

Утилизация резиновой крошки путем производства модифицированного битума

С.А. Иванов¹, С.Н. Шабает¹, К.Ю. Тюрюханов²

¹ *ФГБОУ ВО Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово*

² *ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический
университет», г. Пермь*

Аннотация: В данной статье рассмотрены способы и методы модифицирования битума резиновой крошкой, полученной из использованных утилизированных автомобильных покрышек. Предложен способ модифицирования битума резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе. Рассмотрены основные модификаторы, приведен анализ данных литературных источников по модифицированию битума полимерами для улучшения физико-механических свойств. Приведены собственные данные исследований по модифицированию битума резиновой крошкой. Сделаны основные выводы, анализ полученных результатов, а также сделаны рекомендации по дальнейшему использованию полученного продукта.

Ключевые слова: резиновая крошка, битум, модификация, полимер, улучшение, качество, утилизация, анализ, исследование.

В соответствии с транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года, протяженность автомобильных дорог общего пользования должна увеличиться по сравнению с 2007 годом на 625,5 тыс. км. И, несмотря на то, что на сегодняшний день (в соответствии с Постановлением правительства РФ) нормативный срок службы автомобильных дорог федерального значения с усовершенствованным типом покрытия составляет 24 года (за исключением V категории), что предопределяет долю ввода в эксплуатацию автомобильных дорог с цементобетонным покрытием (на основании (Распоряжения Правительства РФ от 10.05.2016 N 868-р) в общем объеме строительства автомобильных дорог в России к 2030 году до 50 %, асфальтобетон еще достаточно длительное время останется преобладающим материалом автомобильных дорог с покрытием усовершенствованного типа, особенно дорог регионального, межмуниципального и местного значения.

Помимо прочего, слои покрытия, устроенные из асфальтобетонных смесей, могут иметь и недостатки, например, такие, как относительная зависимость от температуры окружающего воздуха и деформации материала, что принуждает вводить ограничения на движения транспортных средств.

В связи с этим необходим поиск путей усовершенствования качества составляющих асфальтобетонов, а именно, битумов.

На сегодняшний день имеется большое количество литературных источников по модифицированию органических вяжущих, по результатам которых можно выделить несколько групп полимеров [1,2]:

1. термоэластопластичные полимеры: стирол-бутадиен-стирол и этилен-винил-ацетат;
2. каучукоподобные полимеры: резиновая крошка, латексы и др;
3. терморезистивные пластмассы: эпоксидные, полиэфирные и др. синтетические смолы;
4. термопластичные пластмассы: полипропилен, полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид, поливинилацетат;
5. полимерная сера.

Немаловажной проблемой государственного значения является утилизация отходов в виде отработанных автомобильных шин. Если в развитых странах, таких, как Германия, США, Франция, Япония, доля переработанных шинных отходов от их общего количества составляет до 95 %, то в России наблюдается обратная ситуация [3–5]. Данные отходы, которые в Российской Федерации в большинстве случаев никаким образом не утилизируются, загрязняя окружающую среду, могут использоваться в различных отраслях народного хозяйства, в том числе, и для получения резинобитумных вяжущих [6-8].

В результате постоянно возрастающей нагрузки транспортных средств и повышения их количества в мире, а в частности, в России, возникает все больше и больше отходов, связанных с выходом из строя использованных

автомобильных покрышек и других резинотехнических изделий (транспортных лент, деформационных прокладок и т.п.). Поэтому необходим поиск путей утилизации подобного рода отходов, которые в настоящее время не нашли широкого применения в народно-хозяйственном значении [9,10].

Имеющиеся рекомендации по возведению покрытий из асфальтобетонных смесей предусматривали, что полученная резиновая крошка из автомобильных шин может быть введена двумя способами, непосредственно в битум (мокрый способ), и сразу при производстве асфальтобетонной смеси (сухой способ).

Так называемый «Сухой способ» не получил широкого распространения в получении резино-асфальтобетонных смесей, поскольку не была решена проблема последовательного набухания резиновой крошки в составе асфальтобетонного покрытия. Вследствие этого покрытие разуплотнялось, происходило выкрашивание минеральной части составляющей асфальтобетонной смеси и конструкций, в целом, разрушалось под действием сезонного замораживания-оттаивания влаги, находящейся в покрытии.

«Мокрый процесс» получения резино-битумного вяжущего, приводит к тому, что материал получается наиболее стабильный, с увеличенными показателями эластичности, вязкости при высоких температурах, что позволяет увеличить толщину пленок в смесях дорожного покрытия. Вяжущие по данной технологии рекомендуется производить при температуре 160–220°C.

Сама реакция получения битума состоит из двух одновременных процессов: частичное переваривание каучука в битум, с одной стороны, и, с другой стороны, адсорбция ароматических масел, имеющих в полимерных цепях, которые являются основными компонентами каучука, как природного, так и синтетического, содержащегося в резиновой крошке. Поглощение ароматических масел из битума полимерными цепями каучука приводит к тому, что каучук набухает и размягчается [11]. Частицы каучука набухают за

счет поглощения маслянистой фазы битума при высоких температурах (160–220°C) полимерными цепями, которые являются ключевыми компонентами резиновой крошки для образования гелеобразного материала. Поэтому в ходе реакции происходит одновременное уменьшение маслянистой фракции и увеличение размеров частиц каучука с последующим уменьшением расстояния между частицами. Это подразумевает образование гелевых структур, которые увеличивают вязкость до 10 раз.

Резина реагирует в зависимости от температуры и времени. Если температура слишком высока или время слишком велико, набухание будет продолжаться до такой степени, что из-за длительного воздействия высоких температур набухание сменится деполимеризацией/девулканизацией, что вызовет диспергирование каучука в битуме. В результате деполимеризации компоненты каучука высвобождаются обратно в жидкую фазу, что связано с жесткостью материала. Если температура высока или время достаточно велико, деполимеризация будет продолжаться, вызывая большее разрушение связующей сети. Взаимодействие между битумными и резиновыми материалами зависит от материала и ряда основных факторов, в том числе: температуры, времени, маслянистых наполнителей, методов обработки и пр.

В Российской Федерации на сегодняшний день производят резино-битумное вяжущее три основных поставщика: БИТРЭК, КМА и Унирем. Основное отличие в производстве компанией БИТРЭК заключается в том, что фирма поставляет готовый продукт без раскрытия основных составляющих компонентов, а именно - резиновой крошки. Известно, что покрышки автомобилей имеют различный химический состав от условий применения и различных нагрузок приходящиеся на колеса автомобилей. Поэтому одному технологическому процессу не свойственен одинаковый технологический режим производства резинобитумного вяжущего. Комплексный модификатор асфальтобетона "КМА" - это материал, представляющий собой порошок для

введения непосредственно в асфальтобетонную смесь в количестве от 0,3 до 3,0% от массы минеральной части. «Унирем» представляет собой активированный резиновый порошок девулканизованной резины, произведенный методом высокотемпературного сдвигового измельчения [12].

Профессором В.Г. Никольским и др. [13] были представлены результаты исследования модификатора асфальтобетона «УНИРЕМ». В отличие от других модификаторов, «УНИРЕМ» можно вводить как в вяжущее, то есть получать битум модифицированный резиновой крошкой («мокрый» способ), так и непосредственно в горячую асфальтобетонную смесь на стадии ее приготовления («сухой» способ). При введении в битум или в готовую асфальтобетонную смесь (до 10 % от массы вяжущего) частицы резиновой крошки распадаются, при этом изменяются свойства вяжущего, увеличивается адгезия до 5 раз [13].

Битумно-резиновые экологические композиционные вяжущие материалы «БИТРЭК» неоднородны по фазовому (размер неоднородностей от 0 до 3 мм) и химическому составу и состоят из битума и резиновой крошки, химически связанных между собой. Данные свидетельствуют, что опытные участки на основе резинобитумного вяжущего через несколько лет эксплуатации имели значительно лучшее состояние по сравнению с соседними участками, выполненные как с использованием обычного битума, так и модифицированными битумами на основе СБС [14,15].

Простейшим способом модифицирования битумов является прямое введение в них резиновой крошки, полученной путем измельчения изношенных покрышек. Однако полученные таким образом материалы, оказались, вопреки ожиданиям, недолговечными. На первом этапе использования, резиновая крошка не могла реализовать своих эластичных свойств, создавая лишь центры эластичности и не образуя единой полимерной сетки. Указанные недостатки удалось впоследствии устранить путем девулканизации резины, т.е. разрушения

вулканизационных мостиков - поперечных связей, чаще всего серных, реже смоляных или перекисных [16].

Невулканизированный каучук, резина старых автомобильных покрышек и других резино-технических изделий, представляют собой разные материалы, обладающие отличающимися свойствами. Резина труднее растворяется в битуме, нежели невулканизированный каучук. Для полного растворения в битуме вулканизированная резина должна содержать достаточно углеводородов с малым молекулярным весом, чтобы составляющие битума могли проникнуть в прочную пространственную сетчатую структуру и разрушить поперечные связи, соединяющие отдельные молекулы каучука (серные мостики). Поэтому эффект от добавления резины в битум зависит от способа ее введения.

Полученные различными авторами битумы, модифицированные резиновой крошкой, и другие строительные материалы имеют интервал пластичности от 75 до 105°C (температура размягчения по методу «Кольцо и шар» от 47 до 67°C; температура хрупкости по Фраасу от минус 13 до минус 38°C), эластичность при 25°C от 40 до 80 %; пенетрацию при 25°C от 40 до 90 пенетрационных единиц, что недостаточно для их эффективного применения в суровых климатических условиях и требует дальнейшего изучения.

Материалы и методы:

Для получения битума, модифицированного резиновой крошкой, использовались три компонента: битум нефтяной дорожный вязкий, маслопластификатор и резиновая крошка из изношенных автомобильных шин. Компонентами асфальтобетонной смеси являлись: щебень фракции 5-20 мм, песок из отсевов дробления фракции 0-5 мм, минеральный порошок, вяжущее.

Битум нефтяной дорожный вязкий

В качестве исходного вяжущего был принят битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 70/100. Физико-химические свойства нефтяного битума приведены в таблице № 1.

Таблица № 1

Физико-химические свойства исходного битума нефтяного
дорожного вязкого марки БНД 70/100.

№ п/п	Наименование показателя	Значение	Требования ГОСТ 33133-2014
1	Глубина проникания иглы, 0,1 мм: при температуре 25°C	72	71-100
2	Температура размягчения по кольцу и шару, °С	47	не ниже 47
3	Температура хрупкости, °С	минус 18	не выше минус 18
4	Растяжимость, см: при 0°C	4,0	не менее 3,7
5	Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	3	Не более 5
6	Индекс пенетрации	+2	От -1,0 до +1,0
7	Температура вспышки, °С	305	не ниже 230

Данные, представленные в таблице 1, свидетельствуют о том, что значения показателей соответствуют требованиям ГОСТ 33133-2014. Элементарный состав битума, определенный на анализаторе Flash 2000, представлен в таблице № 2.

Таблица № 2

Содержание составных элементов битума БНД 70/100

Содержание элемента, масс.%				
N	C	H	S	O
0,7	85,0	10,3	3,0	1,0 (по разности)

Примечание:

N – азот; C – углерод; H – водород; S – сера; O – кислород.

Масло-пластификатор

Используемый совмещающий агент в виде минерального масла ПН-6Ш, выпускаемого промышленностью с целью пластификации резиновых смесей, применяемых для изготовления шин и других резинотехнических изделий,

представляет собой концентрат ароматических углеводородов. Данный совмещающий агент термически устойчив, по воздействию на организм человека относится к малоопасному веществу, не имеет резкого неприятного запаха, характеризуется относительно невысокой стоимостью, а также плотностью, составляющей 960...980 кг/м³, что сопоставимо с плотностью битумов. Кроме того, данный совмещающий агент имеет вязкость в несколько раз меньшую, чем нефтяной битум, что, во-первых, способствует снижению вязкости модифицированных битумных вяжущих при рабочих температурах, а во-вторых, понижает температуру хрупкости по Фраасу конечного продукта. Физико-химические свойства масла-пластификатора ПН-6Ш приведены в таблице № 3.

Таблица № 3

Физико-химические свойства масла-пластификатора ПН-6Ш

№ п/п	Наименование показателей	Фактический показатель	Требования ТУ 38.1011217-89
1	Плотность при 20°С, г/см ³	0,963	0,950-0,980
2	Вязкость кинематическая при 100°С, мм ² /с	30,20	28-40
3	Показатель преломления при 50°С	1,5175	1,515-1,555
4	Анилиновая точка, °С	66	35-70
5	Температура вспышки в открытом тигле, °С	266	не ниже 230
6	Температура застывания, °С	36	не ниже 36
7	Содержание: Механических примесей, %	Отсутствие	Отсутствие
	Воды	Следы	Следы
	Н-метиллирролидона, %	0,01	не ниже 0,01
	Парафино-нафтеновых углеводородов, %	15,78	не ниже 20
	Смол, %	5,78	не ниже 8

Резиновая крошка

Резиновая крошка, полученная измельчением изношенных автомобильных шин, была предоставлена ООО «ЭКО-Шина» (г. Новокузнецк Кемеровской области). Ассортимент продукции данной организации включал в себя резиновую крошку фракций 0-1, 1-3 и 3-5 мм. Для получения битумов, модифицированных резиновой крошкой, было принято решение использовать

резиновую крошку размером до 1 мм. Физические свойства резиновой крошки приведены в таблице № 4.

Таблица № 4

Физические свойства резиновой крошки

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Массовая доля воды, %	1,0
2	Содержание текстиля, % по массе	1
3	Содержание черных металлов после магнитной сепарации, % по массе	0,01
4	Содержание частиц размером более 1,25 мм, % по массе	0,00
5	Содержание частиц размером от 0,63 до 1,25 мм, % по массе	52,6
6	Содержание частиц размером от 0,315 до 0,63 мм, % по массе	34,3
7	Содержание частиц размером от 0,16 до 0,315 мм, % по массе	11,43
8	Содержание частиц размером менее 0,16 мм, % по массе	1,67
9	Насыпная плотность резиновой крошки, т/м ³	0,2
10	Удельная поверхность частиц, м ² /г	0,9

Резиновая крошка соответствует требованиям ГОСТ Р 55419-2013.

Для решения поставленных задач применялись современные методы исследования физико-механических и физико-химических свойств исходных материалов, битумов, модифицированных резиновой крошкой, и асфальтобетонных смесей на их основе. Испытания проводились в лаборатории ОАО «Кемеровоспецстрой» с использованием аттестованного лабораторного оборудования, поверенных и калиброванных средств измерений.

Для моделирования в лабораторных условиях производственного процесса получения битума, модифицированного резиновой крошкой, была разработана экспериментальная лабораторная установка.

Результаты:

Для возможности определения зависимости температуры на процесс модифицирования битума резиновой крошкой на основе проанализированных данных литературных источников, а также собственноручных проведенных экспериментов, была назначена температура модифицирования 200°C, 230°C и 260°C. Результаты эксперимента приведены в таблице № 5.

Таблица № 5

Физико-химические свойства исходного битума и резинобитумного вяжущего

Время приготовления, ч	Наименование показателя										
	П25	П0	Д25	Д0	Э25	Э0	КиШ	Хр	ΔКиШ	ΔМ	
битум марки БНД 70/100											
-	71	27	72	5,0	-	-	54	-18,0	3	0,12	
Резинобитумное вяжущее, при температуре технологического процесса 200°C											
5,25	25	10	13,5	9,8	82	66	65	-13,0	0	0,16	
5,75	25	12	14,4	9,7	84	63	66	-19,5	1	0,14	
Резинобитумное вяжущее, при температуре технологического процесса 230°C											
0,25	32	19	9,5	7,4	91	94	65	-19,0	3	0,48	
0,75	31	20	12,5	7,1	89	88	59	-19,0	3	0,46	
1,25	41	23	11,6	9,2	91	74	64	-19,8	4	0,43	
1,75	44	25	13,8	7,2	88	66	62	-20,6	3	0,33	
2,25	53	30	11,5	6,6	88	58	68	-23,7	-2	0,67	
2,75	58	26	10,5	8,1	86	59	70	-25,8	-1	0,78	
3,25	63	28	13,6	7,6	90	66	68	-25,8	1	0,74	
3,75	65	26	12,9	8,6	85	55	65	-25,4	1	0,73	
4,25	69	32	14,5	8,1	86	49	62	-25,2	1	0,65	
4,75	66	32	12,5	6,8	88	48	60	-25,1	1	0,61	
5,25	63	35	14,5	7,6	83	48	57	-26,1	2	0,55	
5,75	64	36	14,9	5,8	81	31	55	-26,7	2	0,52	
Резинобитумное вяжущее, при температуре технологического процесса 260°C											
0,25	105	33	25,5	4,6	89	86	50	-19,8	-2	0,55	
0,75	119	37	35,3	7,0	77	65	36	-21,5	2	0,85	
1,25	113	55	30,4	9,0	85	55	39	-22,9	1	0,99	
1,75	168	52	21,5	10,6	81	52	42	-21,7	0,5	0,78	

Примечания:

П25 – глубина проникания иглы при температуре 25°C, доли мм;

П0 – глубина проникания иглы при температуре 0°C, доли мм;

Д25 – растяжимость при температуре 25°C, см;

Д0 – растяжимость при температуре 0°C, см;

Э25 – эластичность при температуре 25°C, %;

Э0 – эластичность при температуре 0°C, %;

КиШ – температура размягчения по кольцу и шару, °C;

ΔКиШ – изменение температуры размягчения по кольцу и шару после прогрева, °C;

ΔМ – изменение массы после прогрева, %;

Хр – температура хрупкости по Фраасу, °C.

В результате выполненных экспериментов, а также анализа полученных данных видно, что при температуре взаимодействия резиновой крошки-масла пластификатора и битума при температуре 200°C, процесс интенсификации взаимодействия компонентов настолько медленен, что при продолжительности процесса свыше 5 часов, результаты физико-механических данных отличаются друг от друга незначительно. Из-за этого назначать температуру модифицирования битума резиновой крошкой было нецелесообразно вследствие нерациональных затрат энергетических ресурсов.

Напротив, при температуре термомеханического взаимодействия составляющих компонентов при 260°C, пластификатор (масло ПН-6Ш) начинает интенсивно выгорать, что не может не сказаться на основных показателях, таких, как температура размягчения по методу «Кольцо и шар» и с пенетрацией битумного вяжущего. Поэтому регулировать такой процесс на реальном производстве будет затруднительно.

Реальное производство резинобитумного вяжущего, по данным проведенных исследований, возможно при температуре 230°C. Поскольку при данной температуре пластификация крошки проходит умеренно, без резких перепадов физического состояния и с возможностью контролирования технологического процесса. По результатам данных таблицы 5 видно, что наилучшие показатели (КиШ, температуре хрупкости и эластичности) достигаются при температуре термомеханического воздействия 3,25 часа.

Если принять во внимание, что температура технологического процесса модификации битумов резиновой крошкой представляет собой константу, составляющую $230 \pm 5^\circ\text{C}$, то вопрос о влиянии состава дисперсионной среды и числа стадий на его эффективность остается открытым.

Несмотря на то, что многие авторы [17–19] не уделяли должного внимания возможной стадийности получения битума, модифицированного резиновой

крошкой, практический опыт показал, что единовременное (одностадийное) смешение всех компонентов может привести к недоиспользованию потенциала резиновой крошки как модификатора битума, по сравнению со способом, подразумевающим разделением процесса на несколько стадий.

Таблица № 6

Физико-химические свойства битумов, модифицированных резиновой крошкой, полученных различными способами

№ способа получения	Физико-химические свойства									
	П25	П0	Д25	Д0	Э25	Э0	КиШ	Хр	ΔКиШ	ΔМ
	Исходный битум БНД 70/100									
-	61	26	71	4,0	-	-	53	-19	2	0,11
	Битум модифицированный резиновой крошкой									
Способ 1	44	19	13,0	7,5	86	80	58	-24,5	8	0,57
Способ 2	57	25	10,3	8,0	85	78	68	-25,0	-1	0,59
Способ 3	47	20	12,1	7,1	91	83	64	-25,0	2	0,62
Способ 4	40	26	10,1	7,4	91	78	67	-24,5	-1	0,56
Способ 5	43	22	11,0	6,3	88	86	64	-21,0	2	0,55

По имеющимся собственным данным, введение резиновой крошки в нагретый битум и масло-пластификатор затруднителен. Это обусловлено тем, что введение резиновой крошки большими порциями приводит к резкому вспениванию вяжущего и увеличение в объеме в 2-3 раза, что может быть небезопасно при реальном производстве вяжущего. Для минимизирования данных рисков, были рассмотрены варианты по введению резиновой крошки в несколько стадий. Результаты полученных данных представлены в таблице № 6.

Выводы:

Анализ полученных данных позволяет сделать несколько важных выводов:

1. Получение резинобитумного вяжущего по первому способу (загрузка всех составляющих компонентов единовременно с дальнейшей термомеханической обработкой) будет нерациональным из-за увеличенного временного интервала приготовления вяжущего. При рациональном опыте 2,5

часов, необходимых для того, чтобы резиновая крошка провзаимодействовала с мальтеновой частью битума и дополнительного масла-пластификатора, будет явно недостаточно. Это можно проанализировать по таким показателям, как пенетрация, и изменение температуры по методу «Кольцо и шар».

2. При приготовлении резинобитумного вяжущего в две стадии, получение так называемого, резинобитумного композита приводит к оптимальным физико-химическим показателям. Второй способ сводится к тому, что процесс приготовления вяжущего разделен на две стадии. Это необходимо для того, чтобы битум под воздействием достаточно высокой для него температуры 230°C не утратил своих пластичных свойств. На первоначальном этапе готовится резинобитумная суспензия, состоящая из половины общей доли битума, масла-пластификатора ПН-6Ш и резиновой крошки. На второй стадии вводится вторая половина битума и температура снижается до оптимальных для битума $105-110^{\circ}\text{C}$. В результате получается продукт с оптимальными физико-химическими показателями. При увеличении числа стадий (способ 3 относительно способа 2 или способ 5 относительно способа 4) приводит к некоторому снижению физико-химических свойств (падают значения глубины проникания иглы, температуры размягчения по кольцу и шару, возрастает показатель изменения температуры размягчения по кольцу и шару после прогрева). Обусловлено это тем, что часть резиновой крошки, которая была введена в первую очередь, достаточно хорошо набухает и растворяется, в то время как пластификация и растворение резиновой крошки, введенной позже, проходит в меньшем объеме.

Для оценки степени частичной деструкции резиновой крошки в вяжущем была произведена оценка до и после термомеханической обработки при различных технологиях:

1. Была взята исходная резиновая крошка размером до 1 мм, просеяна через сита с размером ячеек 0,05; 0,315; 0,63; 1,25 мм соответственно.

2. Получено резинобитумное вяжущее по следующей технологии: битум, модифицированный резиновой крошкой состоящий из 73,4 % битума, 6,6 % нефтяного масла и 20 % резиновой крошки, был приготовлен в одну стадию, характеризующуюся тем, что все компоненты были загружены сразу при температуре 230°C в течение 2,5 часов.

3. Стадийный процесс состоял в том, что в первую очередь в битум в количестве 50 % и масла-пластификатора в количестве 12,5 %, нагретую до температуры 230±5°C, добавили резиновую крошку в количестве 37,5 %;

- смесь при постоянном перемешивании выдерживали при температуре 230±5°C в течении 2,5 часов;

- далее в резинобитумную суспензию в количестве 52,5 % добавляли битум, имеющий температуру 105±5°C, в количестве 47,5 % и смесь выдерживали в течение 1,5 и 3,0 часа соответственно с получением вяжущего.

После полученного вяжущего, последний был растворен керосином и уайт-спиритом для разделения резиновой крошки и масляных фракций битума. После этого был произведен расчет частных остатков частиц резиновой крошки до и после термомеханической обработки.

$$\bar{D}_l = D_1 \cdot h_1 + D_2 \cdot h_2 + \dots + D_n \cdot h_n$$

где \bar{D}_l – размер сита, мм;

h_i – остаток на сите.

Таблица № 7

Результаты расчетов

Вид резиновой крошки	Частный остаток на сите	Уменьшение средневзвешенного размера частиц, %
Исходная	0,478	-
1 ст., 3 ч	0,461	3,6
2 ст., 1,5 ч	0,402	15,9
2 ст., 3 ч	0,384	19,7

Результаты эксперимента показывают, что при взаимодействии резиновой крошки с пластифицированным битумом при одно- и двухстадийном процессе, в результате последнего происходит уменьшение резиновой крошки по объему на 15...20 %. Поэтому можно предположить, что происходит частичная деструкция резиновой крошки, что ведет к улучшенным физико-химическим показателям.

Обобщая приведенные результаты, можно сделать вывод, что модифицирование битума резиновой крошкой ведет к улучшению физико-механических показателей вяжущего в целом, а значит можно предположить, что асфальтобетон на таком вяжущем будет более стоек к воздействиям на него транспортных средств.

Литература

1. Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Кадомцева А.А. Модификация битумов полимерами // Современные научные исследования и инновации, 2014, №5. URL: web.snauka.ru/issues/2014/05/34687.
2. Беляев К.В., Чулкова И.Л. Модификация битума техническим углеродом // Вестник СибАДИ. 2019. № 4. С. 472-485.
3. Roberts F., Kandhal S., Brown R., Dunning L. Investigation and evaluation of ground tyre rubber in hot-mix asphalt // NCAT Auburn University. 1989 № 7. pp. 89-94.
4. Memon N. Characterisation of conventional and chemically dispersed crumb rubber modified bitumen and mixtures // University of Nottingham. Nottingham, UK: s.n. PhD thesis. 2011 № 2. pp. 125-132.
5. Вторичное использование и переработка изношенных автомобильных шин // URL: alfaspk.ru/vtorichnoe-ispolzovanie-pererabotka-shin.
6. Ziari H. Characterization of rutting resistance of EBS-modified asphalt mixtures. Pet. Sci. Technol. 2016. № 13. Pp. 1107-1112.

7. Moreno-Navarro F. International Journal of Pavement Engineering, 2017, № 18. URL: tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2015.1057138.

8. Khodaii A. Identification of dominant parameters for stripping potential in warm mix asphalt using response surface methodology // Mater. Struct. 2016 № 49 (6). pp. 2425–2437.

9. Минскер К.С. Использование технологии упрягодеформационного диспергирования резиновых отходов для получения гидроизоляционного материала // Строительные материалы. 2002. № 12. С. 50-52.

10. Аюпов Д.А., Потапова Л.И., Мурафа А.В и др. Современные способы регенерации резин и возможности использования их в строительной отрасли // Строительные материалы. 2011. № 5. С. 260-267.

11. Cheovits JG, Dunning RL, Morris GR. Characteristics of asphalt-rubber by the slide plate microviscometer. Association of Asphalt Paving Technologists. vol. 51. 1982. pp. 240–61.

12. Карпенко А. В., Духовный Г. С., Мирошниченко С. И., Резинобитумное вяжущее, основные показатели и перспективы использования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2012. - № 1. - С. 22-24.

13. Никольский, В. Г., Красоткина И.А. "Унирем" и другие модификаторы // Автомобильные дороги. – 2010. – № 3. – С. 28-29.

14. Битумнорезиновые экологически чистые композиционные материалы битрэк // URL: pandia.ru/text/77/28/92061.php

15. Петров В.К. Вяжущие и резиноасфальтобетоны БИТРЕК. Опыт применения // ООО НПГ «ИНФОТЕХ». Москва: Норма, 2014. С. 15-20.

16. Ресайклинг с запахом резины // URL: plus-one.ru/ecology/resaykling-s-zapahom-reziny

17. Трубников Н.В, Сурмели Д.Д, Мар Ч.И. Гидроизоляционный и кровельный материал – изол // Строительные материалы, изделия и конструкции. 1956. №12. С. 7-12.

18. Диброва И.А. Битумно-резиновые дисперсии новый вяжущий материал для строительства дорожных покрытий // Автомобильные дороги. 1959. №12. С. 24-27.

19. Горельшев Н. В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы. учеб. пособие // М.: Можайск-Терра, 1995. С. 176.

References

1. Tarasov R.V., Makarova L.V., Kadomtseva A.A. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2014, №5. URL: web.snauka.ru/issues/2014/05/34687.

2. Belyaev K.V., Chulkova I.L. *Vestnik SibADI*. 2019. № 4. pp. 472-485.

3. Roberts F., Kandhal S., Brown R., Dunning L. Investigation and evaluation of ground tyre rubber in hot-mix asphalt NCAT Auburn University. 1989 № 7. pp. 89-94.

4. Memon N. Characterisation of conventional and chemically dispersed crumb rubber modified bitumen and mixtures University of Nottingham. Nottingham, UK: s.n. PhD thesis. 2011. № 2. pp. 125-132.

5. *Vtorichnoe ispol'zovanie i pererabotka iznoshennykh avtomobil'nykh shin* URL: alfaspk.ru/vtorichnoe-ispolzovanie-pererabotka-shin.

6. Ziari H. *Harakteristika koleeustojchivosti asfal'tobetonnyh smesej, modificirovannyh EBS* [Characterization of rutting resistance of EBS-modified asphalt mixtures]. *Pet. Sci. Technol.* 2016. № 13. pp. 1107-1112.

7. Moreno-Navarro F. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, № 18. URL: tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2015.1057138.

8. Khodaii A. *Mater. Struct.* 2016. № 49 (6). pp. 2425–2437.

9. Minsker K.S. *Stroitel'nye materialy*. 2002. № 12. Pp. 50-52.

10. Ayupov D.A., Potapova L.I., Murafa A.V. *Stroitel'nye materialy*. 2011. № 5. pp. 260-267.

11. Cheovits JG, Dunning RL, Morris GR. Characteristics of asphalt-rubber by the slide plate microviscometer. Association of Asphalt Paving Technologists. vol. 51. 1982. pp. 240–261.

12. Karpenko A. V., Dukhovnyy G. S., Miroshnichenko S. I. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. - 2012. - № 1. - p. 22-24.

13. Nikol'skiy, V. G., I. A. Krasotkina. Avtomobil'nye dorogi. 2010. № 3. pp. 28-29.

14. Bitumnorezinovye ekologicheski chistye kompozitsionnye materialy bitrek [Bituminous rubber environmentally friendly composite materials bitrek]/ URL: pandia.ru/text/77/28/92061.php

15. Petrov V.K. Vyazhushchie i rezinoasfal'tobetony BITREK. Opyt primeneniya [Binders and rubber asphalt concrete BITREK. Application experience] ООО NPG «INFOTEK». Moskva: Norma, 2014. pp. 15-20.

16. Resaykling s zapakhom reziny [Recycling with the smell of rubber]. URL: plus-one.ru/ecology/resaykling-s-zapahom-reziny

17. Trubnikov N.V, Surmeli D.D, Mar Ch.I. Stroitel'nye materialy, izdeliya i konstruktsii. 1956. №12. pp. 7-12.

18. Dibrova I.A. Avtomobil'nye dorogi. 1959. №12. pp. 24-27.

19. Gorelyshev N. V. Asfal'tobeton i drugie bitumomineral'nye materialy. ucheb. posobie [Asphalt concrete and other bitumen-mineral materials. studies. stipend]. Mozhaysk-Terra, 1995. p. 176.