

Реологические характеристики нефтяных битумов по системе Superpave

Е.К. Онгарбаев^{1,2*}, А.Б. Жамболова², А.Р. Кенжегалиева²

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

²Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Увеличение интенсивности дорожного движения и глобальное потепление требуют совершенствования регламентированных физико-механических характеристик дорожно-строительных материалов. Стандартные физико-механические показатели не позволяют в полной мере обосновать применение битумных вяжущих в асфальтобетонных смесях, поэтому необходимо определение их реологических характеристик по системе Superpave. На основе испытаний по системе Superpave в работе впервые предложены рекомендации по применению нефтяных битумов в соответствии с категориями движения. Определены стандартные физико-механические и реологические характеристики битумов марок БНД 70/100 и БНД 100/130 до и после старения. Битум БНД 70/100 имеет более высокую верхнюю критическую температуру до и после старения по сравнению с битумом БНД 100/130, что подтверждает его жесткость и лучшее сопротивление к колееобразованию при высоких температурах. Испытания на ползучесть и восстановление при воздействии многократных нагрузок показали, что битум БНД 100/130 демонстрирует лучшие характеристики по сопротивлению к колееобразованию и меньшую чувствительность к изменениям нагрузки по сравнению с битумом БНД 70/100. Битум БНД 70/100 имеет показатель невосстанавливаемой податливости ползучести при нагрузке 3,2 кПа, равный 1,0931 кПа⁻¹, соответствует маркировке «Н» и рекомендуется для интенсивного движения транспорта. Битум БНД 100/130 имеет данный показатель, равный 0,8158 кПа⁻¹, соответствует маркировке «V» и рекомендуется для очень интенсивного движения транспорта.

Ключевые слова: нефтяные битумы, реологические характеристики, система Superpave, старение, деформация.

1. Введение

Данный номер журнала «Горение и плазмохимия» посвящен 60-летию ведущего ученого в области химической физики, горения и нанотехнологий – кандидата химических наук, профессора Б.Т. Лесбаева. Он внес значительный вклад в решение экологических проблем нефтяной отрасли Республики Казахстан, принимая участие в проектах по утилизации отходов нефтедобычи и сжиганию нефтяных разливов на поверхности воды.

В 2001-2002 гг. в составе научной группы Института проблем горения Б.Т. Лесбаев принимал участие в полевых испытаниях укрупненной установки объемом 1,2 м³ по переработке нако-

пленной нефти из амбаров месторождения Озен (Мангистауская область). В результате испытаний было получено более 50 тонн асфальтобетонной смеси, из которой было уложено дорожное полотно шириной 3,5 м и длиной 90 м. Данная статья является продолжением этих исследований и направлена на улучшение качества дорожно-строительных материалов.

Производство дорожно-строительных материалов с характеристиками, соответствующими требованиям современных стандартов, имеет важное значение для экономики любой страны. Рост интенсивности автомобильного движения и последствия глобального потепления определяют необходимость совершенствования требований к физико-механическим характеристикам дорожно-строительных материалов.

*Ответственный автор
E-mail: yerdos_ong@mail.ru

На Всемирном экономическом форуме в 2022 году был представлен новый отчет-рейтинг о качестве дорог [1]. Республика Казахстан заняла в нем 93 место из 137 стран. В условиях увеличения нагрузки на дорожное покрытие возрастают требования к материалам, применяемым при строительстве и ремонте дорожного полотна. Актуальным направлением в решении задач повышения эксплуатационных свойств дорожных покрытий является разработка качественных асфальтобетонных смесей с увеличенным температурным диапазоном эксплуатации.

В настоящее время для повышения устойчивости к образованию колеи в дорожном строительстве применяется щебеночно-мастичный асфальтобетон. Улучшенные эксплуатационные характеристики данного вида асфальтобетонной смеси достигаются за счет увеличенного количества битума (6-8 мас. %).

Нефтяные битумы, используемые в настоящее время в качестве вяжущих в составе асфальтобетонных смесей, обладают рядом недостатков: они имеют ограниченный интервал пластичности, а их физико-механические показатели ухудшаются при отрицательных температурах. Традиционные битумы подвержены старению, деформации, термическому разрушению и воздействию агрессивных внешних факторов, ограничивающих срок эксплуатации дорожных покрытий и требующих частого ремонта.

Как правило, характеристики битума определяются на основе его физико-механических свойств, таких как пенетрация при 25 и 0 °C, температура размягчения по кольцу и шару (КиШ), растяжимость при 25 и 0 °C, температура хрупкости и др. Однако эти свойства, а также вязкость битума остаются несколько ограниченными показателями, поэтому механические свойства битума, зависящие от времени и возраста, широко известные как реологические [2, 3], используются как дополнительные методы исследования. Битум и асфальтобетонные покрытия склонны к растрескиванию при низких температурах вследствие избыточной жесткости, а при высоких температурах подвержены размягчению и образованию колеи [4]. Показателями, которые используются для приблизительной оценки способности битума преодолевать такие повреждения, являются коэффициенты усталости и колееобразования [5]. Эти коэффициенты определяются с помощью реометра динамического сдвига, отражают вязкоупругое поведение материала и являются основой для построения мастер-кривых, прогнозирующих

его поведение в широком диапазоне температур и нагрузок [6].

Битум является материалом чувствительным к старению и его свойства ухудшаются в течение срока службы [7]. Битум становится жестким и более хрупким со временем, поэтому эти факторы влияют на характеристики асфальтобетонных смесей [8, 9]. Эффект старения особенно выражен на поверхностных слоях, которые подвергаются воздействию таких условий окружающей среды, как УФ-излучение, влажность, окисление и изменения температуры [10]. Таким образом, срок службы асфальтобетона зависит от его стойкости к старению [11, 12].

Несмотря на известные исследования [13, 14], которые выявили несколько факторов, влияющих на старение битума, наиболее широко признанными механизмами являются физическое и пространственное отверждение (обратимые механизмы), потеря летучих веществ в результате испарения, окисление с последующими изменениями на молекулярном уровне, которые вызывают изменение количества компонентов битума.

В 1987 г. в США была начата Стратегическая дорожная исследовательская программа, в рамках которой разработана и усовершенствована система классифицирования битумов в зависимости от их назначений в дорожном покрытии. Данная система наряду с технологией разработки асфальтобетонных смесей называется системой Superpave [15].

По системе Superpave не применяются такие традиционные физико-механические показатели битумов, как глубина проникания иглы, температура размягчения, растяжимость или вязкость. По данному методу битумы классифицируются по условному диапазону температуры оценки производительности (PG – Performance Grade). С 2010 года система была дополнена испытанием на ползучесть и восстановление после многократного напряжения (MSCR – Multiple Stress Creep Recovery), в результате которого определяется дорожное движение, соответствующее битумному вяжущему. В табл. 1 приведены требования к показателям битумов по категориям и интенсивностям движения по системе Superpave. Соответствие битума определенной категории дорожного движения устанавливается по показателю $J_{nr3,2}$. В России в 2016 г. были введены предварительные национальные стандарты, основанные на принципах методологии Superpave, которые с 2019 г. перешли в статус государственных стандартов РФ [16]. По сравнению с приня-

Таблица 1. Требования к показателям битумов по категориям и интенсивностям движения по системе Superpave [15]

Движение	Нагрузка	Требование для J_{nr} 3,2, кПа ⁻¹	Требование для J_{nr} , diff, %
S (стандартное)	< 10 млн осей и стандартное движение	≤ 4,0	≤ 75
H (интенсивное)	10-30 млн осей и движение с низкой скоростью	≤ 2,0	
V (очень интенсивное)	> 30 млн осей или стоянка транспорта	≤ 1,0	
E (экстремально интенсивное)	> 30 млн осей и стоянка транспорта	≤ 0,5	

тыми ранее стандартами, основанными на эмпирических параметрах, использование принципов Superpave позволяет более объективно оценить работоспособность битумных вяжущих в условиях эксплуатации дорожных покрытий, в том числе с учетом последствий краткосрочного и долгосрочного старения.

С 1 июля 2025 г. в Республике Казахстан будет действовать стандарт СТ РК 3997-2024 [17], который распространяется на асфальтобетонные смеси, запроектированные по системе объемно-функционального проектирования Superpave. Однако по данному стандарту битумные вяжущие применяются согласно СТ РК 1373-2013 [18]. Стандартные физико-механические показатели битумных вяжущих недостаточны для их рекомендации в составе асфальтобетонных смесей, поэтому необходимо определение их реологических характеристик по системе Superpave.

На основе изложенных данных, целью работы является установление реологических характеристик нефтяных битумов по системе Superpave для их дальнейшей рекомендации по категориям и интенсивностям движения. В данном исследовании впервые разработаны рекомендации нефтяных битумов по категориям движений в результате испытаний MSCR системы Superpave.

2. Экспериментальная часть

Объектами исследования в работе служили образцы нефтяных дорожных битумов марок БНД 70/100 производства ТОО «Caspibitum» (г. Актау) и БНД 100/130 производства ТОО «Асфальтобетон 1» (г. Алматы). Данные марки битумов широко распространены в Казахстане и их часто используют в качестве вяжущего в асфальтобетонных смесях дорожных покрытий страны.

Физико-механические характеристики битумов определены по стандартным методикам.

2.1 Методика проведения старения битумов

Для имитации старения битумов была применена процедура испытания тонкопленочного материала в печи (Matest S.p.A., Италия) при прокатке (RTFOT) в соответствии с ASTM D2872-04 [19]. Устройство состоит из внутренней печи с двойными стенками, в которой циркулирует горячий воздух при температуре испытания $163 \pm 0,5$ °C, приводимый в движение внутренним вентилятором (рис. 1). Восемь стеклянных бутылок для образцов специальной конструкции устанавливаются горизонтально на карусели внутри печи. Испытание включает воздействие на тонкий слой битума струи горячего воздуха в течение 225 мин, чтобы имитировать длительный период выдержки, составляющий приблизительно 10-12 лет, что соответствует типичному жизненному циклу дорожного покрытия.

2.2 Методика определения реологических характеристик битумов

Реологические характеристики битумов при высоких температурах определяют их способность к противодействию вязкопластическим деформациям дорожного покрытия. Анализы проводились по стандартам AASHTO M 320-23 [20] и ASTM D7175 [21] с использованием реометра динамического сдвига Smartpave 102e (Anton Paar RheoCompass™, Грац, Австрия) (рис. 2), согласно стандарту AASHTO T315-24 [22]. В результате испытаний определены комплексный модуль сдвига G^* и угол фазового сдвига δ битумов до и после старения. На основе этих параметров были определены предполагаемые наивысшие температуры работы битума в дорожном покрытии:

- перед старением при $G^*/\sin \delta \geq 1,00$ кПа,
- после старения при $G^*/\sin \delta \geq 2,20$ кПа.



Рис. 1. Печь для проведения старения битумов (RTFOT).



Рис. 2. Реометр динамического сдвига Smartpave 102e.

2.3 Методика испытания на ползучесть и восстановление после многократных нагрузок

Испытанием на ползучесть и восстановление после многократных нагрузок (MSCR) измерены характеристики битума при наивысшей ожидаемой температуре работы дорожного покрытия, на основе которых оценивается устойчивость битума к остаточной деформации (колееобразованию). Анализы проводились на реометре динамического сдвига Smartpave 102e, где применяются равномерные пластины диаметром 25 мм и зазором 1 мм.

Во время анализа определяется ползучесть битума после нагрузки за 1 с и его восстановления за 9 с после снятия нагрузки. Сначала при значении сдвигающего напряжения 0,1 кПа выполняются 10 циклов ползучести и восстановления, после чего при 3,2 кПа – еще раз 10 циклов

испытаний. В результате испытаний фиксируют параметр J_{nr} и процентное восстановление R для каждого напряжения. Параметр J_{nr} определяется как соотношение деформации битума после цикла ползучести и восстановления на приложенное напряжение. По значению J_{nr} при напряжении 3,2 кПа оценивается устойчивость битума к остаточной деформации – чем меньше его значение, тем больше устойчивость к колееобразованию. Значение $R_{3,2}$ показывает эффективность модификации битума.

Изменение значения J_{nr} при увеличении напряжения с 0,1 кПа ($J_{nr,0,1}$) до 3,2 кПа ($J_{nr,3,2}$) $J_{nr,diff}$ показывает чувствительность битума к увеличению нагрузки, его значение не должно превышать 75%, и рассчитывается по формуле (1):

$$J_{nr,diff} = \frac{(J_{nr,3,2} - J_{nr,0,1})}{J_{nr,0,1}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Изменение значения восстановления R при увеличении напряжения с 0,1 кПа ($R_{0,1}$) до 3,2 кПа ($R_{3,2}$) R_{diff} рассчитывается по формуле (2):

$$R_{diff} = \frac{(R_{0,1} - R_{3,2})}{R_{0,1}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

3. Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлены стандартные физико-механические характеристики битумов марок БНД 70/100 и БНД 100/130. Битум марки БНД 70/100 по глубине проникания иглы (пенетрация) при 25 и 0 °С, температуре размягчения по КиШ, растяжимости при 25 и 0 °С, температуре вспышки удовлетворяет требованиям стандарта СТ РК 1373-2013. Битум марки БНД 100/130 также по всем основным показателям соответствует требованиям стандарта СТ РК 1373-2013.

Таким образом, выбранные в качестве объектов исследования битумы являются вязкими дорожными битумами в соответствии с требованиями СТ РК 1373-2013 и рекомендуются для приготовления асфальтобетонных смесей согласно ГОСТ 9128-2013 [23]. Содержание битума в асфальтобетонных смесях будет составлять от 5 до 7 мас. % в зависимости от вида смеси.

Далее были изучены реологические характеристики битумов до и после старения, результаты приведены в табл. 3. Комплексный модуль сдвига G^* характеризует общее сопротивление битума деформации сдвига. Чем выше значение G^* , тем жестче битум. Фазовый угол δ указывает на соотношение упругих и вязких свойств битума.

Таблица 2. Физико-механические характеристики битумов

Наименование показателя	БНД 70/100	БНД 100/130	Требования СТ РК 1373-2013 на марки БНД 70/100 и БНД 100/130
Пенетрация при 25 °С, 0,1 мм	83	113	71-100; 101-130
Пенетрация при 0 °С, 0,1 мм	24	32	не ниже 22; не ниже 30
Температура размягчения по КиШ, °С	47	44	не ниже 45; не ниже 43
Растяжимость при 25 °С, см	>150	>150	не менее 75; не менее 90
Растяжимость при 0 °С, см	4,9	6,9	не менее 3,8; не менее 4,0
Динамическая вязкость при 60 °С, Па·с	250	138	не менее 145; не менее 120
Кинематическая вязкость при 135 °С, мм ² /с	547	352	не менее 250; не менее 180
Температура вспышки, °С	274	282	не ниже 230
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-22	-24	не выше -20; не выше -22
Растворимость, %	99,9	99,9	не менее 99,0
Содержание парафинов, %	0,3	0,4	не выше 2,5

Таблица 3. Реологические характеристики битумов до и после старения

Температура, °C	G*, кПа	δ, °	G*/sin δ, кПа	G*, кПа	δ, °	G*/sin δ, кПа
	БНД 70/100			БНД 100/130		
46,0	12,7350	74,14	13,2388	6,5319	80,13	6,6301
52,0	5,6669	77,34	5,8080	2,8743	82,43	2,8995
58,0	2,4929	80,37	2,5285	1,2651	84,45	1,2710
64,0	1,1323	82,91	1,1410	0,5800	86,24	0,5812
70,0	0,5303	84,90	0,5324	-	-	-
БНД 70/100 после старения			БНД 100/130 после старения			
64,0	5,9461	72,79	6,2247	3,8293	77,66	3,9198
70,0	2,8642	76,27	2,9485	1,8085	80,69	1,8326
76,0	1,4148	79,46	1,4391	-	-	-

Чем ближе значение δ к 0°, тем более упругим является материал, а чем ближе к 90°, тем более вязким. Параметр $G^*/\sin \delta$ является ключевым показателем сопротивления битума постоянным деформациям при высоких температурах. Чем выше значение данного параметра, тем более жестким и упругим делается битум, что способствует лучшей устойчивости к колееобразованию.

Как видно из табличных данных, с повышением температуры G^* и $G^*/\sin \delta$ уменьшаются, а δ увеличивается, что указывает на снижение жесткости и повышение вязкой составляющей поведения. По сравнению с битумом БНД 70/100, битум БНД 100/130 имеет более низкие значения G^* и $G^*/\sin \delta$ и более высокие значения δ при одинаковых температурах, что указывает на то, что БНД 100/130 является более мягким и вязким битумом.

Сравнение показателей БНД 70/100 при температуре 64,0 °С до и после старения показывает, что после старения битум стал значительно жестче (увеличилось значение G^*) и более упругим, (уменьшилось значение δ), что типично для процесса старения битума. Аналогично наблюдается у БНД 100/130, который после старения стал жестче и менее вязким, чем до старения.

Как ожидалось, с ростом температуры битумы становятся менее жесткими и более вязкими. Процесс старения приводит к значительному увеличению модуля жесткости и уменьшению фазового угла битумов, делая их более хрупкими и упругими. Это согласуется с известными эффектами старения, которые ухудшают эластичность и повышают склонность к трещинообразованию при низких температурах, но увеличивают сопротивление к колееобразованию при высоких тем-

пературах. Битум БНД 70/100 изначально более жесткий и менее вязкий, чем БНД 100/130, что подтверждается более высокими значениями G^* и $G^*/\sin \delta$ и более низкими значениями δ . Это сохраняется и после старения, хотя абсолютные значения параметров меняются.

По стандарту AASHTO T315-24 [22] верхняя критическая температура битума БНД 70/100 равна 65,1 °C при $G^*/\sin(\delta) \geq 1,0000$ кПа, после старения – 72,4 °C при $G^*/\sin(\delta) \geq 2,2000$ кПа. Верхняя критическая температура битума БНД 100/130 равна 59,8 °C при $G^*/\sin(\delta) \geq 1,0000$ кПа, после старения – 68,6 °C при $G^*/\sin(\delta) \geq 2,2000$ кПа.

Верхняя критическая температура битума определяет максимальную температуру, при которой битум сохраняет свои эксплуатационные характеристики, достаточные для предотвращения колееобразования (постоянных деформаций) под воздействием нагрузки. Битум БНД 70/100 имеет более высокую верхнюю критическую температуру как до старения (65,1 °C против 59,8 °C), так и после старения (72,4 °C против 68,6 °C) по сравнению с битумом БНД 100/130. Это означает, что битум БНД 70/100 является более жестким и лучше сопротивляется колееобразованию при более высоких температурах.

Для обеих марок битума верхняя критическая температура повышается после старения. Это ожидаемо, так как в процессе старения битум становится более жестким и хрупким, что повышает его сопротивление к колееобразованию, но снижает пластичность и устойчивость к низкотемпературному растрескиванию. Для битума БНД 70/100 повышение составляет 7,3 °C, а для БНД 100/130 – 8,8 °C. Хотя оба битума демонстрируют увеличение жесткости после старения, БНД 100/130 показывает немного больший прирост жесткости, что может указывать на несколько более выраженное старение при высоких температурах по сравнению с БНД 70/100 в отношении критической температуры.

БНД 70/100 с его более высокой верхней критической температурой лучше подходит для регионов с жарким климатом, где дорожное покрытие подвергается высоким температурам в течение длительного времени, и обеспечит лучшую сопротивляемость к колееобразованию.

БНД 100/130 имеет более низкую верхнюю критическую температуру, что делает его более подходящим для регионов с умеренным климатом, где температуры дорожного покрытия не достигают экстремально высоких значений. Его повышенное значение пенетрации по сравнению с

битумом БНД 70/100 также указывает на то, что он, как правило, более мягкий и, следовательно, может иметь лучшие низкотемпературные свойства.

Далее проведены испытания на ползучесть и восстановление при воздействии многократных нагрузок (MSCR) битумов, которые позволяют оценить их вязкоупругие свойства, а именно способность сопротивляться постоянной деформации (колееобразованию) и восстанавливаться после нагрузки, при различных уровнях напряжения. Испытания для битума БНД 70/100 проводились при критической температуре 64 °C, для битума БНД 100/130 – при критической температуре 58 °C.

На рис. 3 представлены кривые ползучести битумов в виде зависимости деформации сдвига в битумах от времени. Зависимости имеют схожую общую форму, характерную для битумов, и демонстрируют три стадии ползучести: начальную, квазистационарную (или ее отсутствие) и третичную (ускоренную).

Битумы демонстрируют относительно небольшую деформацию на начальной стадии испытания от 0 до 180-200 с. Кривые на этом участке почти горизонтальны, что указывает на медленный рост деформации или наличие упругой компоненты, которая быстро стабилизируется. Далее битумы показывают резкое увеличение скорости деформации после 180-200 с, что свидетельствует о переходе к третичной стадии ползучести. Это позволяет сделать вывод, что при данных значениях температуры и приложенного напряжения оба битума достигают своего предела стабильности и начинают быстро деформироваться.

Оба графика показывают, что деформация сдвига может достигать значений выше 2000-3000% в течение 300 с. Битум БНД 70/100 за 300 с достигает максимальную деформацию сдвига, равную 3700-3800%, в то время как битум БНД 100/130 за 300 с достигает максимальную деформацию сдвига, равную 2700-2800%. Отсюда можно сделать вывод о том, что битум БНД 70/100 демонстрирует значительно большую деформацию по сравнению с битумом БНД 100/130. Это указывает на то, что битум БНД 70/100 менее устойчив к ползучести по сравнению с битумом БНД 100/130.

Сравнительный анализ графиков показывает, что битум БНД 100/130 демонстрирует лучшую (меньшую) деформацию ползучести по сравнению с битумом БНД 70/100 в течение 300 с испытания. Это говорит о том, что битум БНД 100/130 является более устойчивым к длительным нагрузкам и будет проявлять меньшие остаточные деформации

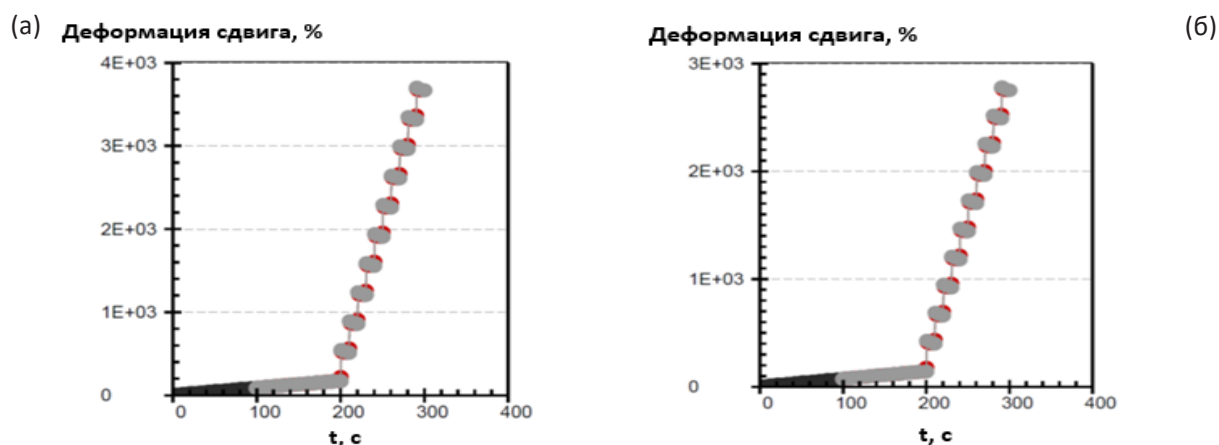


Рис. 3. Зависимости деформации сдвига от времени битумов БНД 70/100 (а) и БНД 100/130 (б).

в условиях эксплуатации, что является преимуществом для дорожных покрытий и других применений, где ползучесть является критическим параметром. Битум БНД 70/100, напротив, может быть более подвержен пластическим деформациям под воздействием постоянных нагрузок.

На рис. 4 показаны зависимости восстановления R от значений J_{nr} при нагрузке 3,2 кПа для битумов. Исходя из положения красного треугольника, значение показателя невосстанавливаемой податливости ползучести J_{nr} у битума БНД 100/130 ($0,8 \text{ кПа}^{-1}$) ниже, чем у битума БНД 70/100 ($1,1 \text{ кПа}^{-1}$). Более низкое значение J_{nr} означает, что битум БНД 100/130 демонстрирует меньшую невосстанавливаемую (пластическую) деформацию после снятия нагрузки. Это указывает на лучшую устойчивость к колееобразованию и меньшую остаточную деформацию под действием повторяющихся нагрузок.

Показатель восстановления R у битума БНД 100/130 (9,9%) немного выше, чем у битума БНД 70/100 (8,6%). Более высокое значение данного показателя для битума БНД 100/130 означает,

что он обладает лучшей способностью к восстановлению (более высокой упругой компонентой деформации) после снятия нагрузки.

Битум БНД 100/130 демонстрирует лучшие реологические характеристики с точки зрения сопротивления постоянным деформациям и восстановления после нагрузки при 3,2 кПа по сравнению с битумом БНД 70/100. Он является более эластичным и менее подвержен остаточным деформациям (например, колееобразованию в дорожном покрытии) в условиях эксплуатации по сравнению с битумом БНД 70/100.

В табл. 4 представлены результаты испытаний битумов на ползучесть и восстановление при воздействии многократных нагрузок. Значения невосстанавливаемой податливости ползучести при низком ($0,1 \text{ кПа}$) и высоком ($3,2 \text{ кПа}$) уровне нагрузки J_{nr} характеризуют величину постоянной деформации, которая остается после снятия нагрузки. Чем ниже его значение, тем лучше битум сопротивляется колееобразованию. Сравнение J_{nr} при разных нагрузках позволяет оценить чувствительность битума к изменению напряжения.

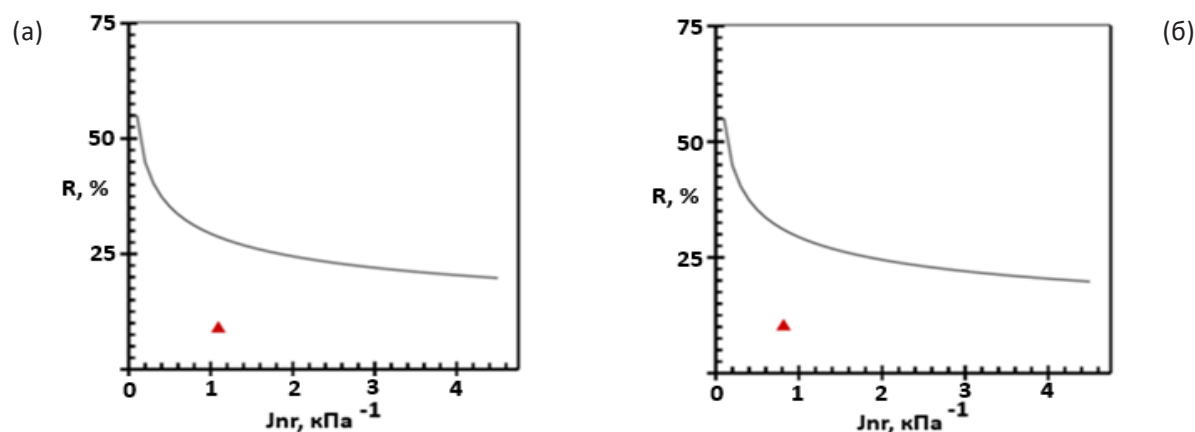


Рис. 4. Зависимости восстановления R от значений J_{nr} при нагрузке 3,2 кПа битумов БНД 70/100 (а) и БНД 100/130 (б).

Таблица 4. Результаты испытаний битумов на ползучесть и восстановление при воздействии многократных нагрузок

Битум	$J_{nr0,1}$, кПа ⁻¹	$J_{nr3,2}$, кПа ⁻¹	$J_{nr, diff}$, %	$R_{0,1}$, %	$R_{3,2}$, %	R_{diff} , %	Маркировка
БНД 70/100	0,8453	1,0931	29,32	24,21	8,65	64,29	Н
БНД 100/130	0,7005	0,8158	16,46	20,32	9,93	51,12	В

Процентное изменение J_{nr} между двумя уровнями нагрузки отражает чувствительность битума к нагрузке, высокий процент указывает на большую чувствительность к нагрузке. Процент восстановления деформации при низком (0,1 кПа) и высоком (3,2 кПа) уровнях нагрузки R отражает упругую составляющую поведения битума. Чем выше его значение, тем больше упругой деформации восстанавливается. Процентное изменение R между двумя уровнями нагрузки показывает насколько снижается способность к восстановлению при увеличении нагрузки.

Сравнение значений J_{nr} указывает на то, что битум БНД 100/130 лучше сопротивляется необратимым деформациям (колеобразованию) при обоих уровнях нагрузки, чем битум БНД 70/100. Процент $J_{nr, diff}$ битума БНД 100/130 значительно ниже, чем у битума БНД 70/100 и менее чувствителен к увеличению нагрузки с точки зрения постоянных деформаций.

При низких нагрузках (0,1 кПа) битум БНД 70/100 (24,21%) демонстрирует более высокий процент восстановления, чем битум БНД 100/130 (20,32%). Однако при высоких нагрузках (3,2 кПа) их значения R становятся более сопоставимыми, хотя битум БНД 100/130 (9,93%) незначительно превосходит битум БНД 70/100 (8,65%). Процент восстановления у битума БНД 70/100 значительно снижается при более высокой нагрузке, R_{diff} равен 64,29%, способность к восстановлению битума сильно ухудшается при увеличении нагрузки.

Процент R_{diff} у битума БНД 100/130 ниже, чем у БНД 70/100, что говорит о меньшем снижении способности к восстановлению при увеличении нагрузки. Это является значимым преимуществом БНД 100/130, так как его свойства меньше изменяются при увеличении транспортной нагрузки и менее подвержен потере эластичных свойств при высоких нагрузках.

По стандарту AASHTO M 332-20 [24] битум БНД 70/100 имеет показатель $J_{nr3,2}$, равный 1,0931 кПа⁻¹, и согласно табл. 1 соответствует маркировке «Н» и рекомендуется в качестве вяжущего в составе дорожных покрытий для интенсивного движения транспорта.

Битум БНД 100/130 имеет показатель $J_{nr3,2}$, равный 0,8158 кПа⁻¹, и согласно табл. 1 соответствует маркировке «В» и рекомендуется в качестве вяжущего в составе дорожных покрытий для очень интенсивного движения транспорта.

4. Заключение

Таким образом, реологические характеристики битумов до и после старения позволяют определить их поведение в зависимости от температуры и нагрузки.

Битум БНД 70/100 обеспечивает лучшую устойчивость к колеобразованию при высоких температурах по сравнению с битумом БНД 100/130, что делает его предпочтительным для применения в более жарких климатических условиях. Битум БНД 100/130 более «мягкий» при высоких температурах и, следовательно, более подвержен колеобразованию при тех же температурах, что и битум БНД 70/100. Это делает его более подходящим для применения в умеренном климате.

На основании данных MSCR испытаний, битум БНД 100/130 демонстрирует лучшие характеристики по сопротивлению к колеобразованию и меньшую чувствительность к изменениям нагрузки по сравнению с битумом БНД 70/100. Он имеет меньшие значения J_{nr} при обоих уровнях нагрузки и значительно меньшие процентные изменения J_{nr} и R при увеличении нагрузки. Это говорит о том, что битум БНД 100/130, вероятно, будет проявлять более стабильное и предпочтительное поведение в условиях высоких и переменных транспортных нагрузок, что делает его более подходящим для дорожных покрытий с более интенсивным движением несмотря на его применение в более умеренных климатических условиях.

Таким образом, обе марки битума подвергаются значительному ужесточению после старения при повышенных температурах, что является нормальным поведением для битумов. Эти данные критически важны для правильного подбора марки битума в зависимости от климатической зоны

строительства дорог с целью обеспечения долговечности и предотвращения преждевременного разрушения дорожного покрытия.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК по проекту программно-целевого финансирования BR24992915 «Разработка технологий получения высокопрочного асфальтобетона на основе эластомерно-полимерно-битумных вяжущих и плазмохимическая переработка жидких углеродсодержащих отходов».

Список литературы (ГОСТ)

- [1]. Назаренко Г.В., Пржекенова А.С. Ведомственный норматив «Контроль качества и приемка работ при строительстве и ремонте автомобильных дорог» // Научно-практический журнал «Jolshy». – 2024. – № 4. – С. 31–33.
- [2]. The bitumen industry: a global perspective: production, chemistry use, specification and occupational exposure. Asphalt Institute, Eurobitume. – Lexington, Brussels. – 2015. – 58 p.
- [3]. ASTM D7175-15. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. ASTM International. – 2017.
- [4]. D'Melo D., Taylor, R. Constitution and structure of Bitumens // In The Shell Bitumen Handbook. – London: ICE Publishing. – 2015. – P. 47–62.
- [5]. Aragão F.T.S., Kim Y.-R., Lee J. Research on Fatigue of Asphalt Mixtures and Pavements in Nebraska // Nebr. Dep. Transp. Res. Rep. – 2008. – No. 41. – 60 p.
- [6]. Airey G.D., Rahimzadeh B., Collop A.C. Linear and Nonlinear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Binders // Road Mater. Pav. Des. – 2004. – Vol. 5. – P. 39–59.
- [7]. Loise V., Caputo P., Porto M., Calandra P., Angelico R., Rossi C.O. A Review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, Materials, Methods and Perspectives // Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9. – No. 20. – P. 4316.
- [8]. Peralta J., Hilliou L., Silva H., Machado A., Pais J., Oliveira J.R.M. Rheological quantification of bitumen aging: Definition of a new sensitive parameter // Appl. Rheol. – 2010. – Vol. 20. – P. 63293.
- [9]. Lesueur D. The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification // Adv. Col. Interf. Sci. – 2009. – Vol. 145. – P. 42–82.
- [10]. Erkens S., Porot L., Glaser R., Glover C.J. Aging of Bitumen and Asphalt Concrete: Comparing State of the Practice and Ongoing Developments in the United States and Europe // Proc. Transp. Res. Board. – Washington. – 2016. – P. 1–12.
- [11]. Apostolidis P., Liu X., Kasbergen C., Scarpas A.T. Synthesis of Asphalt Binder Aging and the State of the Art of Antiaging Technologies // Transp. Res. Rec. – 2017. – Vol. 2633. – P. 147–153.
- [12]. Rossi C.O., Teltayev B., Angelico R. Adhesion Promoters in Bituminous Road Materials: A Review // Appl. Sci. – 2017. – Vol. 7. – P. 524.
- [13]. Zaumanis M., Mallick R.B., Poulikakos L.D. Effect of thermal and oxidative aging on asphalt binders rheology and chemical composition // Materials. – 2020. – Vol. 13, no. 19. – Article 4438.
- [14]. Miró R., Martínez A.H., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez C. Effect of ageing and temperature on the fatigue behaviour of bitumens // Mater. Des. – 2015. – Vol. 86. – P. 129–137.
- [15]. Блажеевский К., Вуйчик-Вишневская М. Битумный справочник. Польша: ORLEN Asphalt Sp. z o.o. – 2017. – 136 с.
- [16]. Пискунов И.В., Рожков И.М., Харпаев А.В., Башкирцева Н.Ю. Основные тенденции в производстве и применении битумных материалов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2021. – № 11. – С. 3–16.
- [17]. СТ РК 3997-2024. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования. – Астана, 2024.
- [18]. СТ РК 1373-2013. Битумы и битумные вяжущие. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. – Астана, 2013.
- [19]. ASTM D2872-04. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). ASTM International, 2012.
- [20]. AASHTO M 320-23. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2023.
- [21]. ASTM D7175. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. ASTM International, 2023.
- [22]. AASHTO T315-24. Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024.

- [23]. ГОСТ 9128-2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014.
- [24]. AASHTO M 332-23. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2023.

References

- [1]. G.V. Nazarenko, A.S. Przhekenova, Departmental standard «Quality control and acceptance of works during construction and repair of highways», Sci. Pract. J. Jolshy. 4 (2024) 31–33. (In Russian).
- [2]. The bitumen industry: a global perspective: production, chemistry use, specification and occupational exposure, Asphalt Institute, Eurobitume. – Lexington, Brussels, 2015. – 58 p.
- [3]. ASTM D7175-15. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM Int., 2017.
- [4]. D. D'Melo, R. Taylor. Constitution and structure of Bitumens, In: The Shell Bitumen Handbook – London: ICE Publ., 2015 P. 47–62.
- [5]. F.T.S. Aragão, Y.-R. Kim, J. Lee. Research on Fatigue of Asphalt Mixtures and Pavements in Nebraska, Nebr. Dep. Transp. Res. Rep. 41 (2008) 60.
- [6]. G.D. Airey, B. Rahimzadeh, A.C. Collop, Linear and Nonlinear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Binders, Road Mater. Pav. Des. 5 (2004) 39–59. <https://doi.org/10.1080/1468062.2004.9689942>
- [7]. V. Loise, P. Caputo, M. Porto, P. Calandra, R. Angelico, C.O. Rossi, A Review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, Materials, Methods and Perspectives, Appl. Sci. 9 (2019) 4316. <https://doi.org/10.3390/app9204316>
- [8]. J. Peralta, L. Hilliou, H. Silva, A. Machado, J. Pais, J.R.M. Oliveira, Rheological quantification of bitumen aging: Definition of a new sensitive parameter, Appl. Rheol. 20 (2010) 63293.
- [9]. D. Lesueur, The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification, Adv. Col. Interf. Sci. 145 (2009) 42–82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
- [10]. S. Erkens, L. Porot, R. Glaser, C.J. Glover, Aging of Bitumen and Asphalt Concrete: Comparing State of the Practice and Ongoing Developments in the United States and Europe // Proc. Transp. Res. Board. 1 (2016) 1–12.
- [11]. P. Apostolidis, X. Liu, C. Kasbergen, A.T. Scarpas, Synthesis of Asphalt Binder Aging and the State of the Art of Antiaging Technologies, Transp. Res. Rec. 2633 (2017) 147–153. <https://doi.org/10.3141/2633-17>
- [12]. C.O. Rossi, B. Teltayev, R. Angelico, Adhesion Promoters in Bituminous Road Materials: A Review, Appl. Sci. 7 (2017) 524. <https://doi.org/10.3390/app7050524>
- [13]. M. Zaumanis, R.B. Mallick, L.D. Poulikakos, Effect of thermal and oxidative aging on asphalt binders rheology and chemical composition, Materials. 13 (2020) 4438. <https://doi.org/10.3390/ma13194438>
- [14]. R. Miró, A.H. Martínez, F. Moreno-Navarro, C. Rubio-Gámez, Effect of ageing and temperature on the fatigue behaviour of bitumens, Mater. Des. 86 (2015) 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.076>
- [15]. K. Blazhevsky, M. Wuychik-Vishnevskaya, Bitumen reference book [Bitumnyi pravochnik], 2017. 136 p. (In Russian).
- [16]. I.V. Piskunov, I.M. Rozhkov, A.V. Kharpayev, N.Yu. Bashkirtseva, Main trends in the production and application of bituminous materials, Oil Ref. Petrochem. [Neftepererabotka i neftehimiya] 11 (2021) 3–16.
- [17]. ST RK 3997-2024, Asphalt concrete road mixtures and asphalt concrete. Volumetric-functional design system. Technical requirements, Astana, 2024.
- [18]. ST RK 1373-2013, Bitumen and bitumen binders. Viscous petroleum road bitumen. Technical conditions, Astana, 2013.
- [19]. ASTM D2872-04, Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), ASTM Int., 2012.
- [20]. AASHTO M 320-23, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder, American Assoc. State Highw. Transp. Offic., 2023.
- [21]. ASTM D7175, Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM Int., 2023.
- [22]. AASHTO T315-24, Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), American Assoc. State Highw. Transp. Offic., 2024.
- [23]. GOST 9128-2013, Asphalt concrete, polymer asphalt concrete mixtures, asphalt concrete, polymer asphalt concrete for highways and airfields. Technical conditions, Moscow: Standartinform, 2014.

- [24]. AASHTO M 332-23, Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, American Assoc. State Highw. Transp. Offic., 2023.

Superpave жүйесі бойынша мұнай битумдарының реологиялық сипаттамалары

Е.К.Онгарбаев^{1,2*}, А.Б. Жамболова²,
Ә.Р. Кенжеғалиева²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,
әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

²Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к-сі,
172, Алматы, Қазақстан

АНДАТПА

Жол қозғалысы қарқындылығының артуы және жаһандық жылыну жол-құрылыс материалдарының физикалық-механикалық сипаттамаларына қойылатын талаптарды жетілдіруді талап етеді. Битумды тұтқыр заттардың стандартты физикалық-механикалық қасиеттері оларды асфальтбетон қоспаларының құрамында ұсыну үшін жеткіліксіз, сондықтан олардың реологиялық сипаттамаларын Superpave жүйесі бойынша анықтау қажет. Жұмыста алғаш рет Superpave жүйесі бойынша сынақтар нәтижесінде мұнай битумдарын қозғалыс категориялары бойынша ұсыныстар жасалды. БНД 70/100 және БНД 100/130 битумдарының ескіруге дейінгі және одан кейінгі стандартты физика-механикалық және реологиялық сипаттамалары анықталды. БНД 70/100 битумының БНД 100/130 битумымен салыстырғанда ескіруге дейін және одан кейінгі жоғарғы кризистік температурасы бар, бұл оның қаттылығын және жоғары температурада ойық түзілуге жақсы төзімділігін растайды. Көп рет қайталанатын жүктеме кезіндегі жылжығыштыққа және қалпына келтіру сынақтары БНД 70/100 битумымен салыстырғанда БНД 100/130 битумының ойық түзілуге жақсы төзімділігін және жүктеме өзгерістеріне төмен сезімталдығын көрсетті. БНД 70/100 битумының 3,2 кПа жүктеме кезінде қалпына келмейтін жылжығыштыққа икемділік көрсеткіші 1,0931 кПа⁻¹-ге тең, «Н» белгісіне сәйкес келеді және қарқынды көлік қозғалысы үшін ұсынылады. БНД 100/130 битумының бұл көрсеткішінің мәні 0,8158 кПа⁻¹, «V» белгісіне сәйкес келеді және өте қарқынды көлік қозғалысы үшін ұсынылады.

Түйінді сөздер: мұнай битумдары, реологиялық сипаттамалар, Superpave жүйесі, ескіру, деформация.

Rheological characteristics of petroleum bitumens according to the Superpave system

Y.K. Ongarbayev^{1,2*}, A.B. Zhambolova²,
A.R. Kenzhegalieva²

¹Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71,
Almaty, Kazakhstan

²Institute of Combustion Problems, Bogenbai batyr str.,
172, Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

Increased traffic intensity and global warming require improvements in the requirements for the physico-mechanical characteristics of road construction materials. Standard physico-mechanical indicators of bitumen binders are insufficient for their recommendation in the composition of asphalt concrete mixtures, therefore it is necessary to determine their rheological characteristics according to the Superpave system. In this work, for the first time, recommendations for petroleum bitumens by traffic categories were established as a result of tests according to the Superpave system. The standard physico-mechanical and rheological characteristics of bitumens BND 70/100 and BND 100/130 before and after aging are determined. Bitumen BND 70/100 has a higher upper critical temperature before and after aging compared to bitumen BND 100/130, which confirms its rigidity and better rutting resistance at higher temperatures. Multiple Stress Creep Recovery tests showed that bitumen BND 100/130 demonstrates better rutting resistance characteristics and lower sensitivity to load changes compared to bitumen BND 70/100. Bitumen BND 70/100 has an index of non-recoverable creep compliance at a load of 3.2 kPa equal to 1.0931 kPa⁻¹, corresponds to the “H” marking and is recommended for intensive traffic. Bitumen BND 100/130 has this indicator equal to 0.8158 kPa⁻¹, corresponds to the marking “V” and is recommended for very intensive traffic.

Keywords: petroleum bitumen, rheological characteristics, Superpave system, aging, deformation.

Сведения об авторах

Е.К. Онгарбаев — профессор кафедры химической физики и материаловедения КазНУ им. аль-Фараби

E-mail: erdos.ongarbaev@kaznu.kz

ORCID 0000-0002-0418-9360

А.Б. Жамболова — ведущий научный сотрудник лаборатории нефтехимических процессов Института проблем горения

E-mail: zhambolova.ainur@mail.ru

ORCID 0009-0003-1680-5452

А.Р. Кенжегалиева — научный сотрудник лаборатории нефтехимических процессов Института проблем горения

E-mail: aleka4204@mail.ru

ORCID 0009-0002-8938-652X