

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-140-150>

УДК 625.85.06

Сравнительный анализ изменения свойств модифицированных асфальтобетонов в зависимости от способа модификации и концентрации полимера в вяжущем

Магистр П. П. Яцевич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Широкое применение полимеров различной природы для модификации асфальтобетонных смесей ставит задачу по определению наиболее оптимального метода их введения в состав асфальтобетонной смеси. В работе рассматриваются варианты сухого введения и через предварительную модификацию битума. При этом оцениваются изменения свойств асфальтобетонов, отражающих условия работы материала в широком диапазоне температур, и учитываются технологические особенности при устройстве покрытия в зависимости от количественной концентрации полимерного модификатора в вяжущем. Исследования наглядно показали, что оптимальной для достижения высокотемпературных показателей асфальтобетонов, с точки зрения расхода полимера, является предварительная модификация битума, которая позволяет оптимизировать распространение модификатора по объему асфальтобетонной смеси. Также показано, что предпочтительными для модификации являются асфальтобетоны с высоким содержанием вяжущего, так как битум является основным компонентом взаимодействия с полимерами и, чем толще пленка битума, тем более оптимально протекает этот процесс. Кроме того, исследования показали негативное влияние относительно высокого содержания термопласта на низкотемпературные и технологические свойства асфальтобетонных смесей, которые могут приводить к снижению устойчивости асфальтобетона к коррозионным разрушениям.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, асфальтобетон, максимальная структурная прочность, водонасыщение, технологические свойства, хрупкость, концентрация полимера, термопласты, эластопласты, модификация битума, модификация асфальтобетона

Для цитирования: Яцевич, П. П. Сравнительный анализ изменения свойств модифицированных асфальтобетонов в зависимости от способа модификации и концентрации полимера в вяжущем / П. П. Яцевич // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 2. С. 140–150. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-140-150>

Comparative Analysis of Property Changes in Modified Asphalt Concretes Depending on the Modification Method and Polymer Concentration in the Binder

P. P. Yatsevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The widespread use of polymers of various types for modifying asphalt concrete mixtures poses the task of determining the most optimal method for their introduction into the composition of asphalt concrete mixtures. The study considers options for dry introduction and pre-modification of bitumen. In this context, changes in the properties of asphalt concrete that reflect the material performance in a wide range of temperature are assessed. Technological aspects during construction of the pavement are also taken into account, depending on the quantitative concentration of the polymer modifier in the binder. The research has clearly demonstrated that the optimal way to achieve high-temperature properties of asphalt concrete,

Адрес для переписки

Яцевич Павел Петрович
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 338-78-40
cniidsgm@bntu.by

Address for correspondence

Yatsevich Pavel P.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 338-78-40
cniidsgm@bntu.by

in terms of polymer consumption, is pre-modification of bitumen, which allows optimizing the distribution of the modifier throughout the volume of the asphalt concrete mixture. Additionally, the research has shown that asphalt concretes with a high binder content are preferable for modification because bitumen is the primary component in interaction with polymers, and the thicker the bitumen film, the more optimally this process occurs. In addition, the studies have revealed the negative influence of relatively high thermoplastic content on the low-temperature and technological properties of asphalt concrete mixtures, which can lead to a decrease in the resistance of asphalt concrete to corrosion damage.

Keywords: asphalt concrete mixture, asphalt concrete, maximum structural strength, water saturation, technological properties, brittleness, polymer concentration, thermoplastics, elastoplasts, bitumen modification, asphalt concrete modification

For citation: Yatsevich P. P. (2024) Comparative Analysis of Property Changes in Modified Asphalt Concretes Depending on the Modification Method and Polymer Concentration in the Binder. *Science and Technique*. 23 (2), 140–150. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-2-140-150> (in Russian)

Введение

Изменение транспортного потока (количественное и качественное в части осевых нагрузок) неминуемо приводит к возникновению дефектов уже в первый год эксплуатации покрытия улиц и дорог из асфальтобетонов, производимых на стандартных битумах, с последующим их лавинообразным распространением [1]. При выборе материалов и расчете дорожных конструкций в населенных пунктах предлагается учитывать свойства, не регламентированные нормативными документами [2, 3]. Практика показывает, что достижение требуемых при проектировании показателей невозможно с точки зрения уровней надежности [4] при использовании не модифицированных полимерами асфальтобетонных смесей.

Модификация асфальтобетонных смесей в зависимости от возможностей производителя и региона строительства может осуществляться по двум направлениям: предварительная модификация битума; сухое смешение полимера с каменным материалом непосредственно в смесительной установке по приготовлению асфальтобетонной смеси [5]. Оба метода имеют свои достоинства и недостатки с экономической и технологической точек зрения [6]. При «мокром» методе необходимо применять полимеры, которые имеют точку плавления ниже технологических температур модификации битума. И если желаемым эффектом является не только гомогенизация, но и химическое взаимодействие между полимером и функциональными группами битума [7], то следует учитывать «средство», по Гильдебранту [8]. Последний аспект также критически важен при «сухом» методе введения полимера, ведь он подразумевает значительно меньшее время воздействия катализатора химического взаимодействия, которым выступает тепловая энергия. Важным является определение количества полимера различной природы, достаточного

для успешной модификации асфальтобетонной смеси до требуемых значений свойств, учитывая их равновесность при положительных и отрицательных температурах, и соблюдение технологических условий устройства покрытия.

Методика проведения исследований

Для выполнения экспериментальных исследований с целью оптимизации ресурсной базы, сравнимости и воспроизводимости в последующем использовали стандартизированные методы. Все испытания проводили на двух типах асфальтобетонных смесей, которые могут применяться в верхних слоях дорожного покрытия [2], как наиболее уязвимые к воздействию транспортной нагрузки [9] и погоднo-климатических факторов. Это щебеночная мелкозернистая смесь типа С (ЩМС_г) и щебеночная мелкозернистая смесь типа Б (ЩМБ_г), приготовленные в соответствии с СТБ 1033 [3]. При этом обе смеси были модифицированы как отдельно термопластом и эластопластом, так и их смесью в пропорции 33/66 и 66/33 для полноты картины воздействия полимеров различной природы на свойства вяжущего.

Высокотемпературные свойства асфальтобетонов определялись на сформованных образцах асфальтобетона по показателю предела прочности при сжатии при 50 °С в соответствии с СТБ 1115 [10]. Выбор этого испытания обусловлен тем, что в отличие от приложения нагрузки по схеме Маршалла минимизировано влияние строения щебеночного каркаса и угла сдвига, по которому происходит разрушение, на результаты, а прочность всего образца с большей долей вероятности коррелируется с прочностью вяжущего, которое и является непосредственно модифицированным компонентом асфальтобетона.

Низкотемпературные свойства определялись на сформованных образцах асфальтобето-

на по показателю максимальной структурной прочности в соответствии с СТБ 1115 [10]. Максимальная структурная прочность – это максимальная прочность материала, реализуемая в широком диапазоне температур и времени нагружения [11]. Для бетонов на органических вяжущих она находится в диапазоне отрицательных температур ввиду кристаллизации структуры битума. Этот параметр наиболее наглядно демонстрирует поведение асфальтобетона при отрицательных температурах.

При модификации асфальтобетонных смесей следует учитывать также фактор удобоукладываемости [12], так как модифицированные смеси обладают повышенной жесткостью относительно немодифицированных смесей [13]. Для оценки технологических свойств асфальтобетонных смесей сравнивали значения параметра водонасыщения сформованных при одинаковом давлении и времени образцов.

В соответствии с методикой [14] минимальное количество испытаний с доверительной вероятностью 0,95 при гарантийном коэффициенте, принимаемом по функции Лапласа, для определения предела прочности на сжатие при температуре 50 °С и максимальной структурной прочности составляет по два образца, для определения показателя водонасыщения с той же доверительной вероятностью достаточно четырех образцов.

Полученный на установке суперконцентрат вводился в асфальтобетонную смесь сверх 100 % минеральной части в количестве, рассчитанном таким образом, чтобы конечное соотношение полимер/битум оставалось неизменным по сравнению со смесями, приготовленными на модифицированном битуме. Битум модифицировал-

ся 2; 4; 6 и 8 % полимера, при «сухом» методе модификатор добавлялся в смесь типа С в количестве 0,11; 0,22; 0,34 и 0,45 % сверх 100 % минеральной части, а для смеси типа Б – 0,10; 0,21; 0,31 и 0,42 % также сверх 100 % минеральной части. При таких содержаниях полимера при «сухом» методе введения модификатора происходит корреляция процентных соотношений. Ввиду большого количества испытаний исследования проводились в течение продолжительного периода времени, что привело к необходимости для каждой серии формировать стандартные образцы без содержания полимера.

Смесь щебеночная мелкозернистая типа С была подобрана на щебне фракции от 5 до 10 мм, песках из отсеков дробления РУПП «Гранит», минеральном порошке ОАО «Доломит» и битуме марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части представлен на рис. 1 и в табл. 1.

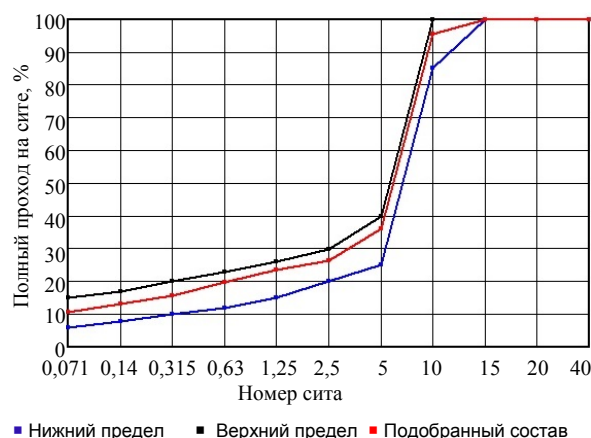


Рис. 1. Кривая гранулометрического состава

Fig. 1. Particle size distribution curve

Таблица 1

Гранулометрический состав минеральных материалов

Granulometric composition of mineral materials

Размер зерен, мм	Гранулометрический состав						Сумма, %	Полный остаток, %	Полный проход, %
	материалов			материалов в смеси					
	1	2	3	1	2	3			
10	5,87	1,35	0	4,23	0,20	0	4,43	4,43	95,57
5	80,44	9,44	0	57,92	1,42	0	59,33	63,76	36,24
2,5	8,49	24,57	0	6,11	3,69	0	9,80	73,56	26,44
1,25	1,20	14,11	0	0,86	2,12	0	2,98	76,54	23,46
0,63	0,93	17,32	2,50	0,67	2,60	0,33	3,59	80,13	19,87
0,315	0,71	20,84	4,17	0,51	3,13	0,54	4,18	84,31	15,69
0,14	0,80	7,87	5,00	0,58	1,18	0,65	2,41	86,72	13,28
0,071	1,09	3,12	10,83	0,78	0,47	1,41	2,66	89,38	10,62
<0,071	0,47	1,38	77,50	0,34	0,21	10,07	10,62	100	-

Смесь щебеночная мелкозернистая типа Б подобрана на щебне фракций от 5 до 20 мм и от 5 до 10 мм, песков из отсевов дробления РУПП «Гранит», песков природных, минерального порошка ОАО «Доломит» и битума марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части представлен на рис. 2 и в табл. 2.

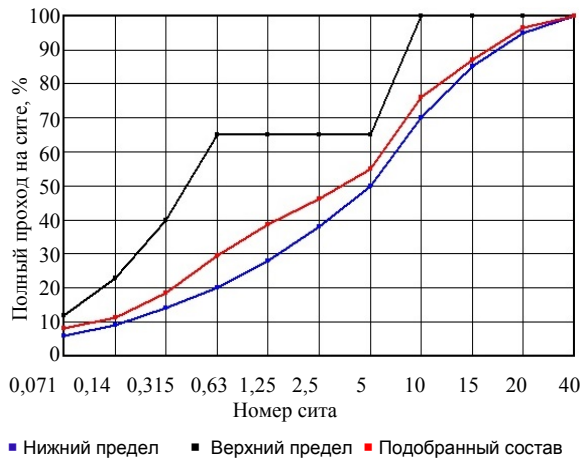


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава

Fig. 2. Particle size distribution curve

Результаты испытаний

Исследования высокотемпературных свойств асфальтобетонов показали их улучшение с ростом концентрации полимера в составе асфальтобетонной смеси. При этом у щебеночного мелкозернистого асфальтобетона типа С эти свойства имели значительно большее приращение, чем у щебеночного мелкозернистого ас-

фальтобетона типа Б. Это можно объяснить тем, что у первого содержание битума больше и, следовательно, полимер может эффективнее взаимодействовать с вяжущим, что подтверждается работой М. А. Далхата [15]. Также из результатов видно, что эффективность предварительной модификации битума значительно выше, чем при «сухом» методе. Это может быть объяснено более рациональным распределением полимера по объему смеси и высокой эффективностью, которую проявляет предварительная гомогенизация вяжущего [16]. Результаты испытаний предела прочности при сжатии при температуре 50 °С представлены на рис. 3 и в табл. 3.

Кроме того, из результатов испытаний видно, что термопласт при «сухом» методе полимеризации смеси активнее проявляется и изменяет свойства асфальтобетона, чем эластопласт. При применении для приготовления щебеночной мелкозернистой смеси типа С предварительно модифицированного битума картина меняется и эластопласт дает большее приращение свойств. Но в мелкозернистой смеси типа Б из-за значительно более тонкой пленки битума термопласт имеет доминирующую позицию в плане улучшения высокотемпературных свойств (рис. 4, табл. 4). Таким образом, исследования показывают, что при модификации смесей с малым содержанием битума эффективнее применение термопластов.

Таблица 2

Гранулометрический состав минеральных материалов

Granulometric composition of mineral materials

Размер зерен, мм	Гранулометрический состав										Сумма, %	Полный остаток, %	Полный проход, %
	материалов					материалов в смеси							
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
20	11,42	0	0	0	0	3,54	0	0	0	0	3,54	3,54	96,46
15	29,94	3,18	0	0	0	9,28	0,25	0	0	0	9,54	13,08	86,92
10	26,59	6,80	3,17	4,45	0	8,24	0,54	0,89	1,2	0	10,88	23,95	76,05
5	24,63	85,17	15,59	8,33	0	7,64	6,81	4,37	2,25	0	21,06	45,02	54,98
2,5	1,89	1,62	23,21	6,01	0	0,59	0,13	6,5	1,62	0	8,84	53,85	46,15
1,25	1,14	0,14	15,20	10,27	0	0,35	0,01	4,26	2,77	0	7,39	61,25	38,75
0,63	0,85	1,14	14,25	17,45	2,50	0,26	0,09	3,99	4,71	0,15	9,21	70,45	29,55
0,315	0,64	0,28	11,37	27,46	4,17	0,2	0,02	3,18	7,41	0,25	11,07	81,52	18,48
0,14	0,73	0,36	7,56	16,13	5,00	0,23	0,03	2,12	4,36	0,30	7,03	88,55	11,45
0,071	0,05	0,34	6,35	3,18	10,83	0,02	0,03	1,78	0,86	0,65	3,33	91,88	8,12
<0,071	2,12	0,97	3,30	6,72	77,5	0,66	0,08	0,92	1,81	4,65	8,12	100	–

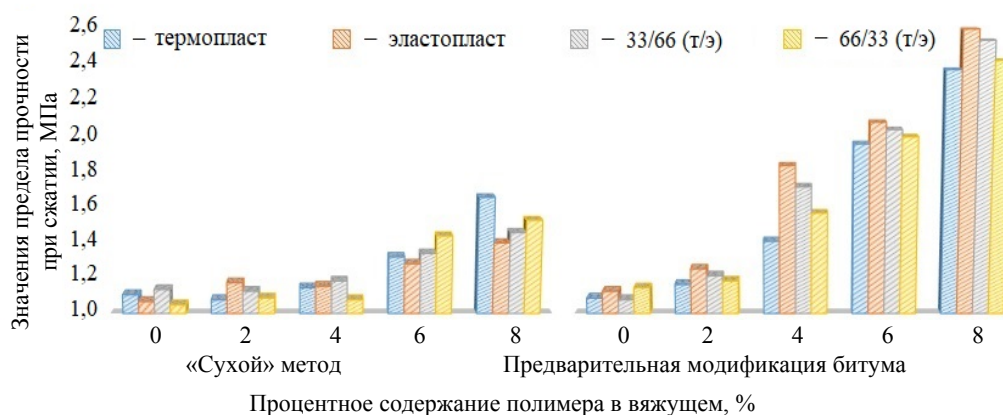


Рис. 3. Изменение предела прочности при сжатии при температуре 50 °С смеси типа С

Fig. 3. Change in compressive strength at a temperature of 50 °C of type C mixture

Таблица 3

Результаты испытаний предела прочности при сжатии при температуре 50 °С щебеночной мелкозернистой смеси типа С
Results of tests of compressive strength of crushed stone fine-grained mixture of type C at a temperature of 50 °C

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь	Тип полимера	Значения показателя предела прочности при сжатии в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, МПа				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
«Сухой» метод	Термопласт	1,11	1,08	1,15	1,33	1,67
	Эластопласт	1,07	1,18	1,16	1,29	1,41
	33/66 (Т/Э)	1,14	1,13	1,19	1,35	1,47
	66/33 (Т/Э)	1,05	1,09	1,08	1,45	1,54
Предварительная модификация битума	Термопласт	1,09	1,17	1,42	1,97	2,38
	Эластопласт	1,13	1,26	1,85	2,09	2,67
	33/66 (Т/Э)	1,08	1,22	1,73	2,05	2,54
	66/33 (Т/Э)	1,15	1,19	1,58	2,01	2,43

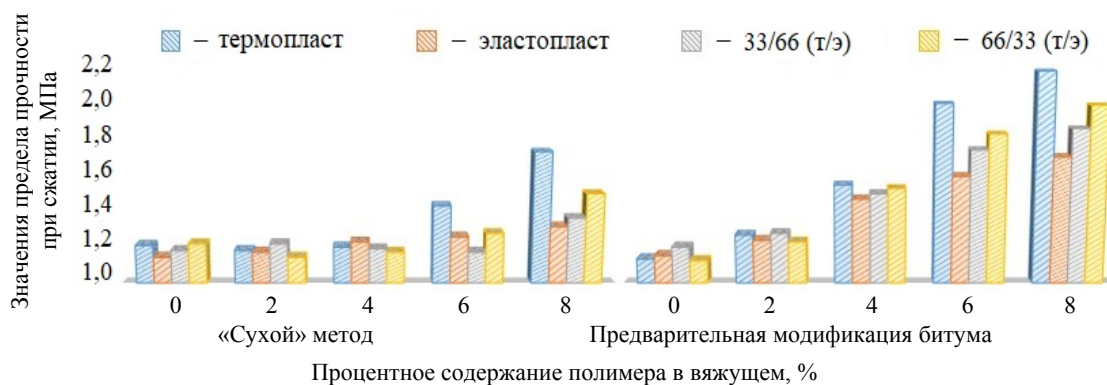


Рис. 4. Изменение предела прочности при сжатии при температуре 50 °С смеси типа Б

Fig. 4. Change in compressive strength at a temperature of 50 °C of type B mixture

Результаты испытаний предела прочности при сжатии при температуре 50 °С
щебеночной мелкозернистой смеси типа Б

Results of tests of compressive strength of crushed stone fine-grained mixture of type B
at a temperature of 50 °C

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь	Тип полимера	Значения показателя предела прочности при сжатии в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, МПа				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
«Сухой» метод	Термопласт	1,22	1,19	1,21	1,45	1,76
	Эластопласт	1,15	1,18	1,24	1,27	1,33
	33/66 (Т/Э)	1,19	1,23	1,20	1,18	1,38
	66/33 (Т/Э)	1,23	1,15	1,18	1,29	1,52
Предварительная модификация битума	Термопласт	1,14	1,28	1,57	2,03	2,21
	Эластопласт	1,16	1,25	1,49	1,62	1,73
	33/66 (Т/Э)	1,21	1,29	1,52	1,77	1,89
	66/33 (Т/Э)	1,13	1,24	1,55	1,86	2,02

При сопоставлении результатов исследований предела прочности при сжатии смесей типов С и Б, модифицированных термопластами и эластопластами при обоих методах модифи-

кации, установлено, что при «сухом» методе требуется значительно больше полимера для достижения того же эффекта от применения (рис. 5).

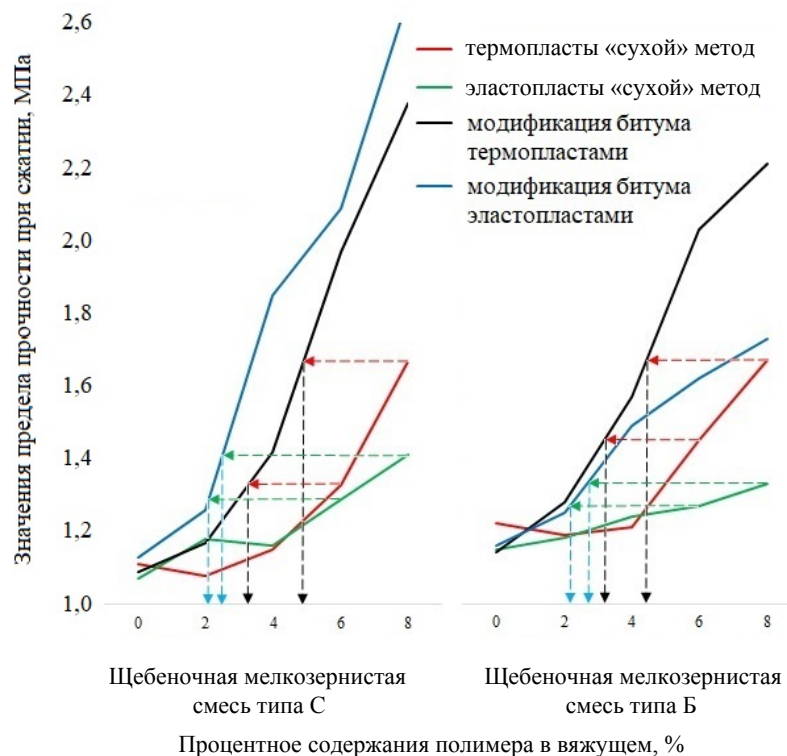


Рис. 5. Соотношение содержания полимера при различных способах модификации смеси

Fig. 5. Ratio of polymer content for various methods of mixture modifying

Результаты определения максимальной структурной прочности щебеночной мелкозернистой смеси типа С (табл. 5) демонстрируют аналогичные приращения свойств, а именно большую эффективность введения полимеров через предварительную модификацию битума, чем при «сухом» методе (рис. 6). При этом наблюдается снижение значений показателя при любом методе модификации при увеличении концентрации термопластов, что свидетельствует о том, что происходит негативное изменение вяжущего с приданием ему хрупких свойств [17].

Исследование максимальной структурной прочности щебеночного мелкозернистого асфальтобетона типа Б показало, что при «сухом» методе введения полимера в состав смеси практически не происходит изменений (табл. 6, рис. 7). Таким образом, можно сделать вывод, что для модификации асфальтобетона критическое значение имеет достаточность битума, который взаимодействует с полимером и раскрывает его потенциал влияния на свойства материала. Кроме того, при методе первоначальной модификации битума термопластами также происходит снижение значений максимальной структурной прочности.

Таблица 5

Максимальная структурная прочность щебеночной мелкозернистой смеси типа С
Maximum structural strength of crushed stone fine-grained mixture of type C

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь	Тип полимера	Значения показателя максимальной структурной прочности в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, МПа				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
«Сухой» метод	Термопласт	6,53	6,54	6,49	6,42	6,35
	Эластопласт	6,48	6,45	6,51	6,62	6,79
	33/66 (Т/Э)	6,51	6,53	6,48	6,65	6,72
	66/33 (Т/Э)	6,47	6,51	6,50	6,49	6,38
Предварительная модификация битума	Термопласт	6,50	6,57	6,45	6,34	6,11
	Эластопласт	6,55	6,50	6,61	6,78	6,92
	33/66 (Т/Э)	6,46	6,53	6,59	6,61	6,69
	66/33 (Т/Э)	6,61	6,57	6,46	6,40	6,34

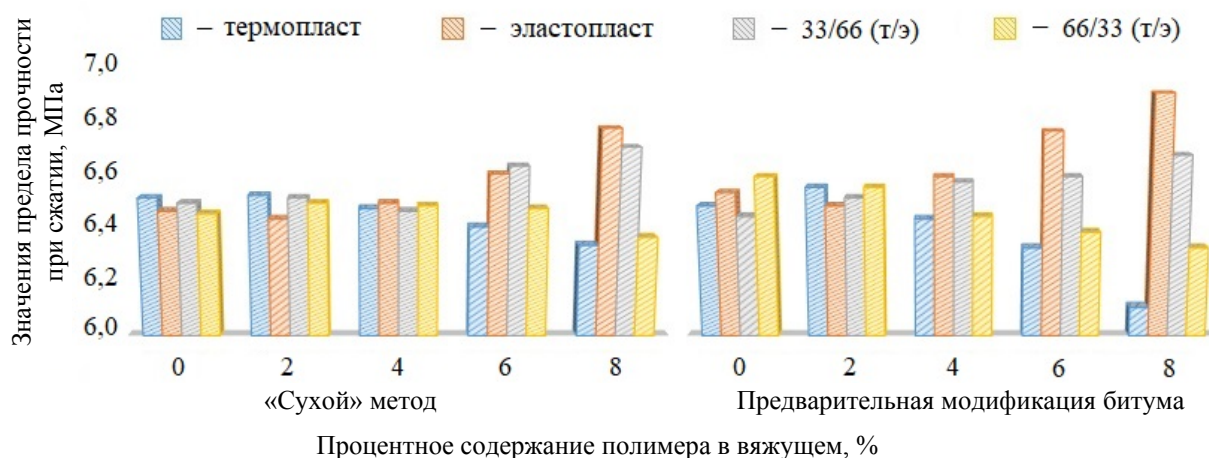


Рис. 6. Изменение максимальной структурной прочности смеси типа С

Fig. 6. Change in maximum structural strength of type C mixture

Таблица 6

Максимальная структурная прочность щебеночной мелкозернистой смеси типа Б
Maximum structural strength of crushed stone fine-grained mixture of type B

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь.	Тип полимера	Значения показателя максимальной структурной прочности в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, МПа				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
«Сухой» метод	Термопласт	5,63	5,60	5,62	5,57	5,52
	Эластопласт	5,55	5,56	5,58	5,54	5,59
	33/66 (Т/Э)	5,58	5,61	5,57	5,64	5,66
	66/33 (Т/Э)	5,65	5,63	5,64	5,67	5,65
Предварительная модификация битума	Термопласт	5,49	5,52	5,44	5,31	5,09
	Эластопласт	5,60	5,57	5,62	5,75	5,89
	33/66 (Т/Э)	5,48	5,50	5,55	5,61	5,58
	66/33 (Т/Э)	5,56	5,53	5,59	5,51	5,48

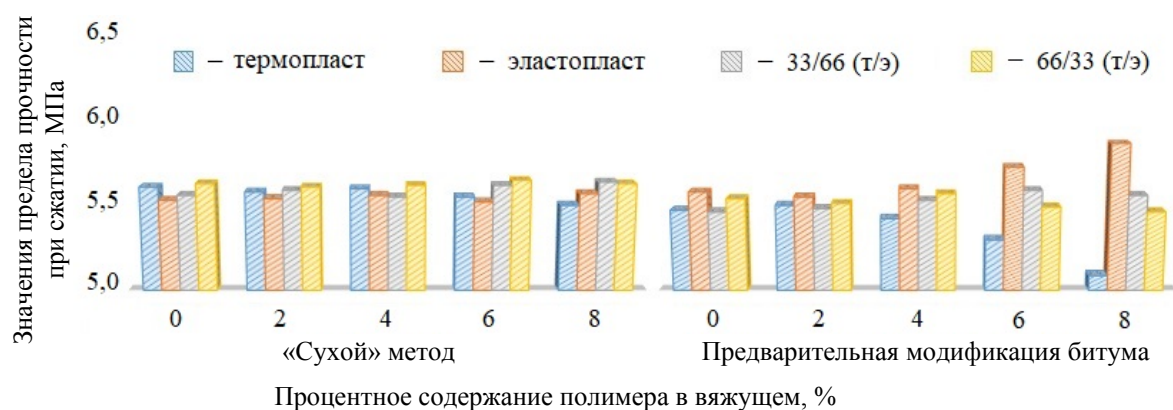


Рис. 7. Изменение максимальной структурной прочности смеси типа Б

Fig. 7. Change in maximum structural strength of type B mixture

Таблица 7

Значения водонасыщения стандартных образцов асфальтобетона
Water saturation values of standard concrete samples

Метод доставки полимера в асфальтобетонную смесь	Тип полимера	Значения показателя водонасыщения стандартного образца в зависимости от процентного содержания полимера в композиции вяжущего, %				
		0	2 %	4 %	6 %	8 %
1	2	3	4	5	6	7
Для щебеночной мелкозернистой смеси типа С						
«Сухой» метод	Термопласт	2,55	2,49	2,67	2,76	2,81
	Эластопласт	2,38	2,44	2,41	2,58	2,63
	33/66 (Т/Э)	2,46	2,51	2,48	2,57	2,69
	66/33 (Т/Э)	2,61	2,60	2,64	2,69	2,74

1	2	3	4	5	6	7
Предварительная модификация битума	Термопласт	2,69	2,73	2,89	3,34	4,53
	Эластопласт	2,54	2,52	2,66	2,83	3,19
	33/66 (Т/Э)	2,55	2,59	2,71	2,89	3,34
	66/33 (Т/Э)	2,39	2,42	2,76	3,04	4,25
Для щебеночной мелкозернистой смеси типа Б						
«Сухой» метод	Термопласт	1,87	1,76	1,81	2,08	2,37
	Эластопласт	1,73	1,77	1,70	1,74	1,92
	33/66 (Т/Э)	1,76	1,83	1,74	1,86	2,03
	66/33 (Т/Э)	1,79	1,85	1,93	2,15	2,24
Предварительная модификация битума	Термопласт	1,75	1,92	2,28	2,77	4,16
	Эластопласт	1,84	1,83	1,96	2,09	2,29
	33/66 (Т/Э)	1,88	1,85	2,04	2,17	3,05
	66/33 (Т/Э)	1,81	1,86	2,11	2,54	3,72

Показатель водонасыщения стандартных образцов щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типа С и Б значительно вырос при увеличении концентрации полимера методом предварительной модификации битума, при этом влияние эластопласта на этот показатель было практически минимальным, что отражено

на рис. 8 и 9. Это объясняется тем, что относительно высокие концентрации термопластов влияют на удобоукладываемость смеси [18], делая вяжущее значительно жестче, что также влияет на хрупкость асфальтобетона, которая была продемонстрирована при испытаниях по определению максимальной структурной прочности.

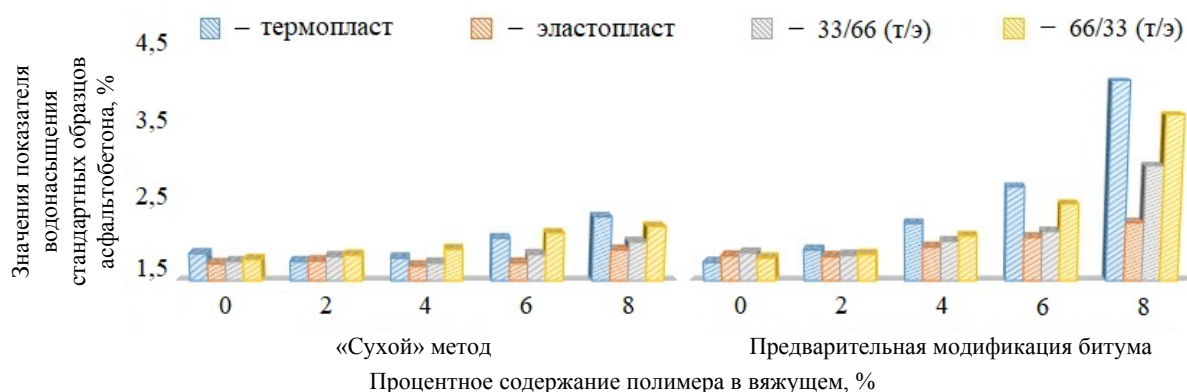


Рис. 8. Изменение водонасыщения асфальтобетона типа Б

Fig. 8. Change in water saturation of type B asphalt concrete

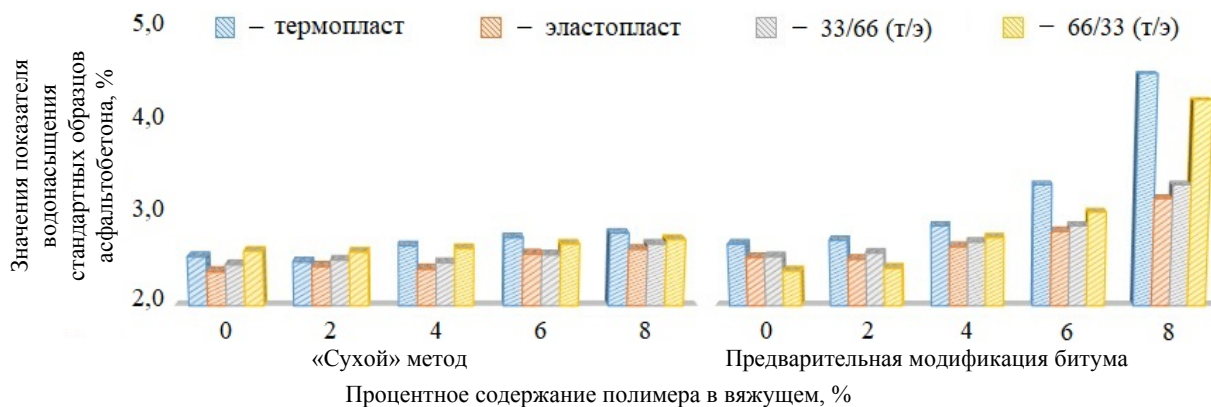


Рис. 9. Изменение водонасыщения асфальтобетона типа С

Fig. 9. Change in water saturation of type C asphalt concrete

При этом в отличие от прошлых испытаний толщина пленки битума не имеет весомого влияния на жесткость материала, так как удобоукладываемость асфальтобетонной смеси и коррелируемый с ним показатель водонасыщения стандартного образца относятся, скорее, к технологическим свойствам асфальтобетона, чем к физическо-механическим. Таким образом, можно утверждать, что присутствие большого количества термопласта в составе вяжущего, приводя к росту показателя водонасыщения, оказывает негативное воздействие на формирование в асфальтобетоне как матрицы вяжущего, так и каркаса каменного материала. Это непосредственно влияет и на все остальные свойства асфальтобетона, ухудшая их. Поэтому при применении модифицированной асфальтобетонной смеси особое внимание следует уделять ее температуре при укладке и технологическому регламенту уплотнения материала [19].

ВЫВОДЫ

1. Предварительная модификация битума является наиболее выгодной с точки зрения расхода полимерного материала, что связано с оптимальным его распределением по всему объему смеси и, как следствие, равномерно изменению свойств покрытия, исключением вероятности конгломерации модифицированного вяжущего в процессе производства асфальтобетонной смеси, ее укладки и уплотнения, исключением эффекта сегрегации.

2. Выявлены изменения технологических свойств асфальтобетонной смеси на примере изменения показателя водонасыщения стандартных образцов при относительно высоких концентрациях термопластичных полимеров в асфальтобетонных смесях, которые могут приводить к снижению всех свойств асфальтобетонных. Также введение термопласта в состав смеси в количестве, относительно «мокрого» способа модификации, свыше 4 % приводит к увеличению хрупкости асфальтобетона и, как следствие, снижению его максимальной структурной прочности, что может отразиться на устойчивости материала покрытия к коррозионным разрушениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько [и др.]. Минск: Арт Дизайн, 2015. 296 с.
2. Проектирование дорожных одежд улиц и дорог населенных пунктов. ТКП 45-3.03-3-2004 / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2005. 54 с.
3. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия: СТБ 1033-2016. Введ. 27.01.2016. Минск: М-во архит. и строительства Респ. Беларусь, 2016. 27 с.
4. Веренько, В. А. Надежность дорожных одежд. Минск: БГПА, 2002. 120 с.
5. Duarte, G. M. Asphalt Concrete Mixtures Modified with Polymeric Waste by the Wet and Dry Processes: A Literature Review / G. M. Duarte, A. L. Faxina // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 312. P. 125408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125408>.
6. Comparison of Asphalt Mixtures Containing Polymeric Compounds and Polymer-Modified Bitumen Based on the VECD Theory / S. Spadoni [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 349. P. 128725. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128725>.
7. Utilisation of Plastic Waste as Aggregate in Construction Materials: A review / N. H. Zulkernain [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 296. P. 123669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123669>.
8. Acosta, E. Hildebrand-Assessed Margules (HAM) Interaction Parameter: Applications to Surfactant and Polar Oil Partition / E. Acosta // *Fluid Phase Equilibria*. 2023. Vol. 565. P. 113649. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2022.113649>.
9. Fan, H. Dynamic Response of a Multi-Layered Pavement Structure with Subgrade Modulus Varying with Depth Subjected to a Moving Load / H. Fan, J. Zhang, J. Zheng // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022. Vol. 160. P. 107358. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107358>.
10. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ 1115-2013. Введ. 31.10.2013. Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2013. 39 с.
11. Веренько, В. А. Новые материалы в дорожном строительстве: учеб. пособие. Минск: Технопринт, 2004. 169 с.
12. Yu, S. Data sensing and Compaction Condition Modeling for Asphalt Pavements / S. Yu, S. Shen, M. Lu // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 154. P. 105021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105021>.
13. Qasim, Z. I. Evaluation of Mixing and Compaction Temperatures (MCT) for Modified Asphalt Binders Using Zero Shear Viscosity and Cross-Williamson model / Z. I. Qasim, A. H. Abed, K. A. Almomen // *Case Studies in Construction Materials*. 2019. Vol. 11. P. e00302. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00302>.
14. Основы научных исследований: учебн. для техн. вузов / В. И. Крутов [и др.] / под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. М.: Высш. шк., 1989. 400 с.
15. Dalhat M. A. Recycling of Different Plastics in Asphalt Concrete / M. A. Dalhat, K. Al-Adham, M. A. Habib // *Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete*. Woodhead Publishing, 2019. P. 287-305. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00013-X>.
16. Sengoz, B. Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen / B. Sengoz, G. Isikyakar // *Construction and Building Materials*. 2008.

Vol. 22, Iss. 9. P. 1897–1905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013>.

17. Silane Crosslinkable Polyethylene Waste as Bitumen Modifier: A New Fortunate Destiny by in Time Recycling of thermoplastic Waste Before Conversion to Thermoset End-of-Life Unrecyclable Polymer / N. M. Sarkari [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 287. P. 122999. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122999>.
18. Almusawi, A. Evaluation of Mechanical Properties of Different Asphalt Concrete Types in Relation with Mixing and Compaction Temperatures / A. Almusawi, B. Sengoz, A. Topal // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 268. P. 121140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121140>.
19. Laboratory Investigation of Compaction Characteristics and Performance of Warm Mix Asphalt Containing Chemical Additives / L. Mo [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 37. P. 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.074>.
9. Fan H., Zhang J., Zheng J. (2022) Dynamic Response of a Multi-Layered Pavement Structure with Subgrade Modulus Varying with Depth Subjected to a Moving Load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 160, 107358. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107358>.
10. STB 1115-2013. *Asphalt Concrete Road, Airfield and Asphalt Concrete Mixtures. Test Methods*. Minsk, Publishing House of the State Standard of the Republic of Belarus, 2013. 39 (in Russian).
11. Verenko V. A. (2004) *New Materials in Road Construction*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 169 (in Russian).
12. Yu S., Shen S., Lu M. (2023) Data Sensing and Compaction Condition Modeling for Asphalt Pavements. *Automation in Construction*, 154, 105021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105021>.
13. Qasim Z. I., Abed A. H., Almomen K. A. (2019) Evaluation of Mixing and Compaction Temperatures (MCT) for Modified Asphalt Binders Using Zero Shear Viscosity and Cross-Williamson Model. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00302. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00302>.
14. Krutov V. I., Grushko I. M., Popov V. V., Savel'ev A. Ya., Sumarokov L. N., Venikov V. A., Kogdov N. M., Timofeeva O. V., Chus A. V., Momot A. I. (1989) *Fundamentals of Scientific Research*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 400 (in Russian).
15. M. A. Dalhat, Khaleel Al-Adham, M. A. Habib. Recycling of Different Plastics in Asphalt Concrete // Use of Recycled Plastics in Eco-Efficient Concrete. 2019. Vol. 476. P. 287–305.
16. Sengoz B., Isikyakar G. (2008) Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen. *Construction and Building Materials*, 22 (9), 1897–1905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013>.
17. Sarkari N. M., Ayar P., Oskouei M. H., Khosrowshahi F. K., Mohseni M. (2021) Silane Crosslinkable Polyethylene Waste as Bitumen Modifier: A New Fortunate Destiny by in Time Recycling of Thermoplastic Waste Before Conversion to Thermoset End-of-Life Unrecyclable Polymer. *Construction and Building Materials*, 287, 122999. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122999>.
18. Almusawi A., Sengoz B., Topal A. (2021) Evaluation of Mechanical Properties of Different Asphalt Concrete Types in Relation With Mixing and Compaction Temperatures. *Construction and Building Materials*, 268, 121140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121140>.
19. Mo L., Li X., Fang X., Hurman M., Wu S. (2012) Laboratory Investigation of Compaction Characteristics and Performance of Warm Mix Asphalt Containing Chemical Additives. *Construction and Building Materials*, 37, 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.074>.

Поступила 17.08.2023

Подписана к печати 21.11.2023

Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Verenko V. A., Zankovich V. V., Ladyshev A. A., Lira S. V., Afanasenko A. A., Yatsевич P. P. (2015) *Durable Asphalt Concrete Pavements for Roads, Bridges and Streets*. Minsk Art Dizain Publ. 296 (in Russian).
2. ТКР 45-3.03-3–2004. *Design of Pavements for Streets and Roads of Populated Areas*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2005. 54 (in Russian).
3. STB 1033–2016. *Asphalt Concrete Road, Airfield and Asphalt Concrete Mixtures. Technical Specifications*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2016. 27 (in Russian).
4. Verenko V. A. (2002) *Reliability of Road Pavements*. Minsk, Belarusian State Polytechnical Academy. 120 (in Russian).
5. Duarte G. M., Faxina A. L. (2021) Asphalt Concrete Mixtures Modified with Polymeric Waste by the Wet and Dry Processes: A literature Review. *Construction and Building Materials*, 312, 125408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125408>.
6. Spadoni S., Ingrassia L.P., Mocelin D., Kim Y.R., Canestrari F. (2022) Comparison of Asphalt Mixtures Containing Polymeric Compounds and Polymer-Modified Bitumen Based on the VECD Theory. *Construction and Building Materials*, 349, 128725. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128725>.
7. Zulkernain N. H., Gani P., Chuan N. C., Uvarajan T. (2021) Utilisation of Plastic Waste as Aggregate in Construction Materials: A review. *Construction and Building Materials*, 296, 123669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123669>.
8. Acosta, E. (2023) Hildebrand-Assessed Margules (HAM) Interaction Parameter: Applications to Surfactant and Po-

Received: 17.08.2023

Accepted: 21.11.2023

Published online: 29.03.2024