкого битума удерживаться на предварительно покрытой им поверхности минерального материала при воздействии воды [16].

Визуальным осмотром поверхности щебня по степени сохранности пленки битума оценивали его сцепление с поверхностью минерального материала. Для оценки качества сцепления битумного вяжущего использовали пятибалльную систему [17]. Битум считается выдержавшим испытание на “пассивное” сцепление, если после испытания сцепляемость с минеральным материалом соответствует контрольному образцу № 1 (или 5 баллам), т. е. наблюдается полное покрытие битумом поверхности каменного материала.

По стандартному тестовому методу ASTM D2872–2004 (метод RTFOT) [18] были исследованы образцы окисленных битумов производства ОАО “ТАИФ-НК”, модифицированных различными присадками, на старение в тонкой пленке с помощью прибора Matest (Италия). Прибор представляет собой печь для старения битума с электрическим подогревом. Печь должна быть оснащена вращающимся барабаном диаметром 300 ± 10 мм, состоящим из трех алюминиевых дисков, закрепленных на одной оси и соединенных между собой при помощи болтов и разделительных втулок (передних и задних). Диски, разделенные передними втулками, должны иметь по восемь отверстий для стеклянных контейнеров, которые наполняются битумом. Печь во время испытания должна поддерживать температуру внутреннего пространства 163 ± 1 °С. Достижение температуры испытания происходит менее чем за 15 мин с момента установки образцов. Пустые стеклянные контейнеры, используемые для определения изменения массы образца, необходимо промаркировать и взвесить с точностью до 1 мг. В каждый стеклянный контейнер наливают 35.0 ± 0.5 г образца. Сразу после заливки битума, при помощи вращения стеклянного контейнера необходимо распределить битум по внутренней боковой поверхности контейнера. Затем контейнеры с битумом необходимо охладить в течение не менее 1 ч при температуре 21 ± 4 °С. После чего их взвешивают с точностью до 1 мг. Далее необходимо привести в действие барабан с частотой вращения 15.0 ± 0.2 мин⁻¹, через форсунку начать подавать воздух со скоростью 4.0 ± 0.2 л/мин и начать отсчет времени испытания. Стеклянные контейнеры с образцами необходимо выдержать при данных условиях в печи в течение времени испытания (85 ± 1 мин).

По истечении этого времени контейнеры необходимо извлечь из печи и поместить их в место для охлаждения при температуре 21 ± 4 °С не менее чем на 1 ч. После чего осуществляют взвешивание стеклянных контейнеров с точностью до 1 мг. Затем, поочередно вынимая все контейнеры, битум собирают из контейнеров в одну емкость, перемещая в нее не менее 90 % битума из каждого контейнера [19]. Далее проводят необходимые испытания.

В соответствии с отраслевым дорожным методическим документом ОДМ 218.2.004–2006 “Рекомендации по определению устойчивости к старению и вязкости битумов” [20], устойчивость битумов к старению рекомендуется определять по: ΔT размягчения, остаточной пенетрации при 25 °С (ОП, %), изменениям абсолютных значений температуры хрупкости и изменению величины индекса пенетрации (ИП).

Определение следующих показателей свойств битумов после прогрева, а именно: пенетрация при 0 °С и дуктильности при 25 и 0 °С, считается нецелесообразным. Для битумов показатель дуктильности при 25 °С часто превышает 100 см, а при 0 °С наступает хрупкий разрыв (образец раскалывается при приложении минимального растягивающего усилия). Изменение показателя пенетрации при 0 °С после прогрева битума дает ценную информацию для оценки устойчивости битумов к старению, однако его включение существенно повысит трудоемкость проведения всего комплекса испытаний, так как потребуются значительное увеличение числа прогреваемых стеклянных емкостей с битумом [20].

Остаточную пенетрацию (ОП, %) при 25 °С вычисляли по формуле:

$$\text{ОП} = \frac{\Pi_1}{\Pi} \cdot 100 \%$$

где Π и Π_1 – пенетрации битума (0.1 мм) до и после прогрева соответственно.

Изменение температуры хрупкости битума после прогрева определяли как разность абсолютных значений температур хрупкости до и после испытания на прогрев. Изменение ИП битума после прогрева вычисляется как разность абсолютных значений величины ИП до и после испытания битума на прогрев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из представленных в табл. 1 данных видно, что по сравнению с промышленно освоенными присадками, при сопоставимых значениях, присадка “Адгезолин” оказывает положительное

ТАБЛИЦА 1
Физико-химические характеристики окисленного битума производства ОАО "ТАИФ-НК"

Показатель	ГОСТ 22245-90	Образец битума		После старения												
		До старения		Исходный												
		+0.8 % "Адгезолин"	+0.8 % "Адгезолин"	+1.0 % "Адгезолин"	+1.0 % "Адгезолин"	+0.5 % Wetfix	+0.5 % "Адгезол-6"	+0.35 % "Адгезол-6"	+0.35 % Wetfix	+1.0 % "Адгезолин"	+1.0 % "Адгезолин"	+0.5 % Wetfix	+0.35 % "Адгезол-6"	+0.8 % БП-КСП		
Пенетрация, 0.1 мм: при 25 °С	не менее 61-90	58	61	64	64	94	56	56	55	27	28	29	29	26	29	29
Температура размягчения по КИШ ^а , °С	не ниже 47	48.7	48.7	48	48	50	48.7	47.1	47.1	58.6	56.4	55.8	57.2	59.6	57.2	57.0
Адгезия на щебне, балл:	Не регламен- тируется	2	5	5	5	5	5	5	5	2	4	5	3	5	3	3
Первоуральский		3	5	5	5	4	4	5	5	2	5	5	3	4	3	3
Брянковский		-1.5	-1.1	-1.1	-1.1	0.5	-1.3	-1.7	-1.7	-0.6	-1.0	-1.0	-0.7	-0.5	-0.7	-0.8
Индекс пенетрации до +1		-20.2	-23.8	-26.3	-26.3	-23.3	-22.3	-22.9	-22.9	-16.2	-20.2	-23.2	-16.7	-17.7	-16.7	-18.7
Температура хрупкости, °С	не выше -15	-	-	-	-	-	-	-	-	9.1	4.8	4.7	6.5	6.6	6.5	6.9
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	не более 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Остаточная пенетрация при 25 °С, %	не менее 46	-	-	-	-	-	-	-	-	47	46	46	52	28	52	53
Изменение температуры хрупкости, °С	не более 3	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5	3.0	3.0	5.1	5.1	5.1	3.7
Изменение индекса пенетрации	не более 0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.9	0.1	0.1	0.6	1.0	0.6	0.9

Примечание. Прочерк – нет данных.

^а Метод определения по кольцу и шару.

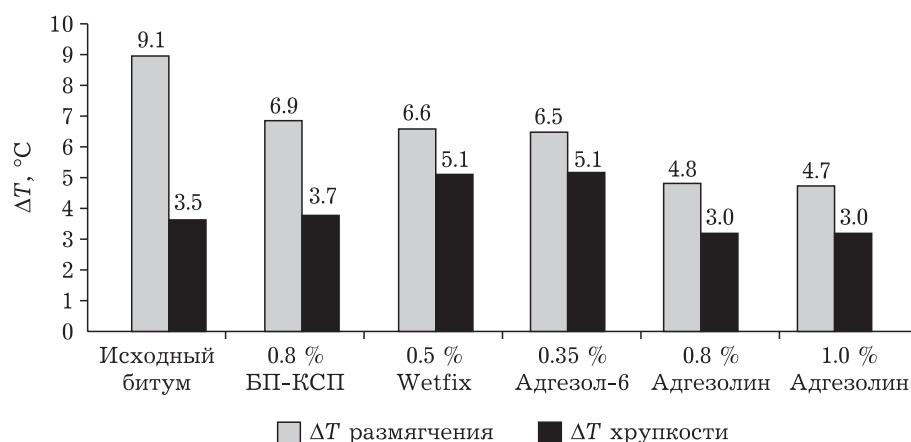


Рис. 1. Изменение температуры (ΔT) размягчения и хрупкости после прогрева образцов исходного битума (ОАО “ТАИФ-НК”) и битумов, модифицированных присадками.

влияние на ΔT размягчения и соответствует требованиям ГОСТ. При этом худший показатель ΔT размягчения наблюдается для исходного битума и соответствует значению 9.1 °C. Следует также отметить, что наиболее высокое ΔT хрупкости (5.1 °C) наблюдается для битумов, модифицированных присадками: 0.35 мас. % “Адгезол-6” и 0.5 мас. % Wetfix (рис. 1).

При этом ОП для всех образцов битумов соответствует ОДМ 218.2.004–2006, за исключением образца битума, модифицированного 0.5 мас. % Wetfix (ОП 28 %). По показателю “изменение ИП” несоответствие отраслевому стандарту ОДМ 218.2.004–2006 проявили образцы исходного битума и битумов, модифицированных присадкой БП-КСП и Wetfix (изменения ИП составили 1.0 и 0.9 при требовании стандарта не более 0.7, см. табл. 1).

Во всем мире наблюдается тенденция разработки составов ПБВ и применение их в дорожных покрытиях, поэтому мы рассмотрели эффективность присадки в составе ПБВ. В работе использовались ПБВ, полученные нами в лабораторных условиях на основе исходных окисленных битумов ОАО “ТАИФ-НК” и ОАО “Сызранский НПЗ” (табл. 2). Нами также исследованы ПБВ с адгезионными присадками: с добавлением 0.8 мас. % “Адгезолин” и 0.35 мас. % “Адгезол-6”. Результаты исследований качественных характеристик ПБВ представлены в табл. 3.

Сравнительный анализ качественных характеристик ПБВ и исходных битумов выявил следующее: добавки полимеров в исследуемые битумы положительно сказались на ΔT размягчения после прогрева, т. е. этот показатель находится в пределах ГОСТ (не более 5 °C). Введение присадок также увеличивает устойчивость битумов к старению: введение 0.8 % присадки

“Адгезолин” заметно уменьшает ΔT размягчения. Введение же 0.35 % присадки “Адгезол-6” приводит к определенному росту этого показателя, что отрицательно скажется на свойствах вяжущего и ведет тем самым к охрупчиванию и, как следствие, преждевременному износу дорожного покрытия (рис. 2).

Остаточная пенетрация и изменение ИП для всех образцов битумов соответствует ОДМ 218.2.004–2006, за исключением образца исходного битума производства ОАО “Сызранский НПЗ” (изменение ИП 1.2). В целом, все остальные образцы соответствуют ОДМ 218.2.004–2006.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что разработанная присадка “Адгезолин” обладает повышенной адгезией к поверхности минеральных материалов. Отличительной особенностью присадки “Адгезолин” по сравнению с некоторыми отечественными и зарубежными аналогами является технологичность применения (совместимость с битумом при относительно низкой температуре, 120–130 °C), высокая термическая стабильность, отсутствие специфического запаха, относительная дешевизна продукта.

В результате проведения комплекса исследований, направленных на изучение влияния присадки “Адгезолин” на свойства ряда битумов, и сопоставительного анализа эффективности с промышленно освоенными отечественными и зарубежными присадками, необходимо отметить высокое качество модифицированных битумов на основе разработанной адгезионной присадки. Рассматриваемые показатели по оценке качества битумов (изменение температур размягче-

ТАБЛИЦА 2

Физико-химические характеристики окисленного битума производства ОАО «ТАИФ-НК» и ОАО «Сызранский НПЗ», а также ПБВ на их основе

Показатель	ГОСТ 22245-90 Образец битума		После старения						
	До старения		После старения						
	«ТАИФ-НК» «Сызранский НПЗ»	ПБВ «ТАИФ-НК»	ПБВ «Сызранский НПЗ»	«ТАИФ-НК» «Сызранский НПЗ»	ПБВ «ТАИФ-НК» НПЗ»	ПБВ «Сызранский НПЗ»			
Пенетрация, 0,1 мм: при 25 °С	не менее 61-90	58	47	66	69	27	38	51	57
Температура размягчения по КиШ, °С	не ниже 47	47,5	49,6	69,2	69,2	58,6	57,2	74,1	72,9
Адгезия на щебне, балл: Первоуральский	Не регламентируется	2	2	2	2	2	2	2	2
Бианковский		3	3	3	3	2	3	3	3
Индекс пенетрации	От -1 до +1	-1,5	-1,4	3,5	3,6	-0,6	-0,2	3,5	3,7
Температура хрупкости, °С	не выше -15	-20,2	-22,6	-42,0	-34,3	-16,2	-19,3	-28,6	-27,8
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	не более 5	-	-	-	-	9,1	7,6	4,9	3,7
Остаточная пенетрация при 25 °С, %	не менее 46	-	-	-	-	47	81	77	83
Изменение температуры хрупкости, °С	не более 3	-	-	-	-	3,5	5,3	8,4	6,5
Изменение индекса пенетрации	не более 0,7	-	-	-	-	0,9	1,2	0	0,1

Примечание. Здесь и в табл. 3: 1. ПБВ – полимерно-битумное вяжущее. 2. Остаточная пенетрация при 25 °С, изменение температуры хрупкости, а также изменение индекса пенетрации оценивались на соответствие ОДМ 218.2.004-2006. 3. Прочерк – нет данных.

ТАБЛИЦА 3

Физико-химические характеристики ПБВ с добавлением адгезионных присадок

Показатель	ГОСТ 22245-90	Образец ПБВ с присадкой				После старения			
		До старения		После старения		До старения		После старения	
		“ТАИФ- НК” + 0,8 % “Адгезолин”	“Сызранский НПЗ” + 0,8 % “Адгезолин”	“ТАИФ- НК” + 0,35 % “Адгезол-6”	“Сызранский НПЗ” + 0,35 % “Адгезол-6”	“ТАИФ- НК” + 0,8 % “Адгезолин”	“Сызранский НПЗ” + 0,8 % “Адгезолин”	“ТАИФ- НК” + 0,35 % “Адгезол-6”	“Сызранский НПЗ” + 0,35 % “Адгезол-6”
Пенетрация, 0,1 мм: при 25 °С	не менее 61-90	58	64	53	62	43	48	41	46
Температура размягчения по КИШ, °С	не ниже 47	67,4	63,3	66,5	67,1	71,3	66,7	74,9	73,3
Адгезия на щебне, балл	Не регламентируется	5	5	5	4	5	4	5	3
Первоуральский		5	5	5	5	5	5	5	4
Бианковский		2,8	2,3	2,4	2,7	2,7	2,2	3,1	3,1
Индекс пенетрации	От -1 до +1	-38,5	-46,0	-38,4	-45,0	-33,3	-30,8	-31,4	-24,0
Температура хрупкости, °С	не выше -15	-	-	-	-	3,5	3,4	8,4	6,2
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	не более 5	-	-	-	-	74	75	77	74
Остаточная пенетрация при 25°С, %	не менее 46	-	-	-	-	5,2	6,2	7,0	8,0
Изменение температуры хрупкости, °С	не более 3	-	-	-	-	0,1	0,1	0,7	0,4
Изменение индекса пенетрации	не более 0,7	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание. Обозн. см. табл. 2.

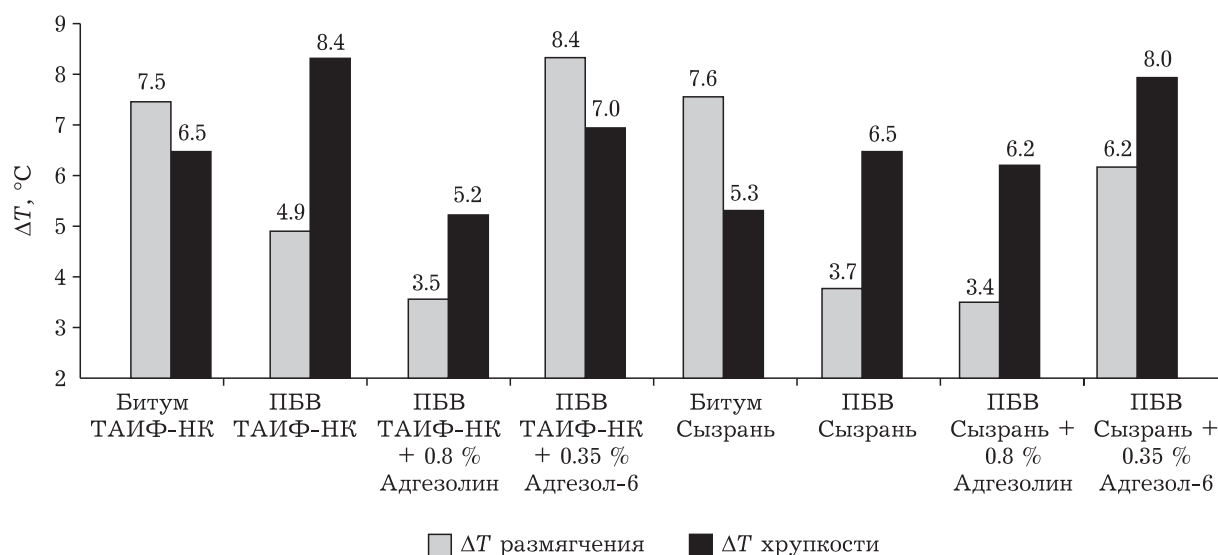


Рис. 2. Изменение температуры (ΔT) размягчения и хрупкости после прогрева образцов исходных битумов и полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) с присадками.

ния и хрупкости, изменение индекса пенетрации, остаточной пенетрации), во многом характеризующие степень старения битумов, позволяют оценить разработанную присадку “Адгезолин” как способствующую менее интенсивному старению битумных вяжущих по сравнению с рассматриваемыми присадками, благодаря чему ее можно рекомендовать для промышленной апробации.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колбановская А. С., Михайлов В. В. Дорожные битумы. М.: Транспорт, 1973. 264 с.
- Becker Y., Muller A. J., Rodriguez Y. Use of rheological compatibility criteria to study SBS modified asphalts // *J. Appl. Polym. Sci.* 2003. Vol. 90, No. 7. P. 1772–1782.
- Грушко И. М., Королев И. В. Дорожно-строительные материалы. Учеб. для вузов, 2-е изд, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991. 357 с.
- Королев И. В., Финашин В. Н., Фендер В. А. Дорожно-строительные материалы. Учеб. для автомоб.-дор. техникумов. М.: Транспорт, 1988. 304 с.
- Руденская И. М., Руденский А. В. Реологические свойства битумов. М.: Высш. шк., 1967. 117 с.
- Мазиев В. А. Процессы старения асфальтобетона, его долговечность. Усталостные свойства асфальтобетона. Обеспечение соответствия структуры и свойств асфальтобетона реальным условиям эксплуатации. М.: МАДИ-ГТУ, 2008.
- Розенталь Д. А., Сыроежко А. М., Ралис Р. В. Получение битумов различных марок компаундированием гудрона с природным асфальтитом // *Нефтехимия.* 2007. Т. 47, № 4. С. 329–330.
- Аминов Ш. Х., Струговец И. Б., Теляшев Э. Г., Кутын Ю. А. Неокисленные дорожные битумы и асфальтобетоны на их основе // *Строительные материалы.* 2003. № 10. С. 30–31.
- Рыбачук Н. А. Старение битумного вяжущего // *Вестник ИрГТУ.* 2015. Т. 97, № 2. С. 120–125.
- Мухаматдинов И. И., Кемалов А. Ф., Фахретдинов П. С. Исследование реологических свойств дорожных битумов, модифицированных адгезионной присадкой // *Химия и технология топлив и масел.* 2017. № 5 (603). С. 33–38.
- Мухаматдинов И. И., Фахретдинов П. С., Кемалов А. Ф., Мухаматдинова Р. Э. Изучение влияния адгезионной присадки на пластичность битумов дорожного назначения и физико-механические свойства асфальтобетонных смесей // *Химия уст. разв.* 2021. Т. 29, № 1. С. 88–99.
- Mukhamatdinov I. I., Gafurov M. R., Kemalov A. F., Rodionov A. A., Mamin G. V., Fakhretdinov P. S. Study of the oxidized and non-oxidized bitumen modified with additive “Adgezolin” by using electron paramagnetic resonance // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2017. Vol. 155. Art. 012004.
- ТУ 0257-001-26813195-2002. Технические условия. Присадка адгезионная для дорожных битумов БП-КСП. Уфа: Изд-во стандартов, 2002. 22 с.
- Эмульсионно-битумные технологии. Wetfix BE [Электронный ресурс]. URL: http://emulbittech.ru/wetfix_be (дата обращения: 20.12.2020).
- Техническая спецификация. Каучук синтетический этиленпропилендиеновый СКЭПТ с ДППД [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cbp-ekb.ru/upload/iblock/1fb/1fb65de9065802c822e7d907be9a713e.pdf> (дата обращения: 20.12.2020).
- ГОСТ 11508–76. Битумы нефтяные. Метод определения сцепления битума с мрамором и песком. М.: Госстандарт, 1976. 7 с.
- ГОСТ 12801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. М.: Госстандарт, 1998. 63 с.
- ASTM D2872–04. Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), 2004 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.astm.org/d2872-04.html> (дата обращения: 20.12.2020).
- ГОСТ 33140–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT). М.: Стандартинформ, 2019. 13 с.
- ОДМ 218.2.004–2006. Рекомендации по определению устойчивости к старению и вязкости битумов. М.: Росавтодор, 2007. 15 с.