

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-409-416>

УДК 625.85.06

Методика оценки адгезионных связей вяжущего с каменным материалом на основе вакуумно-температурного воздействия

Магистр техн. наук П. П. Яцевич¹⁾, А. А. Афанасенко¹⁾

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

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

Реферат. Если рассматривать асфальтобетон как композитный строительный материал, состоящий из разнородных составляющих различной природы и свойств, весьма важными являются обеспечение и контроль связи матрицы вяжущего и минерального каркаса. Это напрямую влияет на наиболее важные технологические и прочностные свойства итогового материала и продолжительность срока службы асфальтобетонного дорожного покрытия. Наиболее распространенным методом оценки адгезионных связей является визуальное сравнение асфальтобетонной смеси, прокипяченной в воде при заданной температуре, с изображением эталонного образца. На наш взгляд, такой метод контроля является весьма субъективным, так как напрямую на результат испытания влияет визуальное восприятие исследователем изображения. Нами разработана и описана методика испытаний, которая позволяет получить объективную картину, основанную на изменении значений показателя водонасыщения под вакуумно-температурным воздействием. По разработанной методике проведены исследования адгезионных свойств вяжущего до и после модификации различными полимерами и их компаундов к каменному материалу. Для исследований были выбраны асфальтобетонные смеси, которые наиболее часто применяются в качестве материала покрытия верхних слоев дорожных одежд в Республике Беларусь. Анализ полученных данных показал зависимость риска проникновения воды между битумом и каменным материалом с потерей адгезии вяжущего к заполнителю от развитости каркаса и толщины битумной пленки. Объяснение этого явления состоит в том, что процент когезионного расслоения значительно увеличивается с ростом толщины пленки битума и может достигать 65 % когезионного отслоения. При этом, как показали результаты исследования, предварительная модификация битума значительно снижает негативные последствия вакуумно-температурного воздействия на асфальтобетон.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, асфальтобетон, адгезия, водонасыщение, термопласты, эластопласты, модификация битума, модификация асфальтобетона, композитный материал, стирол-бутадиен-стирол, бутадиен-стирольный каучук

Для цитирования: Яцевич, П. П. Методика оценки адгезионных связей вяжущего с каменным материалом на основе вакуумно-температурного воздействия / П. П. Яцевич, А. А. Афанасенко // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 409–416. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-409-416>

Methodology for Assessing Adhesive Bonds of Binder with Stone Material Based on Vacuum-Temperature Effects

P. P. Yatsevich¹⁾, A. A. Afanasenka¹⁾

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

Abstract. If we consider asphalt concrete as a composite building material, consisting of heterogeneous components of different nature and properties, ensuring and controlling the connection between the matrix of the binder and the mineral frame is very important. This directly affects the most important technological and strength properties of the final material and

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

the service life of the asphalt concrete road surface. The most common method for assessing adhesive bonds is a visual comparison of an asphalt concrete mixture boiled in water at a given temperature with an image of a reference sample. In our opinion, this control method is very subjective, since the test result is directly influenced by the researcher's visual perception of the image. We have developed and described a test method that allows us to obtain an objective picture based on changes in the values of the water saturation index under vacuum-temperature influence. Using the developed methodology, studies were carried out on the adhesive properties of the binder before and after modification with various polymers and their compounds to stone material. For the research, asphalt concrete mixtures were selected, which are most often used as a coating material for the top layers of road pavements in the Republic of Belarus. Analysis of the data obtained showed the dependence of the risk of water penetration between bitumen and stone material with loss of adhesion of the binder to the aggregate on the development of the frame and the thickness of the bitumen film. The explanation for this phenomenon is that the percentage of cohesive delamination increases significantly with increasing bitumen film thickness and can reach 65% of cohesive delamination. At the same time, as the results of the study showed, preliminary modification of bitumen significantly reduces the negative consequences of vacuum-temperature effects on asphalt concrete.

Keywords: asphalt concrete mixture, asphalt concrete, adhesion, water saturation, thermoplastics, elastomers, bitumen modification, asphalt concrete modification, composite material, styrene-butadiene-styrene, styrene-butadiene rubber

For citation: Yatsevich P. P., Afanasenka A. A. (2024) Methodology for Assessing Adhesive Bonds of Binder with Stone Material Based on Vacuum-Temperature Effects. *Science and Technique*. 23 (5), 409–416. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-409-416> (in Russian)

Введение

Адгезия битума – это свойство образовывать прочное сцепление с поверхностью минеральных материалов, что позволяет создавать стойкие и долговечные соединения внутри структуры асфальтобетона [1]. Так как асфальтобетон – это композитный материал, способность его составных элементов надежно соединяться между собой напрямую влияет на прочность всей композиции в целом. Адгезионные свойства критичны при возникновении растягивающих напряжений [2], которые присутствуют при любых видах нагружения материала [3].

Модификация битума, в частности различными видами термопластов, обычно хоть незначительно, но положительно сказывается на адгезионных свойствах вяжущего [4]. Особенно это проявляется при длительном воздействии высоких положительных температур [5]. Как показано в исследованиях [6], если рассматривать битум как систему, состоящую из асфальтенов, смол, ароматических углеводородов и насыщенных углеводородов, адгезия между асфальтенами и наполнителем является самой сильной, а связь между ароматическими соединениями и наполнителем – самой слабой. При этом следует учитывать, что при модификации битума СБС (стирол-бутадиен-стирол) и СБР (стирол-бутадиеновый каучук) полимеры наиболее активно взаимодействуют именно с асфальтеновой фракцией битума.

В настоящее время для определения адгезии битума к минеральной составляющей асфаль-

тобетонных смесей в основном используются такие визуальные методы, как метод определения сцепления битума с мраморным песком и метод определения сцепления битума с мраморным песком на сетке, а также инструментальные, такие как метод определения водостойкости асфальтобетона (TSR) и метод определения водостойкости при длительном водонасыщении. Визуальные методы являются субъективными, так как полностью зависят от визуального восприятия лаборантом контрольных образцов. В последнее время проводятся исследования [7] для усовершенствования этих методов и исключения человеческого фактора при обработке результатов испытания. На инструментальные методы косвенно влияют прочностные свойства испытуемого асфальтобетона, что может приводить к необъективности получаемых результатов. В работе [8] наглядно продемонстрировано расхождение результатов испытаний при выполнении экспериментов по различным методикам.

Методика проведения исследований

Предлагаем оценивать адгезию модифицированного битума к минеральному наполнителю путем выявления такого фактора, как проникновение воды под битумную пленку в асфальтобетоне при различных температурах при остаточном давлении 2000 Па. Преимущество этого метода состоит в том, что он приближает условия проведения испытаний к реальным условиям работы асфальтобетона в покрытии. Отличие от стандартизированного метода ис-

пытаний заключается в том, что сосуд с водой из вакуумной установки помещается в теплоизолированный водонепроницаемый короб, оснащенный функцией подогрева, и термостатируется в процессе всего испытания при заданных температурах. Это позволяет получить значения количества поглощаемой образцом воды при остаточном давлении 2000 Па и заданной температуре.

Исследования проводились на трех типах асфальтобетонных смесей, которые наиболее часто используются в верхнем слое дорожного покрытия: щебеночной мелкозернистой горячей типа С, щебеночной мелкозернистой горячей типа А, щебеночной мелкозернистой горячей типа Б. Выбор обусловлен тем, что именно верхний слой покрытия наиболее интенсивно подвергается воздействию климатических факторов и именно для него в наибольшей степени критична адгезия битума к минеральной части. Минеральные части асфальтобетонных смесей проектировались в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами Республики Беларусь.

В качестве модифицирующих добавок применялись:

- В II – MF ТУ ВУ 690610504.001-2012;
- многокомпонентная модифицирующая полимерная добавка универсального применения (ММД2П);
- смесь полиэтиленов (агломерат стрейч-пленки);
- стирол-бутадиен-стирол;
- стирол-бутадиеновый каучук.

Все модификаторы вводились в состав асфальтобетонной смеси путем предварительной модификации битума при содержании модифи-

цирующей добавки в количестве 4 % по массе в пересчете на чистый полимер.

В соответствии с методикой [9] для достижения доверительной вероятности 0,95 при гарантийном коэффициенте, принимаемом по функции Лапласа, требуется испытать четыре образца для определения показателя водонасыщения.

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

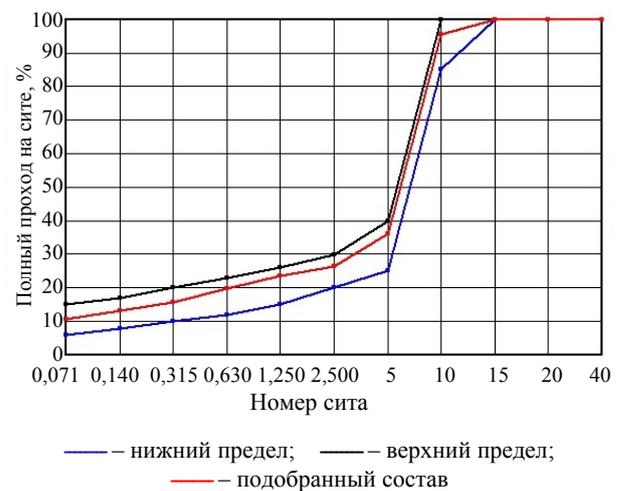


Рис. 1. Кривая гранулометрического состава минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа С

Fig. 1. Curve of granulometric composition of mineral part of crushed stone fine-grained mixture of C-type

Таблица 1

Гранулометрический состав минеральных материалов смеси щебеночной мелкозернистой типа С

Granulometric composition of mineral materials of crushed stone fine-grained mixture of C-type

Номер сита	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 А была подобрана на щебне фракций от 10 до 14 мм ОАО «МАКРОДОР», от 5 до 15 мм РУПП «Гранит», от 4 до 6,3 мм ОАО «МАКРОДОР» и от 2 до 4 мм ОАО «МАКРОДОР», песках из отсевов дробления ОАО «МАКРОДОР», минеральном порошке ОАО «Доломит» и битуме марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части представлен на рис. 2 и в табл. 2.

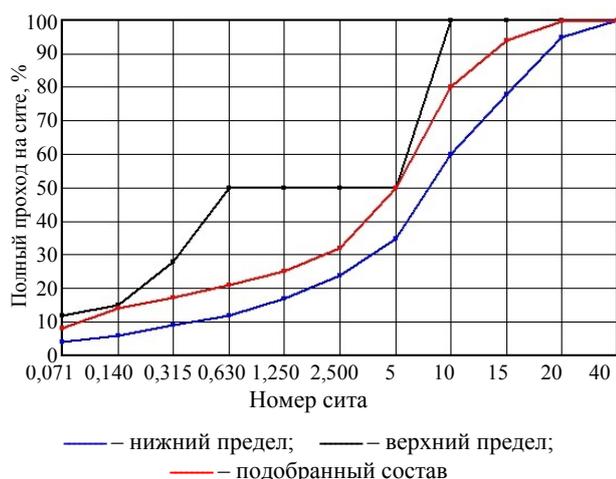


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа А

Fig. 2. Curve of granulometric composition of mineral part of crushed stone fine-grained mixture of A-type

Смесь щебеночная мелкозернистая типа Б подобрана на щебне фракций от 5 до 20 мм и от 5 до 10 мм РУПП «Гранит», песках из отсевов дробления РУПП «Гранит», песках природных, минеральном порошке ОАО «Доломит» и битуме марки 70/100. Гранулометрический состав минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа Б представлен на рис. 3 и в табл. 3.

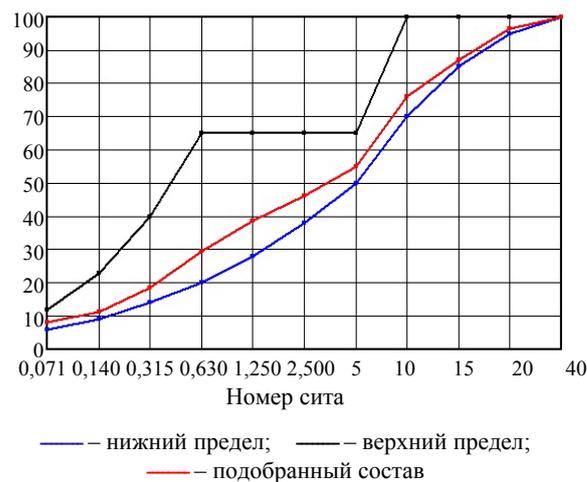


Рис. 3. Кривая гранулометрического состава минеральной части смеси щебеночной мелкозернистой типа Б

Fig. 3. Curve of granulometric composition of mineral part of crushed stone fine-grained mixture of B-type

Таблица 2

Гранулометрический состав минеральных материалов смеси щебеночной мелкозернистой типа А
Granulometric composition of mineral materials of crushed stone fine-grained mixture of A-type

Номер сита	Гранулометрический состав												Сумма, %	Полный остаток, %	Полный проход, %
	материалов						материалов в смеси								
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			
20	4,59	0	0	0	0	0	0,55	0	0	0	0	0	0,55	0,55	99,45
15	46,62	0	0	0	0	0	5,59	0	0	0	0	0	5,59	6,15	93,85
10	48,31	64,74	3,54	0	0	0	5,80	7,12	0,99	0	0	0	13,91	20,05	79,95
5	0,32	35,05	90,13	5,21	0,03	0	0,04	3,86	25,24	0,89	0,01	0	30,02	50,08	49,92
2,5	0,01	0	5,51	89,86	3,76	0	0	0	1,54	15,28	0,94	0	17,76	67,84	32,16
1,25	0,01	0	0,32	4,17	24,79	0	0	0	0,09	0,71	6,20	0	7,00	74,84	25,16
0,63	0,01	0	0,23	0,07	15,43	2,50	0	0	0,06	0,01	3,86	0,17	4,11	78,95	21,05
0,315	0	0	0,08	0,07	13,85	4,17	0	0	0,02	0,01	3,46	0,29	3,79	82,73	17,27
0,14	0,01	0	0,04	0,15	11,37	5,00	0	0	0,01	0,03	2,84	0,35	3,23	85,96	14,04
0,071	0,06	0,09	0,06	0,37	20,53	10,83	0,01	0,01	0,02	0,06	5,13	0,76	5,99	91,95	8,05
<0,071	0,06	0,12	0,09	0,10	10,24	77,50	0,01	0,01	0,03	0,02	2,56	5,42	8,05	100	–

Таблица 3

Гранулометрический состав минеральных материалов смеси щебеночной мелкозернистой типа Б
Granulometric composition of mineral materials of crushed stone fine-grained mixture of B-type

Номер сита	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	1,20	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	6,50	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	0,20	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	77,50	0,66	0,08	0,92	1,81	4,65	8,12	100	–

Результаты испытаний

Испытания контрольного образца щебеночной мелкозернистой смеси типа С показали (табл. 4), что значение водонасыщения в температурных пределах от 10 до 40 °С не показывает бурного роста, а изменяется в пределах величин, допустимых регламентируемым стандартом на асфальтобетон. При температурах 50 и 60 °С образцы поглощают значительно большее количество воды. Это объясняется ее проникновением между пленкой битума и каменным материалом, что приводит к потере сцепных качеств между матрицей и каркасом, а следовательно, материал становится значительно менее восприимчив к различным напряжениям, возникающим в слое покрытия (табл. 4).

Таблица 4

Результаты испытаний контрольных образцов щебеночного мелкозернистого асфальтобетона типа С
Test results of control samples of crushed stone fine-grained asphalt concrete of C-type

Вид испытания	Температура определения показателя водонасыщения образца, °С					
	10	20	30	40	50	60
Значение показателя водонасыщения образца, %	1,5	1,6	2,1	3,7	6,2	11,9

Испытания образцов щебеночной мелкозернистой смеси типа С, изготовленных с применением модифицированных битумов, показали схожие результаты в диапазоне температур от 10 до 40 °С. При этом в интервале температур от 50 до 60 °С модифицированный асфальтобетон показал лучшую сопротивляемость проникновению воды под битумную пленку. Это объясняется тем, что модифицированное вяжущее само по себе лучше сопротивляется повышенным температурам, чем вяжущее на товарном битуме. Кроме того, на результат могло повлиять и то, что модификаторы создают в матрице дополнительную полимерную подсистему, которая, как сетка, прижимает вяжущее к каменному материалу. Худший результат среди модифицированных асфальтобетонов показал экспериментальный образец с применением смеси полиэтиленов. Это можно объяснить тем, что полиэтилены в соответствии с параметрами растворимости не взаимодействуют с битумом, а лишь распределяются в его объеме, поэтому асфальтовая сетка не укрепляется. Этому может служить подтверждением и то, что образцы, модифицированные СБР и СБС, показали значительно лучшие результаты в интервале высоких температур именно из-за того, что при модификации ими происходит химическое взаимодействие с би-

тумом, при этом стирольная и бутадиеновая части способствуют укрупнению и набуханию асфальтеновой части битума. Результаты испытаний представлены в табл. 5 и на рис. 4.

Таблица 5

Результаты испытаний модифицированных щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типа С
Test results of modified crushed stone fine-grained asphalt concrete of C-type

Вид испытания	Температура определения показателя водонасыщения образца, °С					
	10	20	30	40	50	60
Значение показателя водонасыщения образца, %	Смесь, модифицированная В П, – MF ТУ ВУ 690610504.001–2012					
	1,5	1,6	1,9	2,4	3,7	5,8
	Смесь, модифицированная ММД2П					
	1,5	1,7	2,8	3,9	5,1	6,8
	Смесь, модифицированная смесью полиэтиленов					
	1,8	2	3,4	4,9	6,6	8,1
	Смесь, модифицированная СБС					
	1,7	1,6	1,8	2,1	3,2	5,0
Смесь, модифицированная СБР						
1,6	1,6	1,7	1,9	3,8	5,4	

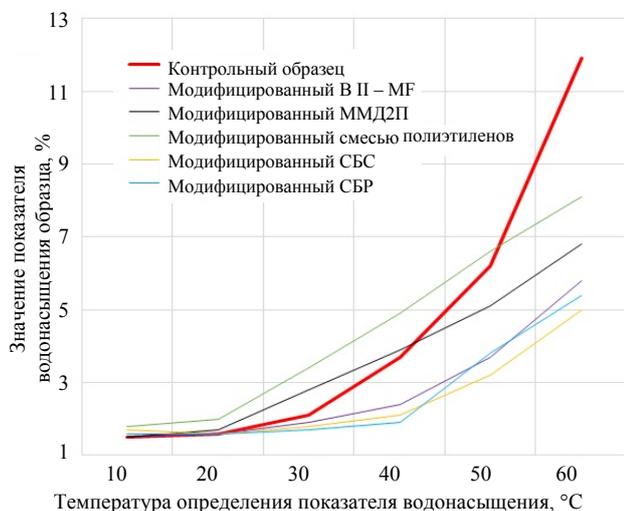


Рис. 4. Сводный график изменения значений показателя водонасыщения контрольного образца и модифицированных асфальтобетонов типа С

Fig. 4. Summary graph of changes in the values of water saturation index of sample and modified asphalt concrete of C-type

Аналогичные испытания проводились для асфальтобетонов типов А и Б (табл. 6, 7 и 8). Картина изменения значений показателя водо-

насыщения была почти аналогична, за исключением того, что значительный рост отмечался уже при температуре 40 °С, за исключением асфальтобетона, модифицированного смесью полиэтиленов. Еще одной особенностью было то, что разница в значениях при испытаниях при 20, 50 и 60 °С не была столь значительной, как на примере асфальтобетона типа С.

Таблица 6

Результаты испытаний контрольных образцов щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типов А и Б

Test results of control samples of crushed stone fine-grained asphalt concrete of A- and B-types

Вид испытания	Температура определения показателя водонасыщения образца, °С					
	10	20	30	40	50	60
Значение показателя водонасыщения образца, %	Смесь щебеночная мелкозернистая горячая типа А, контрольный образец					
	2,1	2,1	2,5	3,8	5,1	6,9
	Смесь щебеночная мелкозернистая горячая типа Б, контрольный образец					
	2,6	2,6	3,1	4,7	6,3	

Таблица 7

Результаты испытаний модифицированных щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типа А

Test results of modified crushed stone fine-grained asphalt concrete of A-type

Вид испытания	Температура определения показателя водонасыщения образца, °С					
	10	20	30	40	50	60
Значение показателя водонасыщения образца, %	Смесь, модифицированная В П, – MF ТУ ВУ 690610504.001–2012					
	2,2	2,3	2,6	3,4	4,7	6,1
	Смесь, модифицированная ММД2П					
	2,2	2,1	2,9	3,9	5,2	6,4
	Смесь, модифицированная смесью полиэтиленов					
	2,7	2,7	2,8	3,3	4,2	5,5
	Смесь, модифицированная СБС					
	2,0	2,1	2,4	3,7	5,0	6,3
Смесь, модифицированная СБР						
2,1	1,9	2,0	3,9	5,2	6,7	

При этом наблюдаем, что расхождение значений показателя водонасыщения контрольного образца и асфальтобетона типа А, пригото-

ленного на битуме, модифицированном смесью полиэтиленов, значительно выше (рис. 5). Это объясняется тем, что в менее каркасных смесях жесткость вяжущего может играть более ощутимую роль из-за того, что в соотношении матрица/каркас матрица начинает преобладать. Такая же картина наблюдается и на образцах типа Б (рис. 6), что подтверждает предположения.

Таблица 8

Результаты испытаний модифицированных щебеночных мелкозернистых асфальтобетонов типа Б
Test results of modified crushed stone fine-grained asphalt concrete of type B

Вид испытания	Температура определения показателя водонасыщения образца, °С					
	10	20	30	40	50	60
Значение показателя водонасыщения образца, %	Смесь, модифицированная В II – MF MF ГУ ВУ 690610504.001–2012					
	2,4	2,5	2,7	4,2	5,8	8,3
	Смесь, модифицированная ММД2П					
	2,2	2,0	2,8	4,5	6,3	7,4
	Смесь, модифицированная смесью полиэтиленов					
	3,0	3,4	3,9	4,7	6,2	8,8
	Смесь, модифицированная СБС					
2,4	2,8	3,3	5,4	6,7	7,5	
Смесь, модифицированная СБР						
2,5	2,5	2,9	4,4	6,3	8,1	

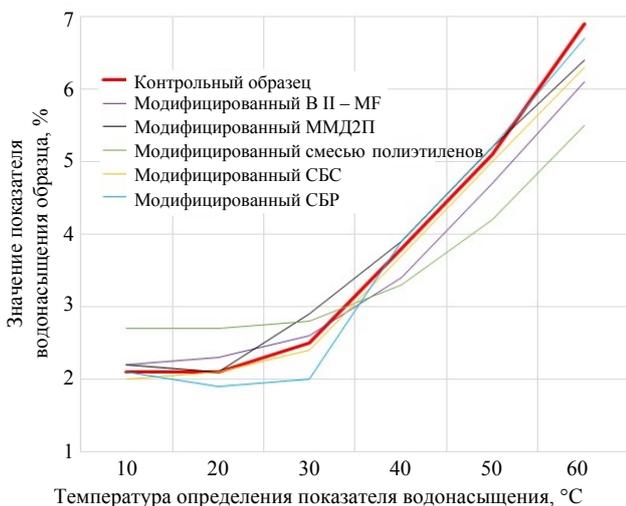


Рис. 5. Сводный график изменения значений показателя водонасыщения контрольного образца и модифицированных асфальтобетонов типа А

Fig. 5. Summary graph of changes in the values of water saturation index of control sample and modified asphalt concrete of A-type

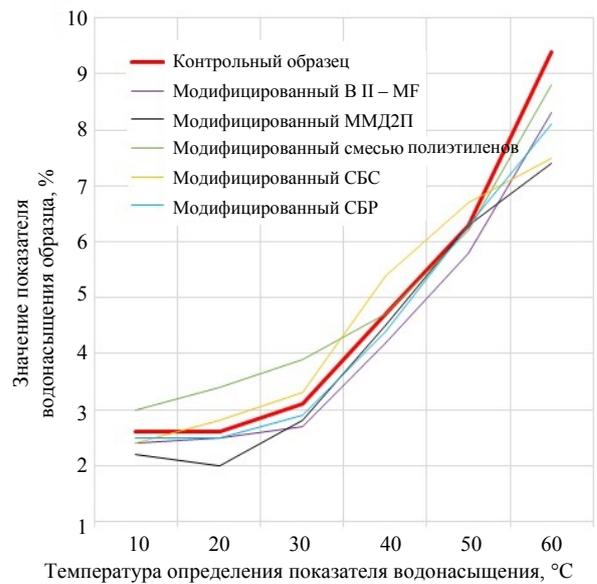


Рис. 6. Сводный график изменения значений показателя водонасыщения контрольного образца и модифицированных асфальтобетонов типа Б
Fig. 6. Summary graph of changes in the values of water saturation index of control sample and modified asphalt concrete of B-type

ВЫВОДЫ

1. При анализе результатов измерения водонасыщения различных типов асфальтобетонов видно, что с ростом температуры на бескаркасных смесях (типы А и Б) относительная разница значений, получаемых при нормальных условиях испытаний и при высоких температурах, становится меньше, чем на каркасных асфальтобетонах. Это объясняется не разницей в количестве каменного материала, а толщиной битумной пленки на его поверхности. Так, в работе [10] показано, что процент когезионного расслоения значительно увеличивается с ростом толщины пленки битума и может достигать 65 % когезионного отслоения, рассчитанного как отношение площадей оставшихся молекул битума к общей поверхности раздела битум – каменный материал.

2. Так как отрыв происходит в слое вяжущего, можно говорить о том, что в многощебенистых асфальтобетонах, характеризующихся большим количеством мастики в своем составе и высокой степенью ее структуризации, при условии разряжения и высоких температур вода проникает не только под битумную пленку, но и в когезионный разрыв. При этом модифи-

цированный битум эффективнее противостоит когезионному разрыву за счет сформированной полимерами подсистемы, что наглядно демонстрирует проведенное исследование.

3. В случае, когда полимер благодаря родству с битумом химически с ним соединяется, этот эффект усиливается, что также подтверждается исследованиями [6], направленными на определение показателей межфазной энергии, коэффициента диффузии и относительной концентрации СБС-модифицированного битума методом моделирования молекулярной динамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог, мостов и улиц / В. А. Веренько [и др.]. Минск: Арт Дизайн, 2015. 296 с.
2. Analysis of the Cohesion/Adhesion Proportion around Bitumen-Mineral Failure Interface under Tensile Loading / B. Shi [et. al.] // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 399. Art. 132555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132555>.
3. Characterisation of Temperature and Loading Rate Dependent Bond Strength on the Bitumen-Aggregate Interface using Direct Shear Test / M. Dong [et. al.] // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 394. Art. 132284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132284>.
4. Investigation of the Relationship between Fluidity and Adhesion Strength of Unmodified and Modified Bitumens using the Pull-Off Test Method / H. Ali Omar [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 122. P. 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.053>
5. Borges Miranda H.M. The Influence of Recycled Plastics Added via the Dry Process on the Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures / H. M. Borges Miranda, D. Domingues, M. J. Rato // *Transportation Engineering*. 2023. Vol. 13. Art. 100197. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100197>.
6. Yao X. Interfacial Adhesive Behaviors between SBS Modified Bitumen and Aggregate using Molecular Dynamics Simulation / X. Yao, Ch. Li, T. Xu // *Surfaces and Interfaces*. 2022. Vol. 33, Art. 102245. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102245>.
7. Interpretation of Stripping at the Bitumen–Aggregate Interface based on Fluorescence Tracing Method / Yi Peng [et. al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 7566. P. 5767–5780. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.035>.
8. Evaluation of Different Test Methods for Bitumen Adhesion Properties / M. Paliukaitė [et. al.] // *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 4592. P. 724–731. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.339>.
9. Основы научных исследований: учеб. для техн. вузов / В. И. Крутов [и др.]; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. М.: Высш. шк., 1989. 400 с.
10. Modeling Percentages of Cohesive and Adhesive Debonding in Bitumen-Aggregate Interfaces using Molecular Dynamics Approaches / P. Chen [et. al.] // *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 571. Art. 151318. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151318>.

Поступила 20.05.2024

Подписана в печать 23.07.2024

Опубликована онлайн 30.09.2024

REFERENCES

1. Verenko V. A., Zankovich V. V., Ladyshev A. V., Lira S. V., Afanasenko A. A., Yatsевич P. P. (2015) *Durable Asphalt Concrete Coatings for Highways, Bridges and Streets*. Minsk, Art Dezayn Publ. 296 (in Russian).
2. Shi B., Liu Q., Gao Y., Wu J., Chen J. (2023) Analysis of the Cohesion/Adhesion Proportion around Bitumen-Mineral Failure Interface under Tensile Loading. *Construction and Building Materials*, 399, 132555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132555>.
3. Dong M., Sun B., Thom N., Li L. (2023) Characterisation of Temperature and Loading Rate Dependent Bond Strength on the Bitumen-Aggregate Interface Using Direct Shear Test. *Construction and Building Materials*, 394, 132284. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132284>.
4. Ali Omar H., Md. Yusoff N. I., Ceylan H., Sajuri Z., Jakarni F. M., Ismail A. (2016) Investigation of the Relationship between Fluidity and Adhesion Strength of Unmodified and Modified Bitumens Using the Pull-Off Test Method. *Construction and Building Materials*, 122, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.053>.
5. Borges Miranda H. M., Domingues D., Rato M. J. (2023) The Influence of Recycled Plastics Added via the Dry Process on the Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures. *Transportation Engineering*, 13, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100197>.
6. Yao X., Li Ch., Xu T. (2022) Interfacial Adhesive Behaviors between SBS Modified Bitumen and Aggregate Using Molecular Dynamics Simulation. *Surfaces and Interfaces*, 33, 102245. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102245>.
7. Peng Y., Zhao T., Zeng Q., Deng L., Kong L., Ma T., Zhao Y. (2023) Interpretation of Stripping at the Bitumen–Aggregate Interface Based on Fluorescence Tracing Method. *Journal of Materials Research and Technology*, 7566, 5767–5780. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.035>
8. Paliukaitė M., Vorobjovas V., Bulevičius M., Andrejevas V. (2016) Evaluation of Different Test Methods for Bitumen Adhesion Properties. *Transportation Research Procedia*, 4592, 724–731. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.339>.
9. 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).
10. Chen P., Luo X., Gao Y., Zhang Y. (2022) Modeling Percentages of Cohesive and Adhesive Debonding in Bitumen-Aggregate Interfaces Using Molecular Dynamics Approaches. *Applied Surface Science*, 571, 151318. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151318>.

Received: 20.05.2024

Accepted: 23.07.2024

Published online: 30.09.2024