На правах рукописи

Иванов Сергей Александрович

АСФАЛЬТОБЕТОН НА БИТУМАХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ РЕЗИНОВОЙ КРОШКОЙ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Улан-Удэ
2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель:	**Шабаев Сергей Николаевич** кандидат технических наук, доцент
Официальные оппоненты:	**Хозин Вадим Григорьевич,** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет «КазГАСУ)», заведующий кафедрой «Технологии строительных материалов, изделий и конструкций» **Копылов Виктор Евгеньевич,** кандидат технических наук, ФГБУН СО РАН «Института проблем нефти и газа «ИПНГ», старший научный сотрудник испытательной лаборатории проблем коррозии и старения
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

Защита состоится «_ _» _____ 2020 г. в 09^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 999.156.02, созданного на базе Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления по адресу: 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В, строение 8, ауд. 8-124.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления и на сайте www.esstu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета  Урханова Лариса Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Для устройства покрытий автомобильных дорог в мировой практике наибольшее распространение получили асфальтобетонные смеси. Однако асфальтобетонные покрытия имеют значительные недостатки и, зачастую, малый срок службы, что обусловлено, преимущественно, низким качеством вяжущего материала - нефтяного битума.

В последнее время все большее распространение получают технологии модификации нефтяных битумов различными полимерами, в том числе и резиновой крошкой. И если большинство полимеров, применяемых для модификации битумов, представляют собой продукцию химической промышленности, что не может не отражаться на повышении стоимости вяжущих, то резиновая крошка представляет собой продукт механической переработки резинотехнических отходов, имеющий стоимость, сопоставимую со стоимостью нефтяного битума.

При модификации битумов резиновой крошкой нет четких обоснований по температурно-временным режимам технологического процесса, а также существуют различные мнения ученых, объясняющих механизм процесса структурообразования, протекающего при их объединении. Данный факт не позволяет эффективно использовать битумы, модифицированные резиновой крошкой, в том числе, для получения долговечных асфальтобетонных смесей, о чем свидетельствует ряд отрицательных результатов их опытного применения. Поэтому, обоснование наиболее эффективных температурно-временного режима и числа стадий технологического процесса модификации битумов резиновой крошкой, обеспечивающих получение на их основе высококачественных асфальтобетонных смесей, актуально.

Степень разработанности темы

Изучению процессов структурообразования и технологии модифицирования битума резиновой крошкой посвящены работы Д.А. Аюпова А.В. Битуева, Х. Вальтера, П. Вуда, Н.В. Горелышева, В.Т. Ерофеева, А.В. Ерофеева, И.А. Дибровой, А.В. Королева, В.П. Лаврухиной, А.В. Мурафа, Ю.Е. Никольского, В.С. Прокопца, А.В. Руденского, И.М. Руденской, Б.М. Слепой, М.Д. Соколовой, Д.К. Томпсона, Л.А. Урхановой, В.Г. Хозина, А.А. Христофоровой и др.

Обобщение результатов показывает, что рекомендуемая температура модификации битумов резиновой крошкой варьируется от 120 до 235ºС, по времени – от 45 минут до 6 часов, при этом в качестве пластификаторов предлагается использовать смолы, нефтяные масла, каучуки, гудроны и их разновидности. Варьирование в достаточно больших пределах технологических параметров не дает ответа на главный вопрос – какие из них являются оптимальными для использования модифицированного битума в качестве вяжущего материала при получении асфальтобетонных смесей.

Целью работы является разработка принципов производства эффективных асфальтобетонных смесей на битумах, модифицированных резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

– оценить влияние температуры и числа стадий технологического процесса на эффективность модификации битумов резиновой крошкой;

– установить закономерности процесса структурообразования битумов, модифицированных резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе;

– определить рациональный температурный режим получения асфальтобетонных смесей на битумах, модифицированных резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе.

Рабочая гипотеза диссертационного исследования базируется на предположении о том, что при рациональных температуре и времени, разделение процесса модификации битумов резиновой крошкой на стадии позволит получить на их основе высококачественные асфальтобетонные смеси.

Положения, выносимые на защиту

– рациональным технологическим процессом модификации битумов резиновой крошкой, при котором достигается повышение температуры размягчения, эластичности, адгезии и понижение температуры хрупкости вяжущего, является двухстадийный процесс, заключающийся в предварительной термомеханической обработке при температуре 230±5ºС и времени воздействия 3,25±1,5 часа резиновой крошкой в среде битума и нефтяного масла с получением концентрированной суспензии резинобитумного композита, с последующим ее смешением с битумом при температуре 155-165ºС в течение 0,25-0,5 часа;

– двухстадийный технологический процесс модификации битумов резиновой крошкой способствует повышению гомогенности системы с формированием в ней дисперсного каркаса, армирующего вяжущее и придающего ему повышенные интервал пластичности (до 90-95ºС), эластичность (85-90 % при 25ºС, 65-70 % при 0ºС) и адгезию (выше на 1 балл по сравнению с исходным битумом не зависимо от происхождения горной породы);

– асфальтобетонные смеси на битумах, модифицированных резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, полученные аналогично асфальтобетонным смесям на основе битума той же марки, с той разницей, что температура увеличена на 15-20ºС, имеют на 5-10 % большую водостойкость при длительном водонасыщении и 7-17 % увеличенную сдвигоустойчивость по сцеплению при температуре 50ºС.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

- выявлено, что при совмещении пластифицированного битума с резиновой крошкой, средневзвешенный размер частиц последней при двухстадийном технологическом процессе уменьшается в 4…6 раз больше, чем при одностадийном, что ведет к повышению однородности системы и обуславливает изменение свойств вяжущего не только из-за взаимодействия на границе раздела фаз «резиновая крошка – битум», но и за счет продуктов деструкции резиновой крошки;

- установлено, что при двухстадийном технологическом процессе модификации битумов резиновой крошкой в гетерогенной системе формируется сетчатый каркас, состоящий из отдельных фрагментов (нитей), представляющих собой частично сшитые, но разорванные молекулы каучука, армирующий вяжущее и придающий ему повышенные интервал пластичности, эластичность и адгезию.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в исследовании влияния температуры и числа стадий технологического процесса модификации битумов резиновой крошкой на физико-химические свойства и процесс структурообразования вяжущего.

Практическая значимость работы заключается в обосновании рациональных температуры, времени и числа стадий технологического процесса модификации битумов резиновой крошкой, а также температурного режима получения эффективных асфальтобетонных смесей на их основе.

Методология и методы диссертационного исследования

В работе использовались современные физико-химические методы исследования структурообразования вяжущих (атомно-силовая, растровая электронная, инфракрасная спектроскопия, анализ (спектрографический, регрессионный)), стандартные методы определения свойств битумов и асфальтобетонов, методы дедукции и описания, а также лабораторный эксперимент.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечивается применением апробированных, стандартизованных методик, современного аттестованного испытательного оборудования, поверенных и калиброванных средств измерений, методов статистической обработки результатов.

Апробация работы диссертации

Основные результаты диссертационной работы и отдельные ее положения были доложены и одобрены на научно-практических конференциях: «Россия молодая» (Кемерово, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019), «Студенческий научный форум» (Кемерово, 2013), «Строительство, формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2013), «Природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока – взгляд в будущее» (Кемерово, 2013), «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Кемерово, 2014), «Проблемы строительного производства» (Кемерово, 2014, 2016, 2018), «Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики (Томск, 2015), «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (Томск, 2015, 2016), «Перспективные технологии в строительстве и эксплуатации автомобильных дорог» (Москва, 2015), «Архитектура, строительство, транспорт» (Омск, 2015).

Внедрение результатов работы. Разработанная асфальтобетонная смесь рекомендована ОАО «Кемеровоспецстрой» для строительства автомобильных дорог общего пользования. Сооружен экспериментальный участок автомобильной дороги в Кемеровской области на базе ОАО «Кемеровоспецстрой» с устройством покрытия из асфальтобетонной смеси на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе. Получен один акт внедрения. Полученные результаты используются в КузГТУ в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» при изучении дисциплины «Строительные материалы».

Публикации

Результаты исследований отражены в 16 публикациях, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования материалов диссертаций, 3 в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, 8 в журналах и сборниках, входящих в РИНЦ.

Личный вклад автора. Автором установлено, что при двухстадийном технологическом процессе модификации битумов резиновой крошкой в гетерогенной системе формируется сетчатый каркас, состоящий из отдельных фрагментов (нитей), представляющих собой частично сшитые, но разорванные молекулы каучука, армирующий вяжущее, а также выявлено, что при совмещении пластифицированного битума с резиновой крошкой, средневзвешенный размер частиц последней при двухстадийном технологическом процессе уменьшается в 4…6 раз больше, чем при одностадийном. Проведен комплекс экспериментальных исследований с последующей обработкой результатов. Проведена апробация результатов работы

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 119 страницах, состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, 3 приложений, содержит 24 таблицы, 25 рисунков. Библиографический список включает 168 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проанализированы современные направления совершенствования асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, различные материалы, используемые для модификации битумных вяжущих, технологические режимы процесса модификации битумов резиновой крошкой, а также различные точки зрения механизма процесса структурообразования.

Асфальтобетонные покрытия, получившие достаточно широкое распространение в мире, имеют ряд недостатков, свойственных для нежестких дорожных одежд, в том числе зависимость их физико-механических и деформационных свойств от температуры наружного воздуха, что заставляет вводить сезонные ограничения для движения автотранспортных средств с повышенной осевой нагрузкой, снижение до 10 раз несущей способности при статической нагрузке по сравнению с динамической, что вызывает пластические деформации материала в городских условиях, особенно на участках перед перекрестками, а также повышенное трещинообразование в условиях резкоконтинентального климата, характеризующегося значительным суточным перепадом температур воздуха. Это приводит к тому, что при расчетном сроке службы дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием от 10 до 20 лет, фактический срок службы зачастую не превышает 3-9 лет. В связи с этим Федеральное дорожное агентство для совершенствования асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог утвердило план внедрения в России системы проектирования асфальтобетонной смеси Superpave, который предусматривает, в том числе, выбор битумного вяжущего для заданных условий эксплуатации.

Таким образом, для совершенствования асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог путем внедрения в практику полимерасфальтобетонов и системы проектирования состава асфальтобетонной смеси Superpave, необходимо повысить качество битумных вяжущих путем их модификации.

Изучению процессов и технологии модифицирования битума различными полимерами посвящены работы О.П. Афиногенова, В.Д. Галдиной, Л.Б. Гезенцвея, Ф. Гонеля, Г.И. Горшенина, Л.М. Гохмана, Е.М. Гурарий, А.С. Колбановской, В.Е. Копылова, А.В. Королева, В.В. Купреенко, О.В. Лукша, И.А. Плотникова, А.П. Чехова и др.

При этом модифицирование битума в основном связано с добавлением в последний различных полимеров, в том числе: термоэластопластичных полимеров, термореактивных и термопластичных пластмасс, полимерной серы и др. Однако на сегодняшний день все большую актуальность набирают технологии, ориентированные на модифицирование битумов отходами промышленного производства, в том числе резиновой крошкой из изношенных автомобильных шин.

Процессу модифицирования битума резиновой крошкой посвящены работы Д.А. Аюпова, А.В. Битуева, Х. Вальтера, П. Вуда, Н.В. Горелышева, В.Т. Ерофеева, А.В. Ерофеева, И.А. Дибровой, А.В. Королева, В.П. Лаврухиной, А.В. Мурафа, Ю.Е. Никольского, В.С. Прокопца, А.В. Руденского, И.М. Руденской, Б.М. Слепой, М.Д. Соколовой, Д.К. Томпсона, Л.А. Урхановой, В.Г. Хозина, А.А. Христофоровой и др.

Известны два основных способа использования резиновой крошки для модифицирования: «сухой», путем ее введения непосредственно при получении асфальтобетонных смесей и «мокрый», заключающийся в добавлении резиновой крошки в битум.

«Сухой» способ введения резиновой крошки в асфальтобетонную смесь является наиболее простым и низкозатратным, однако практический опыт показал, что основной и главный недостаток заключается в постепенном набухании резиновой крошки во времени, в следствие чего покрытие через 2-3 года после устройства разуплотняется и разрушается, а крошка - выкрашивается. Поэтому в ведущих странах мира от «сухого» способа было принято решение отказаться.

«Мокрый» способ основан на разложении и девулканизации резины в битуме. Основными недостатками этого способа являются необходимость использования различных пластификаторов (совмещающих агентов) и дополнительного смешивающего оборудования.

На сегодняшний день не существует единого мнения о структурообразовании битума, модифицированного резиновой крошкой. Одни считают, что резиновая крошка набухает в масляных фракциях битума и в результате механических воздействий происходит разрыв по ослабленным межмолекулярным связям, то есть осуществляется девулканизация резины с образованием каучукового вещества, которое структурирует битум. Однако также известно, что даже при реализации метода Terminal Blended, подразумевающего совмещение битума и резиновой крошки при температуре 200-260ºС с использованием высокооборотистых смесителей, деструкцию резиновой крошки не происходит, а девулканизированный каучук имеет атомную массу не более 65 % от первоначальной. Поэтому представление структуры битума, модифицированного резиновой крошкой, как системы, в которой между фрагментами полимера и мальтенами вяжущего возникает взаимная диффузия, в результате которой исчезает граница раздела между двумя контактирующими материалами, также обосновано.

Во второй главе приведены физико-механические и физико-химические свойства исходных материалов, а также выполнено планирование экспериментов.

В третьей главе приведены результаты эксперимента по оценке влияния температуры и числа стадий на эффективность процесса модификации битумов резиновой крошкой.

На основе анализа данных библиографических источников, а также собственных предварительных экспериментов, было принято решение назначить температуру

технологического процесса модификации битумов резиновой крошкой равной 200ºС, 230ºС и 260ºС. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-химические свойства исходного битума и битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном процессе

Время приготовления, ч	Наименование показателя									
	П25	П0	Д25	Д0	Э25	Э0	КиШ	Хр	ΔКиШ	ΔМ
Исходный битум марки БНД 60/90										
-	61	26	71	4,0	-	-	53	-19,0	2	0,11
Битум, модифицированный резиновой крошкой, при температуре технологического процесса 200ºС										
5,25	25	10	13,2	9,1	80	64	69	-19,0	0	0,13
5,75	24	13	14,7	9,8	85	62	68	-20,5	1	0,15
Битум, модифицированный резиновой крошкой, при температуре технологического процесса 230ºС										
0,25	30	18	9,1	7,0	90	93	64	-18,0	4	0,49
0,75	33	21	12,9	7,1	88	87	58	-18,0	4	0,47
1,25	40	24	11,9	9,2	90	73	63	-19,5	5	0,42
1,75	45	26	13,5	7,2	87	65	61	-20,0	4	0,35
2,25	52	31	11,4	6,5	89	55	67	-23,0	-2	0,68
2,75	57	25	10,3	8,0	85	58	68	-25,0	-1	0,79
3,25	61	27	13,4	7,5	89	65	67	-25,0	1	0,75
3,75	63	25	12,8	8,5	84	53	65	-25,5	1	0,74
4,25	58	33	14,4	8,0	85	48	61	-25,5	1	0,66
4,75	55	33	12,0	6,7	86	48	60	-25,5	1	0,60
5,25	62	34	14,0	7,5	82	48	58	-26,0	2	0,56
5,75	65	38	14,8	5,9	85	29	56	-26,5	2	0,55
Битум, модифицированный резиновой крошкой, при температуре технологического процесса 260ºС										
0,25	100	32	25,6	4,6	88	85	49	-19,0	-2	0,51
0,75	118	38	35,1	7,0	75	68	35	-21,0	2	0,80
1,25	111	56	30,3	9,0	83	54	38	-22,5	1	0,96
1,75	166	51	21,3	10,6	86	51	41	-21,5	0,5	0,78

Примечания:

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

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

Д25 – растяжимость при температуре 25ºС, см;

Д0 – растяжимость при температуре 0ºС, см;

Э25 – эластичность при температуре 25ºС, %;

Э0 – эластичность при температуре 0ºС, %;

КиШ – температура размягчения по кольцу и шару, ºС;

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

ΔМ – изменение массы после прогрева, %;

Хр – температура хрупкости по Фраасу, ºС.

В ходе проведенного эксперимента было выявлено, что при температуре 200ºС процесс пластификации резиновой крошки протекает настолько медленно, что назначать такую температуру экономически не целесообразно. При температуре 260ºС пластификатор начинает выгорать, а разложение резиновой крошки происходит настолько быстро, что регулировать такой процесс на производстве в реальных условиях практически не возможно.

Регулирование процесса пластификации резиновой крошки в промышленных масштабах при чувствительном ее взаимодействии с пластифицированным битумом возможно при температуре технологического процесса 230ºС. При данной температуре с постепенным увеличением времени воздействия пенетрация битума, модифицированного резиновой крошкой, постоянно растет, что свидетельствует о пластификации и частичной деструкции резиновой крошки. Анализ данных показывает, что при температуре 230ºС и времени технологического процесса 15 минут резиновая крошка пластифицируется сильнее, чем при температуре 200ºС и времени воздействия более 5 часов. Зависимости физико-химических свойств битума, модифицированного резиновой крошкой, от времени технологического процесса при температуре 230ºС приведены на рисунках 1-4 (условные обозначения аналогичны тем, которые приведены в таблице 1).

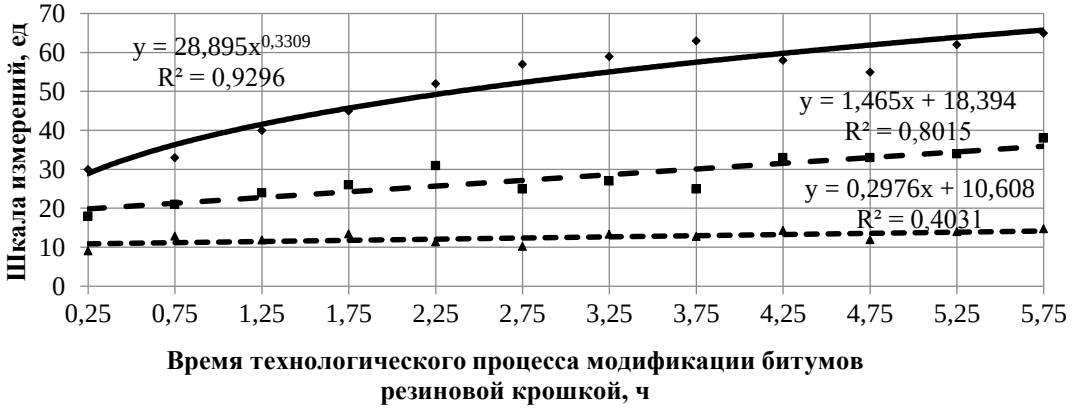


Рисунок 1 – Зависимости глубины проникания иглы при температурах 25ºС и 0ºС, а также растяжимости при температуре 25ºС битума, модифицированного резиновой крошкой, от времени технологического процесса при температуре 230ºС

С увеличением времени технологического процесса происходит постепенная частичная деструкция резиновой крошки с соответствующим уменьшением размера самих частиц, что ведет к снижению влияния крупных включений резиновых частиц на условия проведения лабораторных испытаний в связи с уменьшением их размеров.

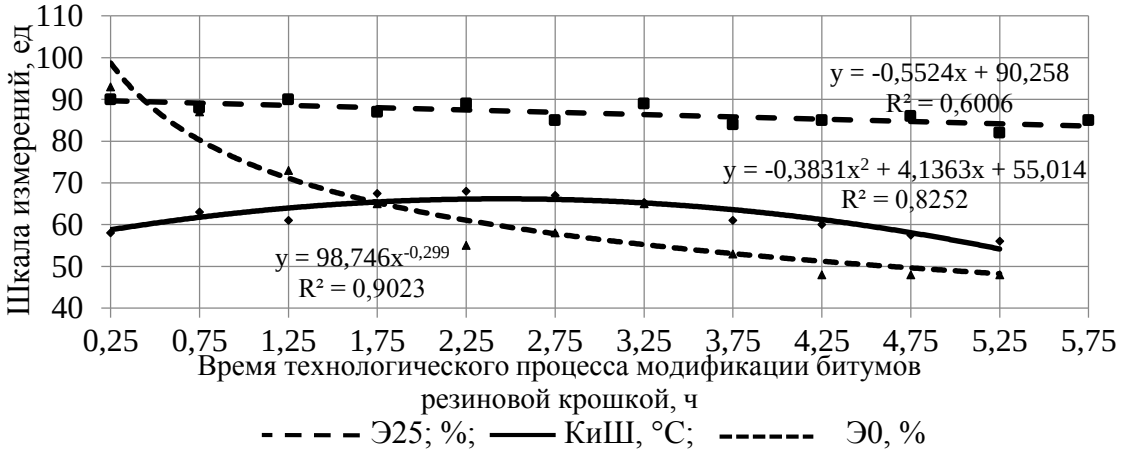


Рисунок 2 - Зависимости эластичности при температурах 25ºС и 0ºС, а также температуры размягчения по кольцу и шару битума, модифицированного резиновой крошкой, от времени технологического процесса при температуре 230ºС

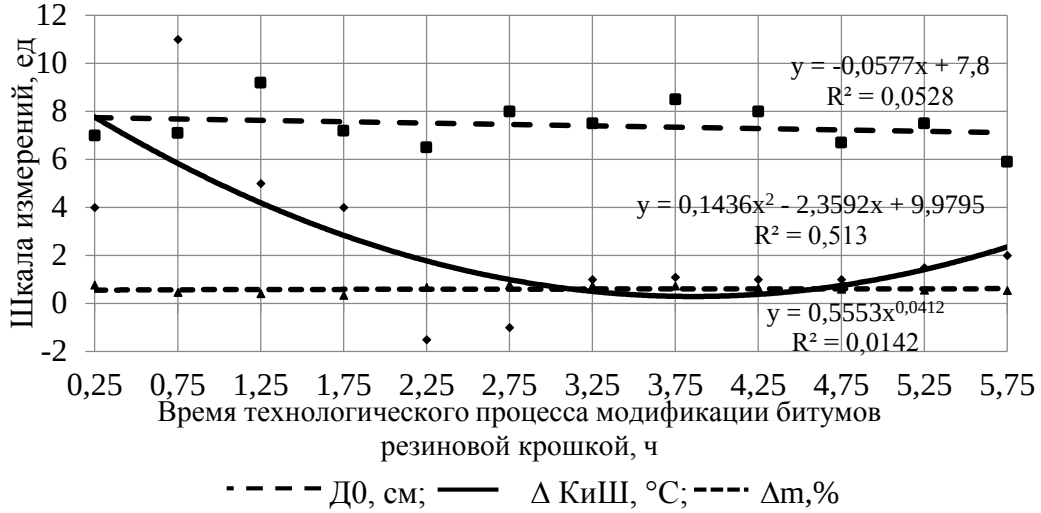


Рисунок 3 - Зависимости растяжимости при температуре 0ºС, изменения температуры размягчения по кольцу и шару после прогрева и изменения массы после прогрева битума, модифицированного резиновой крошкой, от времени технологического процесса при температуре 230ºС

Растяжимость при температуре 0ºС составляет 7-8 см, а потеря массы после прогрева 0,30-0,80 %. Если для первого показателя рост численного значения относительно исходного битума косвенно свидетельствует о снижении температуры хрупкости битума, модифицированного резиновой крошкой (снижение жесткости и вязкости при пониженных температурах), то увеличение показателя изменения массы после прогрева характеризует получение более нестабильной по сравнению с исходным битумом системы, в которой достаточно быстро протекают процессы окисления. Конечно это минус для битума, модифицированного резиновой крошкой, но если дополнительно проанализировать зависимость изменения температуры размягчения по кольцу и шару после прогрева от времени технологического процесса, то можно утверждать, что при времени до 3,0-3,5 часов скорость протекания процесса частичной деструкции резиновой крошки превосходит скорость процесса окисления пластифицированного битума, а, значит, изменение массы после прогрева, в этом случае, не имеет первостепенного значения.

С увеличением времени технологического процесса происходит постепенное замедление скорости падения эластичности при 0ºС, а также стабильное падение эластичности при 25ºС, что обусловлено тем, что вначале резиновые частицы имеют достаточно большой размер и в ходе проведения испытания выстраиваются в нить чередующихся сегментов резиновой крошки и битумного вяжущего (это объясняет значительно меньшую растяжимость битума модифицированного резиновой крошкой при 25 ºС относительно исходных битумов в связи с образованием концентраторов напряжений), при обрыве которой растянутые резиновые частицы, возвращаясь к исходной форме, «подтягивают» за собой и сегменты пластифицированного битумного вяжущего. С уменьшением размера частиц уменьшаются и объемы упругих деформаций, что вызывает снижение эластичности битума, модифицированного резиновой крошкой.

Таким образом, эластичность битума модифицированного резиновой крошкой обуславливается упругими деформациями резиновых частиц и фрагментами обрывками молекул полимера высвободившихся из них.

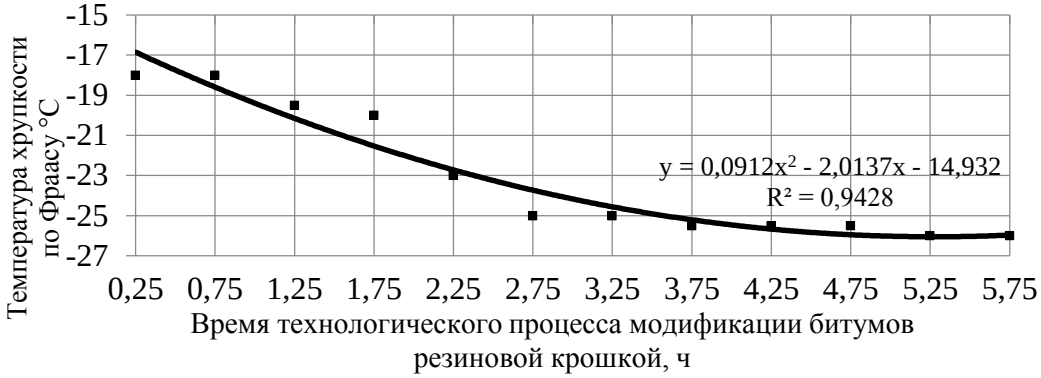


Рисунок 4 – Зависимость температуры хрупкости битума, модифицированного резиновой крошкой, от времени технологического процесса при температуре 230ºС

Температура хрупкости по Фраасу снижается с увеличением времени технологического процесса модификации битумов резиновой крошкой и стабилизируется по истечении 5-6 часов, что объясняется увеличением объема фрагментов полимера с течением времени, а также ростом количества образующихся низкомолекулярных, в том числе летучих, углеводородов.

Зависимости температуры размягчения по кольцу и шару и температуры хрупкости по Фраасу от времени технологического процесса имеют экстремум. Именно эти зависимости определяют интервал пластичности вяжущего, по которому можно определить оптимальное время процесса совмещения резиновой крошки с пластифицированным битумом (рисунок 5).



Рисунок 5 – Зависимость интервала пластичности битума, модифицированного резиновой крошкой, от времени технологического процесса при температуре 230ºС

Анализ зависимости, представленной на рисунке 5, показывает, что при заданных факторах эксперимента, оптимальное время технологического процесса модификации битума резиновой крошкой составляет 3,25 часа. Изменение времени в большую или меньшую стороны ведет к снижению интервала пластичности модифицированного битума, однако это изменение незначительно. Если принять, что допустимое снижение интервала пластичности битума, модифицированного резиновой крошкой, по сравнению с экстремумом может составлять 5 % (в соответствии с результатами представленного эксперимента это 4,5ºС), то можно получить допустимый интервал времени технологического процесса совмещения резиновой крошки с пластифицированным битумом. В представленном случае это 3,25±1,5 часа.

Таким образом, эффективность технологического процесса модификации битумов резиновой крошкой достигает наибольшего значения при температуре 230±5ºС, при этом рекомендуемая длительность должна составлять 3,25±1,5 часа.

Чтобы дать объективную оценку влияния стадийности технологического процесса на эффективность модификации битумов резиновой крошкой, был поставлен следующий эксперимент:

1. В первом случае, битум, модифицированный резиновой крошкой и 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 в один реакционный котел с выдерживанием при постоянном перемешивании при температуре 230±5ºС в течение 2,5 часов.

2. По второму способу было принято решение получить битум, модифицированный резиновой крошкой, при использовании стадийного процесса. Суть состояла в том, что способ получения был разделен на две стадии и заключался в следующем:

- в дисперсионную среду битума в количестве 50 % и нефтяного масла в количестве 12,5 %, нагретую при постоянном перемешивании до температуры 230±5ºС, добавляли резиновую крошку в количестве 37,5 %, имеющую комнатную температуру;
- смесь при постоянном перемешивании выдерживали при температуре 230±5ºС в течении 2,5 часов с получением концентрированной суспензии резинобитумного композита;
- отключали нагревательные элементы и в концентрированную суспензию резинобитумного композита в количестве 52,5 % добавляли битум, имеющий температуру 105±5ºС, в количестве 47,5 % и смесь выдерживали в течение 0,25-0,50 часа с получением вяжущего.

3. Третий способ характеризовался получением битума, модифицированного резиновой крошкой, подобно второму варианту с тем отличием, что резиновая крошка вводилась частями. Суть метода заключалась в том, что в среду битума в количестве 50 % и нефтяного масла в количестве 12,5 %, нагретую при постоянном перемешивании до температуры 230±5ºС, добавляли резиновую крошку, имеющую комнатную температуру, в количестве 12,5 %, смесь непрерывно перемешивали в течение 0,25-0,50 часа, повторно добавляли резиновую крошку в количестве 12,5 %, смесь непрерывно перемешивали в течение 0,75 часа, повторно добавляли резиновую крошку в количестве 12,5 %, смесь непрерывно перемешивали в течение 1,15-1,35 часа с образованием концентрированной суспензии резинобитумного композита. Непосредственно после получения в концентрированную суспензию резинобитумного композита в количестве 52 % добавляли битум в количестве 48 %, имеющий температуру от 100 до 110ºС, отключали нагревательные элементы и смесь окончательно перемешивали в течение 0,25-0,50 часа.

4. По четвертому способу было принято решение увеличить концентрацию резиновой крошки в концентрированной суспензии резинобитумного композита. Так как ввести резиновую крошку в один прием в данном случае не представилось возможным, то вводили ее в состав частями по аналогии с третьим вариантом. При этом соотношение компонентов в концентрированной суспензии резинобитумного композита было принято: резиновая крошка: масло-пластификатор: битум = 3 : 1 : 3.

5. Последний способ повторяет четвертый с той разницей, что резиновая крошка вводилась в состав в пять стадий равными частями с интервалом 0,50 часа.

После получения по каждому варианту битумов, модифицированных резиновой крошкой, производилась оценка их физико-химических свойств. Результаты

эксперимента приведены в таблице 2 (условные обозначения аналогичны тем, которые приведены в таблице 1).

Таблица 2 – 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 60/90									
-	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

Анализ полученных данных позволил сделать несколько выводов:

1. Если приготавливать битум, модифицированный резиновой крошкой, в одну стадию (путем единовременного смешения всех компонентов), то времени технологического воздействия, составляющего 2,5 часа, необходимого для пластификации и частичной деструкции резиновой крошки, явно недостаточно.

2. Если приготавливать битум, модифицированный резиновой крошкой, в две стадии с предварительным получением концентрированной суспензии резинобитумного композита (второй способ), то при заданном режиме технологического воздействия вяжущее обладает наилучшими физико-химическими свойствами. Увеличение числа стадий введения резиновой крошки в процессе получения концентрированной суспензии резинобитумного композита (способ 3 относительно способа 2 или способ 5 относительно способа 4) ведет к ухудшению свойств конечного продукта (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 частично деструктируется, в то время как пластификация и частичная деструкция резиновой крошки, введенной позже, проходит в меньшем объеме. Важно отметить, что данные способы (второй – пятый) подразумевает длительное высокотемпературное воздействие лишь на 20-30 % битума от всего его объема, содержащегося в битуме, модифицированном резиновой крошкой, то есть с точки зрения негативного процесса окисления вяжущего двухстадийный способ является более «щадящим», чем одностадийный.

3. Увеличение объема резиновой крошки в концентрированной суспензии резинобитумного композита (способы 4 и 5 относительно способов 2 и 3) в целом не ведет к изменению физико-химических свойств битума модифицированного резиновой крошкой (за исключением глубины проникания иглы при температуре 25ºС), однако с технологической точки зрения менее предпочтительно, так как резиновые частицы плохо смачиваются, особенно на первых этапах, и слипаются.

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

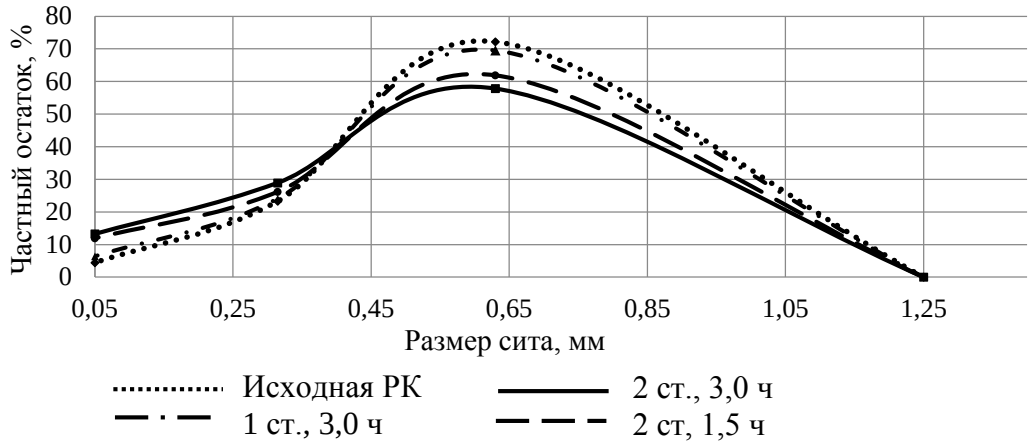


Рисунок 6 – Частные остатки резиновой крошки в результате термомеханического воздействия

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.

Результаты проведенных испытаний по определению качества сцепления исходного и модифицированного битума с поверхностью каменных материалов, а также химический состав горных пород указаны в таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3 – Качество сцепления битумного вяжущего с горными породами

№ п/п	Наименование материала	Оценка качества сцепления	
		БНД 60/90	РБВ
1	Мрамор белый «Коэлгинского месторождения» фр. 2-5 мм (метаморфическая горная порода)	Отличное (пять баллов)	Отличное (пять баллов)
2	Щебень фр. 5-20 мм «Гурьевского карьера» (осадочная горная порода)	Хорошее (четыре балла)	Отличное (пять баллов)
3	Щебень фр. 5-20 мм «Крапивинского карьера» (изверженная интрузивная горная порода)	Плохое (два балла)	Хорошее (четыре балла)
4	Щебень фр. 5-10 мм Мозжухинского карьера (осадочная горная порода)	Плохое (два балла)	Удовлетворительное (три балла)

Примечание:
РБВ – битум, модифицированный резиновой крошкой при двухстадийном процессе

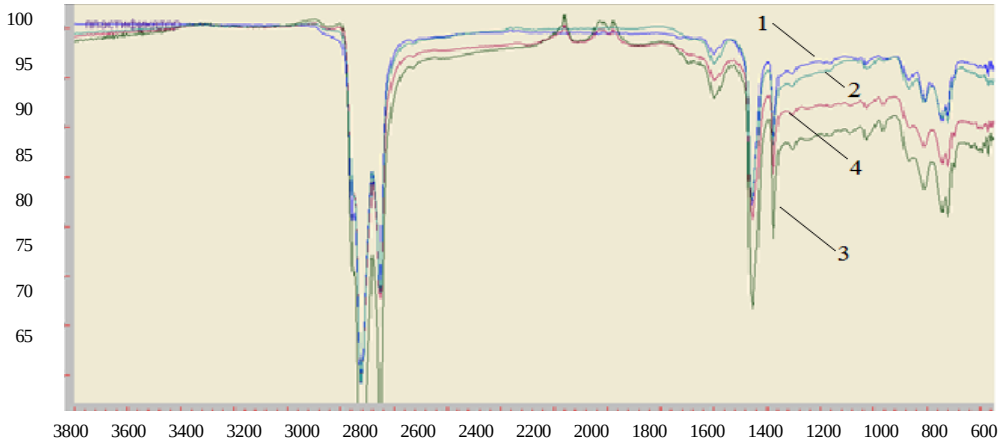
Таблица 4 – Химический состав горных пород

Наименование материала	Компоненты, %												
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	P_2O_5	MnO	ППП
Щебень Мозжухинского карьера	66,96	10,84	0,65	1,58	0,32	4,71	2,41	2,47	2,90	<0,25	0,07	0,12	5,62
Щебень Гурьевского карьера	26,11	2,89	0,59	0,25	0,10	37,11	0,88	0,83	0,64	0,47	0,08	0,09	29,57
Мрамор белый	0,15	-	0,03	-	0,002	55,51	0,13	0,002	0,002	0,004	0,03	0,01	43,33
Щебень Крапивинского карьера	75,30	13,61	0,15	1,65	0,24	0,05	0,17	-	-	-	-	0,05	-

Результаты эксперимента показывают, что битум, модифицированный резиновой крошкой при двухстадийном процессе, имеет качество сцепления в среднем на 1 балл выше по сравнению с исходным битумом не зависимо от происхождения горной

породы. Обусловлено это тем, что происходит деструкция резиновой крошки с образованием радикалов в результате чего увеличивается адсорбционное взаимодействие межмолекулярных связей, а также увеличение адгезионной способности счет физического проникновения и затвердевания в трещинах и порах горных пород элементов группового состава модифицированного резиновой крошкой вяжущего.

В четвертой главе произведена оценка структурно-группового состава исходных компонентов и продуктов модификации (рисунок 7), выполнен структурно-морфологический анализ исходного битума и битума, модифицированного резиновой крошкой, определена текстура поверхности резиновой крошки после термомеханического воздействия.



1 – ИК-спектр масла-пластификатора ПН-6Ш;
2 – ИК-спектр исходного битума марки БНД 60/90;
3 – ИК-спектр битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе;
4 - ИК-спектр битума, модифицированного резиновой крошкой при одностадийном технологическом процессе.

Рисунок 7 – ИК-спектры битумов, модифицированных резиновой крошкой при одностадийном и двухстадийном технологическом процессе, исходного битума марки БНД 60/90 и масла-пластификатора ПН-6Ш

В результате проведенных исследований все образцы показали наличие пиков характерных для битумных вяжущих в области от 2750 до 2900 $см^{-1}$. Указанные полосы всегда присутствуют в спектрах предельных углеводородов, парафинов, масел. Также стоит отметить наличие характерной группы пиков в области от 790 до 910 $см^{-1}$ – признак наличия ароматических структур. Полоса 1600 $см^{-1}$ характеризует валентные колебания непредельных С=С связей, как правило, циклического строения.

Анализ приведенных спектров указывает на повышенное содержание в модифицированном битуме высокомолекулярных асфальтенов с некоторым увеличением структурирующих смол, так как наблюдается усиление полос поглощения карбонильной группы при 1590 $см^{-1}$.

Очевидная особенность отличительных характеристик пиков наблюдается в интервале от 1950 до 2190 $см^{-1}$для битума, модифицированного резиновой крошкой при одно- и двухстадийном технологическом процессе, которое соответствует наличию в модифицированном битуме каучуковых соединений.

Структурно-морфологический анализ исходного битума и полученных на основе него модифицированных вяжущих методом АСМ проводился на приборе Cypher. Для этого были получены АСМ изображения поверхности исходного битума (рисунок 8),

битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе (рисунок 9), и битума, модифицированного резиновой крошкой при одностадийном способе (рисунок 10) (а – топография (рельеф); б – фазовый контраст; 15 – увеличение 15х15; 50 – увеличение 50х50).



Рисунок 8 – АСМ изображения поверхности исходного битума марки БНД 60/90



Рисунок 9 – АСМ изображения поверхности битума, модифицированного резиновой крошкой полученного при двухстадийном технологическом процессе



Рисунок 10 – АСМ изображения поверхности битума, модифицированного резиновой крошкой при одностадийном технологическом процессе

При анализе АСМ изображений установлено:

1. Структура битумов, модифицированных резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, также как и исходного битума, представляет собой смесь асфальтенов и мальтенов (пчелоподобные включения длиной от 2,71 до 4,98 мкм у исходного битума и участки темного цвета длиной до 11 мкм у резинобитумного вяжущего). Отличие заключается в том, что у модифицированного битума наблюдается сгущение структур фазового контраста с образованием дисперсного каркаса, состоящего из отдельных частично сшитых, но разорванных молекул каучука, объемно армирующих вяжущее, что в итоге и приводит к увеличению температуры размягчения по методу «Кольцо и шар».

2. У битума, модифицированного резиновой крошкой при одностадийном технологическом процессе, структура также представляет собой смесь асфальтенов и мальтенов, однако здесь четко прослеживается ее неоднородность. Если в левой верхней и правой нижней частях (рисунок 9) наблюдаются различные компоненты битума с фрагментами резиновых частиц, частично деструктурированных с формированием вокруг ядер каучуковой оболочки, то в средней части структура незначительно отличается от структуры битума (за исключением сгущения структуры и снижения

фазового контраста). Обусловлено это, скорее всего тем, что при получении битумов, модифицированных резиновой крошкой при одностадийном технологическом процессе, достаточно большая вязкость среды не позволяет эффективно деструктурировать резиновую крошку. Это приводит, в том числе, к тому, что модифицированное вяжущее не имеет дисперсного каркаса, следовательно, и физико-химические характеристики данного вяжущего чувствительно хуже, чем у битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе.

Обобщая полученные результаты можно сделать вывод, что двухстадийный технологический процесс модифицирования битумов резиновой крошкой способствует повышению гомогенности системы и формированию дисперсного каучукового каркаса, армирующего вяжущее, что в целом обуславливает получение продукта, обладающего улучшенными физико-химическими характеристиками.

Групповой химический состав исходного битума и битума модифицированного резиновой крошкой представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Групповой химический состав исходного битума и битума модифицированного резиновой крошкой

№ образца	Выход ХБ*, %	Групповой компонентный состав, %				
		Масла	Бензольные смолы	Спирто-бензольные смолы	Сумма смол	Асфальтены
БНД-60/90	97,337	31,27	24,24	22,87	47,11	21,62
РБВ 2 ст	98,131	28,91	24,05	24,90	48,95	22,14
РБВ 1 ст	84,447	32,59	25,37	23,04	48,41	19,00
ПН-6Ш		65,49	24,12	10,16	34,28	0,23

Примечание:
РБВ 1 ст – битум, модифицированный резиновой крошкой при одностадийном процессе;
РБВ 2 ст – битум, модифицированный резиновой крошкой при двухстадийном процессе;
ПН-6Ш – масло-пластификатор.

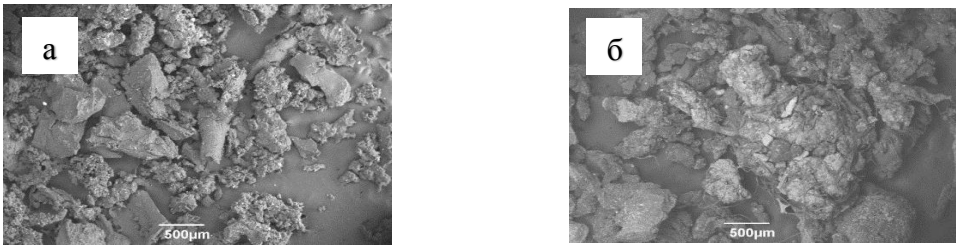
Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в процессе термоокислительного старения, неизбежно протекающего в результате модифицирования битума резиновой крошкой, групповой химический состав модифицированного битума, полученного как при одностадийном, так и при двухстадийном технологическом процессе, не значительно отличается относительно исходного вяжущего. Обусловлено это тем, что несмотря на то, что при термоокислительном старении смолисто-асфальтеновых компонентов должно увеличиться, добавление масла-пластификатора способствует снижению их концентрации до уровня, характерного для исходного битума. Следовательно, по природе старения полученный продукт не должен кардинально отличаться от исходного вяжущего.

Для оценки текстуры поверхности резиновой крошки, формирующейся в результате термомеханического воздействия, с помощью электронного сканирующего микроскопа фирмы Jeol JSM-6390 LA были получены снимки поверхности резиновой крошки (рисунки 10-12).

На рисунках 10, 11 можно отчетливо наблюдать, что резиновая крошка после термомеханической обработки претерпела значительные изменения в плане реорганизации своего внешнего состояния. Ожидаемо она под воздействием высокой

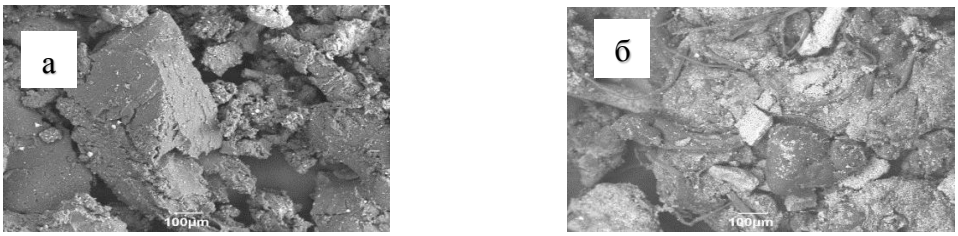
температуры оплавилась по краям, разрозненные частицы частично слиплись между собой.

При максимальном увеличении (рисунок 13) можно отчетливо наблюдать, что поверхность резиновых частиц имеет мельчайшие выпуклости, которые обуславливают их развитую удельную поверхность, а следовательно, и более тесное контактирование поверхности резиновой крошки с компонентами битума. В соответствии с физико-химическими представлениями, положенными П.А. Ребиндером, развитая удельная поверхность обеспечивает повышенную температурную устойчивость и эластичность битумов, модифицированных резиновой крошкой, что справедливо даже в тех случаях, когда факторы технологического процесса не оптимальны.



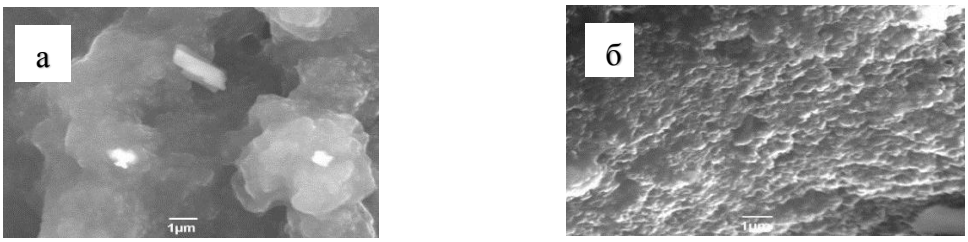
а – до термомеханической обработки, б – после термомеханической обработки

Рисунок 11 – Резиновая крошка при 30х кратном увеличении



а – до термомеханической обработки, б – после термомеханической обработки

Рисунок 12 – Резиновая крошка при 100х кратном увеличении



а – до термомеханической обработки, б – после термомеханической обработки

Рисунок 13 – Резиновая крошка при 10000х кратном увеличении

Таким образом, частицы резиновой крошки придают повышенную температурную устойчивость и эластичность модифицированным битумам посредством формирования мельчайших выпуклостей на поверхности частиц после частичной деструкции.

В пятой главе приведены результаты определения рационального температурного режима получения асфальтобетонных смесей на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, подбора состава и физико-механических свойств плотного мелкозернистого асфальтобетона типа А марки I.

Для подбора зернового состава минеральной части асфальтобетона использовались следующие материалы:

- щебень фракции 5-20 мм ООО «Мозжухинский карьер» в количестве 52 %;
- песок из отсевов дробления ООО «Топкинский цемент» в количестве 43 %;
- минеральный порошок ООО «Кемеровоспецстрой» марки МП-1 в количестве 5 %.

Для оценки рабочей температуры битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, была определена его условная вязкость в сопоставлении с вязкостью исходного битума (рисунок 14, таблица 6).

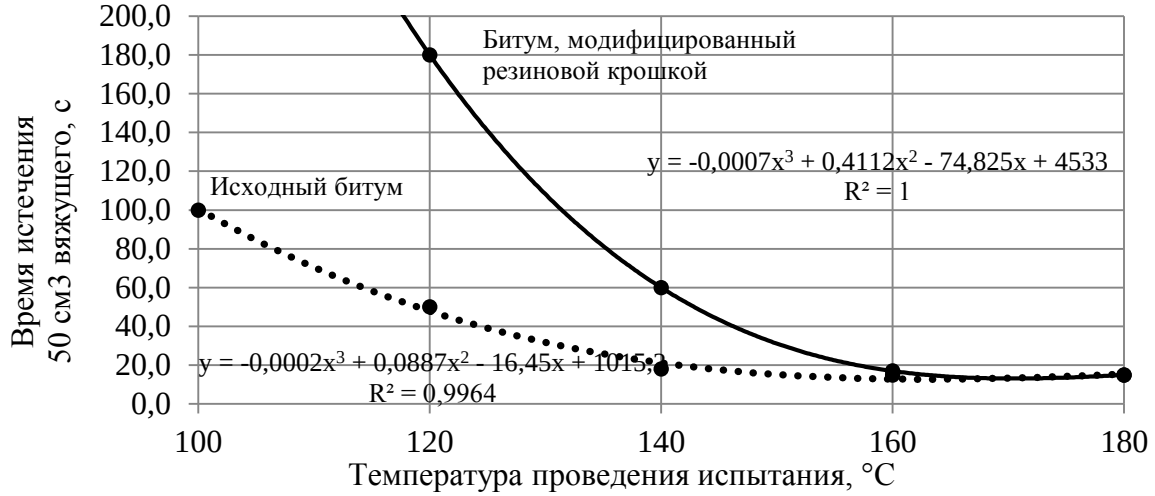


Рисунок 14 – Зависимость условной вязкости битума БНД 60/90 и битума, модифицированного резиновой крошкой, от температуры

Таблица 6 – Результаты определения времени истечения 50 см^3 вяжущих

Наименование вяжущего	Время истечения 50 см^3 вяжущего, с, при температуре испытания, ºС:				
	100	120	140	160	180
Исходный битум марки БНД 60/90	100	50	15	15	15
Битум, модифицированный резиновой крошкой	-	180	60	17	15

Результаты показали, что для обеспечения сопоставимой удобоукладываемости асфальтобетонных смесей на основе битумов, модифицированных резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, по сравнению с асфальтобетонными смесями на основе нефтяного битума, температура выпуска первых должна быть увеличена на 15-20°С.

Для сопоставления физико-механических свойств асфальтобетона подобранного состава были приготовлены четыре партии на следующих вяжущих:

- битум марки БНД 60/90 в количестве 4,6 % сверх 100 % минеральной части (условное обозначение в таблице 5 «БНД»);
- битум марки БНД 60/90 в количестве 4,6 % сверх 100 % минеральной части, модифицированный адгезионной присадкой StarflexLD в количестве 4,0 % от массы вяжущего (условное обозначение в таблице 5 «БНД+ПАВ»);
- полимерно-битумное вяжущее марки ПБВ 90 в количестве 4,0 % сверх 100 % минеральной части (условное обозначение в таблице 5 «ПБВ»);
- битум, модифицированный резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, в количестве 4,5 % сверх 100 % минеральной части (условное обозначение в таблице 5 «РБВ»).

Физико-механические свойства асфальтобетонов на различных вяжущих приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Физико-механические свойства асфальтобетонов на различных вяжущих

Наименование показателя	**Требования для III дорожно-климатической зоны**	**Значение показателей для асфальтобетона, полученного на основе:**			
		БНД	**БНД+ПАВ**	**ПБВ**	**РБВ**
Средняя плотность, г/см^3	не нормируется	2,44	2,46	2,42	2,50
Водонасыщение, % по объему, образцов, отформованных из смесей	1,5-3,5	2,3	0,83	3,3	1,9
Предел прочности при сжатии, при температуре 0ºС, МПа	не более 9,0	8,4	8,0	7,5	7,9
Предел прочности при сжатии, при температуре 20ºС, МПа	не менее 2,0	3,9	3,3	3,1	3,7
Предел прочности при сжатии, при температуре 50ºС, МПа	не менее 0,9	1,6	1,4	1,2	1,3
Сдвигоустойчивость по коэффициенту внутреннего трения	не менее 0,87	0,96	0,95	0,96	0,95
Сдвигоустойчивость по сцеплению при температуре 50ºС, МПа	не менее 0,20	0,37	0,33	0,34	0,40
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0ºС и скорости деформирования 50 мм/мин, МПа	2,8-6,0	3,9	4,5	2,76	3,3
Водостойкость	не менее 0,90	0,79	0,94	0,90	1,00
Водостойкость при длительном водонасыщении	не менее 0,85	0,77	0,83	0,71	0,89
Водостойкость при водонасыщении в течение 30 сут.	не норм.	0,72	0,78	0,65	0,85

В первую очередь следует отметить возросшую среднюю плотность и снижение водонасыщения асфальтобетона на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, по сравнению с асфальтобетоном на основе битума и полимерно-битумного вяжущего, что потенциально должно привести к повышению срока службы. Подобное поведение показал и асфальтобетон на основе битума, модифицированного адгезионной присадкой, однако водонасыщение в данном случае оказалось ниже нормы, что не допустимо.

Также необходимо обратить внимание на достижение самых высоких показателей сдвигоустойчивости у асфальтобетона на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе. И если коэффициент внутреннего трения у всех асфальтобетонов приблизительно одинаковый, что совершенно логично, так как он определяется исключительно зерновым составом минеральной части, который у всех рассмотренных асфальтобетонов одинаковый, то сцепление при сдвиге выше на 7 – 17 %. Данный факт свидетельствует о том, что более теплостойкое вяжущее

обеспечивает повышенное сопротивление асфальтобетона сдвиговым нагрузкам, следовательно покрытие из такого материала будет устойчивым к колееобразованию.

Конечно же, обращает внимание тот факт, что асфальтобетон на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, является единственным асфальтобетоном из рассмотренных с обеспеченной водостойкостью при длительном водонасыщении, которая на 5-10 % выше чем у прочих асфальтобетонов, что подтверждает повышенную адгезионную способность битумов, модифицированных резиновой крошкой, а, соответственно, и потенциально более длительный срок службы асфальтобетонов на их основе.

Для подтверждения полученных научных результатов ОАО «Кемеровоспецстрой» в 2016 году был устроен верхний слой асфальтобетонного покрытия из горячей плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа А марки I на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, на автомобильной дороге Р-255 «Сибирь» Новосибирск-Кемерово-Красноярск-Иркутск, обход г. Кемерово на участке км 18+000 – км 18+500. При этом получение битума, модифицированного резиновой крошкой, осуществлено на установке AR 150M фирмы «Pfoenex industrials» (США) с производительностью 10 т/час.

Экономическая эффективность применения асфальтобетона на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе составляет 441,11 руб/т. В настоящее время продолжается наблюдение за опытным участком, однако спустя три года после его устройства, на нем не наблюдается процесс колееобразования, в отличие от контрольного участка, что подтверждает потенциально более длительный срок службы асфальтобетона на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, по сравнению с асфальтобетоном на основе битума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного комплекса исследований полученные основные научные результаты и выводы сводятся к следующему:

1. Эффективность модификации битумов резиновой крошкой достигает наибольшего значения (повышение температуры размягчения по методу «Кольцо и шар до 68ºС, понижение температуры хрупкости до минус 25ºС, рост эластичности до 85 %) при двухстадийном технологическом процессе, заключающемся в получении на первой стадии при температуре 230±5ºС и продолжительности процесса 3,25±1,5 часа концентрированной суспензии резинобитумного композита, а на второй – модифицированного вяжущего, при этом увеличение числа стадий введения резиновой крошки дополнительного положительного эффекта не дает.
2. Битум модифицированный резиновой крошкой при двухстадийном процессе, имеет качество сцепления в среднем на 1 балл выше по сравнению с исходным битумом не зависимо от происхождения горной породы, что обусловлено повышенной механической и адсорбционной адгезией.
3. Двухстадийный технологический процесс модификации битумов резиновой крошкой способствует повышению гомогенности системы и формированию дисперсного каркаса, армирующего вяжущее, что в целом обуславливает получение вяжущего, обладающего улучшенными физико-химическими характеристиками.

4. Частицы резиновой крошки придают повышенную температурную устойчивость и эластичность модифицированным битумам посредством мельчайших выпуклостей на поверхности частиц.

5. При взаимодействии резиновой крошки с пластифицированным битумом при одно- и двухстадийном процессе, в результате последнего происходит уменьшение резиновой крошки по объему на 15...20 %, что в 4...6 раз больше, чем при одностадийном.

6. Для обеспечения сопоставимой удобоукладываемости асфальтобетонных смесей на основе битумов, модифицированных резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, по сравнению с асфальтобетонными смесями на основе нефтяного битума, температура выпуска первых должна быть увеличена на 15-20ºС.

7. Асфальтобетон на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, имеет на 5-10 % большую водостойкость при длительном водонасыщении и на 7-17 % большую сдвигоустойчивость по сцеплению при температуре 50ºС по сравнению с асфальтобетонами на основе битумов и полимерно-битумных вяжущих, в том числе модифицированных поверхностно-активными веществами.

8. Экономическая эффективность применения асфальтобетона на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, составляет 441,11 руб/т.

По теме диссертации опубликованы следующие печатные работы:

В центральных рецензируемых научных изданиях ВАК

1. Шабаев, С. Н. Развитие технологии получения и эффективного использования в Кузбассе композиционных полимерно-битумных вяжущих на основе резиновой крошки / С. Н. Шабаев, С. А. Иванов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2014. – № 3. – С. 63-72.

2. Шабаев, С. Н. Исследование влияния стадийности технологического процесса получения композиционных резинобитумных вяжущих на их свойства / С. Н. Шабаев, С. А. Иванов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета (Вестник ТГАСУ). – 2016. - № 4. – С. 153-158.

3. Шабаев, С. Н. Исследование влияния технологического режима получения композиционных резинобитумных вяжущих на их свойства / С. Н. Шабаев, С. А. Иванов // Приволжский научный журнал. – 2016. – № 3. – С. 53-62.

4. Иванов, С. А. Обоснование структурообразования резинобитумного вяжущего / С. А. Иванов // ВЕСТНИК Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (Вестник ВСГУТУ). – 2017. – № 1. (68) – С. 11-18.

5. Иванов, С. А. Оценка адгезионной способности битума, модифицированного резиновой крошкой / С. А. Иванов // ВЕСТНИК Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (Вестник ВСГУТУ). – 2018. – № 4 (71). – С. 49-54.

В изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science или Scopus

6. Shabaev, S. N. The Analysis of influence of the temperature-time mode on process of preparation of the composite bitumen binder / S. N. Shabaev, S. A. Ivanov, E. M. Vakhyanov. // International Journal Applied Engineering Research. – 2015. – Volume 10, Number 24. – P. 45342-45344.

7. Shabaev, S. N. The Analysis of structure bituminous knitting, modified by a rubber crumb / S. N. Shabaev, S. A. Ivanov, E. M. Vakhyanov. // International Journal Applied Engi-neering Research. – 2015. – Volume 10, Number 24. – P. 45345-45349.

8. Shabaev, S. N. Promising Technologies of Mining and Processing of Solid Minerals [Электронный ресурс] / S. N. Shabaev, S. A. Ivanov, E. M. Vakhyanov // — Электрон. журн. — Режим доступа: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2017/09/e3sconf_2iims2017_01014/e3sconf_2iims2017_01014.html

В других изданиях

9. Шабаев, С. Н. Оценка рационального содержания резиновой крошки при производстве композиционного резинобитумного вяжущего / С. Н. Шабаев, С. А. Иванов // Молодой ученый. – 2014. – № 5. – С. 113-115.

10. Шабаев, С. Н. Оценка рабочей температуры композиционных полимерно-битумных вяжущих на основе резиновой крошки / С. Н. Шабаев, С. А. Иванов // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью : сборник трудов III Междунар. науч.-практ. конф., 26-27 ноября 2014 г. – Кемерово, 2014. – С. 246-248. – 2014. – С. 246-249.

11. Папин, А. В. Химизм процесса улучшения физико-химических параметров полимерно-битумного вяжущего на основе резиновой крошки / А. В. Папин, С. А. Иванов, Я. Н. Покладий // Вестник Кузбасского государственного технического университета (Вестник КузГТУ). – 2015. – № 4. – С. 147-151.

12. Иванов, С. А. Обоснование технологии получения и эффективного использования полимерно-битумного вяжущего, модифицированного резиновой крошкой / С. А. Иванов, Я. Н. Покладий. // Техника и технологии дорожного хозяйства – Кемерово: ООО «Кузбасский центр дорожных исследований». – 2015. – № 2 – С. 27-33.

13. Иванов, С. А. Рассмотрение физико-химических свойств резинобитумных вяжущих зависящих от технологии получения / С. А. Иванов, С. Н. Шабаев, Е. М. Вахьянов // Сборник научных трудов четвертого всероссийского дорожного конгресса «Перспективные технологии в строительстве и эксплуатации автомобильных дорог». – М.: МАДИ, 2015. – С. 114-122.

14. Иванов, С. А. Анализ влияния времени термохимического воздействия от температуры при приготовлении резинобитумного вяжущего / С. А. Иванов // Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики». – Томск : ТГАСУ, 10-13 марта 2015 г. - С. 289-293.

15. Шабаев, С. Н. Обоснование влияния технологии производства резинобитумного вяжущего на физико-химические свойства / С. Н. Шабаев, С. А. Иванов // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова (Вестник КГУСТА). – 2016. – № 1. – С. 222-228.

16. Иванов, С. А. Обоснование характеристик полимерных вяжущих и асфальтового бетона полученного на их основе / С. А. Иванов // Сборник материалов III Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: Новые идеи и перспективы». Томск. – 2016. – С. 325-332.

Полученные объекты интеллектуальной собственности

17. Пат. №2655334 Рос. Федерация. МПК C08L95/00, C08L17/00, C04B26/26. Композиционное резинобитумное вяжущее и способ его получения / Шабаев С.Н., Иванов С.А., Вахьянов Е.М.; Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева - №2016118144; Заяв. 10.05.2016; Опубл. 25.05.2018, Бюл.№15.