

ХИМИЯ

УДК 665.775.4

DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_3_5

**Р. Р. Ахметзянов, А. Ф. Кемалов, К. И. Додоев,
Р. А. Кемалов**

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНО-БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ НЕОКИСЛЕННОГО ОСТАТОЧНОГО НЕФТЯНОГО СЫРЬЯ ПО МЕТОДУ PERFORMANCE GRADE

Ключевые слова: Полимерно-битумное вяжущее, ПБВ, полимер, СБС, нефтяной остаток, Superpave, PG.

Система проектирования асфальтобетонных смесей Superpave, получившая широкое распространение во многих странах мира, подтвердила свою эффективность в дорожном строительстве и заняла достойное место среди других систем проектирования, в том числе в России. Учет климатических условий и транспортных нагрузок при проектировании асфальтобетонных смесей и определение фундаментальных реологических характеристик вяжущих является уникальной особенностью данной системы, которая основывается на не существовавших ранее в России концепциях. В этой связи были проведены исследования физико-механических характеристик полимерно-битумных вяжущих (ПБВ), полученных на основе неокисленных нефтяных остатков (гудронов), по методу PG, определено влияние содержания блоксополимера типа СБС в составе ПБВ и свойств исходных нефтяных остатков на определяемые характеристики. В ходе проведенных исследований были выявлены закономерности изменения физико-механических характеристик от содержания полимера и свойств исходных нефтяных остатков. Полученные результаты исследований свидетельствуют о том, что с увеличением содержания полимера сдвиговая и низкотемпературная устойчивость ПБВ увеличивается, при этом усталостная устойчивость носит довольно сложный характер изменения. ПБВ, полученные на более вязком нефтяном остатке, характеризуются более высокими высокотемпературными характеристиками, тогда как ПБВ, полученные на менее вязком остаточном сырье, характеризуются более высокой усталостной и низкотемпературной устойчивостью. Получение ПБВ по ГОСТ Р 58400.1-2019 с удовлетворительными характеристиками достигается при содержании полимера в составе ПБВ более 4 % мас. При содержании полимера в составе ПБВ, полученных с использованием различных гудронов, в количестве 5 % мас. свойства ПБВ соответствуют маркам PG 70-28 и PG 64-34. Результаты проведенных исследований позволяют сделать выводы о том, что технология получения ПБВ, основанное на использовании в качестве исходного сырья нефтяного гудрона является вполне приемлемой и эффективной технологией производства ПБВ.

**R. R. Akhmetzyanov, A. F. Kemalov, K. I. Dodoev,
R. A. Kemalov**

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF POLYMER-MODIFIED BITUMENS BASED ON NON-OXIDIZED RESIDUAL PETROLEUM RAW MATERIALS USING THE PERFORMANCE GRADE METHOD

Keywords: Polymer-modified bitumens, PMB, polymer, SBS, petroleum residue, Superpave, PG.

The Superpave asphalt concrete mix design system, which has become widespread in many countries around the world, has proven its effectiveness in road construction and has taken a worthy place among other design systems, including in Russia. Consideration of climatic conditions and transport loads in the design of asphalt concrete mixtures and the determination of the fundamental rheological characteristics of binders is a unique feature of this system, which is based on concepts that did not exist before in Russia. In this regard, studies of the physico-mechanical characteristics of polymer modified bitumens (PMBs) obtained on the basis of non-oxidized oil residues (tar) were carried out using the PG method, the influence of the content of SBS-type block copolymer in PMBs and the properties of the initial oil residues on the determined characteristics was determined. In the course of the research, patterns of changes in physical and mechanical characteristics from the polymer content and properties of the original oil residues were identified. The obtained research results indicate that with an increase in the polymer content, the shear and low-temperature stability of PMB increases, while fatigue resistance has a rather complex character of change. PMBs obtained with more viscous oil residue are characterized by higher high-temperature characteristics, while PMBs obtained with less viscous residual raw materials are characterized by higher fatigue and low-temperature resistance. Obtaining PMB according to GOST R 58400.1-2019 with satisfactory characteristics is achieved when the polymer content in PMB is more than 4% by weight. When the polymer content in the composition of PMBs obtained using various tar is 5% by weight, the properties of PMBs correspond to grades PG 70-28 and PG 64-34. The results of the conducted research allow us to conclude that the technology of obtaining PMB, based on the use of petroleum tar as a feedstock, is a completely acceptable and effective technology for the production of PMB.

Введение

Нормативно-техническая документация претерпевает постоянное изменение в различных

областях регулирования. Техническим специалистам требуется непрерывно отслеживать изменения в мире и оперативно реагировать на сложившиеся перед ними обстоятельства. Итогом множества

принятых решений не редко происходит обновление действующих технических требований к качеству товарного продукта или к производственному процессу, а в отдельных случаях введение новых, не существовавших ранее, стандартов.

Дорожная отрасль не является исключением в данном вопросе. Дорожная нормативно-техническая документация от начала становления отрасли до сегодняшнего дня подвергалась непрерывному преобразованию. В недавнем времени в России была впервые введена разработанная учеными из США система объемно-функционального проектирования асфальтобетонных смесей SuperPave, положительно проявившая себя во многих странах мира [1,2]. Данная система была призвана решить проблемы, сложившиеся в дорожном строительстве. К ним относятся: постоянная деформация, связанная с низкой сдвигоустойчивостью асфальтобетона при положительных температурах, и низкотемпературные разрушения, образующиеся вследствие низкотемпературного сжатия асфальтобетона до критических напряжений, вызывающих разрушение [3,4].

Уникальной особенностью данной системы является подбор и испытание битумного вяжущего по методу Performance Grade (PG). Выбор вяжущего для строительства асфальтобетона осуществляется по ГОСТ 58400.3-2019 и связан с климатическими условиями и транспортными нагрузками в регионе укладки [5], что в корне отличается от существовавших ранее стандартов к битумам и полимерно-битумным вяжущим (ПБВ). В основе методов испытаний, обозначенными в ГОСТ 58400.1-2019 и 58400.2-2019, лежит измерение фундаментальных механических характеристик вяжущего: вязкость, модуль сдвига, фазовый угол и т.д., в отличие от традиционных методов испытаний, содержащихся в ГОСТ 33133-2014 и ГОСТ 52056-2003, по которым осуществляется определение эмпирических механических показателей, не отвечающих фактическим условиям работы вяжущего в составе дорожного покрытия [6]. Метод PG распространяется на модифицированные и немодифицированные вяжущие, требования к показателям и методы испытания для них идентичны.

ПБВ, испытанные по методу PG, характеризуются высокими физико-механическими характеристиками и обладают широким температурным диапазоном эксплуатации и, в отличие от немодифицированных битумов, способны соответствовать любым климатическим условиям и транспортным нагрузкам региона укладки асфальтобетона [7]. Качество битумного вяжущего, содержание и природа пластификатора и полимера безусловно влияют на конечные характеристики ПБВ, определенных по методу PG. В соответствие с этим представляет практический интерес замена битумного вяжущего, являющегося вяжущей основой ПБВ, на вакуумный нефтяной остаток перегонки мазута – гудрона, и определение физико-механических характеристик полученных

СБС-модифицированных полимерно-битумных вяжущих по методу PG.

Вакуумный нефтяной остаток – гудрон, является сырьем для производства битума, исходя из данного обстоятельства, капитальные и эксплуатационные затраты на производство гудрона ниже, чем на производство окисленного битума, что положительно скажется на экономике производства ПБВ. С точки зрения экологической безопасности применение гудрона взамен окисленного битума имеет ряд существенных преимуществ: исключение побочных продуктов жидкофазного окисления – «чёрного соляра» и газов окисления. К преимуществам можно так же отнести высокую пластичность гудрона, в данном случае применение пластификатора, вносящего немалый вклад в конечную стоимость ПБВ, не оправдано.

С учётом вышеизложенного, в работе ставилась задача проведения исследования по получению ПБВ по требованию ГОСТ 58400.1-2019 с использованием гудрона в качестве вяжущего и линейного блоксополимера типа СБС в качестве полимерного модификатора. Установить взаимосвязь физико-химических свойств исходных гудронов и содержания полимера с физико-механическими характеристиками ПБВ и определить конечные PG марки ПБВ.

Материалы и методы исследования

В работе были использованы образцы гудронов-1 и -2 производства АО «ТАНЕКО». Физико-механические характеристики исходных образцов гудронов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики гудронов-1 и -2

Table 1 – Physical and mechanical characteristics of tar sands-1 and -2

№	Наименование показателя	Фактические показатели	
		Гудрон-1	Гудрон-2
1	Условная вязкость при 80 °С, с	451	231
2	Температура размягчения по кольцу и шар, °С	38	31,4
3	Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм	132	236
4	Температура хрупкости по Фраасу, °С	-19	-28
5	Температура вспышки, °С	Выше 290	Выше 270

Как видно из результатов определения физико-механических характеристик, гудрон-1 обладает более высокой вязкостью, чем гудрон-2, о чем свидетельствует более высокая температура

размягчения, динамическая вязкость и более низкая глубина проникания иглы.

В работе был использован линейный блоксополимер типа СБС марки СБС-330 Л производства ПАО «Нижнекамскнефтехим», регламентированный ТУ 20.17.10-214-05766801-2020. Блоксополимер типа СБС наиболее успешно зарекомендовал себя в качестве полимерного модификатора битумов среди всех существующих полимеров за счет более высокого потенциала модифицирования. С учетом результатов предшествующих исследований был выбран полимер линейной структуры по причине более легкой растворимости полимеров линейной структуры в вяжущем [8] и придания получаемому ПБВ наиболее высоких низкотемпературных свойств [9].

Методика приготовления образцов ПБВ

В обогреваемую металлическую емкость с термодатчиком регулятором и мешалкой со скоростью вращения 300-400 об/мин. помещали в заданном количестве предварительно нагретый до 150 °С образец гудрона и продолжали нагрев до 160-180 °С. По достижению заданной температуры в кубе порционно вводили гранулированный полимер. Перемешивание осуществляли до полной однородности смеси. Через сливной кран выгружали продукт и подвергали анализам.

Испытание образцов ПБВ методами, включенные в ГОСТ 58400.1-2019.

Результаты и их обсуждение

Физико-механические свойства образцов ПБВ, полученных на основе обоих образцов гудрона, с различным содержанием полимера в составе вяжущего представлены на рис. 1-4.

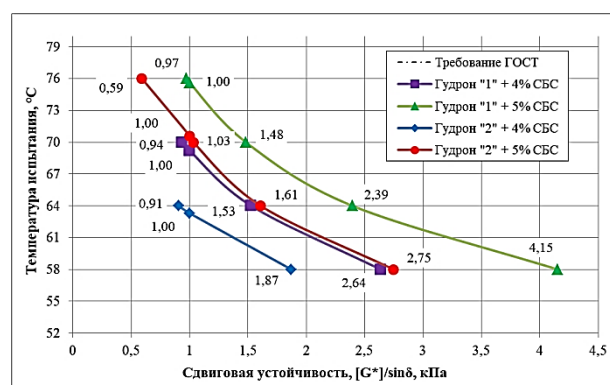


Рис. 1 – Сдвиговая устойчивость ПБВ с различным содержанием полимера в составе при заданных температурах испытания

Fig. 1 – Shear stability of PMB with different polymer content in the composition at given test temperatures

Представленные на рис. 1 результаты определения сдвиговой устойчивости ПБВ при различных температурах испытания демонстрируют увеличение значения данного показателя с увеличением содержания полимера. Данное обстоятельство положительно сказывается на теплостойкости вяжущего, вяжущее становится

более вязким, твердым и менее пластичным при положительных температурах, следовательно, асфальтобетонное покрытие становится менее подверженным сдвиговым деформациям (наплывы, колеи) [10,11]. Сдвиговая устойчивость ПБВ на основе более вязкого гудрона принимает более высокие значения, вязкость исходных образцов гудронов вносит существенный вклад в итоговое значение данного показателя. Первые верхние значения марок ПБВ на основе гудрона-1 при содержании полимера в количестве 4 и 5 % мас. составляют 64 и 70 °С соответственно, для ПБВ на основе гудрона-2 составляют 58 и 70 °С.

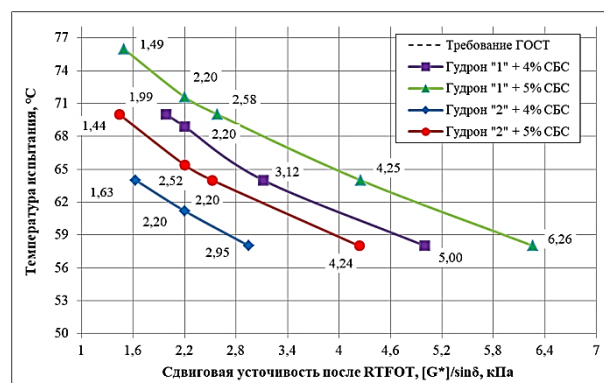


Рис. 2 – Сдвиговая устойчивость состаренных по методу RTFOT ПБВ с различным содержанием полимера в составе при заданных температурах испытания

Fig. 2 – Shear stability of RTFOT aged PMB with different polymer content in the composition at given test temperatures

Сдвиговая устойчивость ПБВ, состаренных по методу RTFOT, выше сдвиговой устойчивости исходных образцов ПБВ в 1,5-2 раза, о чем свидетельствуют представленные на рис. 2 результаты определения сдвиговой устойчивости ПБВ, состаренных по методу RTFOT, при различных температурах испытания. Данное явление указывает на умеренную стойкость ПБВ на основе гудронов к кратковременному термоокислительному старению, происходящего во время технологических операций по приготовлению и транспортировке асфальтобетонных смесей [12,13]. Критическая температура, при которой состаренное ПБВ удовлетворяет требованиям стандарта по сдвиговой устойчивости, чуть ниже, чем у исходного ПБВ. В соответствии с методом PG вяжущее должно повысить свою сдвиговую устойчивость минимум в 2,2 раза, чтобы подтвердить верхнее значение марки, полученное при испытании исходного вяжущего [14]. В связи с чем как низкая, так и высокая склонность вяжущего к технологическому старению является отрицательной характеристикой. Вторые верхние значения марок ПБВ на основе гудрона-1 при содержании полимера в количестве 4 и 5 % мас. составляют 64 и 70 °С соответственно, для ПБВ на основе гудрона-2 составляют 58 и 64 °С. Данные значения являются окончательными.

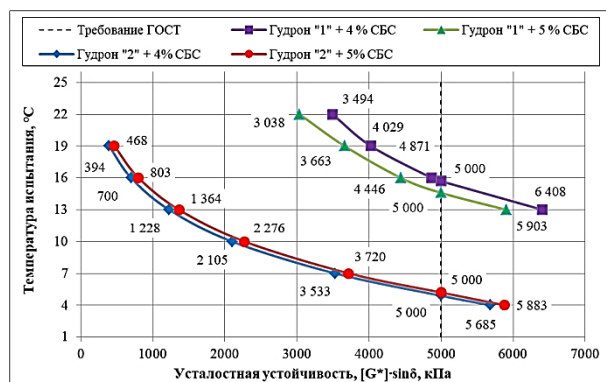


Рис. 3 – Усталостная устойчивость ПБВ с различным содержанием полимера в составе при заданных температурах испытания

Fig. 3 – Fatigue resistance of PMB with different polymer content in the composition at given test temperatures

Представленные на рис. 3 результаты по определению усталостной устойчивости демонстрируют отсутствие зависимости изменения данного показателя с увеличением содержания полимера в составе ПБВ. Для ПБВ на основе гудрона-1 значения усталостной устойчивости увеличивается с ростом содержания полимера, а для ПБВ на основе гудрона-2 зависимость имеет противоположный характер. Однако можно с уверенностью подтвердить, что влияние полимера на данный показатель незначительна, так как значения данного показателя при различном содержании полимера в ПБВ различаются несущественно.

Усталостная устойчивость характеризует способность вяжущего сопротивляться усталостному растрескиванию и определяется после состаривания вяжущего последовательно методами RTFOT и PAV. Метод PAV моделирует долгосрочное старение вяжущего, происходящего во время эксплуатации асфальтобетонного покрытия при воздействии окружающей среды [15,16]. Исходя из условий испытания вяжущего на усталостную устойчивость сущность данного испытания заключается в способности вяжущего после технологического и эксплуатационного старения не переходить в чрезмерно твердое и жесткое состояние, а сохранять способность к релаксации возникающих напряжений, чтобы не вызвать разрушения асфальтобетонного покрытия под транспортными нагрузками.

Усталостная устойчивость ПБВ на основе менее вязкого гудрона принимает более высокие значения – чем менее вязкий гудрон, тем более высокую устойчивость имеет ПБВ к усталостному растрескиванию. Усталостная устойчивость ПБВ на основе гудронов-1 и -2 составляет 7 °C и 16 °C соответственно. Определенные по табл. 1 ГОСТ 58400.1-2019 первые предварительные нижние значения марок ПБВ, полученных на основе гудронов-1 и -2, составляют – 40 °C.

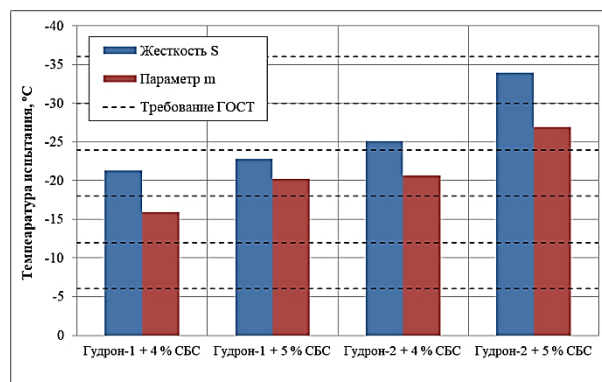


Рис. 4 – Низкотемпературная устойчивость, определенная на реометре динамического сдвига, ПБВ, полученных на основе гудронов, с различным содержанием полимера

Fig. 4 – Low-temperature stability, determined on a dynamic shear rheometer, of PMBs derived from tar sands with different polymer contents

Представленные на рис. 4 результаты по определению низкотемпературной устойчивости ПБВ демонстрируют улучшение данного показателя с увеличением содержания полимера в составе ПБВ. Низкотемпературная устойчивость характеризует способность вяжущего сопротивляться низкотемпературному растрескиванию, происходящего в зимний период времени, и определяется после старения вяжущего последовательно методами RTFOT и PAV. Сущность испытания вяжущего на низкотемпературную устойчивость заключается в том, чтобы вяжущее после технологического и эксплуатационного старения не становилось чрезмерно жестким при отрицательных температурах, показатель жесткости S не должен принимать значения более 300 МПа, сохраняло способность к релаксации напряжений при воздействии нагрузок на вяжущее, безразмерный параметр m должен принимать значения не менее 0,3 [17]. С увеличением содержания полимера, вероятно, снижается жесткость ПБВ и растет скорость релаксации напряжений в ПБВ при отрицательных температурах.

На рисунке показаны критические температуры, при которых значения параметров S и m принимают 300 МПа и 0,3 соответственно. Низкотемпературная устойчивость ПБВ на основе менее вязкого гудрона принимает более высокие значения – чем менее вязкий гудрон, тем более высокую устойчивость имеет ПБВ к низкотемпературному растрескиванию. Низкотемпературная устойчивость ПБВ на основе гудрона-1 при содержании полимера 4 и 5 % мас. составляет - 12 °C и -18 °C соответственно, для ПБВ на основе гудрона-2 составляет - 18 °C и - 24 °C. Определенные по табл. 1 ГОСТ 58400.1-2019 вторые нижние значения марок ПБВ на основе гудрона-1 составляют - 22 и - 28 °C, для ПБВ на основе гудрона-2 составляют - 28 °C и - 34 °C и становятся окончательными, поскольку принимают наибольшие значения.

Таблица 2 - Физико-механические характеристики ПБВ, полученных на основе гудрона-1

Table 2 - Physical and mechanical characteristics of PMB produced on the basis of tar-1

Наименование показателя		Требования ГОСТ Р 58400.1 - 2019	Фактическое значение (Гудрон-1 – 95 % мас. + Полимер – 5 % мас.	Фактическое значение (Гудрон-1 – 96 % мас. + Полимер – 4 % мас.)
Показатели качества и требования для исходного битумного вяжущего				
Температура вспышки, °С		не ниже 230 °С	>270	> 270
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с		не более 3 Па·с	0,88	0,75
Сдвиговая устойчивость при 10 рад/с, кПа	При 64 °С	$G^*/\sin\delta \geq 1,0$ кПа	2,39	1,53
	При 70 °С		1,48	0,94
	При 76 °С		0,97	-
Критическая высокая температура, ($G^*/\sin\delta = 1,0$ кПа), °С			75,6	69,2
Показатели качества и требования для битумного вяжущего, состаренного по методу RTFOT				
Изменение массы после старения, %		не более 1 %	0,1	0,12
Сдвиговая устойчивость после старения при 10 рад/с, кПа	При 64 °С	$G^*/\sin\delta \geq 2,2$ кПа	4,25	3,12
	При 70 °С		2,58	1,99
	При 76 °С		1,49	-
Критическая высокая температура, ($G^*/\sin\delta = 2,2$ кПа), °С			71,6	68,9
Показатели качества и требования для битумного вяжущего, подготовленного по методу PAV				
Усталостная устойчивость после старения при 10 рад/с, кПа	При 16 °С	$G^*\cdot\sin\delta < 5000$ кПа	4446,32	4871,48
	При 13 °С		5902,87	6408,15
Критическая средняя температура, ($G^*\cdot\sin\delta = 5000$ кПа), °С			14,6	15,7
Низкотемпературная устойчивость жесткость S (60) ползучесть m	При - 14 °С	S (60) не более 300 МПа	186,2	221,4
		m не менее 0,300	0,341	0,315
	При - 18 °С	S (60) не более 300 МПа	246,7	272,3
		m не менее 0,300	0,312	0,284
Критическая низкая температура, °С, по жесткости S			-22,8	-21,3
Критическая низкая температура, °С, по параметру m			-20,2	-16,0
Фактическая марка			71,6-30,2	68,9-26
Марка PG по ГОСТ Р 54800.1-2019			PG 70-28	PG 64-22

В таблице 2 и 3 приведен полный комплекс определенных по ГОСТ 58400.1-2019 физико-механических характеристик исследуемых ПБВ. Как видно из результатов определения характеристик, свойства ПБВ на основе гудрона-1 с содержанием полимера 4 и 5 % мас. соответствуют маркам PG 64-22 и PG 70-28 соответственно, свойства ПБВ на основе гудрона-2 с содержанием полимера 4 и 5 % мас. соответствуют маркам PG 58-28 и PG 64-34 соответственно. Из данных результатов можно сделать вывод, что чем более вязкий гудрон, тем более высокими высокотемпературными свойствами характеризуется ПБВ, однако, чем менее вязкий гудрон, тем более высокими низкотемпературными свойствами обладает ПБВ. Удовлетворительные результаты достигаются при содержании полимера в составе ПБВ от 5 % мас., при содержании полимера ниже 5 % мас. ПБВ обладает низкими характеристиками, что подтверждается результатами исследования. Получение ПБВ с высокими

характеристиками, то есть с более широким температурным диапазоном эксплуатации (свыше 98 °С), гипотетически возможно, но при содержании полимера свыше 5 % мас., что на первый взгляд выглядит нерационально.

Заключение

1. Проведены исследования по оценке возможности применения гудрона в качестве аналога окисленным и компаундированным битумам дорожного назначения. Определены физико-механические характеристики ПБВ по ГОСТ 58400.1-2019, полученных на основе нефтяных остатков (гудронов), различавшихся друг от друга по физико-механическим характеристикам, при различном содержании полимера в составе ПБВ.

2. В ходе исследований выявлен ряд закономерностей изменений физико-механических характеристик ПБВ от содержания полимера в

составе вяжущего. Было обнаружено, что с увеличением содержания полимера в составе ПБВ сдвиговая и низкотемпературная устойчивость ПБВ увеличивается, но незначительно ухудшается усталостная устойчивость.

3. Свойства ПБВ на основе гудрона-1 с содержанием полимера 4 и 5 % мас. соответствуют

маркам PG 64-22 и PG 70-28 соответственно, свойства ПБВ на основе гудрона-2 с содержанием полимера 4 и 5 % мас. соответствуют маркам PG 58-28 и PG 64-34. Чем более вязкий гудрон, тем более высокими высокотемпературными свойствами характеризуется ПБВ, однако обладает более низкими низкотемпературными свойствами.

Таблица 3 – Физико-механические характеристики ПБВ, полученных на основе гудрона-2

Table 3 - Physical and mechanical characteristics of PMB produced on the basis of tar-2

Наименование показателя		Требования ГОСТ Р 58400.1 - 2019	Фактическое значение (Гудрон-2 – 95 % мас. + Полимер – 5 % мас.	Фактическое значение (Гудрон-2 – 96 % мас. + Полимер – 4 % мас.)
Показатели качества и требования для исходного битумного вяжущего				
Температура вспышки, °С		не ниже 230 °С	>270	> 270
Динамическая вязкость при 135 °С, Па·с		не более 3 Па·с	0,61	0,53
Сдвиговая устойчивость при 10 рад/с, кПа	При 58 °С	$G^*/\sin\delta \geq 1,0$ кПа	2,75	1,87
	При 64 °С		1,61	0,91
	При 70 °С		1,03	-
	При 76 °С		0,59	-
Критическая высокая температура, ($G^*/\sin\delta = 1,0$ кПа), °С			70,6	63,3
Показатели качества и требования для битумного вяжущего, состаренного по методу RTFOT				
Изменение массы после старения, %		не более 1 %	0,09	0,1
Сдвиговая устойчивость после старения при 10 рад/с, кПа	При 58 °С	$G^*/\sin\delta \geq 2,2$ кПа	4,24	2,95
	При 64 °С		2,52	1,63
	При 70 °С		1,44	-
Критическая высокая температура, ($G^*/\sin\delta = 2,2$ кПа), °С			65,4	61,2
Показатели качества и требования для битумного вяжущего, подготовленного по методу PAV				
Усталостная устойчивость после старения при 10 рад/с, кПа	При 7 °С	$G^*\cdot\sin\delta < 5000$ кПа	3719,52	3533,1
	При 4 °С		5883,19	5684,65
Критическая средняя температура, ($G^*\cdot\sin\delta = 5000$ кПа), °С			5,2	4,9
Низкотемпературная устойчивость жесткость S (60) ползучесть m	При - 18 °С	S (60) не более 300 МПа	115	192,8
		m не менее 0,300	0,349	0,354
	При - 24 °С	S (60) не более 300 МПа	164,8	270,4
		m не менее 0,300	0,316	0,233
Критическая низкая температура, °С, по жесткости S			-34,0	-25,2
Критическая низкая температура, °С, по параметру m			-27,0	-20,7
Фактическая марка PG			65,4-37	61,2-30,7
Марка PG по ГОСТ Р 54800.1-2019			PG 64-34	PG 58-28

Литература

1. П.М. Тюкилина, В.В. Поздняков, А.А. Андреев, А.Г. Егоров, А.А. Гуреев, Р.Е. Соловьев, А.В. Харпаев, *Башкирский химический журнал*, **28**, 4, 44-55 (2021). DOI: 10.17122/bcj-2021-4-44-55.
2. С.В. Привезенцева, А.Ф. Иванов, *Вестник МГСУ*, **18**, 8, 1179-1185 (2023). DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1179-1185.
3. А.И. Траутвайн, А.Е. Акимов, В.П. Денисов, М.В. Лашин, *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, **3**, 8-14 (2019). DOI: 10.34031/article_5ca1f62f6b9a09.67742444
4. N. Lotfi Omran, K. Rajaei, S.M. Marandi, *Magazine of Civil Engineering*, **113**, 5, Article 11309 (2022). DOI: 10.34910/MCE.113.9.
5. Н.А. Страхова, З.С. Исраилова, *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*, **1**, 5, 234-238 (2018).
6. П.М. Тюкилина. Дисс. докт. техн. наук, ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Москва, 2021. 527 с.
7. У.Г. Зверева. Дисс. канд. хим. наук, Ин-т хим. физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, 2016. 149 с.
8. В.Д. Галдина Модифицированные битумы: учебное пособие. СибАДИ, Омск, 2009. 228 с.

9. Е.И. Лесик, С.С. Косицына, В.А. Сафин, Ф.А. Бурюкин, Южно-сибирский научный вестник, **48**, 2, 139-145 (2023). DOI: 10.25699/SSSB.2023.48.2.015.
10. H. Fazaeli, H. Behbahani, A.A. Amini, J. Rahmani, G. Yadollahi, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2012**, Article 406791 (2012). DOI: 10.1155/2012/406791.
11. G. Garedew, *Magazine of Civil Engineering*, **103**, 3, Article 10304 (2021). DOI: 10.34910/MCE.103.4.
12. C. Chen, J.H. Podolsky, N. Hernandez, A. Hohmann, R.C. Williams, E.W. Cochran, *Transportation Research Procedia*, **14**, 3592–3600 (2016). DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.427.
13. B.B. Teltayev, C.O. Rossi, S. Ashimova, *Magazine of Civil Engineering*, **81**, 5, 93–101 (2018). DOI: 10.18720/MCE.81.10.
14. И.В. Пискунов, И.М. Рожков, А.В. Харпаев, *Дороги. Инновации в строительстве*, **96**, 56-62 (2024).
15. O. Sirin, D.K. Paul, E. Kassem, *Advances in Civil Engineering*, **2018**, Article 3428961 (2018). DOI: 10.1155/2018/3428961.
16. J. Mirwald, S. Werkovits, I. Camargo, D. Maschauer, B. Hofko, H. Grothe, *Construction and Building Materials*, **258**, Article 119577 (2020). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119577.
17. Н.И. Брызгалов, А.Ф. Кемалов, *Вестник СибАДИ*, **20**, 2, 278-290 (2023). DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-2-278-290.
4. N. Lotfi Omran, K. Rajaei, S.M. Marandi, *Magazine of Civil Engineering*, **113**, 5, Article 11309 (2022). DOI: 10.34910/MCE.113.9.
5. N.A. Strakhova, Z.S. Israilova, *Mezhdunarodnyj zhurnal humanitarnykh i estestvennykh nauk*, **1**, 5, 234-238 (2018).
6. P.M. Tyukilina. Diss. dokt. tekhn. nauk, FGAOU VO «RGU nefti i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina», Moskva, 2021. 527 p.
7. U.G. Zvereva. Diss. kand. khim. nauk, In-t khim. fiziki im. N.N. Semenova RAN, Moskva, 2016. 149 p.
8. V.D. Galdina *Modificirovannye bitумы: uchebnoe posobie*. SiBADI, Omsk, 2009. 228 p.
9. E.I. Lesik, S.S. Kosicyna, V.A. Safin, F.A. Buryukin, *Yuzhno-sibirskij nauchnyj vestnik*, **48**, 2, 139-145 (2023). DOI: 10.25699/SSSB.2023.48.2.015.
10. H. Fazaeli, H. Behbahani, A.A. Amini, J. Rahmani, G. Yadollahi, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2012**, Article 406791 (2012). DOI: 10.1155/2012/406791.
11. G. Garedew, *Magazine of Civil Engineering*, **103**, 3, Article 10304 (2021). DOI: 10.34910/MCE.103.4.
12. C. Chen, J.H. Podolsky, N. Hernandez, A. Hohmann, R.C. Williams, E.W. Cochran, *Transportation Research Procedia*, **14**, 3592–3600 (2016). DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.427.
13. B.B. Teltayev, C.O. Rossi, S. Ashimova, *Magazine of Civil Engineering*, **81**, 5, 93–101 (2018). DOI: 10.18720/MCE.81.10.
14. I.V. Piskunov, I.M. Rozhkov, A.V. Kharpaev, *Dorogi. Innovacii v stroitel'stve*, **96**, 56-62 (2024).
15. O. Sirin, D.K. Paul, E. Kassem, *Advances in Civil Engineering*, **2018**, Article 3428961 (2018). DOI: 10.1155/2018/3428961.
16. J. Mirwald, S. Werkovits, I. Camargo, D. Maschauer, B. Hofko, H. Grothe, *Construction and Building Materials*, **258**, Article 119577 (2020). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119577.
17. N.I. Bryzgalov, A.F. Kemalov, *Vestnik SiBADI*, **20**, 2, 278-290 (2023). DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-2-278-290.

References

1. P.M. Tyukilina, V.V. Pozdnyakov, A.A. Andreev, A.G. Egorov, A.A. Gureev, R.E. Solov'ev, A.V. Kharpaev, *Bashkirskij khimicheskij zhurnal*, **28**, 4, 44-55 (2021). DOI: 10.17122/bcj-2021-4-44-55.
2. S.V. Privezencheva, A.F. Ivanov, *Vestnik MGSU*, **18**, 8, 1179-1185 (2023). DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1179-1185.
3. A.I. Trautvain, A.E. Akimov, V.P. Denisov, M.V. Lashin, *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, **3**, 8-14 (2019). DOI: 10.34031/article_5ca1f62f6b9a09.67742444p].

© **Р. Р. Ахметзянов** – аспирант кафедры Технологии нефти газа и углеродных материалов (ТНГУМ), Институт геологии и нефтегазовых технологий (ИГНТ), Казанский Федеральный Университет (КФУ), Казань, Россия, ra315281@gmail.com; **А. Ф. Кемалов** – д.т.н. профессор, заведующий кафедрой ТНГУМ, ИГНТ, КФУ, alim.kemalov@mail.ru; **К. И. Додоев** – главный специалист отдела анализа почвы, Министерство транспорта Республики Узбекистан, Комитет по автомобильным дорогам, Ташкент, Узбекистан, kidodoev@mail.ru; **Р. А. Кемалов** – к.т.н. доцент кафедры ТНГУМ, ИГНТ, КФУ, kemalov@mail.ru.

© **R. R. Akhmetzyanov** – PhD-student at the Department of Oil, Gas and Carbon Materials Technology (OGCM), Institute of Geology and Oil and Gas Technologies (IGOGT), Kazan Federal University (KFU), Kazan, Russia, ra315281@gmail.com; **A. F. Kemalov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the OGCM department, IGOGT, KFU, alim.kemalov@mail.ru; **K. I. Dodoev** – Chief Specialist of the Soil Analysis Department, the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan, the Committee on Highways, Tashkent, Republic of Uzbekistan, kidodoev@mail.ru; **R. A. Kemalov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the OGCM department, IGOGT, KFU, kemalov@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 12.02.25.

Дата принятия рукописи в печать – 25.02.25.