

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Воронежский государственный архитектурно-строительный университет»

Ю.И. Калгин, А.С. Строкин, Е.Б. Тюков

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Учебное пособие

*Допущено УМО вузов РФ по образованию в области строительства
в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся
по направлению подготовки бакалавров «**Строительство**»
(профиль подготовки «**Автомобильные дороги**»)
и направлению подготовки магистров «**Строительство**»
(магистерская программа «**Проектирование, строительство
и эксплуатация автомобильных дорог**»)*

Воронеж 2014

УДК 625.855.3
ББК 39.311
К 17

Рецензенты:

*кафедра городского строительства и автомобильных дорог
Тамбовского государственного технического университета;
Б.А. Бондарев, проф., д.т.н., проф.
Липецкого государственного технического университета*

Калгин, Ю. И.

К 17 **Перспективные технологии строительства и ремонта дорожных покрытий**
: учеб. пособие / Ю.И. Калгин, А.С. Строкин, Е.Б. Тюков ; Воронежский ГАСУ.
– Воронеж, 2014 г. – 226 с.

ISBN 978-5-89040-516-6

Содержит сведения о нефтяных дорожных битумах, дорожных горячих и холодных модифицированных асфальтобетонах. Приводится подробная характеристика способов модификации дорожных битумов и асфальтобетонов с целью повышения их качества. Рассматриваются вопросы структуры битумов, их основные свойства, влияющие на эксплуатационные характеристики асфальтобетонных покрытий; различные способы повышения их качества путем введения полимеров класса термоэластопластов, синтетических каучуков, поверхностно-активных веществ, резиносодержащих добавок.

Анализируется работа асфальтобетона в дорожном покрытии с учетом изменения структуры и свойств материала в течение срока его службы. Подробно рассмотрены технологии повышения качества ремонта асфальтобетонных покрытий холодными асфальтобетонами. Приводятся сведения о технологии модификации жидких битумов и холодных асфальтобетонных смесей.

Рассмотрена перспективная технология устройства шероховатых поверхностных обработок асфальтобетонных покрытий с повышенным сроком службы за счет применения различных модификаторов. Приведены результаты теоретических исследований по повышению работоспособности шероховатых поверхностных обработок асфальтобетонных покрытий.

Ил. 76. Табл.33. Библиогр.:107 назв.

УДК 625.855.3
ББК 39.311

ISBN 978-5-89040-516-6

© Калгин Ю.И., Строкин А.С.,
Тюков Е.Б., 2014
© Воронежский ГАСУ. 2014

ВВЕДЕНИЕ

Цель учебного пособия улучшить подготовку студентов, обучающихся по специальности «Автомобильные дороги».

Позволяет углубить знания курсов «Строительство, реконструкция и ремонт автомобильных дорог и городских улиц с использованием современных технологий», «Перспективные материалы для строительства и эксплуатации автомобильных дорог» при подготовке магистрантов по направлению 270800 – «Строительство», программа «Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог». Материал, изложенный в первой, второй и третьей главе поможет расширить знания студентов, обучающихся по программам подготовки бакалавров при изучении курсов «Дорожное материаловедение и технология дорожно-строительных материалов», «Физическая химия в дорожном материаловедении», «Технология и организация строительства автомобильных дорог».

Учебное пособие будет полезно аспирантам, специализирующимся по проблемам повышения долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий, качества дорожного битума и асфальтобетона, а также инженерно-техническим работникам дорожных организаций и слушателям системы повышения квалификации, обучающимся по направлению «Транспортное строительство».

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Опыт эксплуатации автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями в Российской Федерации показывает, что реальные сроки службы дорожных конструкций нередко ниже нормативных. Снижение сроков службы приводит к ухудшению транспортно-эксплуатационного состояния дорожной сети в целом, а также требует ежегодного увеличения финансирования объемов ремонтных работ.

Автомобильная дорога, как любое другое инженерное сооружение, рассчитана на определенный срок службы, за время которого она подвергается различного рода и количества воздействиям транспорта и погодноклиматических факторов. Одним из наиболее незащищенных её элементов, испытывающим максимальные влияние, является асфальтобетонное покрытие. Повышение долговечности асфальтобетонных покрытий в настоящее время является наиболее важной и актуальной задачей дорожной отрасли.

В результате многих сотен тысяч нагружений, а порой и перегрузок покрытия, износа и старения асфальтобетона на нем с течением времени возникают всевозможные дефекты, деформации и разрушения (шелушения, выкрашивания, неровности, трещины, сколы, выбоины, ямы и т. п.). Дорожные службы всего мира ежегодно выполняют значительные объемы работ по ликвидации появившихся дефектов и разрушений, но, несмотря на это, ежегодный прирост протяженности автомобильных дорог, требующих ремонта, превосходит протяженность отремонтированных дорожных покрытий.

Известно, что разрушение асфальтобетона под действием многократных нагрузок обусловлено процессами усталости, т.е. образованием и накоплением микродефектов с постепенным снижением прочности во времени. В современных условиях высокоскоростного интенсивного движения транспортных средств для объективной оценки усталостной долговечности материалов конструктивных слоев дорожной одежды необходимо переходить на новые методы их испытания, соответствующие по условиям нагружения реальному воздействию транспортного потока.

Отличительной особенностью асфальтобетонных покрытий является значительное изменение их характеристик в течение срока службы вследствие влияния климатических факторов, процессов усталости и старения. Эта особенность асфальтобетона требует углубленного анализа его деформационного поведения при различных режимах действия климатических условий и транспортных нагрузок. Отсутствие в российских стандартах методов определения усталостной прочности и требований к ней для асфальтобетонных смесей при многократном нагружении исключает возможность целенаправленного подбора состава асфальтобетона повышенной усталостной прочности, приводит к ошибочным решениям при выборе типа асфальтобетона, а также при обосновании целесообразности использования модифицирующих добавок.

Асфальтобетон представляет собой один из наиболее сложных строительных материалов. Эта сложность обусловлена большой зависимостью свойств асфальтобетона от физико-химических процессов, происходящих при приготовлении асфальтобетонных смесей, их укладке и уплотнении в покрытии, а также последующей эксплуатации. Отвердевшие в дорожных покрытиях различные виды асфальтобетона характеризуются индивидуальной структурой и свойствами, которые зависят от его состава, свойств исходных материалов, среди которых определяющая роль отводится битумному вяжущему.

«Структура» – это термин, происходящий от латинского слова «structura», обозначающего строение, расположение, порядок. Применительно к композиционным строительным материалам под структурой понимают совокупность устойчивых связей, обеспечивающих их целостность и тождественность самим себе, т.е. сохраняющих индивидуальные свойства при различных воздействиях на материал.

Зависимость свойств битумоминеральных материалов от структуры и свойств нефтяных битумов установлена многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных учёных [7, 11, 20, 31, 39, 51, 56, 57, 61, 78, 84, 85, 91, 92]. В указанных работах битумоминеральный материал рассматривается как гетерогенная дисперсная система с преимущественно коагуляционными связями, где зерна твердой фазы (минерального остова) соединяют ориентированные пленки битума и все свойства которой определяются её структурой. Впервые представление о структуре асфальтобетона было дано в работах П.В. Сахарова. Им предложено рассматривать асфальтобетон как материал, состоящий из двух частей – минерального остова и асфальтового вяжущего вещества, образованного, в свою очередь, из битума и минерального порошка. Позднее структуру асфальтобетона стали рассматривать как трехкомпонентную систему, состоящую из микроструктуры (асфальтового вяжущего вещества), мезоструктуры (асфальтового раствора, образованного из смеси песка и асфальтового вяжущего вещества) и макроструктуры (щебня и асфальтового раствора). Разделение структуры асфальтобетона на отдельные компоненты увязывается с влиянием отдельных элементарных структур на свойства асфальтобетона и их ролью в обеспечении его качества.

Макроструктура асфальтобетона определяется количественным соотношением, взаимным расположением и крупностью зерен щебня, связанных в монолитную структуру асфальтовым раствором, состоящим из песка и асфальтового вяжущего [19, 20, 27]. Структурообразующая роль щебня заключается в формировании пространственного каркаса асфальтобетона, обеспечивающего прочность и сдвигоустойчивость дорожного асфальтобетонного покрытия. При незначительном содержании щебня (до 30-35 %) в минеральной части асфальтобетона свойства последнего определяются свойствами асфальтового раствора, т.к. зерна щебня как бы плавают в растворной части асфальтобетона. Такой минеральный остов называют бескаркасным. Размер, свойства поверхности, форма зерен щебня в бескаркасном остове незначительно влияют на свойства

асфальтобетона. Увеличение содержания щебня в минеральной части до 40 % приводит к формированию отдельных контактов между зернами через тонкие пленки ориентированного битума. При этом формируется минеральный остов асфальтобетона, зерна щебня в котором частично раздвинуты преобладающей частью асфальтового раствора. Такой минеральный остов называется полукаркасным. Увеличение содержания щебня до 50 % и более формирует в асфальтобетоне пространственный каркас, в котором крупные минеральные зерна контактируют друг с другом непосредственно или через тонкие прослойки асфальтового вяжущего. В указанном каркасном минеральном остове пустоты заполнены асфальтовым раствором, который не может раздвинуть минеральные зерна ни своим размером, ни объемом. Дальнейшее увеличение количества щебня (более 65 %) приводит к формированию структуры, в которой объем пустот в каркасе превышает содержание асфальтового раствора, что приводит к получению асфальтобетона с большой пористостью и пониженной прочностью.

Мезоструктуру асфальтобетона формируют зерна песка при их объединении с асфальтовяжущим веществом. При этом прочность системы снижается, что связано с повышением неоднородности смеси и появлением свободного, неструктурированного битума. Однако наполнение системы зернами песка положительно влияет на плотность и деформативность асфальтобетона [20].

Микроструктура асфальтобетона отражает количественное соотношение и характер взаимодействия битума и самой активной минеральной составляющей смеси – минерального порошка [19]. При малом количестве минерального порошка в асфальтовом вяжущем веществе степень структурированности битума незначительная. В этом случае частицы минерального порошка с образующимися на них ориентированными слоями битума не взаимодействуют между собой и прочность микроструктуры незначительна. С увеличением содержания минерального порошка расстояние между отдельными частицами становится меньше, и при его оптимальном содержании битумные пленки на минеральных зернах полностью находятся в ориентированном состоянии. Прочность микроструктуры при этом максимальная. При увеличении количества минерального порошка выше оптимального в асфальтовом вяжущем резко увеличивается число пор, битума не хватает для обволакивания минеральных зерен, что приводит к резкому сокращению прочности микроструктуры. Таким образом, определение оптимального соотношения битума и минерального порошка является основной задачей при формировании микроструктуры асфальтобетона. Поскольку асфальтобетон является полиструктурным материалом, то его получение с заданными структурой и свойствами возможно путем установления оптимального соотношения между микро-, мезо- и макроструктурой асфальтобетона. Тесная связь между структурой и свойствами асфальтобетона, наиболее распространенного битумо-минерального материала, установлена в работах академика П. А. Ребиндера и его школы [82], в которых асфальтобетон рассматривается как система с коагуляционной структурой и ярко выраженными вязкопластическими свойствами. Н.В. Горелышев и Л. Б. Гезенцевей [20, 27] также

относят асфальтобетон к коагуляционным структурам, связь между частицами которой обеспечивается битумными пленками, адсорбированными на поверхности минерального материала, и свободным битумом, находящемся в асфальтобетоне в неструктурированном состоянии, т.е. под понятием «структура асфальтового бетона» следует понимать характер связей и взаимное расположение минеральных частиц разных размеров, соединенных пленками покрывающего их битума, и степень заполнения битумом промежутков между минеральными зернами.

В настоящее время многие вопросы, относящиеся к формированию структуры асфальтобетона, достаточно изучены. Так, наиболее значительная роль в формировании структуры асфальтобетона отводится физико-химическим свойствам вяжущего, виду и количеству минерального порошка в микроструктуре, т.к. свойства асфальтового вяжущего в значительной мере определяют свойства всей системы в целом. Суммарная удельная поверхность минерального порошка в составе минеральной части асфальтобетонной смеси достигает 90 %. Благодаря большой площади поверхности минеральный порошок увеличивает количество контактов между минеральной частью асфальтобетонной смеси и битумом, что позволяет увеличить сцепление частиц в асфальтобетоне, а следовательно, и его прочность.

Асфальтовый бетон относят к твердым телам, отличительной чертой которых является наличие собственной формы, определенного объема и высокого сопротивления их изменению под воздействием внешних сил. Это физическое состояние асфальтобетона наиболее значительно зависит от температуры и продолжительности действия внешних сил. Сопротивление внешним силам с повышением температуры или увеличением продолжительности их действия резко снижается, что приводит к значительным необратимым деформациям. Асфальтобетон в зависимости от температуры может проявлять себя в нескольких структурных состояниях [20, 91, 92]:

- вязко-пластичном, когда при повышенных температурах минеральные зерна соединены текучими прослойками битумных пленок и даже небольшие по величине напряжения приводят к деформированию материала;
- упруго-пластичном, когда минеральные частицы соединены битумными пленками, которые при малых напряжениях проявляют упруго-эластические свойства, а при больших напряжениях – упруго-вязкие;
- упруго-хрупком, при котором минеральные частицы фиксированы стекловидными битумными пленками.

При обычной температуре (20...25 °С) в асфальтобетоне проявляются упруго-эластические и упруго-вязкие свойства, при повышенных температурах - вязко-пластические, а при отрицательных температурах асфальтобетон становится упруго-хрупким телом.

В практических целях механическую прочность асфальтобетона характеризуют пределом прочности при сжатии стандартных образцов, испытанных на

одноосное сжатие при температурах 20, 50, 0 °С и скорости приложения нагрузки, равной 3 мм/мин. При температуре 20 °С прочность при сжатии асфальтобетона обычно составляет 2,0-3,0 МПа, а при растяжении в 5-8 раз меньше, с понижением температуры предел прочности при сжатии сильно возрастает – до 15-25 МПа при - 20 °С, а при повышенных температурах значительно снижается – до 1,0-1,5 МПа при + 50 °С.

Вышеуказанные показатели предела прочности при сжатии свидетельствуют о значительной зависимости механических свойств асфальтобетона от температуры. Наилучшим комплексом механических свойств (повышенной прочностью при высоких температурах и пониженной хрупкостью при отрицательных температурах) обладают асфальтобетоны оптимальной структуры.

Получению битумоминеральных материалов с оптимальной структурой способствует выполнение определенных закономерностей, показывающих связь между структурными параметрами и физико-механическими и эксплуатационными свойствами материала. Получение оптимальной структуры асфальтобетона зависит от состава и качественных показателей исходных материалов, технологии приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей.

Традиционно получение оптимальной структуры и наилучших свойств асфальтобетона шло главным образом по пути соответствующего подбора компонентов минеральной части, в частности, гранулометрического состава асфальтобетонной смеси и качественных показателей минеральных материалов. В последние годы наибольшее внимание уделяется выбору вяжущих материалов, характеризующихся хорошими физико-механическими свойствами, высокой устойчивостью к старению, улучшенным взаимодействием с минеральной частью асфальтобетонной смеси. Особенность современных исследований в области получения оптимальной структуры и наилучших свойств асфальтобетона заключается в стремлении к получению материала, обладающего повышенной долговечностью и показывающего высокие эксплуатационные свойства при его работе в дорожном покрытии.

Глава 1. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

1.1. Общие сведения о битумах. Состав и структура нефтяных битумов

Битумы представляют собой органические вещества черного или темно-бурого цвета, состоящие из смеси высокомолекулярных углеводородов - нафтенового ($C_n H_{2n}$), ароматического ($C_n H_{2n-6}$) и метановых ($C_n H_{2n+2}$) рядов, а также их производных, различающихся по молекулярной массе и характеру растворимости в селективных растворителях. В состав углеводородных соединений битумов обычно входят также кислород, азот, сера, железо, никель и т. д. Молекулярная масса молекул битумов в среднем составляет 300 – 5000. Битумы растворяются в бензоле, толуоле, ксилоле, хлороформе и некоторых других органических растворителях. Истинная плотность битумов составляет около 1г/см^3 .

Элементный состав битумов (% по массе): углерода – 80-85; водорода 8-12,5; кислорода - 0,2-4; серы - 0,5-10; азота - 0,2-0,4. Содержание некоторых металлов в асфальтовых концентратах нефти (например, арланской) составляет (% по массе): V - 0,22; Ni - 0,115; Fe - 0,110; Ca - 0,054 и т. д.

Основная часть молекул битума состоит из 25-150 атомов углерода. Способность атомов углерода образовывать цепи, кольца, сложные решетки, в которые входят другие химические элементы – кислород, азот, сера, обуславливает существование соединений с различными, резко отличающимися свойствами. Поэтому для битумов принято различать групповой состав, т.е. содержание различных групп углеводородов. Химический состав и строение компонентов битума определяют его структурные характеристики, а следовательно, и его эксплуатационное поведение.

В настоящее время принято считать, что основными компонентами битума являются масла, смолы (нейтральные и кислые), асфальтены, асфальтогеновые кислоты и их ангидриды, карбены и карбоиды, парафины [7, 33, 34, 39, 56, 57]. Разделение битума на отдельные группы соединений, близких по строению и свойствам, основано на неодинаковой растворимости их в органических растворителях (бензоле, сероуглероде и др.), а также различной избирательной адсорбируемости, например на силикагеле или др. адсорбентах. Указанные группы углеводородов отличаются строением и физико-химическими свойствами и поэтому оказывают различное влияние на свойства битума. Содержание этих компонентов различно, мас. % : масел – 40...60; карбенов и карбоидов – 1...3; смол – 20...40; асфальтогеновых кислот и их ангидридов – около 1; асфальтенов – 10...25 [33, 57]. Указанные компоненты обладают определенными физико-химическими свойствами, которые оказывают влияние на реологические, физико-механические, эксплуатационные характеристики и долговечность битумов, а также органических вяжущих веществ на их основе. Рассмотрим свойства основных компонентов подробнее.

Асфальтены - твердые и неплавкие вещества с плотностью 1,01—1,24 г/см³ и молекулярной массой 900—6000. Температура разложения асфальтенов 175...240 °С, отношение С : Н = 0,78 - 0,94 (атомное). Растворимость асфальтенов в парафиновых углеводородах очень плохая, в циклопарафиновых углеводородах (нафтеновых) частичная. Они растворимы в бензоле, сероуглероде и четыреххлористом углероде.

Асфальтены являются наиболее высокомолекулярными соединениями нефти, в которых имеются кислород, сера, азотсодержащие соединения и металлические комплексы — порфирины. Элементный состав асфальтенов (% по массе): углерода – 80-89; водорода – 7-8,5; серы – 1-8,5; азота – 1-3; кислорода – 3-5. По растворимости в разных растворителях асфальтены могут быть разделены на ряд фракций. Асфальтены полидисперсны как по массе, так и по структуре и элементному составу молекул (высокомолекулярные синтетические вещества - полимеры - полидисперсны только по массе).

Асфальтены повышают вязкость, твердость, теплоустойчивость битума. При нормальной температуре асфальтены являются твердыми, неплавящимися, хрупкими веществами. Они имеют несовершенную кристаллоподобную структуру. Часть веществ в них находится в аморфном состоянии, другая часть – закристаллизованные вещества [57]. Структура асфальтенов представляется в виде упорядоченных агрегатов типа плоских листов радиусом 8,5...15,0 Å и толщиной 16...20 Å. Эти листы обладают повышенной полярностью и поэтому способны адсорбировать полярные вещества.

Наиболее вероятная структура агрегата плоского листа – 12...14 конденсированных колец с чередующимися алифатическими боковыми цепями и атомами кислорода или серы в этих цепях и кольцах. Кислород, сера, азот незначительно изменяют структуру асфальтенов, но увеличивают разнообразие структурных элементов. Под действием ультрафиолетовых лучей асфальтены становятся нерастворимыми в бензоле, переходя при этом в карбены.

Асфальтены с относительно невысокой молекулярной массой (900—2000) имеют компактную систему в основном из гетероциклических гибридных колец, тогда как более высокомолекулярные (2000 — 6000) содержат многокольчатые гетероциклические системы, соединенные между собой алифатическими мостиками, и имеют короткие боковые алифатические цепи. Рентгеноструктурным анализом показано, что структура асфальтенов характеризуется хорошо организованными полициклическими системами — двухмерными дискообразными слоями (гроздьями), имеющими диаметр 0,0005—0,0015 мкм.

Полиядерные пластины ассоциируются в кристаллоподобные образования (пачки) толщиной 0,0012—0,002 мкм, состоящие из пяти-шести слоев. Расстояние между слоями - 0,00035—0,00037 мкм. Расстояние между звеньями в насыщенных структурах - 0,0055—0,0006 мкм. В асфальтеновых веществах концентрируются свободные радикалы, которые являются одним из факторов, определяющих склонность асфальтенов к ассоциации. Наличие свободных радикалов обусловлено тем, что в асфальтенах сосредоточено больше всего конденсирован-

ных ароматических структур, которые дают явления парамагнетизма. Это приводит к значительному межмолекулярному взаимодействию, способствующему образованию надмолекулярных структур, выявляемых рентгеноструктурным анализом.

Концентрация парамагнитных частиц в значительной степени зависит от величины молекулярной массы асфальтенов, их степени ароматичности, способа выделения.

В зависимости от химической природы нефти и способа переработки сырья в битум структурные элементы молекул асфальтенов могут несколько различаться. В частности, может варьироваться количественное соотношение ароматических, циклопарафиновых и гетероциклических структур в молекуле, так же как могут различаться их размеры, а следовательно, и молекулярные массы.

Асфальтены большинства битумов представляют собой при нормальной температуре твердые тела. Рентгеноструктурным анализом асфальтенов установлено, что они имеют несовершенную кристаллоподобную структуру. По видимому, часть веществ, составляющих группу асфальтенов, является аморфными, другая часть представляет собой кристаллоподобные вещества. Считают, что молекула асфальтенов имеет форму эллипсоида, большая ось которого составляет 0,0097 - 0,0106 мкм, а малая ось 0,0011 - 0,0018 мкм, их поверхностное натяжение - 25,0 - 31,2 дин/см.

Из некоторых нефтей, содержащих значительное количество парафиновых и циклопарафиновых углеводородов, выделяются асфальтены мазеподобной тягучей консистенции. Эти асфальтены после осаждения изооктаном из бензольного раствора битума плохо поддаются фильтрации. Битумы, содержащие такие асфальтены, обладают большей пластичностью.

Введение в молекулы асфальтенов алкильных радикалов (алкилирование) позволяет значительно улучшить их пластичность, а следовательно, и пластичность битумов при низких температурах, их устойчивость к воздействию атмосферных факторов.

В высокомолекулярную часть асфальтенов входят порфирины - комплексные соединения металлов, состоящие из сложных внутрикомплексных циклических структур с включением атомов азота. Наиболее изучены порфириновые комплексы ванадия и никеля. Обнаружены также порфириновые комплексы урана и меди. Порфириновые комплексы металлов играют значительную роль в структурообразовании и погодоустойчивости битумов. Пластичность и растворимость асфальтенов являются одним из основных свойств, непосредственно связанных с их химической структурой, которые определяют в значительной мере эксплуатационные характеристики битумов. Лучшими пластификаторами и растворителями асфальтенов служат ароматические и гетероциклические соединения. Пластифицирующее действие оказывают фракции смол. В составе битумов могут находиться вещества, нерастворимые в CS_2 и называемые карбоидами. Примерный химический состав карбоидов (% по массе): С — 74,25; Н — 5,13;

S — 8,16; N — 1,10; O — 10,86; золы — 0,50; C : H = 14,5; число омыления - 124; кислотное число 4.

Кроме карбоидов, в битумах могут присутствовать также карбены — вещества, растворимые в сероуглероде, но нерастворимые в четыреххлористом углероде. Карбены и карбоиды по свойствам близки к асфальтенам, но имеют большую плотность и более темный цвет. *Карбены и карбоиды* — высокоуглеродистые продукты обработки нефти и ее остатков. Их содержание в битумах колеблется от 1 до 3 %. По составу карбены похожи на асфальтены, но содержат больше углерода. Они нерастворимы в бензоле и растворяются только в сероуглероде. Карбоиды — твердые вещества типа сажи, нерастворимые в органических растворителях [33, 57]. С увеличением содержания карбенов и карбоидов увеличивается хрупкость битума.

Мальтены представляют часть битума, растворимую в низкокипящих предельных углеводородах. Основные свойства мальтенов: средняя молекулярная масса - 400—800 к. е., плотность - 0,9—0,98 г/см³; отношение C : H = 0,63 ~ 0,74 (атомное); вязкость при 50 °C = 100 Па·с. Растворяющая способность в отношении асфальтенов: при большом содержании ароматических углеводородов — хорошая, при большом содержании парафиновых углеводородов — плохая, при большом содержании циклопарафиновых углеводородов (нафтеновых) — посредственная. Мальтеновая часть битумов состоит из смол и масел.

Смолы состоят из углеводородов циклического и гетероциклического строения с молекулярной массой 600-1000 и плотностью примерно 1 г/см³. Выделяют смолы растворением в бензине, бензоле и хлороформе. Смолы содержат значительное количество полярных сернистых, азотистых и кислородных производных, что придает им повышенную поверхностную активность. Их присутствие придает также битуму водоустойчивость, растяжимость и эластичность.

Смолы битумов имеют основными структурными элементами конденсированные циклические системы, в состав которых входят ароматические, циклопарафиновые и гетероциклические соединения. Эти системы соединены между собой короткими алифатическими мостиками и имеют несколько алифатических реже циклических заместителей. Молекулярные массы смол в среднем варьируют от 500 до 2000. Обычно более низкие молекулярные массы (457—520) имеют бензольные смолы. В строении их преобладают ароматические кольца и короткие боковые алифатические цепи. Смолы спиртобензольные отличаются более высокими молекулярными массами (946—2000). Они содержат, помимо конденсированных циклов, больше алифатических мостиков и заместителей, чем бензольные смолы.

Структурные элементы смол соединены между собой сравнительно короткими алифатическими мостиками и содержат в кольце один или несколько алифатических заместителей. Принято разделять смолы на нейтральные смолы и асфальтогеновые кислоты. Длина молекул смол составляет 76,4...83,0 Å, поперечный размер - 12,7...15,6 Å.

Нейтральные смолы плохо растворяются в этиловом спирте и ацетоне, но хорошо растворяются в этиловом эфире, бензине, бензоле, хлороформе, образуя истинные растворы. При нагреве и под воздействием кислот легко подвергаются химическим превращениям, уплотняются и превращаются в асфальтены.

Некоторые авторы разделяют смолы на две группы по растворимости в феноле. Смолы, растворимые в феноле, отличаются меньшими молекулярными массами, более высокой плотностью и высоким содержанием серы, кислорода, азота, более низким содержанием водорода (аналогично бензольным смолам). Смолы, нерастворимые в феноле, имеют более высокие молекулярные массы, меньшую плотность, меньшее содержание серы, азота, кислорода (аналогично спиртобензольным смолам), большее содержание водорода. Они обладают свойствами депрессаторов, т.е. веществ, понижающих температуры затвердевания, что объясняется присутствием длинных боковых цепей, характерных для депрессаторов.

Смолы имеют разную консистенцию от тягучей липкой массы до твердых аморфных хрупких тел. Имеется предположение, что смолы, нерастворимые в феноле, являются пластификаторами асфальтенов. Длина молекул смол составляет 0,00764-0,00831 мкм, поперечный размер - 0,00127-0,00156 мкм, а поверхностное натяжение - 25,0-31,2 дин/см. Элементный состав смол (% по массе): С – 80-85; Н – 9-11; S - 0,7-1,4; N - 0,6-1,4; О – 3-4. В смолах, так же как и в асфальтенах, содержится некоторое количество порфириновых комплексов.

По элементному химическому составу и строению молекул смолы близки к асфальтенам и отличаются от них несколько большим содержанием водорода, следовательно, более низким отношением С : Н и меньшим суммарным содержанием атомов S, N, О и металлов. Смолы — вещества, окрашенные в темный цвет (от светло- до темно-коричневого, почти черного), плотность их около 1 г/см³ (0,99—1,08). Они являются смесью многочисленных и разнообразных по химическому строению высокомолекулярных соединений нефтяного происхождения, которые легко изменяются под действием таких факторов, как нагревание или окисление. Под влиянием окислителей и адсорбентов смолы уплотняются с образованием асфальтенов.

Существенное отличие смол от асфальтенов заключается в их растворимости и молекулярно-массовом распределении. Смолы растворимы во всех углеводородах нефти, сами являются растворителями (пластификаторами) асфальтенов и той средой, которая обеспечивает переход от полярной части нефти (асфальтенов) к неполярной (масла). Смолы служат в известной степени стабилизаторами, предотвращающими флокуляцию асфальтенов; они облегчают растворение асфальтенов в углеводородных растворителях. В то же время смолы и асфальтены представляют собой непрерывный ряд разнообразных трудноразделимых высокомолекулярных соединений гибридного строения. Провести четкую границу между смолами и асфальтенами весьма трудно. Смолы так же, как и асфальтены, полидисперсны по массе, элементному составу и структуре молекул.

Асфальтены и смолы являются основными структурообразующими компонентами битумов как наиболее полярные соединения, содержащие

в молекулах гетероатомы, такие как кислород, азот, серу, а также внутрикомплексные соединения металлов в виде порфиринов и им подобных веществ.

Кислородсодержащие соединения асфальтенов и смол включают главным образом четыре основные функциональные группы — гидроксильные, карбонильные, карбоксильные и сложноэфирные. В окисленных битумах преобладают сложноэфирные группы, а в неокисленных — остаточных или природных битумах, большая часть кислорода содержится в виде гидроксильных и карбонильных групп.

Битумы могут содержать незначительные количества асфальтогеновых кислот и их ангидридов, в которых сконцентрированы основная масса сернистых, кислородных, а в большинстве случаев и азотистых соединений (до 2 %). Асфальтогеновые кислоты и их ангидриды имеют плотность более 1 г/см³. Это вещества коричнево-серого цвета, густой смолистой консистенции, легко растворимые в этиловом спирте или хлороформе и трудно в бензине.

Асфальтогеновые кислоты, являясь наиболее полярными компонентами битума, способствуют лучшему прилипанию его к поверхности минеральных материалов. О присутствии этих веществ в битуме судят по кислотному числу (0,5—1 мг КОН) и числу омыления (10—30 мг КОН).

Асфальтогеновые кислоты способствуют высокой адгезии битумов к минеральным материалам. Эти вещества являются наиболее поверхностно-активной частью битума. Асфальтогеновые кислоты отличаются от нейтральных смол не только кислотными свойствами, но и лучшей растворимостью в органических растворителях. Их молекулы содержат несколько гидроксильных и карбоксильных групп. Общее число асфальтогеновых кислот в битумах не превышает 3 %. Их количество оценивают по кислотному числу (0,5...1,0 мг×КОН) и числу омыления [57, 84].

Особая роль в битумах принадлежит полярным соединениям, содержащим гетероатомы кислорода, азота и серы, а также комплексные соединения металлов в виде порфиринов. Гетероатомы сконцентрированы в основном в асфальтено-смолистой части и образуют активные функциональные группы: COOH, OH, NH₂, SH, SO₃H. Азот входит в состав производных гетероциклических структур типа пиридина, пиррола, хинолина и т.д., относящихся к гетероциклическим структурам. Сера, как правило, присутствует в виде сульфидных мостиков в циклической структуре сульфогрупп.

Масла представляют собой углеводородную фракцию битумов и содержат сложную смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматических рядов несложного строения с молекулярной массой 300-600 и средней плотностью 0,911—0,923г/см³. Это жидкости высокой вязкости, содержащие углеводороды, оказывающие растворяющее действие в отношении асфальтенов (циклические — в основном ароматические и в меньшей степени циклопарафины), и углеводороды, не являющиеся растворителями и даже осадителями асфальтенов (в основном парафинового, циклопарафинового и гибридного строения с преобладанием боковых алкильных цепей). Масла так же, как асфальтены и смолы, полидис-

персны, но в значительно меньшей степени. В составе масел могут присутствовать углеводороды, которые при понижении температуры иногда выделяются в виде кристаллов. Содержание серы - до 4 %, а концентрации кислорода и азота незначительны. В маслах может также присутствовать весьма незначительное количество гетероциклических соединений. Элементный состав масел:

75—85 % С; 15 % Н. Степень ароматичности, характеризуемая отношением С/Н, составляет для различных групп масел от 0,55...0,66 до 0,63...0,72.

В маслах содержатся углеводороды парафинового ряда с 20-70 атомами углерода в молекуле и молекулярными массами 300-600, циклопарафины с 20-35 атомами углерода с боковыми заместителями и молекулярными массами 450-650, вещества ароматического ряда с боковыми парафиновыми (алифатическими) или циклопарафиновыми заместителями и молекулярными массами 450-620. Масла придают битуму подвижность, увеличивают испаряемость, снижают температуру размягчения. Также масла оказывают значительное влияние на растворимость асфальтенов и реологические свойства битумов. Выделяют масла растворением их в петролейном эфире или легком бензине.

Парафины это твердые метановые углеводороды. Парафины снижают растяжимость битума, а некоторые их разновидности повышают хрупкость битума. Парафиновые углеводороды являются неактивными растворителями, иногда даже осадителями или флокулирующими веществами, они практически неполярны, изменяются под действием тепла, кислорода воздуха и ультрафиолетовых лучей. Увеличение содержания парафиновых углеводородов в мальтеновой части битумов ухудшает растворимость и набухание асфальтенов, что ведет к нарушению однородности битума. Наиболее высокомолекулярные парафиновые углеводороды имеют тенденцию при понижении температуры выкристаллизовываться на поверхности пленки битума и понижать прилипаемость последней к поверхности каменных материалов. С другой стороны, асфальтены битумов могут играть роль центров кристаллизации парафиновых углеводородов; последние образуют частицы, препятствующие ассоциации (сближению) макромолекул. Этим можно объяснить неоднородность битумов, содержащих значительные количества парафиновых углеводородов. опыты показали, что если нанести богатый парафинистыми составляющими битум на поверхность каменного материала или положить на поверхность такого битума пористую (фильтровальную) бумагу, то через определенный промежуток времени пористый материал или бумага впитают в себя некоторые составляющие битума. Эти составляющие являются углеводородами парафинового ряда. Такие опыты показывают, что парафиновые углеводороды легче всего отделяются от составляющих битума.

Ароматические углеводороды являются весьма активными растворителями для макромолекул асфальтенов, обладают определенной полярностью и большой устойчивостью к воздействию тепла, кислорода и ультрафиолетовых лучей. Увеличение содержания ароматических углеводородов в битумах обуславливает их лучшее прилипание к поверхности каменных материалов, большую стабильность при нагревании и воздействии атмосферных факторов.

Нафтенновые углеводороды по свойствам близки к парафиновым углеводородам, однако шестичленные нафтенновые углеводороды легко могут превращаться в ароматические, теряя шесть атомов водорода. Нафтенновые углеводороды при окислении образуют смолы.

Гетероциклические и гибридного старения углеводороды по свойствам приближаются к ароматическим, и увеличение содержания их в составе битумов желательно. Гетероциклические углеводороды (особенно содержащие в молекуле атомы серы и азота) значительно более полярны, чем ароматические, но менее стабильны при нагревании, окислении и других воздействиях.

Как видно из вышеизложенного, битумы полидисперсны, они состоят из сложной смеси множества индивидуальных соединений (веществ). Для таких материалов или отдельных их фракций определяют средние значения молекулярных масс. Обычно находят средние числовые и средние массовые значения молекулярных масс. Средняя числовая величина молекулярной массы

$$M_n = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i}, \quad (1.1)$$

где n_i — число молекул, имеющих молекулярную массу M_i .

Средняя массовая величина молекулярной массы M_w — масса фракций с молекулярной массой M_w .

Для монодисперсного материала $M_n = M_w$, где M_w - средняя величина молекулярной массы. При полидисперсности $M_n < M_w$, поскольку M_w растет с увеличением полидисперсности.

Чем сильнее различаются молекулярные массы отдельных молекул, тем больше будет отношение M_w/M_n , которое называют показателем, или коэффициентом полидисперсности. Данные исследования распределения молекулярных масс асфальтенов и мальтенов выделенных из дорожных битумов с глубиной проникания 90 при 25 °С. Определяли средние массовые, средние числовые значения молекулярных масс отдельных фракций битумов и коэффициент их полидисперсности. Эти данные получены А.В. Руденским [92] также для битума, подвергнувшегося нагреванию при 160 °С в течение 5 ч в тонкой пленке для оценки стабильности при тепловом старении.

При подготовке битумов к смешению с минеральными материалами при производстве дорожных смесей, затем при смешении, укладке и уплотнении битумы подвергаются воздействию температур от 90 до 160 °С. Продолжительность этого воздействия при подготовке битума может достигать нескольких часов, если значительные запасы битума хранят на строительстве и нет регулярной подачи битума непосредственно с битумной установки. Процесс дозировки и смешения продолжается всего несколько минут, затем массу транспортируют на место производства работ (иногда на расстояние более 30 км), что занимает 0,5-1 ч; укладка и уплотнение также длятся в течение 0,5-1 ч. В это время происходят необратимые изменения битума (старение), сопровождающиеся изменением химического состава, структуры и физико-механических свойств. В битумах уве-

личивается содержание асфальтенов, но несколько снижается количество смол и масляных компонентов. При перегреве битума образуются карбены и карбоиды. Качество битума ухудшается, температуры размягчения и хрупкости повышаются, увеличивается вязкость, он становится менее пластичным. Это первый этап, во время которого старение обусловлено нагревом и взаимодействием с частицами минерального материала. В процессе эксплуатации происходит второй этап старения, обусловленный воздействием атмосферных (перепадом температур, солнечной радиацией, воздействием кислорода воздуха, воды и др.) и эксплуатационных (усталостью от динамических нагрузок) факторов.

При исследовании окисляемости отдельных компонентов битума под действием кислорода при атмосферном давлении и температуре 204 °С установлено, что асфальтены в большей степени подвержены окислению, а масла достаточно устойчивы при данной температуре. После окисления асфальтенов в течение 3 ч они содержат большое количество (до 96 %) карбоидов. Если окислению подвергать не отдельные компоненты битума, а сам битум, то образование значительного количества карбоидов не происходит. Это показывает, что асфальтены легко окисляются, когда они не защищены мальтенами. Температура значительно повышает склонность к окислению. Продолжительность окисления оказывает влияние на состав продуктов реакции. При продолжительном окислении проходят вторичные реакции, усложняющие процесс окисления.

После воздействия света на тонкие пленки битума он становится нерастворимым в бензоле и хлороформе. При испытаниях на старение в естественных и искусственных условиях был сделан вывод [92], что в этих условиях все битумы ведут себя примерно одинаково и что в том и в другом случае образуется некоторое количество водорастворимых продуктов — кислот и кетонов. Свет и тепло без доступа кислорода или тепло и кислород без доступа света не вызывают образования водорастворимых веществ, т. е. отсюда можно сделать вывод, что водорастворимые вещества образуются при фотохимическом окислении некоторых компонентов битумов. Исследования, проводимые А. В. Руденским по изучению влияния искусственного солнечного света на дорожные битумы, проводились на образцах-пленках толщиной 10—15 мкм (на стеклянных пластинках) без доступа воздуха при температуре в среднем 82 °С. Вязкость битумов определялась до и после 24-часовой экспозиции. Отношение вязкости битумов, подвергавшихся экспозиции, к вязкости исходных битумов, измеренной при скорости сдвига $5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, изменялось от 1,5 до 8,3, причем 7 из 11 битумов имели это отношение от 2 до 3. Скорость окисления битума выше в присутствии света, чем без него, и реакции, проходящие при этом, различны. Окисление на свету вызывается главным образом ультрафиолетовой радиацией, и этот эффект распространяется на глубину около 4 мкм, а отверждение в темноте — на глубину до 3 мм. Интенсивность изменения свойств битумов под действием ультрафиолетовых лучей зависит от природы битума и от условий облучения (количество энергии, температура). При воздействии ультрафиолетовых лучей увеличивается содержание в битуме водорастворимых веществ. Физико-химические свойства битумов

при периодическом увлажнении изменяются несколько больше, чем без увлажнения. Считают, что короткие видимые волны могут действовать в большей степени разрушающе на битум, чем ультрафиолетовые. Отраженный солнечный свет (поляризованный), даже такой, как лунный, ускоряет разрушение органических веществ, в том числе и битумов. Добавка 5 % высокомолекулярных кислот (олеиновой, монтановой, лауриновой, стеариновой) или соответствующих спиртов может предотвратить изменение свойств битума под действием солнечного света.

Указанные исследования показали, что ванадиевые комплексы являются катализаторами фотоокислительных процессов. Содержание ванадия в битуме может характеризовать его погодоустойчивость.

Исследовано [87] изменение вязкости битума после нагревания в тонкой пленке при 163 °С в течение 75 мин и после старения в естественных условиях в течение 3 лет (коэффициент корреляции 0,84). Для сравнения дано изменение вязкости после 0 ч и 100 ч испытания в аппарате искусственной погоды и после 3 лет в естественных условиях, а также изменение вязкости после 3 лет в естественных условиях и содержания ванадия в битуме (коэффициент корреляции 0,75). Коэффициент корреляции при определении изменения вязкости нагревом в тонкой пленке и содержанием ванадия составляет 0,81. Хорошую характеристику старения битумов получают при испытаниях в аппарате искусственной погоды (длительность испытания не менее 100 ч). По содержанию ванадия в битуме можно быстро определить его склонность к старению методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

В настоящее время существует несколько основных тенденций в исследовании и направленном регулировании свойств битумов. Несмотря на различную трактовку строения битума и наиболее перспективных путей регулирования его свойств, различные исследования сходятся в том, что свойства битума зависят от концентрации асфальтенов, количественного соотношения смол и различных групп углеводородов в битуме, а также химической природы асфальтенов и их дисперсности [57, 84].

В теории Нелленштейна битум представляется коллоидной системой мицеллярного строения с находящимися в углеводородной среде ядрами асфальтенов, стабилизированных адсорбированным слоем смол. Размер ядер асфальтенов зависит от длины и количества их боковых алифатических цепей. Чем длиннее и многочисленнее цепи, тем больше молекул углеводородов они способны удержать и тем больше размер ядер. Стабильность системы зависит от интенсивности поверхностного взаимодействия между ядрами асфальтенов и масляной средой.

Дальнейшее развитие представлений о структуре битумов как о сложных дисперсных системах, в которых дисперсионной средой является молекулярный раствор смол или их часть в маслах, а дисперсной фазой – асфальтены, получили в работах И. А. Рыбьева. По его мнению, асфальтены, коллоидно-растворенные в углеводородной среде, становятся своеобразными центрами,

окруженными оболочкой, состоящей из смол и масел, равномерно распределенных по молекулярной массе: от тяжелых смол к сравнительно легким маслам без резко выраженной границы между фазой и средой. В пограничной зоне адсорбированы асфальтогеновые кислоты. Размер ядер зависит от химического состава среды, активности асфальтенов и температуры [93].

По современным воззрениям внутреннее строение битума представляет собой сложную коллоидную систему, дисперсионной средой в которой является раствор смол в маслах, а дисперсной фазой – асфальтены, карбены и карбоиды, коллоидно-растворенные в среде до макромолекул размером 18-20 мкм. Исходя из группового состава, степени пептизации асфальтенов битумы были разделены на три категории: золь, золь-гель и гель, отличающиеся по реологическим свойствам [57].

В соответствии с теорией растворов высокомолекулярных соединений в зависимости от внешних условий битумы могут находиться в различных термодинамических состояниях: проходя последовательно все стадии от истинных растворов к коллоидным растворам надмолекулярных структур асфальтенов и смол до пластичных, а затем твердых тел. Состояние и свойства битумов определяются не только формами и размерами молекул, но и всем комплексом сложных явлений структурообразования, начиная с укладки отдельных цепей молекул и заканчивая формированием крупной надмолекулярной структуры с различными типами связей [84, 85].

Развитию теории структурообразования в нефтяных битумах посвящены работы А. С. Колбановской [56, 57, 58]. В её работах исследовано влияние количественных соотношений структурообразующих компонентов – масел, смол и асфальтенов, а также их качественных характеристик на свойства битума. Основная структурообразующую роль отведена асфальтенам, модель которых может быть представлена системой конденсированных циклов, состоящих из 12-20 ароматических и меньшего количества нафтеновых колец. По данным А. С. Колбановской, плоские листы конденсированных систем радиусом 0,85-1,50 нм и толщиной 1,6-2,0 нм связаны гетероциклами, содержащими атомы кислорода, азота, серы. Стабильными асфальтенами могут быть только в среде полициклических ароматических углеводородов, которые образуют на их поверхности сольватные оболочки. Молекулы смол являются конденсированными системами, преимущественно состоящими из двух колец (ароматических и нафтеновых), соединённых алифатическими мастиками. По данным А.С. Колбановской, асфальтены и смолы содержат одинаковые химические группы, и различие в их строении в значительной мере носит количественный характер. Полученные закономерности позволили А.С. Колбановской обосновать три структурных типа битума и установить количественное соотношение структурообразующих компонентов для каждого типа битума (табл. 1.1)

Так, битумы, содержащие более 25 % асфальтенов, менее 24 % смол и более 50 % масел, отнесены к I структурному типу - гель. Дисперсная структура I типа определяется коагуляционной сеткой-каркасом из набухших в ароматиче-

ских углеводородах асфальтенов, взаимодействующих по лиофобным участкам поверхности через тонкие прослойки слабоструктурированной смолами дисперсионной среды. Асфальтены в сетке-каркасе взаимодействуют полярными лиофобными участками. На внешней лиофильной поверхности асфальтенов адсорбируются смолы, имеющие повышенные механические свойства в тонком слое. Сольватируясь, асфальтены набухают в ароматических углеводородах. Возможная кристаллизация твердых парафинов на асфальтенах может привести к образованию в битуме дополнительной пространственной кристаллизационной сетки.

Таблица 1.1

Структурные типы битумов по содержанию компонентов

Компоненты	Содержание компонентов, %, в битумах типа		
	I	II	III
Асфальтены	>25	<18	21...23
Смолы	<24	>30	30...34
Углеводороды	>50	<48	45...49

При содержании асфальтенов менее 18 %, смол более 36 % и масел менее 48 % битумы принадлежат II структурному типу - золь. В структуре II типа доминирующую роль играют надмолекулярные вторичные образования смол, в узлах которых находятся не связанные и не взаимодействующие друг с другом асфальтены. Битумы типа золь - предельно стабилизированная, разбавленная система асфальтенов в сильно структурированной смолами дисперсионной среде. Не связанные и не взаимодействующие между собой асфальтены адсорбируют смолы, переводя их в пленочное состояние.

Промежуточное положение по содержанию асфальтенов занимают битумы III структурного типа - золь-гель, в которых асфальтенов 21-23 %, смол 30-34 %, масел 45-49 %. Структура битума III типа определяется сопряжёнными сетками из отдельных агрегатов асфальтенов и адсорбированными на их поверхности тяжёлыми смолами, пронизывающими весь объём системы [43, 44]. Битумы типа золь-гель — система, в которой отдельные агрегаты асфальтенов находятся в дисперсионной среде, структурированной смолами в большей степени, чем в среде I типа, но в меньшей степени, чем в среде битумов II структурного типа. Асфальтены в такой структуре, взаимодействуя лиофобными полярными участками, образуют агрегаты и зародыши коагуляционной структуры, но их недостаточно для создания сплошного структурного каркаса. На внешней поверхности асфальтенов ориентированно адсорбируются смолы. Особенности этого вида структуры определяют взаимодействия отдельных агрегатов асфальтенов и структурированных смол, служащих как бы мостиками между ними.

По результатам исследования дисперсных структур в нефтяных битумах различных типов, проведенных А. С. Колбановской, установлены преимущества битумов, имеющих структуру III типа золь-гель перед I типом гель и II типом золь. По А. С. Колбановской, оптимальная структура битума для горячих

асфальтобетонов выбирается путём сравнительной оценки поведения различных дисперсных структур в эксплуатационных условиях. Битумы I типа, несмотря на повышенную пластичность при низких температурах и высокую теплоустойчивость, обладают рядом существенных недостатков, к числу которых относятся низкая устойчивость против действия окислительных факторов и склонность к синерезису на поверхности пористых минеральных материалов, что способствует ускоренному старению. Битумы II типа, несмотря на высокую прочность и устойчивость против термоокислительных воздействий при высоких технологических температурах в процессе приготовления асфальтобетонных смесей, практическое отсутствие синерезиса на пористых минеральных поверхностях, недостаточно теплоустойчивы при положительных температурах и хрупки даже при небольших отрицательных температурах. Не имеют указанных недостатков битумы III типа, так как обладают более высокой теплоустойчивостью и повышенной пластичностью при низких температурах в сравнении с битумами II типа и более устойчивы к старению, чем битумы I типа. Указанное позволило обосновать необходимость применения в дорожном строительстве битумов III структурного типа, которые получили наименование марок БНД.

В исследованиях И.М. Руденской и А.В. Руденского [84, 85, 91] приводятся данные, убедительно показывающие влияние структурообразующих компонентов битума на их свойства. Так, установлено, что интервал упруго-вязкопластичного состояния битума определяется содержанием асфальтенов и масел. Содержание смол напрямую отражается на величине растяжимости битума при 25 °С и на его температуре хрупкости. И. М. Руденской предложено проводить классификацию битумов по реологическим типам, подразделяя их по интервалу пластичности на три группы: битумы с малым (меньше 60 °С), средним (60-70 °С) и широким (более 70 °С) интервалом пластичности.

Состав битума в значительной мере определяет интенсивность процессов, протекающих на границе раздела фаз «битум – минеральный материал». Контакт указанных фаз в значительной степени определяет качество (физико-механические и эксплуатационные свойства) композиционных материалов на основе битумов, что требует уделять пристальное внимание прочного и плотного адгезионного соединения между битумом и минеральным наполнителем. Разработка методов улучшения смачивающей способности битума является самостоятельной и актуальной научно-практической задачей.

На поверхность минерального материала в первую очередь будут адсорбироваться содержащиеся в битуме поверхностно-активные компоненты типа асфальтогеновых кислот и их ангидридов. Соединения ароматического ряда той же химической природы и с одинаковым числом атомов углерода адсорбируются на поверхность лучше, чем алифатические, что связано с повышением активности за счет присутствия ненасыщенных двойных и тройных связей. Содержащиеся в маслах неполярные парафиновые углеводороды являются иногда флокулирующими веществами, изменяющимися под действием тепла, кисло-

рода воздуха, ультрафиолетовых лучей. Увеличение их содержания в мальтеновой части битумов ухудшает растворимость асфальтенов [84].

Интенсивность окислительных процессов в битуме зависит как от его структуры/типа (см. табл. 1.1), так и от химического состава. Так, комплексные соединения металлов (ванадия и никеля), входящих в высокомолекулярную часть асфальтенов битума термического крекинга, оказывают значительное влияние на структурообразование и атмосферостойкость.

На химический состав битумов каждого типа оказывают влияние природа сырьевой нефти, состав нефтяных фракций и технология получения битума. Так, несмотря на близкий элементный состав и среднюю молекулярную массу углеводородов и смол разных нефтей, асфальтены битумов могут иметь различные характеристики: асфальтены из крекинг-остатков имеют высокую степень ароматичности и невысокую молекулярную массу, что свидетельствует об их достаточной лиофобности вследствие малого количества алифатических боковых цепей; асфальтены битумов прямой перегонки гудрона, наоборот, достаточно лиофильны, а глубоко переокисленные битумы имеют более высокомолекулярные асфальтены [1, 11, 12, 13].

Объёмы производства битумов прямой перегонки и глубокоокисленных битумов марок БН и БНД по ГОСТ 22245-90 составляют наиболее значительную часть от объема всех потребляемых дорожных битумов. Однако значительная часть получаемых на нефтеперерабатывающих заводах окисленных битумов марок БН и БНД невысокого качества, что связано, как правило, с недостатками применяемой технологии производства. Путем оптимизации технологических факторов окисления нефтяного сырья (температуры и продолжительности процесса окисления, расхода воздуха) возможно влиять на структуру и свойства окисленных битумов [1, 5, 11, 12, 13, 15, 32, 34], однако этот путь технически недостаточно эффективен и экономически не рационален, т.к. при оптимальной для качества получаемого битума температуре окисления и рациональном расходе воздуха снижается производительность окислительных реакторов. Так, битумы, окисленные при более низких температурах и оптимальном расходе воздуха, обладают несколько улучшенными качественными характеристиками (в том числе более высокой устойчивостью к старению), но производительность технологического процесса в этом случае в 1,5-2 раза ниже. Получаемые при оптимизированном технологическом процессе дорожные битумы соответствуют по своим качественным показателям требованиям ГОСТ 22245-90, что является пределом для данной технологии получения вяжущих.

1.2. Модифицированные нефтяные дорожные битумы. **Влияние модификаторов на структурообразование и свойства битумов**

1.2.1. Технические решения, направленные на улучшение качества дорожных битумов. Модифицированный битум

Для получения битумов с улучшенными характеристиками необходимо принимать те технологические решения, которые обеспечивают требуемый уровень качества битумов и соответствуют общим критериям технико-экономической эффективности использования битумов в конкретных условиях их применения. В частности, для повышения качества битумов наряду с совершенствованием технологических процессов производства битумов используются следующие основные технические решения:

- для обеспечения высоких адгезионных свойств необходимо использовать разного рода добавки поверхностно-активных веществ (в первую очередь, катионного типа);

- для обеспечения широкого интервала пластичности наиболее эффективно введение в состав битумов модифицирующих добавок типа каучуков, резин, эластомеров, полимеров и т.п.;

- для обеспечения стабильности свойств битумов целесообразно введение в состав битумов тонкодисперсных структурирующих наполнителей, получаемых, в частности, помолот горючих сланцев, природных битумосодержащих материалов; применение синтетических волокон, природных битумов и добавок, тормозящих развитие процессов окисления в битуме.

Для качественного улучшения структуры и свойств дорожных битумов самым эффективным способом, позволяющим при направленном воздействии на структуру битума получать качественно новое органическое вяжущее, является **модификация битумов** высокомолекулярными соединениями полимера-ми, позволяющая получать комплексные многокомпонентные органические вяжущие, которые являются вяжущими нового поколения.

В настоящее время к **модифицированным битумным вяжущим** относятся нефтяные дорожные битумы (или другие органические вяжущие, например сланцевые битумы), содержащие до 10 % (по массе) добавок модификатора, относящегося, как правило, к органическим высокомолекулярным соединениям. В качестве модифицированных битумов широко известны разные виды полимерно-битумных вяжущих, резинобитумных вяжущих и битумов, модифицированных добавками высокомолекулярных поверхностно-активных веществ или природных битумов, а также продуктов нефтехимии, коксохимических и лесохимических производств.

Комплексные органические вяжущие (КОВ) – это вяжущие, состоящие из двух или более компонентов, в которых содержание основного компонента составляет менее 90 % по массе. В качестве компонентов КОВ могут быть использованы нефтяные или природные битумы, тяжелые нефти, каменноуголь-

ные и сланцевые битумы, продукты нефтехимических, коксохимических и лесохимических производств. К числу КОВ относятся дегтебитумные и битумодегтевые вяжущие, сернобитумные вяжущие, а также вяжущие, получаемые с использованием тяжелых нефтей и природных битумов, остатков от регенерации отработанных смазочных масел и разного рода композиционные вяжущие.

К **композиционным вяжущим** относятся КОВ, содержащие более трех компонентов, включая различные модифицирующие добавки, пластификаторы, структурирующие и стабилизирующие добавки (например, тонкодисперсные порошки и волокнистые наполнители). Наиболее известным компонентом комплексных органических вяжущих из числа природных битуминозных материалов являются тринидатский озерный асфальт, а также природные тугоплавкие битумы типа асфальтитов или гильсонитов.

1.2.2. Нефтяные дорожные битумы, модифицированные полимерами

Первые исследования, направленные на повышение качества битума, были предприняты более 150 лет назад. Для повышения эксплуатационных свойств битумов вводили органические соединения. Так, в Японии в 1923 году был получен патент на модификацию битума натуральным каучуком. Однако широкое использование этого способа модификации битумов в начале прошлого столетия сдерживалось высокой стоимостью указанного модификатора. Разработка технологии и организация мощной сети предприятий по производству синтетических каучуков значительно снизили их стоимость и увеличили доступность, что обеспечило широкое использование каучуков в различных отраслях промышленности, в том числе в строительстве [97].

Эффективность модификации битумов зависит от структуры и физико-механических свойств полимеров. Известно [4, 36, 80, 93, 96, 97], что макромолекулы полимеров построены из одинаковых, многократно повторяющихся групп атомов – элементарных звеньев. По расположению атомных групп в макромолекулах полимеры подразделяются на линейные, разветвленные и сшитые. Особенностью строения этих макромолекул является резкое различие характера связей вдоль цепи и между цепями, причем связи вдоль цепи намного прочнее поперечных связей, образующихся вследствие межмолекулярного взаимодействия любого происхождения. Эта особенность строения макромолекулы определяет весь комплекс аномальных свойств полимеров. Благодаря большой длине в сравнении с поперечным размером, макромолекулы обладают значительной гибкостью. Полимеры малочувствительны к действию положительных температур. Переход полимера из высокоэластичного в вязкотекучее состояние начинается при температурах выше 100 °С. Это обстоятельство обусловлено тем, что текучесть требует перемещения всей макромолекулы, какова бы ни была ее длина, а потеря твердости, т. е. возникновение высокоэластичности, происходит уже при перемещении отдельных участков цепных макромолекул. Поэтому температура текучести возрастает с ростом длины молекулы, поскольку

ку вязкость систем как жестких, так и гибких цепных макромолекул неизбежно тем больше, чем длиннее макромолекулы. Температура стеклования понижается с ростом молекулярного веса до тех пор, пока не начинает проявляться гибкость молекулы.

К настоящему времени в полимербитумных композициях испытаны практически все известные полимеры. Однако для практических целей применяются лишь некоторые типы высокомолекулярных соединений. Все имеющиеся высокомолекулярные соединения, применяемые в настоящее время для улучшения свойств битумов, сгруппированы в следующие классы:

1. Блоксополимеры дивинила и стирола (термоэластопластичные полимеры). Различают три вида блоксополимеров стирола: стирол-бутадиен-стирол (СБС), стирол-изопрен-стирол (СИС), стирол-этилен / бутилен-стирол (СЭ/БС). Для модификации дорожных битумов применяют блоксополимеры стирола типа СБС. Примером является группа полимеров: «Кратон Д 1101», «Кратон Д 1184», «Кратон Д 1186» фирмы «Шелл»; «Финопрен 411» фирмы «Петрофина»; «Европрен Сол Т 161» фирмы «Эникем», «Калпрен 411» фирмы «Репсол»; отечественные термоэластопласты ДСТ 30-01 и ДСТ 30 Р-01, производства ОАО «Воронежсинтезкаучук».

Термоэластопласты сохраняют способность к высокоэластическим деформациям в диапазоне температур от +80 до –80 °С. Температура деструкции термоэластопластов – 190...210 °С. Это класс полимеров, который сочетает в себе высокую прочность, присущую пластмассам, и эластичность, свойственную эластомерам. Термоэластопласты бутадиена и стирола типа СБС отличаются способностью к высокоэластическим деформациям за счет работы пространственной структурной сетки, образованной благодаря физическим связям между блоками макромолекул бутадиена и стирола. Блоки полистирола трёхблочных молекул термоэластопласта типа СБС расположены по краям и имеют очень прочные связи между макромолекулами при температуре до + 80 °С. Это придаёт пространственной сетке, образующейся в битуме при растворении в нём блоксополимера, высокую прочность, а следовательно, получаемое вяжущее более теплостойкое в сравнении с исходным битумом. Полимеры типа СБС сочетают в себе высокую прочность, присущую пластмассам и очень низкую температуру стеклования, свойственную каучукам. Последнее свойство, как и при применении эластомеров, позволяет обеспечить требуемую температуру хрупкости вяжущего.

Блоксополимеры бутадиена и стирола типа СБС хорошо совмещаются с битумами, т.к. полистирол и полибутадиен хорошо набухают в парафинонафтеновых и нафтено-ароматических углеводородах битума и частично растворяются в них при температуре 150 °С. Для улучшения растворения полимера в битуме применяют пластификаторы: промышленные масла марок И-20А, И-30А, И-40А, И-50А и нефтяные гудроны. Применение пластификатора позволяет значительно улучшить растворимость полимера в битуме, но при этом

несколько снижает адгезионные свойства получаемого вяжущего в сравнении с исходным битумом.

Для битумов с добавками полимеров типа СБС присуще новое свойство, нехарактерное для битумов – эластичность, которое характеризует способность вяжущего к обратимым, эластическим деформациям. Для того чтобы регламентировать получение вяжущего с оптимальной структурой и обеспечить контроль его качества, используется показатель эластичности (\mathcal{E}), который определяется на приборе дуктилометре, одновременно при определении растяжимости вяжущего при температуре 25 и 0 °С (табл. 1.2). Эластичность при 25 °С характеризует наличие в вяжущем пространственной структурной сетки полимера, соответственно при 0 °С - характеризует работоспособность этой сетки при низких температурах, что необходимо для повышения деформативности битумно-полимерного вяжущего при низких температурах [29, 30, 31, 51, 59].

2. Эластомеры. К эластомерам относят каучук и каучукоподобные полимеры. Синтетические каучуки - продукты цепной полимеризации различных углеводородных мономеров: изопрена, дивинила (бутадиена) и др. В отличие от других полимеров эластомеры при их растяжении могут удлиняться до 10 раз больше первоначальной длины, а при снятии нагрузки восстанавливать первоначальные размеры. Способность к эластичным деформациям объясняется спиралевидным строением их макромолекул, сильными внутримолекулярными связями и слабым взаимодействием между макромолекулами.

Примером полимеров–эластомеров, наиболее пригодных для модификации битумов, являются синтетические каучуки общего назначения (изопреновые СКИ, дивиниловые СКД, дивинил-стирольные СКС, дивинил-метилвые СКМС, этиленпропиленовые сополимеры СКЭПТ) заводов синтетического каучука – Волжского, Воронежского, Нижнекамского, Стерлитамакского и др. Указанные каучуки выпускаются в виде брикетированного эластичного продукта и служат основой для получения резины путем вулканизации (сшивки макромолекул) каучука. Каучуки имеют большую молекулярную массу от 150 тыс. до миллиона, среднюю плотность 0,9-0,95 г/см³, температуру стеклования не менее 50 °С.

Синтетические каучуки общего назначения, в силу своего специфического строения, обладают широким интервалом пластичности - от +190...+210 °С (температура начала термодеструкции) до -70...-105 °С (температура стеклования), что вызывает увеличение интервала пластичности битумов при введении в них каучука с 50– 65 °С до 80– 90 °С (табл. 1.3). Введение синтетического каучука в нефтяной битум способствует снижению его теплочувствительности, возрастанию вязкости при высоких температурах и снижению при низких. Присутствие каучука в составе асфальтобетона повышает его деформативную способность при низких и деформационную устойчивость при высоких температурах, приводит к возрастанию усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий [51, 53, 62, 67, 68, 69, 76].

Выбор типа каучука для приготовления модифицированного битума определяется техническими требованиями к физико-механическим свойствам вяжущего, т.к. каждый из перечисленных типов каучуков специфичен и передает всей битумно-полимерной системе только присущие ему качества. Синтетические каучуки из-за больших размеров макромолекул плохо растворяются, но хорошо набухают в органических растворителях.

3. Термопласты. Термопластичными называются полимеры, способные многократно размягчаться при нагревании и отвердевать при охлаждении, что в основном определяется линейным строением их молекул. Термопласты не только набухают, но и отлично растворяются, а после испарения растворителя способны возвращаться в твердое состояние. Широкое применение термопласты находят в лаках, клеях, битумных мастиках [39, 93].

4. Реактопласты. Примером реактопластов являются эпоксидные, карбонидные, полиэфирные и др. синтетические смолы. Указанные полимеры для образования пространственной структуры нуждаются в отвердителе и после реакции становятся чрезвычайно прочными (до 100 - 150 МПа), но недостаточно деформативными материалами для применения в конструкциях дорожных одежд. Более эффективным является путь применения битумов в качестве модифицирующих добавок с целью повышения деформативных характеристик полимерных композитов на основе эпоксидных и др. термореактивных смол [96]. Получаемые на основе модифицированных синтетических смол, композиционные материалы обладают более высокими физико-механическими свойствами и коррозионной стойкостью в сравнении с битумо-минеральными материалами, однако в силу высокой стоимости пока применяются для устройства полов высокой износо- и химической стойкости, изготовления строительных клеев, антикоррозионной защиты строительных конструкций.

Условия эксплуатации нефтяных битумов в дорожных покрытиях, а также многочисленные исследования [29, 30, 31, 51, 59, 92] позволили сформулировать следующие требования к высокомолекулярным полимерным соединениям, предназначенным для модификации битумов:

- полимер должен быстро и полностью растворяться до молекулярного уровня в дисперсионной среде нефтяного битума;
- макромолекулы полимера должны обладать склонностью к ассоциации и при определенном содержании в битуме образовывать пространственную структурную сетку;
- полимер должен образовывать в битуме такую структурную сетку, которая была бы устойчива к деструкции при технологических воздействиях в процессе приготовления асфальтобетонных смесей и дальнейшей эксплуатации асфальтобетона в покрытии;
- способ модификации битума, определяемый индивидуальными особенностями конкретного класса полимера, должен отвечать всем критериям технико-экономической эффективности.

Таблица 1.2

Технические требования к битумам и полимерно-битумным вяжущим на основе полимеров типа СБС

Наименование показателей	Нормы по маркам										
	БНД 200/300	ПБВ 200	БНД 130/200	ПБВ 130	БНД 90/130	ПБВ 90	БНД 60/90	ПБВ 60	БНД 40/60	ПБВ 40	
Глубина проникновения иглы, 0,1 мм, не менее:	при 25 °С	201—300	200	131—200	130	91—130	90	61—90	60	40—60	40
	при 0 °С	45	70	35	50	28	40	20	32	13	26
Температура размягчения по КиШ, °С, не ниже	35	47	40	49	43	51	47	54	51	56	
Растяжимость, см, не менее:	при 25 °С	—	30	70	30	65	30	55	25	45	15
	при 0 °С	20	25	6,0	20	4,0	15	3,5	11	—	8
Температура хрупкости, °С, не выше	-20	-35	-18	-30	-17	-25	-15	-20	-12	-15	
Эластичность, %, не менее:	при 25 °С	—	85	—	85	—	85	—	80	—	80
	при 0 °С	—	75	—	75	—	75	—	70	—	70
Изменение температуры размягчения по- сле прогрева, °С, не более	7	7	6	6	5	6	5	5	5	5	
Температура вспышки, °С, не ниже	220	220	220	220	230	220	230	220	230	230	
Сцепление с мрамором или песком, кон- трольный образец	—	№ 2	—	№ 2	—	№ 2	—	№ 2	—	№ 2	
Однородность	—	Одн.	—	Одн.	—	Одн.	—	Одн.	—	Одн.	

Таблица 1.3

Сравнительные технические требования к БКВ и БНД

Наименование показателей	Нормы по маркам										
	БНД 200/300	БКВ 200/300	БНД 130/200	БКВ 130/200	БНД 90/130	БКВ 90/130	БНД 60/90	БКВ 60/90	БНД 40/60	БКВ 30/40	
Глубина проникновения иглы, 0,1 мм, не менее:	при 25 °С	201—300	201—300	131—	131—200	91—	91—130	61—	61—90	40—	31—40
	при 0 °С	45	60	200 45	50	130 28	40	90 20	28	60 13	10
Растяжимость, см, не менее:	при 25 °С	—	70	70	70	65	70	55	60	45	30
	при 0 °С	20	35	6,0	35	4,0	25	3,5	22	—	10
Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	35	40	40	43	43	45	47	49	51	56	
Температура хрупкости, °С, не выше	-20	-42	-18	-32	-17	-27	-15	-22	-12	-15	
Эластичность, %, не менее:	при 25 °С	—	40	—	40	—	40	—	40	—	40
	при 0 °С	—	30	—	30	—	30	—	30	—	30
Температура вспышки, °С, не ниже	220	220	220	220	230	220	230	220	230	230	
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С, не более	7	7	6	6	5	6	5	6	5	5	
Сцепление с мрамором или песком по контрольному образцу	—	№1	—	№1	—	№1	—	№1	—	№1	
Однородность	—	Одн.	—	Одн.	—	Одн.	—	Одн.	—	Одн.	

Для решения вопроса о целесообразности использования того или иного модификатора или технологического процесса для получения битумных вяжущих улучшенного качества необходима оценка соблюдения следующих критериев технико-экономической эффективности:

1. Техническая эффективность определяется тем, в какой степени используемый модификатор реально обеспечивает улучшение требуемых показателей качества битума.

2. Технологическая эффективность определяется тем, насколько предлагаемое техническое решение соответствует реальным технологическим возможностям производства, не требует введения дополнительных технологических операций, использования специального технологического оборудования и пр.

3. Экономическая эффективность определяется тем, в какой мере удорожание получаемого вяжущего оправдано улучшением его характеристик и возможностями продления сроков службы асфальтобетонных покрытий. Использование технически эффективных, но дорогих модификаторов или трудоемких технологических процессов может существенно ограничить экономически целесообразную область применения модифицированного битумного вяжущего.

Из перечисленных выше классов полимеров в наибольшей степени предъявленным требованиям удовлетворяют термоэластопласты и эластомеры, и поэтому они в настоящее время имеют наибольшее применение для улучшения свойств дорожных битумов. В 2002 году в «СоюзДорНИИ» подготовлено к изданию «Руководство по применению комплексных органических вяжущих (КОВ), в том числе ПБВ, на основе блоксополимеров типа СБС в дорожном строительстве». В нем отражены особенности технологии приготовления, применения и подбора составов. В 2004 году утвержден и введен в действие ГОСТ Р 52056-2003 «Вяжущие полимерно-битумные на основе блок-сополимеров типа стирол-бутадиен-стирол».

Показатели свойств синтетического каучука типов СКД, СКС и термоэластопласта ДСТ приведены в табл. 1.4 - 1.8.

Таблица 1.4

Каучук синтетический цис-бутадиеновый СКД
(производитель ОАО «Воронежсинтезкаучук»)

Наименование показателя	Норма для каучука СКД (высший сорт)	Фактическое значение показателя
Вязкость по Муни МБ 1÷4 (100°С).	40-50	46
Разброс вязкости внутри партии, не более	6	-
Массовая доля золы, %, не более	0,3	0,1
Потеря массы при сушке, %, не более	0,8	0,3

окончание табл. 1.4

Наименование показателя	Норма для каучука СКД (высший сорт)	Фактическое значение показателя
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	19,1	26
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	480	700
Относительная остаточная деформация после разрыва, %, менее	12	14
Эластичность по отскоку, %, не менее	0,3	0,3
Условные напряжения при 300 % удлинения, МПа, не менее	6,9	7,1
Массовая доля антиоксидантов, %, не более: агидол-1	0,4 - 1,0	0,5

Таблица 1.5

Каучук синтетический бутадиен-стирольный СКС-30 АРКМ-15
(производитель ОАО «Воронежсинтезкаучук»)

Наименование показателя	Норма для каучука СКС 30 АРКМ-15 (1 группа)	Фактическое значение показателя
Вязкость по Муни МБ 1÷4 (100°С).	36-44	39
Разброс вязкости внутри партии, не более	8	-
Массовая доля золы, %, не более	0,6	0,2
Потеря массы при сушке, %, не более	0,40	0,1
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	23,5	27
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	550-750	740
Эластичность по отскоку, %, не менее	27	27
Массовая доля антиоксиданта (агидол-2), %	0,6-1,2	0,9
Массовая доля масла, %	14 - 17	15

Таблица 1.6

**Каучук синтетический маслонаполненный бутадиен-стирольный
СКС-30 АРКМ-27
(производитель ОАО «Воронежсинтезкаучук»)**

Наименование показателя	Норма для каучука СКС 30 АРКМ-27(1 сорт)	Фактическое значение пока- зателя
Вязкость по Муни МБ 1÷4 (100°С).	47-57	52
Разброс вязкости внутри партии, не более	6	-
Массовая доля золы, %, не более	0,6	0,15
Потеря массы при сушке, %, не более	0,35	0,15
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	22,0	26
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	550-750	700
Эластичность по отскоку, %, не менее	29	30
Массовая доля антиоксиданта (агидол-2), %	0,8-1,5	1,2
Массовая доля масла, %	26 - 29	27

Таблица 1.7

**Каучук синтетический бутадиен-стирольный СКС-30 АРКПН
(производитель ОАО «Воронежсинтезкаучук»)**

Наименование показателя	Норма для каучука АРКПН (1 группа)	Фактическое значение пока- зателя
Вязкость по Муни МБ 1÷4 (100°С).	27-37	33
Разброс вязкости внутри партии, не более	8	1
Массовая доля золы, %, не более	0,8	0,2
Потеря массы при сушке, %, не более	0,4	0,1
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	23,0	31
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	560	750
Эластичность по отскоку, %, не менее	33	35
Массовая доля антиоксиданта (агидол-2), %	0,7-1,2	1,0

Термоэластопласт ДСТ 30-01
(производитель ОАО «Воронежсинтезкаучук»)

Наименование показателя	Норма для марки по ТУ 38-103267-99	Фактическое значение показателя
Твердость по Шору А, усл. ед., не более	85	55
Массовая доля золы, %, не более	5	1
Потеря массы при сушке, %, не более	0,5	-
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	650	700
Эластичность по отскоку, %, не менее	45	48
Массовая доля антиоксиданта (агидол-1), %	0,2-0,5	0,4
Относительная остаточная деформация после разрыва, %, не более	25	27
Характеристическая вязкость раствора полимера, дл/г	1,0-1,6	1,3

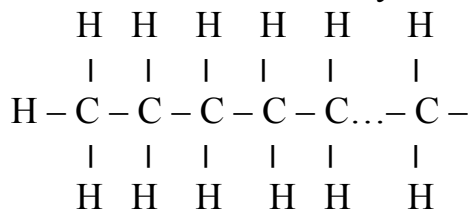
Несмотря на широкое применение в дорожном строительстве модифицированных битумов на основе СБС, в ряде случаев по причине неудовлетворительного сцепления вяжущего с минеральной частью асфальтобетона произошло преждевременное разрушение дорожных покрытий, построенных в 1996-2002 гг. [47, 51]. Поэтому одновременно со стремлением улучшить свойства битума и расширить диапазон температур его эксплуатации необходимо уделять повышенное внимание проблеме повышения прочности сцепления вяжущего с минеральными материалами. Для увеличения смачиваемости и адгезии битума к каменным поверхностям в различных странах были предложены и применены добавки анион- и катионактивных поверхностно-активных веществ (ПАВ).

1.2.3. Нефтяные дорожные битумы, улучшенные поверхностно-активными добавками

Поверхностно-активными веществами называют такие химические соединения, которые адсорбируются на поверхностях раздела жидкостей и твердых тел и влияют на их физико-химические или химические свойства. ПАВ являются, как правило, соединениями, молекулы которых состоят из двух главных частей - радикала и функциональной группы.

Радикал представляет собой группу *атомов*, которая при ряде химических превращений неизменна и переходит из молекулы одного соединения в моле-

кулу другого. Радикалы образуются, например, при отщеплении в молекулах углеводородов органических соединений атома водорода. Так, если в любом предельном (насыщенном) соединении, относящемся к классу парафинов, типа C_nH_{2n+2} , отщепляется атом водорода, то оставшаяся группа атомов C_nH_{2n+1} является алифатическим или жирным (алкильным/парафиновым) радикалом, который обозначается обычно буквой R:



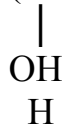
Место отщепленного водорода в молекуле может занять другой атом или группа атомов, обладающих определенными свойствами, связанными со стационарным смещением электронов на их атомных орбитах, что обуславливает наличие определенного электрического диполя и дипольного момента всей молекулы. Такие атомы или группы атомов называются функциональными группами.

Наиболее часто встречающиеся в составе ПАВ функциональные группы:

1. (-OH) – гидроксильная;



2. (-C) – или (-COOH) – карбоксильная;



3. (-N) или (NH₂) – аминная (аминогруппа);



4. (-NO₂) – нитрогруппа;

5. (-SO₃H) – сульфогруппа.

От типа функциональной полярной группы и структуры радикала зависит растворимость ПАВ в различных растворителях и способность диссоциировать на ионы. ПАВ, в которых функциональные группы несут положительный заряд, активны в кислой среде и неактивны в щелочной, тогда как ПАВ с отрицательно заряженными функциональными группами, наоборот, активны в щелочной и неактивны в кислой.

Поверхностно-активные добавки характеризуются тем, что в составе их молекул должны содержаться полярная, растворимая (гидрофильная) часть и неполярная, нерастворимая в воде (гидрофобная) часть.



Сложный органический радикал



Функциональная группа

Кислотные группы (COOH^-) имеют отрицательный заряд, положительно заряженная группа (NH_2^+) характерна для аминов.

Если какая-либо поверхность полярная или имеет собственные активные (полярные) группы, то она, естественно, будет притягивать (адсорбировать) противоположно заряженные полярные группы молекул ПАВ, которые будут при этом ориентироваться углеводородными радикалами наружу. Покрытая слоем в одну молекулу такая поверхность со стороны окружающей среды приобретает свойства, характерные для углеводородов. Она не будет смачиваться водой и потому будет гидрофобной (от греческого «боязнь/страх воды»), или водоотталкивающей. Первоначально же поверхность, будучи полярной, хорошо смачивалась водой, что указывало на её гидрофильность (от греческого «любовь к воде»).

В том случае когда поверхность первоначально была углеводородной, например поверхность битума, небольшая примесь ПАВ - жирной кислоты ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$) или жирного амина ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{NH}_2$) - может самопроизвольно изменить её на полярную с находящимися сверху полярными группами COOH или NH_2 . При этом концентрация ПАВ в поверхностном (адсорбционном) слое может в десятки тысяч раз превышать концентрацию его в объёме окружающей среды (например, в растворе). Адсорбционный слой ПАВ осуществляет как бы переход между двумя граничащими фазами, противоположными по молекулярной природе. Благодаря этому слою обеспечивается тесная связь между соприкасающимися телами (адгезия).

Принципиально все поверхностно-активные вещества разделяются на две большие группы: *ионогенные* соединения, при растворении в воде диссоциирующие на ионы, и *неионогенные*, которые на ионы не диссоциируют. В зависимости от того, какими ионами обусловлена поверхностная активность ионогенных веществ - анионами или катионами, ионогенные вещества подразделяются на *анионоактивные*, *катионоактивные* и *амфолитные* (амфотерные). Анионоактивные ПАВ активны в щелочных растворах, катионоактивные - в кислых, амфолитные - в тех и других.

Активность ПАВ зависит от длины и ненасыщенности углеводородного радикала. При одинаковом числе атомов углерода в молекуле действие ПАВ улучшается с увеличением числа двойных связей, а при числе атомов углерода менее 10 поверхностно-активные свойства вообще не проявляются. При введении в воду ионных добавок они ионизируются и перемещаются к поверхности раздела фаз. Пленка, которая образуется в результате объединения на поверхности битумной части гидрофобных частей молекул эмульгатора, придает битумным каплям электрический заряд. Знак этого заряда определяется зарядом гидрофобной или углеводородной части молекулы добавки. Если отрицательно заряженные ионы (анионы) добавки обладают гидрофобностью, то битум будет нести отрицательный заряд, а добавка называется анионной. Если катионы или положительно заряженные ионы гидрофобны, то битум несет положительный заряд, добавка относится к типу катионных.

Анионные поверхностно-активные добавки активно взаимодействуют с основными (содержащими СаО) минеральными материалами, образуя на их поверхности водостойкую пленку. С кислыми (содержащими SiO₂) породами анионные поверхностно-активные добавки взаимодействуют слабо, поэтому пленка вяжущего будет менее водостойка.

Катионные поверхностно-активные добавки активно взаимодействуют с основными и особенно с кислыми минеральными материалами, образуя на поверхности зерен любых горных пород прочную и водостойкую пленку.

В качестве анионных поверхностно-активных добавок используют вещества типа высших органических кислот (жирные, смоляные, нафтеновые, сульфатонафтеновые) и их солей (мыла).

Из катионных ПАВ наибольшее практическое значение имеют амины и четвертичные соли аммония. В растворах они могут быть в молекулярной, ионной или мицеллярной форме. Механизм взаимодействия аминов с минеральными материалами сводится к ионному обмену катиона минерала на катион амина. Закрепление аминов на поверхности кислых минеральных материалов обусловлено в значительной мере электростатической адсорбцией ионов ПАВ во внешней обкладке двойного электрического слоя. Адсорбция аминов на поверхности минеральных материалов вызывает изменение электрохимического потенциала.

Итак, ПАВ обладают способностью перемещаться к поверхности раздела фаз, которая может представлять собой границу между двумя жидкостями, жидкостью и газом, жидкостью и твердым телом, и собираются там в количестве большем, чем внутри раствора. В среде «битум – вода» (битумно-водная эмульсия) поверхностно-активные добавки перемещаются к поверхности раздела между битумом и водой. Гидрофобная часть молекулы добавки сохраняет взаимодействие с поверхностью частиц битума, придавая им ионные заряды. Гидрофильная часть молекулы добавки располагается в водной фазе. В среде «битум – минеральный материал» органический радикал добавки входит в себе подобный слой (битум), а функциональная группа взаимодействует с минеральным материалом.

Поверхностно-активные добавки снижают поверхностное натяжение на границе «битум - минеральный материал», улучшают и ускоряют обволакивание поверхности минеральных материалов, увеличивают адгезию битума к минеральному материалу. Они могут адсорбироваться также на лиофобных участках поверхности асфальтенов, блокируя места их коагуляционных контактов, препятствуя тем самым асфальтенам сливаться в более крупные частицы (коалесценция). Это свойство поверхностно-активных добавок заключается в разделении частиц, одинаково заряженных, а значит, отталкивающихся друг от друга. Поверхностно-активные добавки приводят к стабилизации всей системы, а следовательно, к замедлению старения битума. Такая стабилизация системы адсорбционными слоями приводит к снижению ее вязкости. Все это вместе взятое – улучшение смачивания и обволакивания вследствие стабилизации системы - позволяет снизить рабочую температуру битума и температуру приготовления асфальтобетонной смеси.

Широко применять ПАВ в дорожном строительстве начали в прошлом веке. В середине 20-го столетия во Франции широкое применение при модификации битумов получили диамины и полиамины. В Англии и Швеции используют катионактивные ПАВ на основе пальмитиновой, масляной, стеариновой кислот. В США и Канаде выпускаются добавки типа аминов и солей аммония. В период 1959 - 1970 гг. в СССР построено свыше 15000 км дорог с применением ПАВ как анионного, так и катионного типов [84]. В последние 20 лет получили широкое распространение неионогенные ПАВ, которые наиболее чувствительны к щелочным и кислым минеральным материалам [39]. Также в России для улучшения адгезионных свойств битума к минеральной части асфальтобетона применяют анионактивные ПАВ: госсиполовую кислоту, окисленный петролатум, синтетические жирные кислоты (СЖК), кубовые остатки СЖК, железистые соли высших карбоновых кислот и др. Используются также катионные

ПАВ (октадециламин, амины, диамины). Из неионогенных ПАВ известны камид, эфиры полиоксиэтиленовых алкифенолов ОП-7 и ОП-10.

Катионные ПАВ, применяемые в дорожном строительстве для повышения сцепления битума с кислыми горными породами, как правило, относятся к классу органических азотсодержащих соединений – аминов и их производных. В качестве катионных ПАВ используются амины, диамины, полиамины и их производные, четвертичные аммониевые основания и их соли, амидоамины, имидазолины и их производные, пиперазины и их производные, а также смеси этих соединений и т.п.

В настоящее время наиболее широко известны отечественные азотсодержащие ПАВ, используемые в качестве адгезионных добавок к дорожным битумам: БП-3М по ТУ 38.401-66-60-90 (амидоамины), «Амдор» по ТУ 0257-003-35475596-96 (алкиламины и амидоамины, имидазолины), ТУ 0257-004-35475596-96 (алкиламины и диалкиламины), «Дорос-АП» по ТУ 5732-002-33452160-97 (амидоамины), «Кодид» по ТУ 38.507-63-0272-91 (амиды и эфираамиды), «Камид» (амины, соли аминов, амиды жирных кислот), пеназолин по ТУ 38-40753-75 и пат. РФ № 2090580 (амидозолины), «Бикор» по ТУ 38.507-63-0218-91 и пат. РФ № 2101249 (имидазолины, пиперазины, аминокамиды).

Кроме улучшения сцепления с минеральными материалами, ПАВ должны обладать термостабильностью при технологической температуре вяжущих. Некоторые азотсодержащие ПАВ имеют низкую термостабильность (например, БП-3, БП-3М), в то же время такие ПАВ, как «Амдор-9», «Амидан», характеризуются достаточно высокой термостабильностью, т.е. сохраняют свои свойства при длительном выдерживании битумных вяжущих при температуре 160-180 °С.

Одной из наиболее распространённых добавок, улучшающих сцепление вязкого битума с минеральной частью, является ПАВ «Амдор-9», производимое в ООО «УРАЛХИМПЛАСТ-АМДОР» по ТУ 0257-003-35475596-96. Характеристики свойств ПАВ «Амдор-9» приведены в табл. 1.9.

Необходимое условие адгезии – смачивание битумом поверхности минерального материала. ПАВ, содержащиеся в битуме, улучшают смачивание. Даже на мокром минеральном материале битум в присутствии ПАВ распределяется в виде пленки, тогда как без ПАВ он собирается в капли. После смачивания

происходит избирательная адсорбция и хемосорбция активных компонентов битума на минеральной поверхности.

Таблица 1.9

Свойства адгезионной добавки «Амдор-9»

Наименование показателя	Норма	Фактическое значение показателя
Внешний вид	Однородная ма- зеобразная масса или вязкая жид- кость от светло- желтого до темно- коричневого цвета	Соответствует
Сцепление с минеральным материа- лом битума, содержащего 0,5 % присадки	Не хуже контроль- ного образца №1	Соответствует
Кислотное число, мг КОН/г продук- та, не более	15,0	14,8
Массовая доля воды, %, не более	2,0	0,54
Температура плавления, °С, не бо- лее	35	27
Аминное число, НСl с массовой до- лей 100 % на 100 г продукта, не ме- нее	16	21,4

Если химического взаимодействия не наблюдается, адсорбция является физической и представляет собой обратимый процесс. Прочное сцепление би- тумов с минеральными материалами достигается в тех случаях, когда между активными высокомолекулярными соединениями битума и минеральным мате- риалом происходит химическая реакция с образованием водонерастворимых соединений.

1.2.4. Резинобитумные вяжущие, полученные совмещением нефтяных битумов и резиновой крошки

Расширение возможностей использования модифицирующих добавок мо- жет быть также достигнуто за счет использования методов компаундирования и введения в состав битумных вяжущих компонентов, позволяющих снизить сто- имость получаемого вяжущего. Известны, в частности, технические решения, позволяющие с использованием компактных установок производить модифи- кацию битума резиновой крошкой и другими резиновыми компонентами. Для повышения качества битумов одним из наиболее эффективных направлений является расширение производства и применения резинобитумных вяжущих и

мастик на их основе для применения при приготовлении дорожных асфальтобетонных смесей, гидроизолирующих и герметизирующих составов для заделки швов, трещин, устройства переходных зон покрытий над стыками мостовых плит и т. п.

В целях выявления наиболее эффективной технологии получения резинобитумных вяжущих необходимо учитывать различия в характеристиках резиновой крошки, получаемой различными способами, и различия в способах совмещения резиновой крошки с битумом, в том числе температуру, интенсивность и длительность процесса перемешивания резиновой крошки с битумом.

Применение изношенной резины в дорожном строительстве возможно двумя основными способами. Более простой способ, но не использующий в полной мере ценных свойств каучуков и резин, состоит в применении резиновой крошки в качестве замены части наполнителя в асфальтобетоне. В рамках этой технологии рекомендовано вводить резиновую крошку в минеральные смеси в процессе перемешивания. Количество резиновой крошки должно составить 1,5-3 % от массы минеральной части асфальтобетона, и крошка должна иметь не менее 80 % зерен размером мельче 0,63 мм. При этом битума должно быть не менее 10 % для песчаного и не менее 7 % для щебенистого асфальтобетона, а температура нагрева минеральных материалов - 160...180 °С при производстве уплотняемых асфальтобетонных смесей и 190...250 °С при производстве литых смесей. Длительность перемешивания минеральных материалов и резиновой крошки до подачи битума составляет 15-30 секунд, а полное время перемешивания смеси – 120-180 секунд. Температура при выходе из смесителя для уплотняемых смесей равна 140...160 °С, литых 190...220 °С, а при укладке соответственно 120...140 и 180...210 °С. Уплотнение асфальтобетонных смесей, содержащих резиновую крошку, рекомендуется проводить при более низкой температуре. Отмечается, что асфальтобетон с резиновой крошкой имеет повышенную теплостойкость, морозостойкость и деформативность при низких температурах, а также повышенный коэффициент сцепления колес автомобиля с дорожным покрытием. Введение в асфальтобетон резиновой крошки снижает уровень шума. Асфальтобетонная смесь с резиновой крошкой плохо уплотняется, однако после хранения в накопительных бункерах при 160 °С в течение 3-5 ч уплотняемость улучшается.

Дробленую резину с размером зерен 0-12,5 мм рекомендуется применять в качестве теплоизоляционного слоя с размером зерен 6-20 мм (70 %), 20-30 мм (10 %) и мельче 6 мм (20 %) — при устройстве поверхностной обработки. Для ремонта покрытий предложено укладывать тонкий слой дробленой резины, а затем наносить слой износа. При использовании изношенной резины в виде наполните-

ля - порошка или более крупных гранул - не утилизируются ценные свойства самого каучука, входящего в состав резин.

Более эффективным направлением является перевод резины в пластифицированное состояние, обеспечивающее возможность применения ее в составе битумного вяжущего для производства уплотняющих, гидроизоляционных и кровельных мастик, дорожных смесей [92].

Наибольшее количество изношенной резины собирается в виде автопокрышек и камер. В них содержатся такие ценные виды каучука, как натуральный, изопреновый, бутадиеновый, бутадиен-стирольный, бутилкаучук. Посредством термомеханической обработки в присутствии пластифицирующих материалов изношенная резина может быть девулканизирована. В качестве пластифицирующих материалов могут быть использованы нефтяные гудроны или маловязкие битумы, тяжелые экстракты селективной очистки масляных фракций (предпочтительно остаточные), каменноугольные тяжелые масла, смолы, дорожные дегти. При этом могут быть получены резинобитумные и резинодегтевые вяжущие высокого качества. Технологические параметры процесса зависят от типа каучука, входящего в состав резин, и вида пластификатора.

Процесс пластификации резиновой крошки посредством термомеханической обработки ведут пропусканьем набухшей в нефтяном гудроне (или битуме) резины через аппарат-пластификатор, объединенный с шестеренчатым насосом, при оптимальной температуре 225...235 °С. Набухшая резина под воздействием зубьев шестеренчатого насоса постепенно пластифицируется, и органические компоненты переходят в раствор. Продолжительность термомеханической обработки составляет от 30 мин до нескольких часов в зависимости от вида каучука и растворителя. Снижение температуры и сокращение времени пластификации ухудшают свойства готового продукта. Термопластификация резины может быть проведена в лопастном или роторно-эксцентриковом смесителе.

Рекомендовано при термомеханической пластификации резины использовать поверхностно-активные вещества, например сульфитно-дрожжевую бражку. Процесс термомеханической пластификации изношенной резины протекает следующим образом: при совместной термомеханической обработке измельченная резина набухает в масляных фракциях битума (гудрона или дегтя), что ослабляет межмолекулярные связи в резине; в условиях продолжающихся подвода тепла и механических воздействий происходит разрыв по этим ослабленным связям, т.е. осуществляется девулканизация резины с образованием каучукового вещества, которое структурирует битум (гудрон или деготь).

По мере увеличения содержания резиновой крошки резинобитумные смеси все больше приближаются по физико-механическим свойствам к каучуковым материалам.

При исследовании методом ИК-спектроскопии резинобитумных составов наблюдаются значительные изменения на полосе поглощения с частотой 970 см^{-1} , которая отсутствует в спектре исходного битума (гудрона). Появление этой интенсивной линии, характерной для ИК-спектров каучуков, обусловлено колебаниями двойных — С-С — связей в трансположении, что следует отнести за счет деструктурированной в результате термомеханической обработки резины и образовавшегося каучукового вещества.

Данные о свойствах резинобитумных вяжущих, полученных при совмещении резиновой крошки (20 %) с нефтяным гудроном при температуре 220—230 °С (длительность термомеханической обработки 4 ч), приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Свойства резинобитумных вяжущих

Вяжущее, содержание модификатора в вяжущем	Температура размягчения, °С	Глубина проникания иглы, 0,1 мм при		Температура хрупкости, °С	Интервал пластичности, °С	Растяжимость при 25°С, см
		25 °С	0 °С			
Исходный гудрон	33	300	98	-23	56,3	100,0
Гудрон, содержащий 20 % резиновой крошки	36,0	167	69	-20	66,0	15,8

Термомеханической пластификацией резиновой крошки с битумом, имеющим температуру размягчения 70 °С, а температуру хрупкости -10 °С при содержании 5 % резиновой крошки, получено резинобитумное вяжущее с температурой размягчения 78 °С и температурой хрупкости - 21 °С. При увеличении содержания резиновой крошки до 15 % эти температуры составили соответственно 104 и -30 °С, а при 30 % резиновой крошки -119 и -36 °С. Начиная с 30-процентной добавки резины к битуму резинобитумное вяжущее при нагревании не растекается и в то же время имеет температуру хрупкости -30 °С и ниже.

Скорости растворения и девулканизации зависят от влажности резиновой крошки и от способа ее введения. Влажная крошка в нагретом гудроне растворяется быстрее, чем сухая, по-видимому, вследствие разрыва структурных связей резины под давлением паров воды. Рекомендуется проводить обработку гудронов, содержащих растворенную (девулканизированную) резиновую крошку, введением серы при повышенной температуре и в присутствии ускорителей вулканизации, таких как мочевины и ее производные, окиси Mg, Zn, Pb или гидрат

оксида кальция (известь). При этом получают резинобитумные вяжущие с широким интервалом пластичности (70 - 80 °С), улучшенными показателями температуры хрупкости, глубины проникания иглы при 0 °С и растяжимости при 0 °С.

Резинобитумные вяжущие дают асфальтобетоны с высокими эксплуатационными свойствами, повышенной износо- и теплостойкостью, стабильностью при старении. Асфальтобетон, приготовленный на резинобитумном вяжущем, отличается также меньшим водонасыщением и набуханием. Для него характерна меньшая прочность при 0 °С, меньшая жесткость.

На основе резинобитумных вяжущих при введении наполнителей получают мастики для заполнения швов бетонных покрытий. При использовании пластификаторов (нефтяных масел, полиолефинов, бутилкаучука) получают мастичные материалы с температурой хрупкости до -35 °С, которые можно применять в суровых климатических условиях. Эти мастики успешно применяют в аэродромном строительстве. Для заполнения швов при устройстве и ремонте цементобетонных покрытий автомобильных дорог рекомендованы мастики из резинобитумных вяжущих, при производстве которых резиновую крошку подвергают сначала термопластификации тяжелым каменноугольным маслом (антраценовым) при 160 °С в течение 4 ч в герметически закрытом смесителе, а затем вводят битум и минеральные наполнители. Резиновую крошку рекомендовано вводить порциями в предварительно нагретое до 60-70 °С каменноугольное масло. Состав мастики для заполнения швов следующий: битум БН-IV 60-70 %, каменноугольное масло 8-10 %, резиновая крошка 8-10 %, асбестовый порошок 5-10 %, известняковый порошок 5-10 %.

Мастики для заполнения швов получают также путем энергичного перемешивания битума с резиновой крошкой при температуре 200 °С в присутствии добавок дитиокислот, тиофенолов или их металлопроизводных, дитиокарбаматов, тетраметилтиурамсульфидов, меркаптобензотиазолов, диарилдисульфидов (т.е. агентов вулканизации образующегося каучука), вводимых в количестве 0,1-5,0 % от массы резины. В качестве наполнителя применяют асбестовое волокно.

Резинобитумные вяжущие используют для ремонта покрытий, имеющих густую сетку трещин. Для этого применяют битум с глубиной проникания около 300 при 25 °С, который нагревают до 180 °С, и вводят в него резиновую крошку (0,071-12 мм), получаемую как отход в мастерских по ремонту шин. После перемешивания при этой температуре получают резинобитумное вяжущее, которое разливают на поврежденное покрытие с расходом 1,6-3,2 л/м². После остывания образуется слой толщиной 5-6,5 мм, на который рекомендуется рассыпать мелкий щебень или песок. Открывать движение можно через 45 мин.

Резинобитумные составы рекомендуют также для заделки крупных трещин на асфальтобетонном покрытии. Расход материала - 2,25-2,5 л/м² или 0,25 л на 1 м трещин. После розлива вяжущего производят россыпь и укатку мелкой каменной крошки на толщину 0,95-1,25 см.

Предложено резинобитумное вяжущее, содержащее до 70 % резины, распределять при температуре 90—235 °С на дорожное основание в количестве 0,9—

4,5 л/м², после чего наносить тонкий слой щебня, а затем асфальтобетонное покрытие.

Если ввести 30 % резиновой крошки в каменноугольный деготь с вязкостью 70 с по стандартному вискозиметру, можно получить резинодегтевое вяжущее с глубиной проникания 360·0,1 мм при 25 °С, которое может быть применено для гидроизоляции и производства дегтебетона. Работы по резинобитумным и резинодегтевым вяжущим показали преимущества их по сравнению с исходными битумами, гудронами, дегтями. Технологические процессы получения таких вяжущих достаточно разработаны. Однако производство резиновой крошки из изношенной резины является весьма энергоемким процессом. При этом надо учитывать, что для успешной термомеханической пластификации резины требуется тонкоизмельченная резиновая крошка, размер зерен которой должен быть менее 1 мм. В патентной литературе рекомендуется измельчение резины производить в присутствии жидкого азота из-за его химической инертности и низкой температуры (-196 °С), легкости получения и использования, а пластификацию резины производить «ароматизированным» битумом при 195 °С в течение 1 ч. Значительное количество изношенных покрышек, камер и других резиновых изделий еще не используется, накапливается, а нередко сжигается. Некоторую часть изношенной резины перерабатывают на специальных регенерационных заводах в регенерат и снова используют для производства резиновых изделий. Однако с ростом автомобильного парка растет и количество изношенной резины, которая может быть успешно использована в производстве высококачественных дорожных вяжущих материалов. Вследствие большой энергоемкости процессов измельчения резины и ее термопластификации получаемое резинобитумное вяжущее дороже, чем нефтяной битум, хотя покрытия из такого вяжущего значительно долговечнее.

1.2.5. Отечественный опыт производства и применения резинобитумных вяжущих

Работы по использованию отходов производства и потребления резинотехнических изделий (РТИ) проводятся как в нашей стране, так и за рубежом. К настоящему времени накоплен значительный опыт применения отходов РТИ в дорожном строительстве.

Применение резиновых отходов при устройстве асфальтобетонных покрытий, начатые еще в 30 – 40-х годах XX века, и обобщены в публикациях А. И. Лысихиной, Н. В. Горелышева и др [27]. В дальнейшем работы по применению продуктов переработки отходов РТИ были продолжены. Следует отметить, что опыт использования отходов РТИ имеется не только в дорожном строительстве, но и в производстве гидроизоляционных, кровельных и герметизирующих материалов.

Исследования, выполнявшиеся в СоюзДорНИИ, позволили разработать «Методические рекомендации по строительству асфальтобетонных покрытий с

применением резинового порошка», в которых предусматривалось введение резинового порошка в асфальтобетонную смесь в качестве наполнителя в составе минеральной части смеси.

Опыт строительства и ремонта дорожных покрытий с использованием асфальтобетонов, улучшенных добавками резины по данной технологии, позволил в 1985 году разработать уточненные и дополненные рекомендации по строительству асфальтобетонных покрытий с применением дробленой резины, которые нашли отражение в «Пособии по строительству асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов». В этих рекомендациях были учтены результаты проведенных в те годы исследований и опытно-производственных работ. Методические указания включали в себя методы подбора составов асфальтобетонных смесей с дробленой резиной, особенности технологии приготовления смесей и устройства покрытий и поверхностных обработок.

Материалы, применяемые для приготовления асфальтобетонных смесей с дробленой резиной, должны отвечать требованиям ГОСТ 9128-2009 [23].

Для получения наиболее плотной и прочной асфальтобетонной смеси рекомендовалось использовать резиновую крошку, содержащую не менее 80 % частиц размером мельче 0,63 мм.

Дробленую резину рекомендовалось вводить либо непосредственно в минеральную часть асфальтобетонной смеси, либо предварительно объединив ее с битумом. Количество вводимой дробленой резины составляло 1,5-3 % массы минеральной части (при введении ее в минеральную часть асфальтобетонной смеси) или 5 – 7 % массы битума при введении в вяжущее. Рекомендовалось учитывать зерновой состав резины при введении ее в минеральную часть и не учитывать при введении в битум.

В технологии приготовления асфальтобетонных смесей с дробленой резиной отмечалось, что при введении резиновой крошки в битум вяжущее необходимо приготавливать в рабочем котле, оборудованном приспособлением для перемешивания резины и битума. Температура вяжущего не должна превышать 160 °С, время выдерживания – 5 часов. При введении резины непосредственно в асфальтобетонную смесь смеситель необходимо оборудовать дополнительным устройством для хранения дробленой резины и отдельным дозатором для введения резины в мешалку. При технической возможности дробленую резину позволялось дозировать с помощью дозатора минерального порошка. При введении дробленой резины непосредственно в минеральную смесь рекомендуемое общее время перемешивания компонентов должно составлять 60-90 с, при этом сухое перемешивание минеральных материалов и резины в мешалке 15 – 20 с. Точность дозирования минерального материала 3 %, а битума и резины ± 5 %. Температура уплотняемых асфальтобетонных смесей при выходе из мешалки должна быть 140-160 °С, литых смесей – 190-200 °С. Отмечалось, что существенное повышение качества асфальтобетона с дробленой резиной может быть достигнуто при выдерживании асфальтобетонных смесей в накопитель-

ных бункерах в течение 1-2 часов. Для того чтобы повысить совместимость вулканизированной резины с битумом, предлагалось использовать мягчитель, например сланцевый, в количестве 4-8 % массы дробленой резины. Предполагалось его предварительное смешивание с резиной.

При укладке в покрытие температура уплотняемой смеси должна была составлять 120-140 °С, литых смесей 180-210 °С. Отмечалось, что укладку предпочтительней вести асфальтоукладчиком, обеспечивающим высокую степень предварительного уплотнения. Уплотнение асфальтобетонной смеси с дробленой резиной отличалось рядом особенностей. Смеси рекомендовалось уплотнять при несколько пониженной (по сравнению с принятой для обычных смесей) температуре: 90-100 °С для песчаных и 100-120 °С для щебенистых. В случае появления на покрытии во время укатки технологических трещин укатку необходимо приостановить, возобновив ее после снижения температуры смеси на 10 °С. Не рекомендовалось использование для уплотнения катков на пневматических шинах из-за повышенного сцепления шин с покрытием. Уплотнение полагалось вести либо статическими гладковальцовыми, либо вибрационными катками.

Исследования различных вариантов технологических процессов введения резины в состав строительных материалов показали, что в наибольшей степени эффект проявляется при введении ее в состав битумного вяжущего.

Добавление резиновой крошки или резинового порошка в битум позволяет получать высококачественное резинобитумное вяжущее, отличающееся более широким интервалом пластичности и более высокими показателями деформативности и трещиностойкости по сравнению с обычными нефтяными битумами. Однако широкое применение резинобитумных вяжущих ограничивалось трудностью обеспечения гомогенности совмещения резины с битумом, поскольку резина в битуме не растворяется, а только набухает, впитывая масляные компоненты битума.

В целях облегчения процесса совмещения резины с битумом частицы резины предварительно выдерживали в среде пластификатора (обычно нефтяных или каменноугольных масел, предпочтительно ароматического состава) с последующим интенсивным и длительным перемешиванием. Длительность и трудоемкость данного процесса и являлись основными факторами, сдерживающими широкое применение резинобитумных вяжущих. В последние годы были разработаны несколько методов химической модификации битумов резиновой крошкой. Использование специальных химических реагентов способствует улучшению процесса совмещения битума с резиновой крошкой, повышению качества получаемых резинобитумных вяжущих.

Высокие адгезионные свойства получаемых вяжущих обеспечиваются введением в их состав в процессе изготовления дополнительных активных химических групп, которые увеличивают полярность асфальтенов, стабилизируют гетерогенную структуру вяжущего. При этом большая часть адгезионноактив-

ных аминогрупп химически связывается с каучуковыми цепями резины, специально подготовленными для этой операции на начальном этапе.

Кроме того, важной особенностью резиновой крошки, особенно шинной, является присутствие в ее составе специальных химических веществ - антиоксидантов и антистарителей, которые диффундируют в объеме вяжущего, дополнительно стабилизируя его структуру. Их присутствие обеспечивает повышение устойчивости материала к окислительной деградации в условиях эксплуатации, замедляет процессы старения при высокой эксплуатационной температуре и также в условиях нагрева до высоких технологических температур. Введение мелкодисперсных резиновых частиц и их химическая сшивка с компонентами битумов, высокие адгезионные свойства повышают водоустойчивость битумных мастик, вяжущих и продуктов на их основе.

Необходимо отметить, что резинобитумные материалы, как правило, по своей структуре являются композиционными материалами.

В результате научно-исследовательских и опытно-технологических работ были разработаны составы композиционных резинобитумных вяжущих, опыт практического применения которых в 2000-2005 гг. показал, что при стоимости резины в несколько раз ниже стоимости синтетических каучуков или термоэластопластов (например, ДСТ 30-01 производства «Воронежсинтезкаучук») они обеспечивают требуемые эксплуатационные качества асфальтобетонных покрытий, что в целом обеспечивает заметно выраженный положительный эффект.

Исследования показали, что одним из важных показателей качества резинобитумных вяжущих является их гомогенность (т.е. однородность), непосредственно влияющая на однородность асфальтобетона, получаемого на основе модифицированного битумного вяжущего.

Имеющийся в России опыт получения резинобитумных вяжущих с использованием специальных химических реагентов показывает возможность не только эффективно улучшить характеристики исходных битумов, но и способствует решению важной экологической проблемы утилизации отходов резинотехнических изделий (в первую очередь изношенных автомобильных шин) в виде резиновой крошки, которая получается путём измельчения старой резины и является практически неисчерпаемым и дешевым источником эластомерного сырья для получения резинобитумных мастик и вяжущих. На основании опыта работ, проводившихся в России, был разработан «Технологический регламент на производство и применение резинобитумных вяжущих и мастик», с использованием которого был выполнен ряд опытно-производственных работ на объектах дорожного строительства.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию нефтяных дорожных битумов. Охарактеризуйте структура и свойства битумов?
2. Приведите групповой состав нефтяных битумов и оцените его влияние на их свойства?
3. Назовите достоинства и недостатки вязких дорожных битумов, область их применения в дорожном строительстве?
4. Каковы пути улучшения свойств дорожных битумов. Дайте понятие о комплексных органических вяжущих. Чем обусловлена модификация битумов?
5. Технология модификация битумов полимерами: совместимость полимеров с битумами; виды полимерных модификаторов; способы введения полимеров в битумы; применяемые пластификаторы?
6. Охарактеризуйте резинобитумные вяжущие; область применения; совмещение битумов с резиновой крошкой; свойства резинобитумных вяжущих?
7. Назовите классификацию поверхностно-активные вещества; виды добавок; улучшение свойств битумов поверхностно-активными веществами?

ГЛАВА 2. ПОВЫШЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО СРОКА СЛУЖБЫ И УЛУЧШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ПОЯВЛЕНИЮ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

2.1. Необратимое деформирование асфальтобетонных дорожных покрытий и пути повышения устойчивости асфальтобетона к возникновению пластических деформаций

В последние годы условия работы покрытий автомобильных дорог существенно изменились. В составе транспортного потока происходит увеличение доли тяжелых многоосных автомобилей, осевая нагрузка которых значительно превышает расчетные нагрузки, принятые при проектировании автомобильных дорог, что приводит к значительному росту различных видов дефектов на автомобильных дорогах. Среди общей массы разрушений асфальтобетона особое место занимают дефекты, связанные с недостаточной сдвигоустойчивостью асфальтобетонных покрытий. Так, по данным Росавтодора (рис 2.1), тенденция увеличения доли пластических деформаций имеет большую динамику развития и величину в сравнении с ямочностью или трещинами [75].

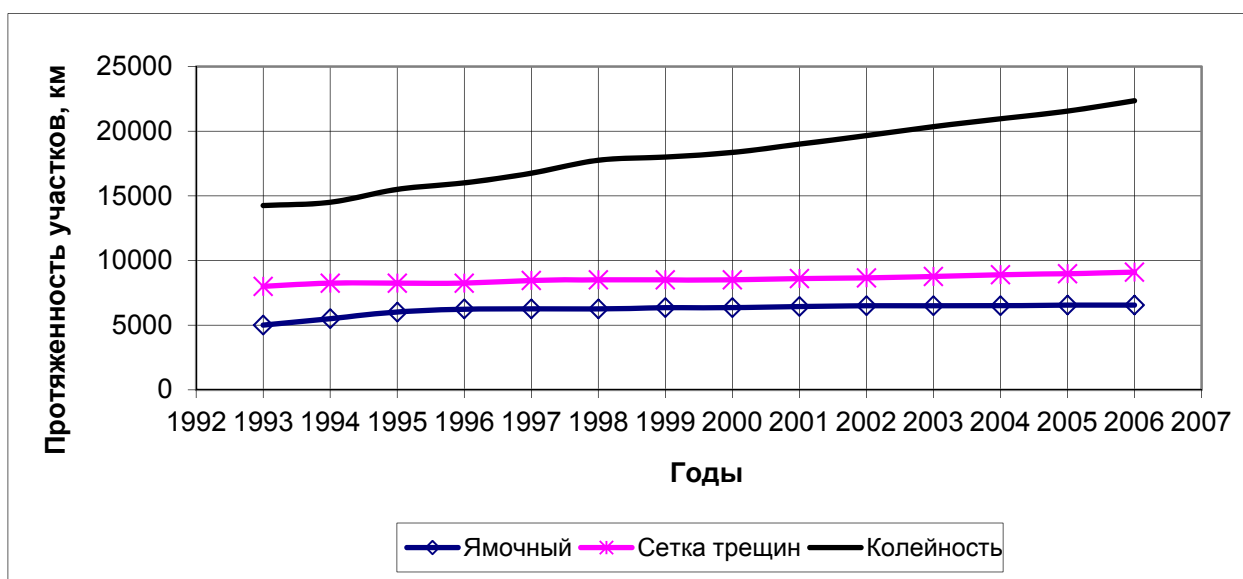


Рис. 2.1. Изменение протяженности участков, имеющих различные дефекты, во времени, по данным «Росавтодора»

В настоящее время принята следующая классификация пластических дефектов дорожных покрытий, наблюдаемых на их поверхности [24, 25, 75]:

- сдвиг по всей толщине покрытия без нарушения его ровности - характерен для относительно сдвигоустойчивых покрытий; может быть вызван усталостью материала, приводящей к изменению, структуры, встречается на пешеходных переходах или перед линией «Стоп» в виде незначительного искривления маркировочных линий;

- сдвиг поверхностного слоя покрытия без нарушения ровности – характерен для участков, на которых вследствие выдавливания битума из нижних слоев в верхнем слое покрытия глубиной до 20-30 мм накапливается излишнее его количество;

- поперечные волны определенной закономерности – характерны для участков торможения и с уклонами; обусловлены недостаточной сдвигоустойчивостью покрытия, воздействием значительной сдвигающей нагрузки и нагревом покрытия;

- отдельные неровности и бугры – приводят впоследствии к волнообразованию;

- колееобразные дефекты – образуются под воздействием грузового и тяжелого пассажирского транспорта на определенные зоны дорожного покрытия. В зонах с высокой застройкой возникает систематическое замедление движения в часы "пик". Наличие больших уклонов также существенно влияет на темп движения и усиливает процесс колееобразования;

- наплыв поверхностного слоя покрытия вдоль кромки проезжей части - характерен для прямых участков при наличии поперечного уклона.

В целом факторы, влияющие на образование пластических деформаций асфальтобетонных покрытий, можно разделить на внутренние и внешние [16, 17, 20, 72].

К внутренним, наиболее важным факторам можно отнести [17, 20]:

- недоуплотнение или неравномерное уплотнение слоев дорожной одежды нежесткого типа;

- неудовлетворительные показатели свойств асфальтобетона при высокой температуре, которые зависят от свойств битума, свойств минерального материала и гранулометрического состава асфальтобетона;

- появление структурных разрушений, когда вертикальные или горизонтальные напряжения, возникающие от воздействия колес тяжелых автомобилей, превышают допустимые значения, и начинается нарушение сплошности или структуры материала.

К внешним факторам относится воздействие автомобильной нагрузки и природно-климатических условий. Из них наибольшее влияние оказывают следующие факторы [16]:

- нагрузка на ось автомобиля и большое давление в автомобильных шинах, а также количество повторных приложений тяжелой нагрузки при высокой интенсивности движения и короткие интервалы между этими приложениями, особенно при проходе многоосных автомобилей;

- продолжительность приложения каждой нагрузки и суммарная продолжительность, которая зависит от скорости движения автомобилей на сложных участках дороги (кривые малого радиуса, крутые подъемы, пересечения и др.), а также при высокой плотности транспортных грузов.

- температура воздуха и солнечная радиация, под воздействием которых повышается температура верхнего слоя покрытия и при этом снижаются физи-

ко-механические свойства битумоминеральных смесей.

Температура асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог в летний период может достигать + 50 °С и более. Интенсивная и продолжительная солнечная радиация разогревают асфальтобетон и оказывают влияние на поведение битумного вяжущего в его составе. Разогретое покрытие становится более пластическим, и после прохода тяжелой нагрузки, в результате ползучести асфальтобетона возникает остаточная деформация [8, 16, 91, 92].

Начиная с 50-х годов 20 века проведёнными исследованиями установлено, что сопротивление колееобразованию асфальтобетона зависит от шести принципиальных параметров:

- плотности исходных минеральных материалов и полученного асфальтобетона;
- зернового состава минеральной части;
- свойств минеральных наполнителей;
- содержания и вязкости битумного вяжущего. На основе более вязкого битума сопротивление колееобразованию асфальтобетона существенно выше;
- степени уплотнения асфальтобетона в покрытии.

Как известно [8, 9, 10, 25, 26], форма и характер поверхности частиц заполнителя существенно влияют на сопротивление колееобразованию асфальтобетона. Применение в асфальтобетонной смеси остроугольных частиц (песка и щебня) способствует повышению её сдвигоустойчивости и прочности. Угловатость дробленого наполнителя увеличивает внутреннее трение зерен, делая покрытие более устойчивым к колееобразованию, наибольшее содержание дробленого наполнителя снижает риск колееобразования. Покрытие, подвергаемое интенсивному движению, должно состоять из 100 % дробленого материала [74].

Повышенное содержание битумного вяжущего приводит к нестабильности, ползучести асфальтобетона. В течение многих лет ведутся поиски оптимального содержания битумного вяжущего для увеличения сопротивления усталости смеси. У подобранной таким образом смеси увеличивается долговечность с точки зрения старения, но повышается риск колееобразования из-за более значительной ползучести [14, 24, 25].

Как отмечено выше, существенным параметром, влияющим на сопротивление колееобразованию, является степень уплотнения асфальтобетонной смеси. Снижение или увеличение степени уплотнения напрямую влияет на колееобразование. При слабом уплотнении имеет место «процесс доуплотнения» и наблюдается усадка асфальтобетона.

Проблеме колееобразования в мировой практике в последнее время уделяется очень большое внимание. Суть проблемы не только в снижении потребительских качеств дороги, но и в решении конструктивно-технологических вопросов, связанных с ликвидацией и предупреждением колеености [27, 28, 39, 43, 44, 54, 71, 72, 74, 75].

Колееобразование асфальтобетона является одной из наиболее сложных

проблем для подобного типа материала. Наиболее распространенная причина колееобразования на покрытии из дорожного асфальтобетона происходит вследствие его вязкопластического поведения. Как известно, одним из основных недостатков асфальтобетона как дорожно-строительного материала является большая зависимость его прочности и деформативных свойств от температуры. При повышении температуры вязкость битума, содержащегося в асфальтобетоне, понижается, связи между минеральными частицами ослабевают, что влечет за собой уменьшение прочности материала [20, 21, 27]. При понижении температуры происходит обратный процесс: вязкость битума, а с нею и прочность асфальтобетона повышаются. Изменение прочности, связанное с изменением температуры, происходит в достаточно широких пределах. Прочность при сжатии стандартных асфальтобетонных образцов в среднем составляет для горячих смесей (МПа): при температуре +50 °С – 1-2; при +20 °С – 2-5; при 0 °С – 8-13; при -10 °С – 10-17; при -35 °С – 18-30 [23]. Указанные цифры показывают высокую зависимость прочности асфальтобетона в покрытии от температуры окружающей среды.

Согласно [20, 21] устойчивость против возникновения сдвигающих деформаций тесно связана с прочностью асфальтобетона – повышенной прочностью асфальтобетона при высоких летних температурах сопутствует и повышенная сдвигоустойчивость дорожных покрытий.

Согласно теории Мора предельные сопротивления одноосному сжатию материала связаны со сцеплением его частиц между собой и внутренним трением, возникающим между ними:

$$\text{сопротивление сжатию} \quad R_c = 2c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right); \quad (2.1)$$

$$\text{сопротивление растяжению} \quad R_p = \frac{2c}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (2.2)$$

где c – сцепление; φ – угол внутреннего трения.

Следовательно, исходя из вышеизложенного, с увеличением сцепления повышается сопротивление растяжению и сжатию материала.

Соотношение же сопротивления сжатию к сопротивлению растяжения зависит только от угла внутреннего трения [8]:

$$\frac{R_c}{R_p} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right); \quad (2.3)$$

Согласно [20], угол внутреннего трения φ и сцепление c можно выразить следующими зависимостями:

$$\sin \varphi = \frac{(R_c - R_p)}{(R_c + R_p)}; \quad (2.4)$$

$$c = 0,5 \sqrt{R_c \cdot R_p}, \quad (2.5)$$

Таким образом, чем выше угол внутреннего трения φ и сцепление c , тем выше прочность материала.

Согласно [20], устойчивость к образованию пластических деформаций будет достигнута, если прочность асфальтобетона будет удовлетворять следующему условию:

$$R_{расч} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot h \cdot \lambda}{D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (2.6)$$

где σ – расчетное напряжение, действующее на покрытие; h – толщина слоя асфальтобетона; λ – коэффициент, учитывающий совместное действие вертикальных и горизонтальных напряжений; D – диаметр следа колеса; φ – угол внутреннего трения асфальтобетона.

Сопrotивление асфальтобетона сдвигу, согласно теории Н.Н. Иванова [41, 42, 43], основывающейся на известном уравнении Кулона, выражается зависимостью

$$\tau = P \cdot \operatorname{tg}\varphi + C + \Sigma, \quad (2.7)$$

где P – нормальное давление на площадке сдвига; φ – угол внутреннего трения материала; C – сцепление минеральных зерен; Σ – сцепление, обусловленное битумными связями.

Первые два слагаемых ($P \cdot \operatorname{tg}\varphi + C$) выражают сопротивление сдвигу, обусловленное особенностями структуры минерального остова асфальтобетона. Повышение сдвигоустойчивости за счет увеличения угла внутреннего трения φ и сцепления минеральных зерен C является одним из направлений, развиваемых в работах Баловневой И.И., Горельшева Н.В. и др. [26, 27]. Проведенные исследования показывают, что повышение сдвигоустойчивости может быть достигнуто путем увеличения количества щебня в композиции. Согласно многочисленным исследованиям, использование в составах асфальтобетонов в качестве заполнителей природных окатанных минеральных материалов снижает его прочностные характеристики, сцепление и сдвигоустойчивость. Это связано с окатанной формой частиц и невысокой удельной их поверхностью. На величину внутреннего трения асфальтобетона влияет зерновой состав минеральной смеси, форма и характер поверхности минеральных частиц [27]. Смесь, состоящая из острогранных частиц, имеет большее внутреннее трение и более высокую прочность. Однако Гезенцевей Л.Б. и др. [20] указывают, что в ряде случаев такие асфальтобетонные покрытия подвержены коррозионному разрушению.

В работах Рыбьева И.А., Гезенцевей Л.Б., Королева И.В. и др. [19, 20, 21, 60, 61] показано, что одним из направлений в области повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонов является усиление сдвигообразующей роли асфальтовязующего в асфальтобетоне. Сцепление в асфальтобетонах на традиционном плотном минеральном заполнителе зависит от вязкости битума, соотношения битум – минеральный порошок и характера взаимодействия битума с минеральным материалом.

Чувствительность к изменению температуры является основным недостатком термопластичных материалов, которыми являются битумо-минеральные смеси, характеризующиеся коагуляционной структурой [10, 90, 91, 92]. При по-

вышенной температуре асфальтобетона энергия сил взаимодействия Ван-дер-Ваальса между частицами битума ослабевает, вязкость уменьшается, модуль упругости снижается, при этом величина остаточных деформаций асфальтобетона увеличивается. При добавлении битума в минеральную часть происходит резкое падение прочности минерального скелета, что обусловливается появлением пленки битума на поверхности минеральных частиц, играющих роль смазки, вследствие чего внутреннее трение системы и силы сцепления снижаются и создаются предпосылки для колееобразования. Интенсивность колееобразования усиливает избыток битума, использование марки битума, не соответствующей региональным–климатическим условиям, а также низкий коэффициент уплотнения смеси в покрытии. Следует отметить, что начало развития пластических деформаций на асфальтобетонном покрытии наблюдается при его температуре не менее 40°C , что связано с фазовыми превращениями применяемой марки битума при этой высокой температуре и структурными изменениями асфальтобетона [20, 43, 54].

Летом при высоких температурах вязкость битумо-минеральных смесей резко снижается (отличается от вязкости при низких температурах на несколько порядков), а следовательно, резко уменьшается и время релаксации, которое становится сопоставимым со временем действия нагрузок [20]. В критических случаях это приводит к появлению пластических деформаций [20, 90, 91, 92]. С точки зрения условий работы покрытий из битумо-минеральных смесей в течение всего срока службы необходимо обеспечить снижение жесткости покрытия при отрицательных температурах и повышение его вязкости при высоких температурах и повышенную сдвигоустойчивость [8, 9, 10, 20, 25, 64, 65, 90].

Прочность битумо-минеральной смеси имеет ярко выраженный временной характер, а интенсивность релаксационных процессов деформирования и разрушения битумо-минеральных материалов в сильной степени зависит от температуры и уровня действующих напряжений в конструкции дорожной одежды. Вообще, зависимость предела прочности при сжатии от температуры битумо-минерального материала близка к линейной. Для правильного понимания условий работы битумо-минеральных покрытий следует рассмотреть вопрос о релаксации напряжений, поскольку битумо-минеральные смеси являются наиболее яркими представителями релаксирующих материалов. Исследованиями А.В. Руденского установлено, что с изменением температуры модуль упругости изменяется незначительно (например, в интервале температур от 15 до 50°C модуль упругости снижается всего в $2 - 2,5$ раза). В то же время на вязкость асфальтобетона температурные колебания влияют значительно сильнее. Таким образом, для асфальтобетона время релаксации в основном зависит от вязкости. С увеличением температуры вместе с уменьшением вязкости уменьшается и время релаксации.

Время релаксации есть своего рода внутренняя шкала времени, которой определяется поведение материала [20]. Если время действия нагрузки такого же порядка, как и время релаксации, то материал ведет себя как упруговязкий:

одновременно наблюдается упругость и течение. При одном и том же времени действия нагрузки битумоминеральная смесь может проявлять себя как упругое или вязкое тело в зависимости от температуры.

В зимний период битумоминеральные смеси приобретают очень высокую вязкость [10, 90, 91]. Поэтому время релаксации велико и намного превышает длительность действия нагрузок. Летом же, при высоких температурах, вязкость резко снижается (отличается от вязкости при зимних температурах на несколько порядков), а следовательно, резко уменьшается и время релаксации, которое становится сопоставимым или значительно меньшим в сравнении с временем действия нагрузок. В критических случаях это приводит к появлению пластических деформаций.

Поскольку релаксация напряжений в битумоминеральных материалах связана главным образом с присутствием битума, механизм этого процесса в макроскопическом плане может быть представлен перемещениями битума в межзерновых пространствах, связанными с перемещениями минеральных частиц, а в микроскопическом – перемещениями структурных элементов в самом битуме [84, 85, 91]. Таким образом, битумоминеральные смеси, как любой другой релаксирующий материал, могут рассматриваться как среда с внутренними степенями свободы. Применительно к битумоминеральным дорожным материалам не может существовать единственное время релаксации напряжений. Это время существенно меняется не только в зависимости от температуры, но и от скорости приложения нагрузки, величины напряжений и др. Очень важную роль в данных процессах играет состав минеральной части смесей. Многощебенистые смеси с конденсационной структурой в гораздо меньшей степени подвержены пластическим деформациям [20, 27]. Связано это с тем, что основная часть прилагаемых напряжений передается по зонам контактов минерального остова и влияние битума сказывается в значительно меньшей степени. В каркасных смесях снижается и влияние температур окружающей среды [27].

Еще один фактор, негативно влияющий на физико-механические свойства битумоминеральных смесей и износостойкость дорожных покрытий, - это низкая водостойкость. Неудовлетворительная водостойкость слоев покрытий приводит к преждевременному их разрушению. Указанное происходит из-за низкой адгезии органического вяжущего к минеральной части смеси и, как следствие, нарушению пленок вяжущего на поверхности каменного материала и разрушению слоя покрытия [18, 20, 27, 50]. Для повышения водостойкости битумоминеральных смесей наиболее эффективным путем является применение поверхностно-активных веществ.

Поверхностно-активные вещества, применяемые в дорожном строительстве для повышения сцепления битума с кислыми горными породами, как правило, принадлежат к классу органических азотсодержащих соединений – аминов и их производных [20]. Указанный химический состав азотсодержащих ПАВ обуславливает наличие специфического неприятного запаха, что требует применения специальных средств защиты дыхания при выполнении работ по

устройству асфальтобетонного покрытия. Механизм влияния ПАВ аминного типа на свойства битума и асфальтобетона изучен далеко не полностью.

Авторами ОДМ «Руководство по применению поверхностно-активных веществ при устройстве асфальтобетонных покрытий», сотрудниками ФГУП «СоюзДорНИИ» Л.М. Гохманом и А.Р. Давыдовой отмечается, что введение аминных ПАВ типа «Амдор-9», «БП-3М», «Дорос – АП» в битум сверх оптимального количества приводит к значительному отрицательному эффекту. Учитывая высокую вероятность в погрешности дозирования компонентов в производственных условиях, введение указанных ПАВ в битум, в отличие от лабораторно – приготовленных составов, может привести только к снижению качества битумного вяжущего.

Некоторые применяемые в практике ПАВы являются отходом химического производства и поэтому их составы и свойства нестабильны, что может отрицательно сказаться на показателе сцепления. Это требует разработки адгезионной добавки постоянного состава, что позволит получать стабильно высокий показатель сцепления вяжущего с минеральным материалом.

Таким образом, для решения проблемы повышения устойчивости асфальтобетонного покрытия к пластическим деформациям и повышению срока его службы возможно использование нескольких направлений.

1. Направленное улучшение структуры и свойств вяжущего. Основными характеристиками органических вяжущих являются: адгезионные свойства, определяющие сцепление вяжущих с минеральными материалами; реологические свойства, обуславливающие технологические и эксплуатационные параметры деформативности и прочности; физико-химические свойства, определяющие устойчивость к воздействию погодно-климатических и эксплуатационных факторов в течение срока службы (устойчивость к тепловому и радиационному старению, водостойкость, биостойкость и др.). Органические вяжущие, в частности битумы, должны отвечать всему комплексу технологических и эксплуатационных требований, предъявляемых в дорожном строительстве. В зависимости от конкретных требований и условий применения вяжущих с целью улучшения их свойств необходимо использовать введение различных добавок. Добавки поверхностно-активных веществ применяют для улучшения адгезионных свойств битумов, добавки полимеров применяют для улучшения деформативности, теплоустойчивости. Перспективы в этой области большие, недаром в Канаде, Германии, США и других развитых странах, несмотря на достигнутые успехи, не уменьшаются капиталовложения в научные разработки и модернизацию технологий и оборудования.

2. Улучшение физико-механических показателей битумо-минеральных смесей за счет придания асфальтобетону повышенной каркасности (скелетности).

3. Применение составов асфальтобетона, обладающего повышенной усталостной долговечностью.

Вышеописанные направления могут использоваться как самостоятельно, так и в комплексе.

2.2. Оценка сдвигоустойчивости дорожных асфальтобетонных покрытий и предпосылки повышения их устойчивости к возникновению пластических деформаций путем применения модифицированного битума

Теоретическими исследованиями сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий занимались многие ученые: Иванов Н.Н., Гезенцевей Л.Б., Ладыгин Б.И., Богуславский А.М., Руденский А.В., Шумчик В.К., Кирюхин Г.Н. и др. [8, 21, 40, 54, 64, 65, 91, 92]. Анализ исследований, посвященных проблемам сдвигоустойчивости асфальтобетона, показал, что наиболее распространенными являются три подхода к данному вопросу.

Первый подход опирается на принципы механики сыпучих сред. Наибольшие сдвигающие напряжения $\tau_{расч}$ Н.Н. Иванов предлагает считать равным $0,75P$, что соответствует условию внезапного торможения. Условием сдвигоустойчивости, согласно Н.Н. Иванову, будет

$$0,75 \cdot P < P \cdot \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (2.8)$$

где P - удельное нормальное давление; φ - угол внутреннего трения; $C = C_1 + C_2$ - внутреннее сцепление, складывающееся из зацепления минеральных зерен C_1 и склейки их битумом C_2 .

Кроме того, сделана попытка учесть режимы движения. Устойчивость покрытия к образованию пластических деформаций, согласно Н.Н. Иванову, обеспечивается, если прочность битумо-минерального материала при сжатии составляет

$$R = \frac{2 \cdot \sigma_p \cdot h \cdot \gamma}{D \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad (2.9)$$

где h - толщина слоя покрытия; γ - коэффициент перегрузки (на перегонах равен 2,5-3,0; на участках торможения равен 1,5); φ - угол внутреннего трения асфальтобетона; D - диаметр следа колеса расчетного автомобиля.

Н.В. Горельшев [26, 27], считает, что для предотвращения образования остаточных деформаций из условия сдвигоустойчивости (2.8) надо исключить величину сцепления C_1 , что, по его мнению, дает завышенный результат.

Ю.В. Соколовым была показана несущественная роль внутреннего зацепления для различных составов минеральных смесей. Ввиду этого Ю.В. Соколов принял предложение Н.В. Горельшева об исключении величины C_1 , тогда условие сдвигоустойчивости упрощается

$$\psi < \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.10)$$

где ψ - коэффициент, зависящий от условий движения и условий сцепления колеса с дорогой и равный 0,25-0,75 [26, 27].

Общим недостатком решений, основанных на механике сыпучих сред, является то, что асфальтобетон не является сыпучим материалом.

Ко второму подходу относятся исследования, в которых асфальтобетон рассматривается как вязкопластичный материал и где предлагается оценить деформативную устойчивость через реологические свойства на базе принципов механики сплошных сред, можно отнести труды Б.И. Ладыгина, И.А. Рыбьева, Л.Б. Гезенцева, А.М. Богуславского, И.М. Руденской, Н.Н. Горельшева, А.В. Руденского, И.К. Яцевича, Я.Н. Ковалева, К.Ф. Шумчика, Г.Н. Кирюхина и др.

В частности, Гезенцев Л.Б. [20], рассматривая асфальтобетон как упруго-вязкое тело Максвелла, создал формулу, определяющую величину относительных остаточных деформаций покрытия, возникающих под действием автомобильного транспорта при высокой температуре

$$\gamma = \frac{n}{\eta} \cdot \sigma \cdot t_n, \quad (2.11)$$

где n - количество импульсов; σ - напряжение, Па; t_n - время приложения нагрузки, с; η - вязкость, Па·с.

Б.И. Ладыгин и И.К. Яцевич [64], учитывая более полно реологические свойства асфальтобетона при высокой температуре, предлагают для определения величины остаточной деформации следующую формулу

$$\gamma = \frac{\tau - P \cdot \operatorname{tg} \varphi - \tau_k}{\eta} \cdot n \cdot t_n, \quad (2.12)$$

где τ - сдвигающее напряжение в асфальтобетоне от воздействия подвижной нагрузки, Па; P - нормальное давление, Па; φ - угол внутреннего трения, град; n - предел текучести асфальтового вяжущего по Бингаму, Па; t_n - время действия импульсной нагрузки, сек; η - вязкость асфальтобетона, Па·с.

Если известна величина допустимой относительной деформации (γ), то авторы рекомендуют определить требуемую величину вязкости асфальтобетона по следующей формуле

$$\eta = \frac{\tau - P \cdot \operatorname{tg} \varphi - \tau_k}{\gamma} \cdot n \cdot t_n, \quad (2.13)$$

Ковалев Я.Н. [55] предложил определить расчетную вязкость асфальтобетона (η_p) по условию сдвигоустойчивости

$$\eta_p = \frac{\tau_p - \tau_k}{\gamma_{\text{ост}}} \cdot T_p, \quad (2.14)$$

где τ_p - расчетное (допустимое) сдвигающее напряжение, зависящее от характера воздействия транспортной нагрузки, Па; τ_k - нормальный предел текучести асфальтобетона данной марки при расчетной температуре, Па; $\gamma_{\text{ост}}$ - допустимая величина относительной деформации; T_p - суммарное время приложения транспортных нагрузок с учетом вероятности прохода колеса след в след, приходящейся на период времени с расчетной температурой.

Для проектирования асфальтобетонных покрытий с длительной сдвигоустойчивостью Я.Н. Ковалев предлагает в качестве основного требования следующую зависимость [54]

$$\eta_{\phi} < \eta_p, \quad (2.15)$$

где η_{ϕ} - фактическая пластическая вязкость асфальтобетона, получаемая экспериментально применительно к его заданному составу с учетом длительности суммарного времени приложения транспортных нагрузок T_p .

Шумчик К.Ф. [100], анализируя действия вертикальной нагрузки в упруго-пластичном состоянии с учетом толщины слоя, предложил определять минимально требуемую вязкость по формуле

$$[\eta_{nl}] = \frac{(P - 2 \cdot \tau_k) \cdot (H - [\Delta h])}{[\Delta h]}, \quad (2.16)$$

где P - вертикальное давление от колеса автомобиля, Па; τ_k - условный предел пластичности асфальтобетона; $[\Delta h]$ - допускаемая величина остаточной деформации, м; H - толщина слоя покрытия.

Теоретические исследования, выполненные Б.И. Ладыгиным, показали, что при действии удельного вертикального давления (P) в асфальтобетонном покрытии возникают наибольшие касательные напряжения, равные [64, 65]

$$\tau = 0.5 \cdot P, \quad (2.17)$$

$$P = 2 \cdot \tau_k, \quad (2.18)$$

где τ_k - условный предел пластичности асфальтобетона, Па.

В результате решения задач о деформировании асфальтобетонного покрытия от вертикальной распределенной нагрузки получены зависимости, позволяющие определить величину остаточной деформации, накапливающейся в покрытии за время действия нагрузки T .

Критерием перехода асфальтобетона в вязкопластичное состояние под действием вертикальной нагрузки является условие:

а) в упруговязком состоянии ($P < 2 \cdot \tau_k$)

$$\Delta h = \frac{P \cdot H \cdot T_1}{\eta_0 + P \cdot T_1}, \quad (2.19)$$

где P - удельное вертикальное давление от колеса автомобиля, Па; H - толщина слоя покрытия, м; η_0 - вязкость ненарушенной структуры асфальтобетона, Па·с; T_1 - общая продолжительность действия подвижной транспортной нагрузки при работе покрытия в упруго-вязкой стадии за расчетный период;

б) в упруговязкопластическом состоянии, ($P > 2 \cdot \tau_k$)

$$\Delta h = \frac{(P - 2 \cdot \tau_k) \cdot H \cdot T}{\eta_{nl} + (P - 2 \cdot \tau_k) \cdot T}, \quad (2.20)$$

где η_{nl} - пластическая вязкость асфальтобетона, Па·с; T - общая продолжительность опасного действия подвижной транспортной нагрузки при работе покрытия в вязкопластической стадии за расчетный период, с.

Вертикальные усилия от колесной нагрузки вызывают изгибающие напряжения в монолитных слоях дорожных одежд. Наибольшие изгибающие напря-

жения возникают по оси действия нагрузки в нижней части покрытия. Величина этих напряжений зависит при прочих равных условиях от толщины слоя покрытия и отношения его модуля упругости к общему модулю упругости всех нижележащих слоев. Горизонтальные усилия в дорожной одежде возникают в местах торможения автомобилей, при изменении скорости движения, на крутых уклонах и кривых. Эти усилия, достигающие до величины удельных вертикальных усилий, вызывают напряжения в слое покрытия и на его контакте с основанием, что может привести к деформированию покрытия или смещению его по основанию при высокой положительной температуре. Деформаций покрытия от горизонтальных усилий можно избежать, применяя для его устройства асфальтобетонные смеси, характеризующиеся такими значениями угла внутреннего трения и сцепления, которые обеспечивают требуемую сдвигоустойчивость слою покрытия. Значительно сложнее избежать смещения покрытия относительно основания при воздействии больших горизонтальных усилий в летнее время. Можно сделать вывод о том, что основными критериями устойчивости покрытия можно считать: сдвигоустойчивость слоя покрытия, сдвигоустойчивость в плоскости раздела верхнего слоя покрытия и нижележащего слоя, температурную устойчивость асфальтобетона и его способность противостоять износу и пластическим деформациям.

Согласно А.В. Руденскому [90, 91, 92] в качестве критерия сдвигоустойчивости возможно использовать минимальные значения вязкости асфальтобетона, соответствующие высокой расчетной температуре покрытия, при которой за период эксплуатации не образуется пластических деформаций, приводящих к образованию неровностей допустимой величины $\sigma_{дон}$. Величина предельно допустимой пластической деформации $\varepsilon_{дон}$ связана с $\sigma_{дон}$ соотношением

$$\varepsilon_{дон} = \sigma_{дон} \cdot \frac{L_0}{h_2}, \quad (2.21)$$

где h_2 - толщина верхнего слоя покрытия; L_0 - шаг неровностей.

В этом случае требуемая вязкость асфальтобетона может быть определена по формуле [90, 91]

$$\eta_{mp} = \tau_p \cdot t_\phi / \varepsilon_{дон}, \quad (2.22)$$

где τ_p - расчетное напряжение сдвига в асфальтобетоне, в верхнем слое покрытия; t_ϕ - расчетная длительность действия сдвигающей нагрузки.

Третий подход к расчету на сдвигоустойчивость, предложенный В.Н. Антиповым [26, 27], заключается в использовании эмпирической формулы для толщины покрытия «h», соответствующей сдвиговому покрытию

$$\frac{h}{D} = \frac{\lg T}{2 \cdot \left(\frac{R_{50}}{C} \cdot \lg \frac{2 \cdot \theta}{K_p} + \frac{R_{50}}{P_0} - \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} - 1.25 \cdot 10^{\frac{F_n}{F_t}} \right)}, \quad (2.23)$$

где D - диаметр отпечатка колеса, м; T - заданный срок службы, годы; R_{50} - предел прочности при сжатии асфальтобетона при 50 °С, МПа; C - коэффици-

ент ($C = 9,1 \text{ МПа}$); θ - время релаксации асфальтобетона, с; $K_p = P_1/P_2$ - кинетическая характеристика асфальтобетона; P_0 - давление в пневматике колес, МПа; $E_{1,2}$ - приведенные модули упругости покрытия и основания, МПа;

F_n/F_t - вертикальная и горизонтальная силы, действующие со стороны колеса, Н.

Параметры P_1 и P_2 определяются по формуле:

$$P_{1,2} = -\frac{\theta + 0.5 \cdot \tau}{\theta \cdot \tau} \pm \sqrt{\left(\frac{\theta + 0.5 \cdot \tau}{\theta \cdot \tau}\right)^2 - \frac{1}{\theta \cdot \tau}}, \quad (2.24)$$

где $\theta = \eta/E$ - время релаксации, с; $\tau = \gamma \cdot E$ - время ретардации, с; η - коэффициент вязкости, Па·с; E - модуль упругости, МПа; γ - коэффициент вязкой податливости, МПа⁻¹·с.

На практике значения θ , $K_p = P_1/P_2$ определяются по номограммам, что более соответствует свойствам реального материала.

В зарубежной практике широко используются различные методы определения устойчивости асфальтобетонных смесей к колееобразованию. Наибольшее распространение к настоящему времени получили следующие методы с применением:

- установки ускоренного нагружения (FHWA Accelerated Loading Facility-ALF);
- «Испытательной Машины Вращением» (Gyratory Testing Machine — GTM);
- прибора для испытания покрытий на колееобразование (French Pavement Rutting Tester-FPRT);
- испытательной установки Джорджии нагружения колесом (Georgia Loaded-Wheel Tester- GLWT);
- Гамбургского устройства образования колеи (Hamburg Wheel-Tracking Device — HWTD).

*Установка ускоренного нагружения
(FHWA Accelerated Loading Facility-ALF)*

Федеральная Дорожная Администрация США (FHWA) внедрила методику Superior Performance Asphalt Pavements (Superpave), являющуюся главным результатом Стратегической дорожной исследовательской Программы в области битумных вяжущих и горячих асфальтобетонных смесей. Существенной составляющей программы является утверждение методов испытания битумных вяжущих, асфальтобетонных смесей и прогнозирующие модели поведения на колееобразование или усталостное разрушение с использованием установки ускоренного нагружения FHWA Accelerated Loading Facility (ALF). С её помощью выполняют испытание дорожного покрытия в натуральную величину в течение меньше 6 месяцев транспортной нагрузкой, эквивалентной общей нагрузке движущихся машин за срок службы покрытия до 20 лет. Прикладывается нагрузка в пределах от 43 до 100 кН через колесный агрегат, который ими-

тирует 1,5 нагрузки одинарной оси грузового автомобиля. Может использоваться двойная шина или широкое основание (суперодипарной) шины. Движение осуществляется на максимальной скорости 18,5 км/ч на 10 – метровом испытательном участке. Приблизительно 8 600 проходов колеса могут быть произведены за день; 50 000 проходов колеса за неделю, включая время обслуживания.

*«Испытательной Машины Вращением»
(Gyratory Testing Machine - GTM)*

Испытательная «Машина Вращением» Gyratory Testing Machine (GTM) позволяет моделировать комбинированное уплотнение и проводить испытания на деформацию сдвига в плоскости, в которой создается напряжение, равное напряжению от выбранного давления в шине. GTM считывают напряжения сдвига в асфальтобетонной смеси и ее сопротивление сдвигу, при котором начинается ее уплотнение. Модель GTM 8A-6B-4C может испытывать образцы с диаметрами 101,6, 152,4 или 203,2 мм. Образцы, диаметр которых 101,6 мм и высота 63,5 мм или диаметр 152,4 мм и высота 95,2 мм, испытываются обычно. FTIWA GTM автоматически измеряет и вычисляет параметры, используемые для определения сдвига, или колееобразования, чувствительности асфальтобетонной смеси. По результатам испытаний получают три основных параметра для оценки асфальтобетонной смеси:

- индекс стабильности (GSI),
- индекс упруго-пластичности (GEPI),
- прочность на сдвиг (Sg).

Другие параметры, которые обрабатываются самим прибором:

- коэффициент сдвига вращения (GSF),
- деформационный классифицирующий индекс вращения (GSCI),
- индекс уплотняемости (GCI),
- плотность минерального материала.

*Французский метод для испытания покрытий на колееобразование
(French Pavement Rutting Tester — FPRT)*

Французский метод испытания покрытий на колееобразование (FPRT) разработан центральной лабораторией мостов и дорог - Laboratoires Central des Ponts et Chaussées (LCPC). По этому методу испытывают плиты на пластические деформации при 60 °С, используя перемещающуюся возвратно-поступательно гладкую резиновую шину с давлением 0,60 + 0,03 МПа. Это испытание используется во Франции, чтобы оценивать асфальтобетонные смеси, предназначенные для тяжелого движения; асфальтобетонные смеси, включающие в себя материалы, которые предрасполагают к колееобразованию. Также используется для выполнения контроля качества в процессе строительства.

Испытуемый асфальтобетонный образец подготавливается в форме плиты длиной 500 мм, шириной 180 мм и толщиной 50 мм или 100 мм. Толщина 100 мм установлена для асфальтобетонных смесей, которые используются как в верхнем, так и в нижнем слоях покрытия с толщиной слоя более чем 50 мм. Во

Франции такие слои обычно строят толщиной 60-80 мм. Плиты, отобранные из покрытия, должны быть тщательно подогнанными по форме, а в случае наличия зазоров между плитой и формой фиксируют образец гипсом. Допустимое отклонение по толщине для вырубленной плиты в среднем ± 5 мм. Масса плиты толщиной 100 мм равна приблизительно 22 кг.

После уплотнения плиты выдерживают при комнатной температуре до 7 дней. Плотность плиты определяют после уплотнения, и затем плиту помещают обратно в форму для испытания. Испытательная машина испытывает одновременно две плиты, используя две перемещающиеся возвратно-поступательные шины. Нагрузка колесом на обе плиты должна быть равной, чтобы не происходило асимметричное давление на шинный агрегат.

Для создания нагрузки гидравлический домкрат толкает плиту снизу вверх. Стандартная нагрузка 5000 ± 50 Н; максимальный груз 5500 Н. Манометры на пульте управления машины считывают давление на каждом домкрате. Манометр калибруется с шагом в 0,1 МПа. С помощью предварительно построенного для данной установки графика зависимости давления от нагрузки обеспечивают желаемую нагрузку. Вес формы и плиты не включают в прикладываемую нагрузку. Среднее давление, обеспечиваемое 5 000 Н, определили из условия 0,59 МПа для левой шины и 0,55 МПа для правой шины. Шины должны быть накачаны до 0,60 МПа и расположены на плоской стальной пластине, чтобы получить постоянную площадь контакта.

Стандартное давление шины 0.60 ± 0.03 МПа; максимальное давление 0.71 МПа. Требуется приблизительно 0,1 с для шины, чтобы переместиться с одного конца плиты до центра со скоростью, являющейся наибольшей в центре. Шины поддерживаются в фиксированном подвешенном положении, перемещаясь таким образом назад и вперед поперек плит. Средняя скорость каждого колеса приблизительно 7 км/час. Каждое колесо проходит приблизительно 380 мм перед изменением направления, и устройство совершает приблизительно 67 циклов/мин. (134 прохода/мин.). Один цикл определен как два прохода шины (назад и вперед).

Сначала выполняют 1 000 циклов при температуре от 15—25 °С для уплотнения смеси и обеспечения более гладкой поверхности. На это требуется приблизительно 15 мин. Толщина каждой плиты определяется как среднее арифметическое 15 измерений толщины в 15 стандартных местах с использованием измерителя точности до 0,1 мм. Эту толщину считают начальной толщиной плиты. Плиты для нагрева до температуры испытания (60 ± 2 °С) выдерживают 12 часов. Температура нагревания при испытании (50 ± 2 °С) иногда используется во Франции для нижних слоев покрытия. После начала испытания в каждой плите измеряют вручную среднюю глубину колеи после 30, 100, 300, 1000 и 3 000 циклов испытания плиты толщиной 50 мм и после 300, 1 000, 3 000, 10 000 и 30 000 циклов при испытании плиты 100 мм. Измерение глубины колеи после 30, 100 и 300 циклов включают при испытании плиты толщиной 100 мм, если существует вероятность разрушения плиты до 3 000 циклов.

Средняя глубина колеи в процентах рассчитывается по отношению к начальной толщине плиты.

Данный метод не действителен для смесей с максимальным размером минеральной части более 20 мм. Плита шириной 180 мм является относительно маленькой по сравнению с шириной шины 110 мм. С каждой стороны колеса на плите остается по 35 мм свободного пространства. Поэтому смеси с максимальным размером минеральной части более 20 мм могут не позволить сдвиг из стороны в сторону. Минеральный материал с максимальным размером более 20 мм может также серьезно повредить шину, и часто не может быть уплотнен должным образом. Прибор первоначально был разработан для того, чтобы испытывать асфальтобетонные смеси для верхних слоев.

*Испытательная установка погружения колесом штата Джорджии
(Georgia Loaded—Wheel Tester—GLWT)*

Испытательная установка нагружения колесом (GLWT) измеряет чувствительность к колееобразованию путем катания стального колеса перпендикулярно шлангу, находящемуся под давлением и расположенному на поверхности асфальтобетонной балки при температуре 41 °С. Прибор GLWT был разработан Министерством транспорта штата Джорджии.

Балка для испытаний имеет ширину 125 мм, толщину 75 мм и длину 380 мм. Масса балки — 8,5 кг. На установке рекомендуется испытывать смеси с максимальным размером минеральной части 37,5 мм, хотя максимально допустимый размер частиц не установлен. Каждая балка выдерживается 24 часа при комнатной температуре и 24 часа при температуре испытания 40,6 °С. После подготовки балку помещают в GLWT и жесткий, диаметром 29 мм, резиновый шланг под давлением воздуха 0.69 МПа кладут поперек на поверхность балки. Стальное колесо, нагруженное грузами, катается назад - вперед по поверхности этого шланга для создания колеи за 8 000 циклов. Балка во время испытания со сторон обжата стальными пластинами и не доходит 12,7 мм до верхней кромки. Средняя скорость колеса приблизительно 2 км/ч; колесо проходит приблизительно 330 мм прежде, чем изменит направление, и данное устройство работает в 33±1 цикла/мин. (67±2 прохода/мин.). Один цикл — два прохода колеса.

Деформации измеряют в трех положениях: в центре балки, на 51 мм левее от центра и на 51 мм правее от центра, и берут среднее арифметическое. Если средняя глубина колеи для трех балок превышает 7,6 мм, то смесь чувствительна к колееобразованию. На испытание одной балки требуется 4 часа. Полное время для выполнения испытания от начала до конца, включая изготовление образцов и их выдерживание равняется, 4 дням.

Гамбургское устройство колееобразования (HWTD).

Гамбургское устройство колееобразования (HWTD) измеряет общий эффект колееобразования и разрушение от воды или движения стального колеса вдоль поверхности плиты из асфальтобетона, которая погружена в горячую воду. Устройство, разработанное в 1970 г. ESSO A.G. в г. Гамбурге, основано на подобном Британском устройстве, в котором используется резиновая шина.

Устройство первоначально было названо прибором колееобразования ESSO. В Гамбурге был разработан непосредственно метод испытания и критерий «количество проходов/выход из строя», гарантирующий то, что асфальтобетонные смеси, выдержавшие данное испытание, имеют высокое сопротивление колееобразованию.

Устройство первоначально использовалось, чтобы определять сопротивление колееобразованию. Испытание выполнялось при 9540 проходах колеса и температуре образцов 40 или 50 °С. Вместо использования воздушной камеры используется вода для поддержания требуемой температуры испытания. Позже было увеличено число проходов колеса до 19 200 и обнаружено, что некоторые смеси разрушаются от воды. Обычно необходимо больше чем 10 000 проходов колеса, чтобы показать эффект разрушения от воды.

В основном испытываются плиты длиной 320 мм и шириной 260 мм, толщиной 40, 80 или 120 мм. Также возможно испытывать плиты толщиной до 150 мм. Толщина плиты должна превышать максимальный номинальный размер минерального материала в три раза. Плита толщиной 80 мм весит приблизительно 15 кг. Могут испытываться также и керны дорожного покрытия с минимальным диаметром 250 мм.

Температура бани 50 °С достигается в пределах 45 мин. Образцы выдерживают при температуре испытания не менее 30 мин. Обогрев или охлаждение обеспечивается за счет змеевиков в воде.

Устройство испытывает одновременно две плиты двумя вращающимися возвратно-поступательно стальными колесами. Колеса имеют диаметр 203,5 мм и ширину 47,0 мм. Установленная нагрузка - 685 Н, а среднее напряжение при контакте составляет 0,73 МПа. Однако площадь контакта увеличивается с глубиной колеи, и таким образом напряжение контакта делается переменным. Заложенное изготовителем напряжение контакта 0,73 МПа приближено к напряжению, производимому одной шиной двухосного грузовика. Средняя скорость каждого колеса приблизительно 1,1 км/час. Каждое колесо проходит приблизительно 230 мм перед изменением направления, и устройство работает приблизительно в 53±2 прохода колеса/мин.

В Германии принимают максимальную допустимую глубину колеи 4 мм за 19 - 200 проходов колеса. Глубина колеи в каждой плите измеряется автоматически и непрерывно линейно-переменным дифференциальным преобразователем с точностью 0,01 мм. Распечатка данных может быть получена на каждые 20, 50, 100 или 200 проходов колеса. Приблизительно необходимо 6,5 ч для выполнения 20 000 проходов колеса. Полное время выполнения испытания, включая изготовление образцов, составляет 3 дня.

Асфальтобетонные покрытия подвергаются комбинированному воздействию статических и динамических нагрузок, прилагаемых в различных режимах. При высоких скоростях деформирования и низких температурах поведение покрытия является практически упругим. Периодический режим нагружения соответствует условиям работы покрытия под воздействием потока дви-

жущегося транспорта. В этих условиях в материале покрытия развиваются процессы усталости, приводящие к снижению прочностных характеристик покрытия.

Прочность является одной из важнейших характеристик асфальтобетонного покрытия, указывающей границы допустимых напряжений, которые оно может выдерживать в процессе эксплуатации. Определяемое на практике значение прочности всегда меньше теоретического предела прочности R_{max} и зависит от условий и длительности процесса разрушения и прочих факторов. Это связано с наличием дефектов как на поверхности, так и внутри слоя покрытия. При этом влияние оказывают не только «грубые» дефекты, обусловленные, например, недоуплотнением или неполноценными перемешиванием смеси, но и «естественные» микродефекты, неизбежно присутствующие в структуре слоя покрытия [89].

Разрушение покрытия под действием приложенного напряжения представляет собой кинетический процесс, развивающийся во времени и заключающийся в постепенном формировании микротрещин из-за микродефектов и их роста. Теоретически процесс разрушения начинается с момента приложения любых напряжений, т.е. фактически с момента завершения строительства участка покрытия. Чем больше величина действующих напряжений, тем быстрее протекает процесс разрушения. Таким образом, прочностные свойства характеризуются двумя показателями: разрушающим напряжением и долговечностью. Долговечность характеризует время, в течение которого покрытие может выдерживать заданное постоянное напряжение без разрушения. На практике, как правило, проводят испытания на прочность при возрастающем напряжении (например, в результате деформирования с постоянной скоростью). В этом случае фиксируют максимальное напряжение, достигнутое в момент разрушения, которое называют пределом прочности, т.е. просто прочностью.

Термин «предел прочности» в данном случае менее удачен, чем просто «прочность», т.к. определяемый таким образом показатель прочности не имеет связи с теоретическим пределом прочности R_{max} и зависит от скорости роста напряжений, т.е. от скорости деформирования (и, соответственно, длительности пребывания материала покрытия в напряжённом состоянии). Влияние скорости деформирования на характеристики прочности покрытия весьма существенно, поэтому для практических целей очень важно, чтобы режим испытания соответствовал эксплуатационным условиям работы дорожного покрытия.

Зависимость значений разрушающего напряжения от длительности пребывания слоя покрытия в напряжённом состоянии обусловлена процессом усталости. Усталость характеризует постепенное снижение работоспособности покрытия при длительно действующих или многократно прикладываемых нагрузках. Статическая усталость проявляется в снижении долговечности покрытия при увеличении значений постоянно действующего напряжения. Динамическую усталость при многократных, циклически действующих нагрузках характеризуют числом циклов, которое выдерживает покрытие до разрушения. При этом

прочность характеризуется либо амплитудой напряжения и числом циклов нагружения до разрушения, либо амплитудой деформации и числом циклов [63, 89, 91, 92].

Подобным образом, если при испытании с постоянной скоростью роста напряжений прочность характеризуется величиной напряжения в момент разрушения с обязательным указанием скорости роста напряжений, то при испытании с постоянной скоростью деформирования прочность может быть оценена величиной деформации в момент разрушения (с обязательным указанием принятой скорости деформирования). При испытаниях на прочность всегда наблюдается разброс получаемых данных. Этот разброс связан со случайным расположением и концентрацией макро- и микродефектов в слое покрытия. Зависимость прочности покрытия от длительности действия нагрузки является следствием пластичности асфальтобетона.

Накопление усталостных микродефектов в асфальтобетоне является процессом практически необратимым. Исследования показали [89, 91, 92], что продолжительность нерабочих периодов (или так называемого "отдыха") между сериями загрузений практически не оказывает влияния на долговечность битумов и асфальтобетонов. Даже при высоких температурах усталостные микродефекты почти не залечиваются. В то же время при высоком содержании битума в асфальтобетоне отмечалось благоприятное влияние периодов отдыха. На восстановление асфальтобетонным покрытием первоначальных свойств в периоды отдыха оказывают большое влияние особенности свойств битума, применённого для приготовления смеси в процессе строительства покрытия.

Использование указанных зависимостей позволяет определять характеристики статической и динамической усталости на основе результатов достаточно простого и оперативного испытания образцов асфальтобетона на ползучесть, что позволяет выявить общие закономерности усталостного разрушения дорожных покрытий исходя из характеристик материалов, применённых при приготовлении асфальтобетонных смесей, и условий эксплуатации (температуры и режима нагружения).

Величины деформаций в плёнках битума значительно превосходят средние значения деформаций в асфальтобетоне. Поэтому требования к деформативному поведению битумного вяжущего (оцениваемого, например, по показателю растяжимости) должны устанавливаться с учётом того, что деформации асфальтобетона происходят преимущественно за счёт деформации плёнок битума, тогда как деформации собственно минеральных частиц при уровне напряжений, характерном для эксплуатационных условий, незначительны.

Одно из перспективных направлений повышения длительной прочности асфальтобетонных покрытий – применение технологий производства асфальтобетонных смесей на основе вяжущего, модифицированного полимерными материалами. Применение полимерных добавок позволяет улучшить весь комплекс физико-механических свойств асфальтобетона - повысить прочность, деформационную устойчивость, морозостойкость, водоустойчивость и т.д. В основном работы в этой области посвящены технологическим аспектам модифи-

цирования битумов и получению полимерно-битумного вяжущего.

Модифицирующие добавки изменяют физико-механические свойства и структуру вяжущего, оказывают пластифицирующее воздействие на дисперсионную среду. При этом компоненты системы битум — полимер вступают между собой в химическое взаимодействие, в результате чего образуется единая пространственная структура [30, 31, 51, 58, 59].

Модифицирующие добавки действуют как армирующий элемент, при этом компоненты не вступают между собой в химическое взаимодействие; в полимерно-битумной композиции образуются независимые пространственные структуры. Структурирующие добавки существенно повышают механические свойства и температурную устойчивость вяжущего и разделяются по форме частиц на волокнистые и порошкообразные наполнители.

Выбор полимера-модификатора определяется во многом физическим состоянием полимера. Чем больше температурный интервал высокопластичного состояния полимера, тем выше способность модификатора обеспечивать стабильность свойств вяжущего в широком интервале температур. Эффективность модификатора, кроме того, оценивается способностью полимера растворяться или набухать в битуме.

В качестве добавок в битумы используют полимерные материалы нескольких групп:

- каучукоподобные полимеры - эластомеры (натуральный и синтетический каучук, бутилкаучук, этилен-пропиленовый каучук, бутадиев-стирольные хлоропреновые каучуки, полиизобутилен, девулканизированная резиновая крошка;
- различные латексы (дивинилстирольные, дивинилнитрильные) и жидкие силоксановые каучуки;
- термопластичные пластмассы (полиэтилен и полипропилен, полистирол, поливинилхлорид);
- термопластичные пластмассы (фенолформальдегидные и эпоксидные смолы);
- термопластичные полимеры (дивинилстирольный, дивинилметастирольный, изопренстирольные блоксополимеры).

Существуют следующие способы объединения полимеров с битумом:

- совмещение полимера в виде порошка, гранул или крошки механическим путем в смесителе с расплавленным битумом, в том числе с предварительной пластификацией последнего;
- объединение в смесителе расплавленного битума с раствором полимера в органических растворителях (керосине, лигроине, толуоле и др.), маслах или нефтяном сырье (гудроне или мазуте);
- совмещение битума с раствором полимера в органических растворителях и маслах путем продувки композиции воздухом;
- совмещение полимера, предварительно пластифицированного на вальцах с добавлением мягчителя или без него, с расплавленным битумом в смесителе.

Способ объединения полимера с битумом в значительной мере определяет качество получаемого вяжущего. Следует учитывать, что необходимо добиться

более равномерного распределения полимера в массе битума, поскольку эффект от модификации проявляется тем сильнее, чем более однородно вяжущее. Таким образом, наибольшее влияние на свойства битумов оказывают полимеры, которые полностью в них растворяются. Частичное растворение или набухание полимера в битуме существенно не влияет на его свойства, так как полимер в этом случае является высокомолекулярным наполнителем.

В практику дорожного строительства внедряются, в основном, технологические разработки по модифицированию битумов, направленные на повышение деформационных свойств асфальтобетона в дорожных покрытиях. Установлено [63], что для обеспечения оптимального уровня эксплуатационной надежности асфальтобетонных покрытий, особенно верхних слоев, необходимо применять вяжущие с температурным интервалом пластичности 70-75°C, в то время как промышленные дорожные битумы имеют, как правило, температурный интервал пластичности 55-65 °С.

Рассмотрим основные характеристики технологических процессов модифицирования битумов с применением полимерных добавок.

Синтетические каучуки, вводимые в битум в виде растворов, порошка, мастики, латекса или эмульсии, способствуют увеличению предельных деформаций, ударной прочности, теплоустойчивости модифицированного вяжущего и снижают его температуру хрупкости.

Известны три способа получения битумно-каучуковых композиций: смешение битума с небольшим (2-5 %) количеством каучука при температуре не выше 150 °С; предварительное растворение каучука и объединение этого раствора с битумом; введение латекса каучука в битум.

Во всех случаях одним из главных параметров режима смешения компонентов является температура. Под действием повышенных температур (140 - 200 °С) происходит разрыв молекул каучука и снижается эффективность его воздействия на свойства битума. В связи с этим длительность и температура перемешивания компонентов должны быть ограничены: при температуре 130 °С смеси можно выдерживать не более 72 ч, при 160 °С - не более 12 ч, при 200°C - не более 1 ч.

Перспективными являются разработки комплексных вяжущих на основе битумов или нефтяных гудронов и пластифицирующих низкомолекулярных и структурирующих высокомолекулярных компонентов. Высокие реологические свойства отмечаются, например, у композиции, приготовленной путем добавления к остаточному или окисленному битуму 1 - 5 % полимеров из числа: полиэтилена, полиизобутилена, полибутилена, полибутадиена, полихлоропрена, бутилкаучука и эпоксидной смолы. Причем массовая доля модифицирующих добавок может достигать 20 % [39].

Известны способы модифицирования битумов и битумоминеральных композиций с использованием регенерированной резины и резиновой крошки, полученной путем вторичной переработки автомобильных шин и других резинотехнических изделий [39]. Измельченную резину в порошкообразном состоя-

нии вводят в количестве 3 - 5 % при температуре 150 - 250 °С. Реологические свойства резинобитумных композиций в значительной мере зависят от условий смешения, которое может осуществляться в механических мешалках, паром или кавитационным способом. Для асфальтобетонов с добавками резины характерна высокая эластичность, трещиностойкость и динамическая прочность.

В практике дорожного строительства в настоящее время находят применение модификаторы, рекомендованные Росавтодором для внедрения с 1998 г. [81]:

- блоксополимеры бутадиена и стирола типа СБС, предназначенные для получения полимерно-битумного вяжущего в соответствии с ГОСТ Р 52056-2003;

- «Каудест-Д» - каучук деструктурированный дорожный - макрогетерогенная система полимеров типа синтетических бутадиен-альфаметилстирольных каучуков (СКМС) со стабилизирующими добавками, предназначенная для получения полимерно-битумных вяжущих в соответствии с ТУ 2257-045-05766793-96. Полимерно-битумное вяжущее получают путем введения в исходный битум, нагретый в зависимости от марки до 130-150 °С, 2-6 % по массе «Каудест-Д» в холодом виде;

- растворы каучуков типа СКС в керосине и сланцевом масле, предназначенные для получения битумно-каучуковых вяжущих по ТУ 5718-004-03443057-98 [98, 99].

В качестве полимерных добавок, используемых при приготовлении модифицированных битумов, наибольшее применение находят эластомеры (синтетические каучуки) и термоэластопласты, которые были рассмотрены в первой главе.

С выходом приказа ФДД РФ от 31.01.95 г. № 9 «О повышении качества выпускаемых асфальтобетонных смесей и обязательном применении модифицированных битумов при устройстве верхних слоев покрытий» начат этап широкомасштабного применения в дорожной отрасли вяжущих нового поколения. На основании положительных результатов лабораторных испытаний в 1997-1998 гг. «Центром лабораторного контроля, диагностики и сертификации» Росавтодора были рекомендованы к широкому применению в дорожном строительстве модификаторы битумов: полимеры типа СБС, растворы синтетических каучуков типа СКС, полимерная композиция «Каудест-Д».

Процесс освоения дорожниками в различных регионах России технологии производства модифицированных битумов происходил не одинаково в 1995—1997 гг. и после 1998 г. К 2006 г. построено более 3000 км асфальтобетонных покрытий, слоев износа и поверхностных обработок с применением различных модификаторов битумов [46, 51, 81]. В наибольшей степени при приготовлении модифицированных битумов нашло применение полимерно-битумное вяжущее

на основе полимеров типа СБС (ДСТ, «Кратон» и др.). Другие модификаторы битумов имели, в основном, опытное применение.

Однако, несмотря на значительный объем опытного строительства дорожных покрытий с применением модифицированных битумов, а также проведенные по этому направлению научные исследования, многие вопросы до настоящего времени изучены недостаточно. Применение модификаторов из числа полимеров класса термоэластопластов и эластомеров позволяет повысить физико-механические свойства вяжущего и битумо-минеральных смесей, но требует значительных затрат на модификацию. Так, по данным ЗАО «Техпрогресс», стоимость модификации одной тонны битума приводит к 100 % удорожанию по исходному битумному вяжущему. К тому же многие вопросы эффективности применения модификаторов из числа полимеров класса термоэластопластов и эластомеров для повышения устойчивости к колееобразованию многощелебнистых асфальтобетонных смесей решены недостаточно. В значительном количестве случаев, например при модификации битумов термоэластопластами, требуется дополнительное применение поверхностно-активных веществ для улучшения адгезионных свойств получаемого битумно-полимерного вяжущего. Таким образом, разработка новых эффективных добавок и исследования в области уточнения технического и экономического эффекта применения известных модификаторов, несомненно, актуальны для дорожной отрасли.

Значительное снижение сроков службы дорожных покрытий в последние годы в процессе эксплуатации подтверждают необходимость дальнейшего изучения асфальтобетона и обоснования требований к применяемым для его приготовления материалам. Анализу долговечности дорожных покрытий на основе новых компонентов и их деформационного поведения под действием эксплуатационных нагрузок.

2.3. Физико-механические и деформационно-прочностные характеристики горячего модифицированного асфальтобетона

Прочностные свойства слоев асфальтобетонных покрытий практически полностью определяются деформационно-прочностными и реологическими характеристиками асфальтобетона [8, 9, 10, 20, 27, 90, 91, 92]. Асфальтобетон как термопластичный материал обладает сложным комплексом физико-механических и реологических свойств, в значительной степени зависящих от температуры, состава минеральной части смеси и свойств применяемого вяжущего. Как уже было отмечено ранее, наилучшим комплексом деформационно-прочностных свойств обладают каркасные асфальтобетоны, полученные с применением модифицированных или улучшенных вяжущих.

С целью изучения влияния модифицирующих добавок синтетических каучуков различных типов, а также бутадиен-стирольных термоэластопластов были приготовлены плотные горячие асфальтобетонные смеси типа «А» (каркасной структуры) и типа «Б» (полукаркасной структуры) на основе модифицированного битума. Составы плотного асфальтобетона типов «А» и «Б» были подобраны в соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2009.

В качестве модифицирующих добавок были использованы синтетические каучуки типов СКД, СКС-30 АРКПН, СКС-30 АРКМ-15, СКС-30 АРКМ-27, а также термоэластопласт ДСТ 30-01, свойства которых приведены в первой главе. В качестве исходного битума при приготовлении модифицированных вяжущих был использован нефтяной битум БНД 60/90. Содержание каучука в битумно-каучуковом вяжущем составляло 2,0; 2,5; 3,0 %, а при исследовании влияния ДСТ 30-01 было приготовлено полимерно-битумное вяжущее, полученное путем введения 3,5 % полимерной добавки и 7 % пластификатора – индустриального масла, по массе в исходный битум БНД 60/90. Полученное вяжущее на основе ДСТ 30-01 отвечало требованиям ГОСТ 52056-2003 для марки ПБВ 60.

Контрольные смеси одинакового гранулометрического состава были приготовлены на БНД 60/90. Результаты определения показателей физико-механических свойств асфальтобетона на БКВ, ПБВ и БНД типа «А» и «Б» приведены в табл. 2.1, 2.2, а также рис. 2.2- 2.7.

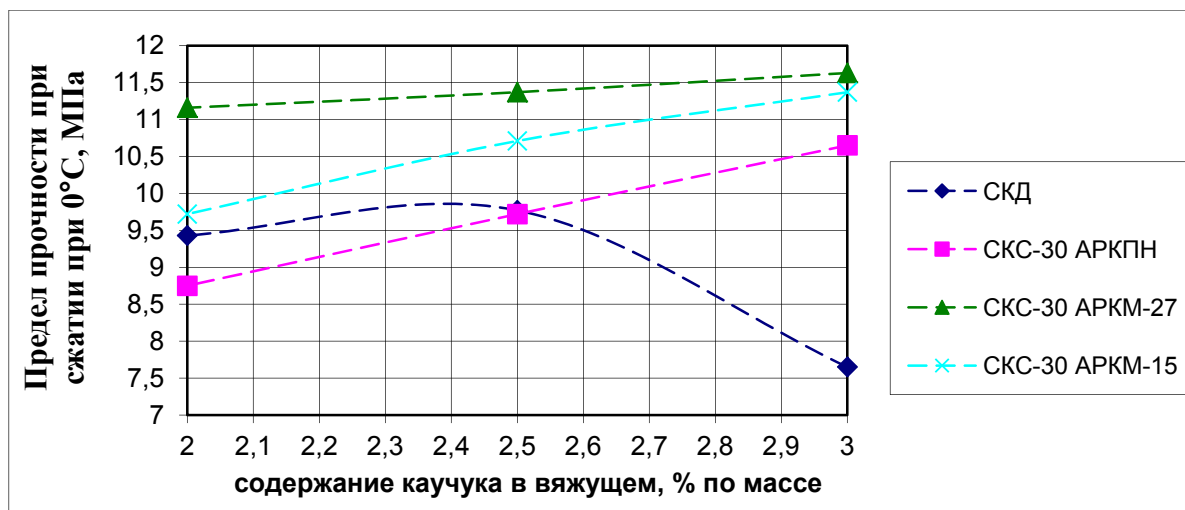


Рис. 2.2. Зависимость предела прочности при сжатии при 0 °С модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от вида синтетического каучука и его содержания в вяжущем

Таблица 2.1

Физико-механические свойства асфальтобетона каркасной структуры (типа «А») на модифицированном и традиционном битуме

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Средняя плотность, г/см ³	Водонасыщение, % по массе	Предел прочности при сжатии, при t °С, МПа			Коэффициент водостойкости	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Маршала), МПа	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Никольского), МПа
			0	20	50			
СКД 3 %	2,43	1,36	7,65	3,37	1,35	1,00	5,89	2,95
СКД 2,5 %	2,43	1,17	11,64	4,90	1,51	0,98	5,98	2,46
СКД 2 %	2,42	1,68	9,46	4,00	0,93	0,98	4,90	2,15
СКС-30 АРКПН 3 %	2,43	1,39	10,55	3,90	1,17	1,00	6,82	2,97
СКС-30 АРКПН 2,5 %	2,43	1,47	9,72	4,75	1,20	0,90	5,40	2,59
СКС-30 АРКПН 2 %	2,43	1,35	12,77	4,08	1,05	1,00	5,06	2,28
СКС-30 АРКМ-27 3 %	2,43	1,33	11,64	5,12	1,22	1,00	5,85	2,91
СКС-30 АРКМ-27 2,5 %	2,43	1,72	12,34	4,87	1,75	1,00	5,39	2,72
СКС-30 АРКМ-27 2 %	2,43	1,26	11,56	5,12	1,41	0,98	5,17	2,17
СКС-30 АРКМ-15 3 %	2,43	1,27	10,37	3,95	1,38	1,00	5,89	3,02
СКС-30 АРКМ-15 2,5 %	2,42	1,57	14,71	5,72	1,30	0,75	5,52	2,90
СКС-30 АРКМ-15 2 %	2,43	1,82	11,72	4,53	1,18	1,00	5,21	2,58
БНД 60/90 (без модификатора)	2,43	1,69	11,59	3,83	0,98	0,98	5,00	1,94
ПБВ 60 (ДСТ 30-01)	2,43	1,48	9,60	5,03	1,83	0,91	6,67	2,51

Таблица 2.2

Физико-механические свойства асфальтобетона полукаркасной структуры (типа «Б») на модифицированном и традиционном битуме

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Средняя плотность, г/см ³	Водонасыщение, % по массе	Предел прочности при сжатии, при t °С, МПа			Коэффициент водостойкости	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Маршала), МПа	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Никольского), МПа
			0	20	50			
БНД 60/90 (без модификатора)	2,42	1,39	6,40	3,5	1,07	1,00	4,68	2,43
ПБВ 60 (ДСТ 30-01)	2,42	1,32	7,38	4,68	1,73	0,89	6,15	2,70
СКД 2,5 %	2,41	1,78	11,69	6,28	1,47	0,91	5,66	2,66
СКС-30 АРКПН 2,5 %	2,41	2,25	14,75	6,78	1,23	1,00	5,01	2,21
СКС-30 АРКМ-27 2,5 %	2,41	1,43	10,38	4,9	1,35	1,00	5,15	2,62
СКС-30 АРКМ-15 2,5 %	2,42	1,70	13,46	5,77	1,34	0,99	6,26	3,05

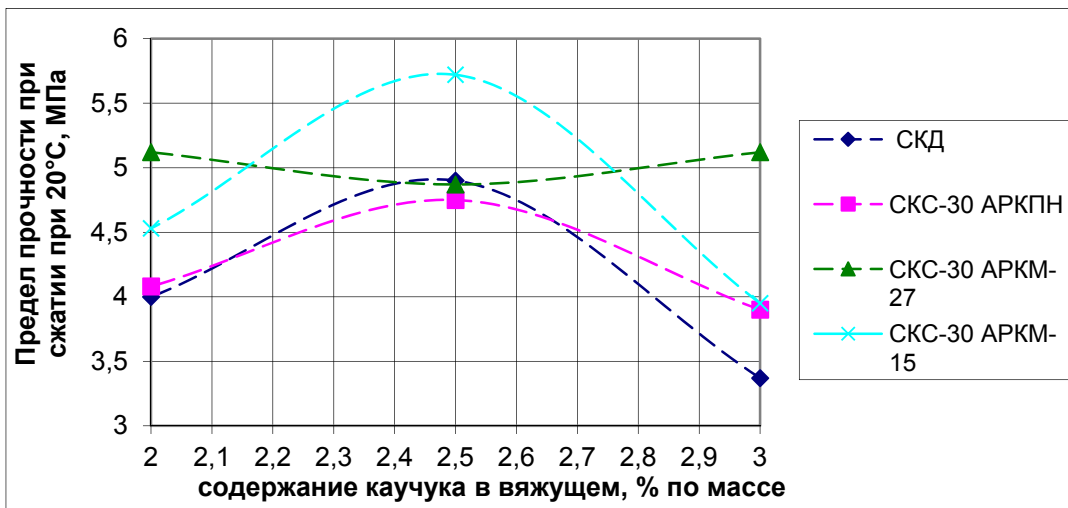


Рис. 2.3. Зависимость предела прочности при сжатии при 20⁰С модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от вида синтетического каучука и его содержания в вяжущем

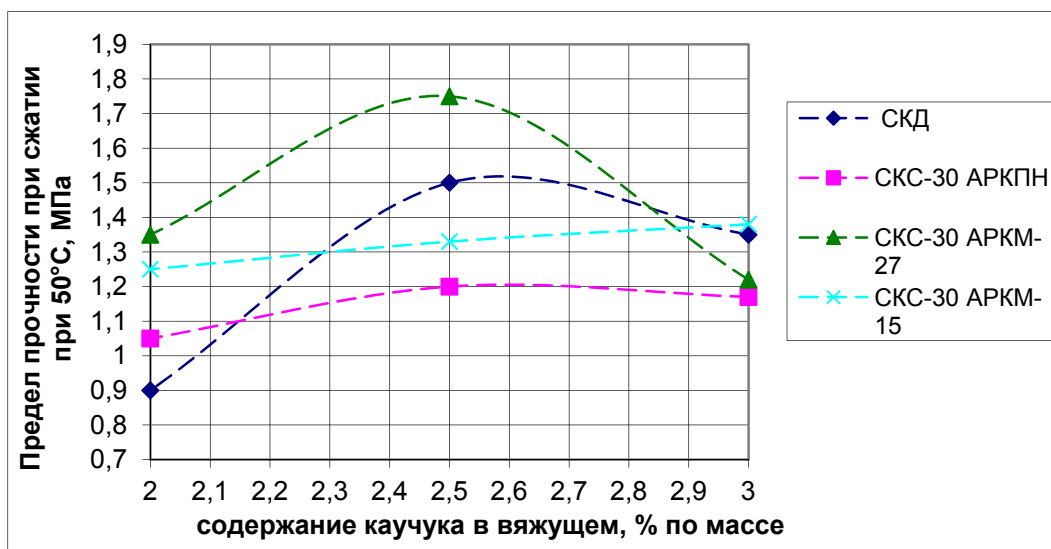


Рис. 2.4. Зависимость предела прочности при сжатии при 50⁰С модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от вида синтетического каучука и его содержания в вяжущем

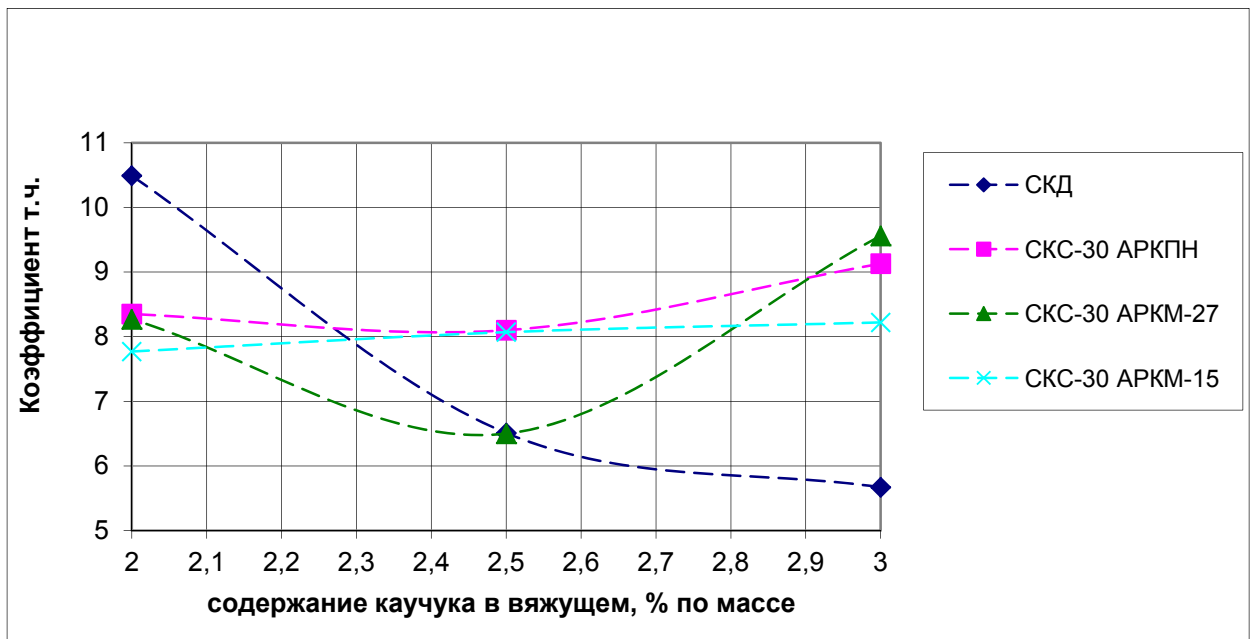


Рис. 2.5. Зависимость коэффициента температурной чувствительности модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от вида синтетического каучука и его содержания в вяжущем

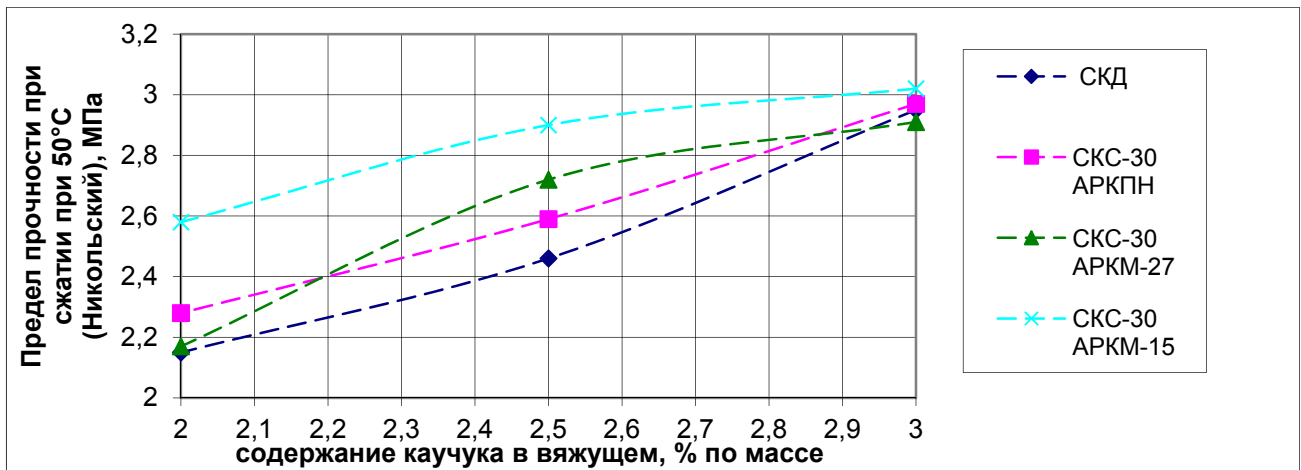


Рис. 2.6. Зависимость предела прочности при сдвиге (по методу Никольского) модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от вида синтетического каучука и его содержания в вяжущем

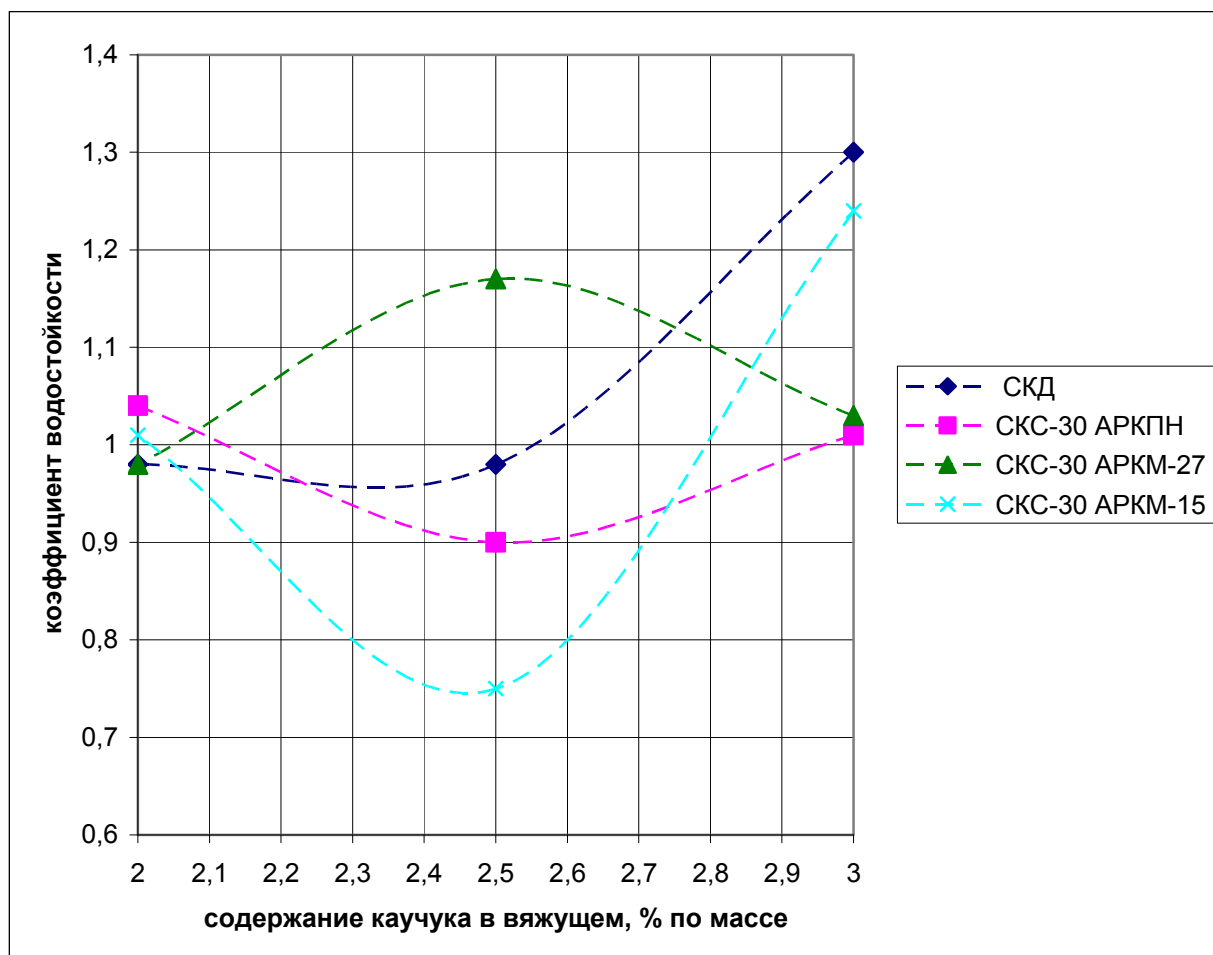


Рис. 2.7. Зависимость коэффициента водостойкости модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от вида синтетического каучука и его содержания в вяжущем

Как следует из приведенных результатов, применение модификаторов незначительно влияет на физические показатели асфальтобетона (среднюю плотность, водонасыщение), но очень значительно на механические и деформативно-прочностные показатели материала как каркасной, так и полукаркасной структуры. Рассматривая прочность асфальтобетона в области повышенных температур (при 50°C), отмечают значительное улучшение показателя в 1,05 - 1,5 раза. Наиболее эффективно для повышения указанного показателя применение каучуков типов СКС-30 АРКМ-15 и СКД при содержании модификатора в количестве 2,5-3 % по массе. Применение указанных модификаторов практически в 1,5 раза повысило предел прочности при сдвиге каркасного асфальтобетона (определенного по методу Никольского) в сравнении с контрольным составом (см. рис. 2.5). Применение в качестве модификатора термоэластопласта ДСТ 30-01 не менее эффективно (в сравнении с каучуками) позволяет увеличить показатель прочности при 50°C и предел прочности при сдвиге.

Анализ влияния модифицирующих добавок на прочность асфальтобетона каркасной структуры при 0°C также показал положительный эффект в сравнении с традиционным составом на вязком битуме, но в меньшей степени, чем в

области высоких температур. Это, вероятно, можно объяснить особенностью структуры каркасного асфальтобетона, в котором в силу преимущественного содержания крупных частиц меньше удельная поверхность наполнителя, и поэтому структурированные битумные пленки отличаются большей толщиной в сравнении с песчаными асфальтобетонами. Исходя из этого при температуре 0 °С традиционный вязкий битум позволяет на пределе обеспечить соответствие требуемого по ГОСТ 9128 - 2009 показателя предела прочности при сжатии. Применение в качестве модификаторов добавок синтетических каучуков позволяет несколько снизить предел прочности при сжатии при 0 °С и тем самым повысить трещиностойкость покрытий.

Рассматривая влияние модифицирующих добавок на физико-механические показатели асфальтобетона полукаркасной структуры (типа «Б»), приведенные в табл. 2.3, можно отметить, что наиболее значительно предел прочности при 50 °С позволяет повысить применение ДСТ 30-01 или каучука СКД. Применение указанных добавок позволяет повысить прочность при 50 °С в 1,4 - 1,7 раза, а предел прочности при сдвиге - на 10-15 % в сравнении с контрольным составом традиционного асфальтобетона типа «Б».

2.4. Применение полимерных адгезионных добавок для повышения физико-механических и деформационно-прочностных характеристик горячего каркасного асфальтобетона

Некоторые применяемые в практике ПАВы являются отходами химического производства, и поэтому их составы и свойства нестабильны, что может отрицательно сказаться на показателе сцепления. Это требует разработки адгезионной добавки постоянного состава, что позволит получать стабильно высокий показатель сцепления вяжущего с минеральным материалом. Сложившаяся к настоящему времени научно-теоретическая база по применению полимеров в промышленности строительных материалов показывает, что синтез новых материалов на основе полимеров позволяет получить наиболее значительный эффект. К числу таких материалов относятся полимерные адгезионные добавки, которые объединяют в себе достоинства полимерных модификаторов и адгезионных присадок.

Исследованиями, проведенными в 2002-2003 гг. Калгиным Ю.И., Кондратьевым А.Н., Юдиным В.П., была разработана полимерная адгезионная добавка «Мобит», предназначенная для улучшения сцепления с каменными материалами кислых пород вязких битумов и битумно-полимерных вяжущих [76].

В указанной работе в качестве основы для полимерного поверхностно-активного вещества использованы полимеры, полученные анионной растворной полимеризацией в присутствии литийорганических соединений, типа бутадиена, стирола, изопрена, пиперена [51,76]. Этот метод позволяет получать полимеры с узким молекулярно-массовым распределением ($M_w / M_n = 1,1-1,3$) и концевым звеном - $\text{CH}_2 - \text{Li}$.

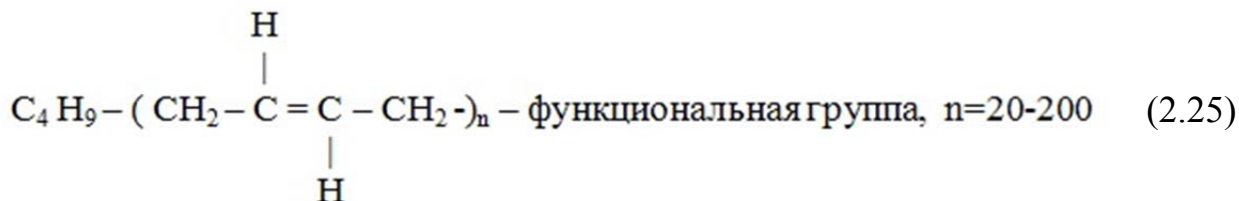
Таблица 2.3

Физико-механические свойства асфальтобетона полукаркасной структуры (типа «Б») на модифицированном и традиционном битуме

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Средняя плотность, г/см ³	Водонасыщение, % по массе	Предел прочности при сжатии, при t °С, МПа			Коэффициент водостойкости	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Маршала), МПа	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Никольского), МПа
			0	20	50			
БНД 60/90 (без модификатора)	2,42	1,39	6,40	3,5	1,07	1,00	4,68	2,43
ДСТ 30-01	2,42	1,32	7,38	4,68	1,73	0,89	6,15	2,70
СКД 2,5 %	2,41	1,78	11,69	6,28	1,47	0,91	5,66	2,66
СКС-30 АРКПН 2,5 %	2,41	2,25	14,75	6,78	1,23	1,00	5,01	2,21
СКС-30 АРКМ-27 2,5 %	2,41	1,43	10,38	4,9	1,35	1,00	5,15	2,62
СКС-30 АРКМ-15 2,5 %	2,42	1,70	13,46	5,77	1,34	0,99	6,26	3,05

В качестве примера рассмотрим химизм процесса ранее полученного состава полимерного ПАВ.

Микроструктура цепей полимера из бутадиена описывается следующей формулой



Остатки бутадиеновых звеньев находятся в цис – 1,4-; транс – 1,4-, и 1,2 положениях. Средне-вязкостная молекулярная масса полибутадиена может находиться в пределах от 1000 до 10000 и оптимальная её величина выбирается исходя из технологических параметров. В качестве функциональной группы может быть продукт реакции кислорода, мочевины, ортофосфорной кислоты, метилпирролидона или диметилформамида с активным концом молекулы.

Полимер из стирола имеет формулу

$$\text{C}_4\text{H}_9 - \left(\text{C} - \text{C} - \right)_m - \text{функциональная группа, } m = 10 - 100 \quad (2.26)$$

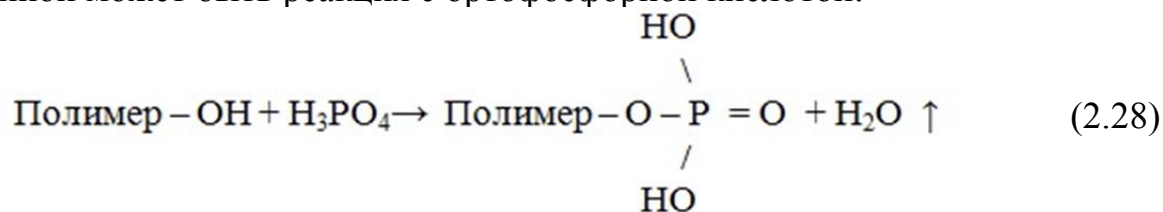

Полистирол отличается от полибутадиена температурой стеклования, которая равняется (+ 95...+105) °С в зависимости от молекулярной массы. У полибутадиена температура стеклования (-90...-95) °С и зависит от содержания в нем 1,2 - звеньев.

Строение полиизопреновой цепи можно выразить формулой

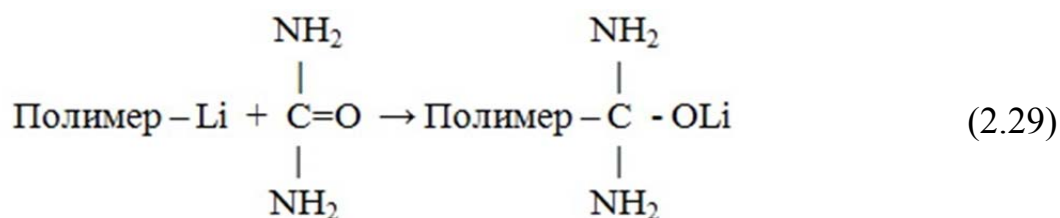
$$\text{C}_4\text{H}_9 - \left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{CH}_2 - \text{CH} = \text{C} - \text{CH}_2 - \end{array} \right)_p - \text{функциональная группа, } p = 15-150 \quad (2.27)$$

Полиизопреновая цепь содержит мономерные остатки в виде 3,4 – звеньев, цис – 1,4 звеньев; транс – 1,4 звеньев. Температура стеклования такого полимера находится на уровне -65 °С.

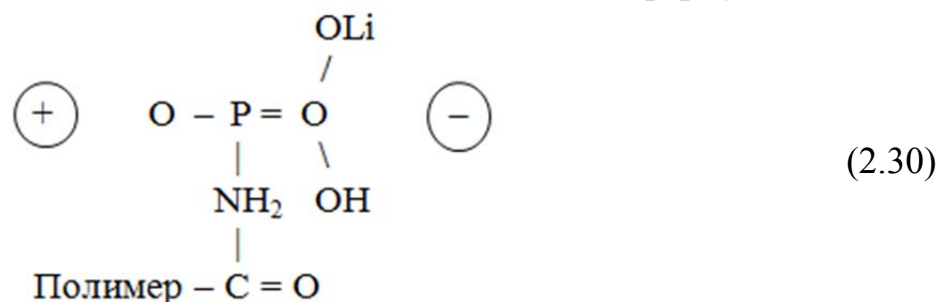
Примером получения функциональной группы из полимера с концевой ОН – группой может быть реакция с ортофосфорной кислотой:



По другому варианту при взаимодействии активного полимера с мочевиной образуется азотсодержащая концевая группа



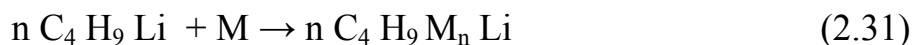
Указанная группа при взаимодействии с ортофосфорной кислотой (H_3PO_4) переходит предположительно в соединение, описываемое формулой (2.30)



Положительно и отрицательно заряженные функциональные группы полимера будут присоединяться к поверхности минерального наполнителя, а углеводородный радикал (C_4H_9) растворится в битуме. В случае использования в качестве основы полимерного ПАВ полистирола в битумной композиции при температурах эксплуатации дорожного покрытия полимер, вероятно, образует отдельную фазу и будет стекловаться на поверхности наполнителя, защищая её от воздействия воды.

В промышленности накоплен более чем 40-летний опыт работы по получению полимеров методом «живущей» растворной полимеризации мономеров в присутствии литийорганических соединений. Этот метод позволяет на основе различных мономеров, таких как бутадиен, стирол, изопрен, пиперелен получать полимеры с заданной средней молекулярной массой и узким молекулярно-массовым распределением (ММР).

Полимеризация указанных выше мономеров протекает в углеводородных средах без обрыва и переноса цепи по реакции:



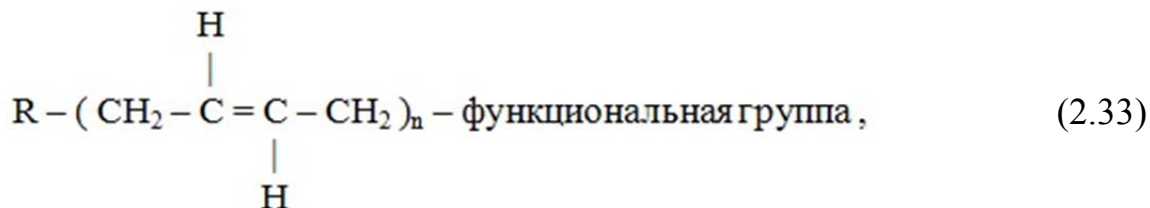
где n – желаемая степень полимеризации.

При этом параметры процесса: температура, концентрация мономеров и чистота системы – выбираются из технологических соображений.

Заданная молекулярная масса полимера достигается путем выдерживания соотношения

$$M_n = \text{Вес полимера, г} / \text{дозировка активного лития, моль} \quad (2.32)$$

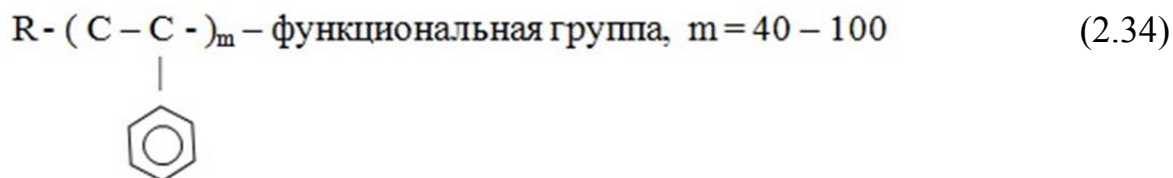
Строение линейного полибутадиена «литиевой» полимеризации, который может использоваться в качестве основы полимерного ПАВ, описывается формулой



где R – углеводородный радикал, Ф – функциональная группа литийорганического соединения; n=20-200.

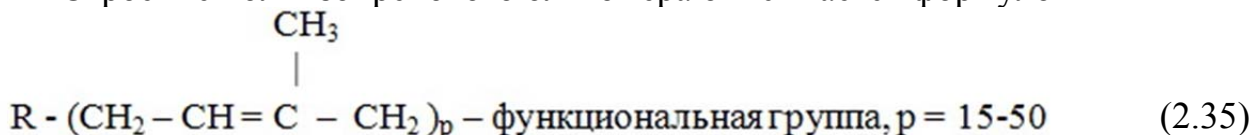
Остатки бутадиена в полимере имеют вид 1,2 звеньев – 10 %, цис – 1,4-звеньев – 45 %; 1,4-звеньев – 45 %. Оптимальная величина молекулярной массы определяется исходя из технологических параметров. Температура стеклования полибутадиена – 90...95 °С и зависит от содержания в нем 1,2 - звеньев. Полибутадиен представляет собой вязкую жидкость, текучесть которой снижается с увеличением молекулярной массы и ростом температуры.

Полистирол «литиевой» полимеризации имеет строение, соответствующее формуле



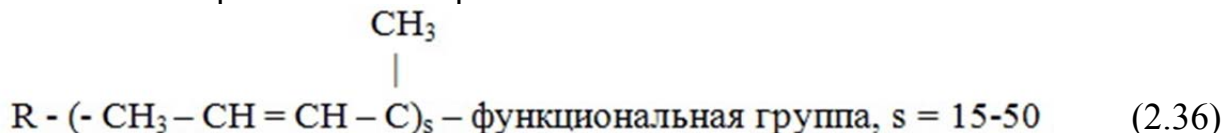
Полистирол отличается от полибутадиена температурой стеклования, которая равняется +70...+100 °С в зависимости от молекулярной массы. Такой полистирол представляет собой хрупкий порошок белого цвета.

Строение полиизопренового олигомера описывается формулой



Полиизопреновая цепь содержит мономерные остатки в виде 3,4 – звеньев, около 7 %; в виде цис – 1,4 звеньев, около 65 %; и транс – 1,4 звеньев - 28%. Полиизопрен представляет вязкую жидкость с температурой стеклования на уровне - 65°С.

Полипиперилен имеет строение



Полипиперелен представляет собой вязкую жидкость. Его температура стеклования находится на уровне – 60°С.

В качестве основы для полимерного ПАВ могут быть использованы как индивидуальные полимеры, описанные выше, так и статистические сополиме-

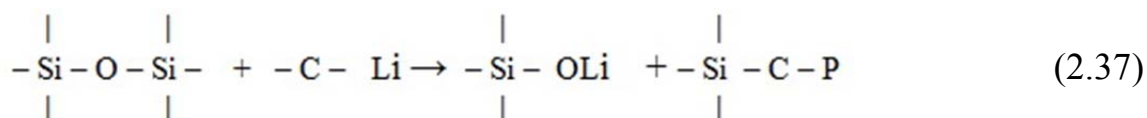
ры данных мономеров с чередованием указанных мономерных остатков, а также блок-сополимеры, в которых могут иметь место блоки (2,3 и более) описанного выше строения.

Температура стеклования статистических сополимеров обычно находится между величинами указанного показателя соответствующих полимеров и зависит от состава полимера.

Блок-сополимеры имеют две или более температуры стеклования, соответствующие одинаковым по строению полимерам.

Обязательным условием для получения основы для полимерного ПАВ по данному методу является сохранение до конца полимеризации концевых групп $-C-Li$, которые могут реагировать с веществами – обрывателями цепи, образуя функциональную группу. В этом случае полимеризация мономеров прекращается, т.к. «живущий» полимер дезактивируется. Обычно процесс обрыва проводят при почти 100%-м исчерпывании мономера, чтобы избежать стадию удаления непрореагировавшего мономера.

Введение функциональных групп в полимер. Теоретически лучшей функциональной группой для присоединения полимера к минеральной поверхности является концевая группа $P-C-Li$. Присоединение происходит по реакции

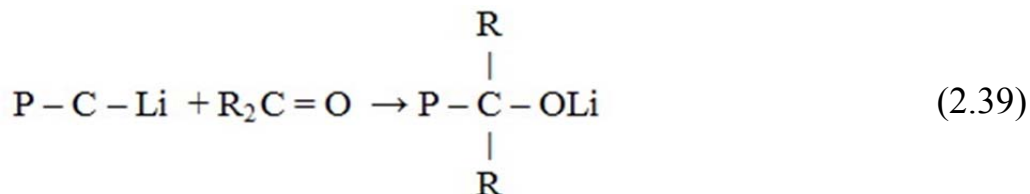


Однако для реализации данного направления имеются технические трудности и вследствие этого для улучшения взаимодействия полимера с минеральной поверхностью в него можно ввести атомы кислорода, азота и фосфора.

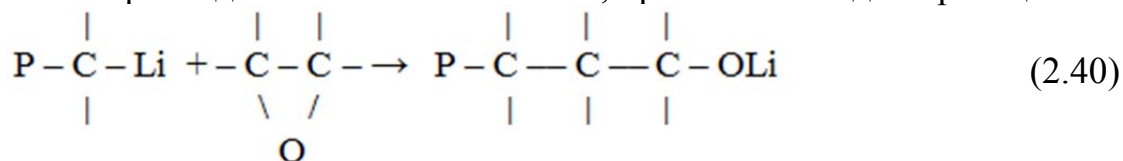
Введение кислорода. Простейшим методом введения кислорода в полимер является окисление полимерного соединения $P-Li$ кислородом с образованием алкоголята лития по реакции



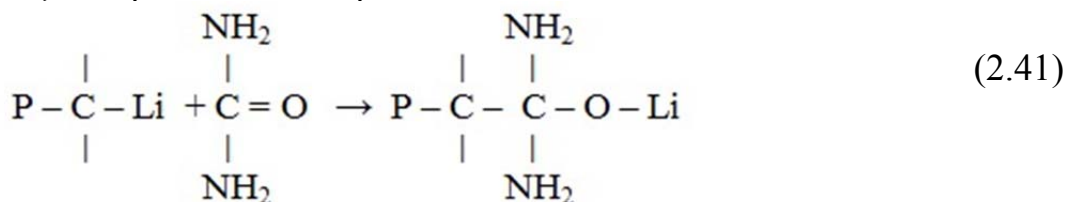
Другим методом является присоединение кетонов (например, ацетона) по реакции



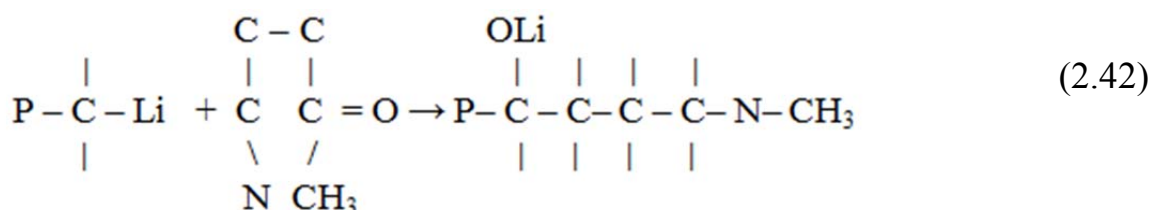
Возможно присоединение окисей этилена, пропилена и т.д. по реакции



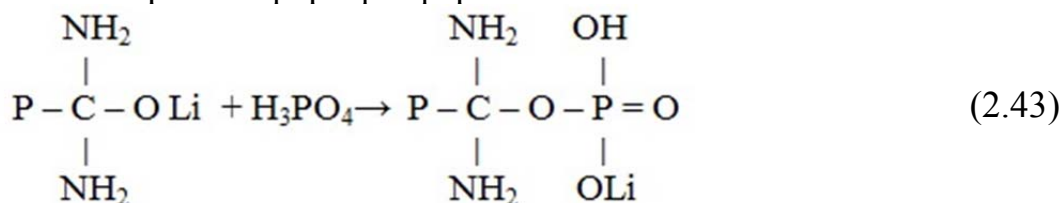
Одновременное введение кислорода и азота. При взаимодействии «живущего» полимера с мочевиной по реакции (2.41) образуется концевая функциональная группа, содержащая кислород и два азота:



При замене мочевины на соединения пирролидона, например метилпирролидон, также образуется функциональная группа, содержащая кислород и азот



Введение фосфора. Введение фосфора в полимерную цепь происходит при взаимодействии полимерного алкоголята лития с ортофосфорной кислотой с образованием полимерного эфира фосфорной кислоты



При этом с избытком фосфорной кислоты образуется трилитийфосфат, который выпадает в осадок



Состав полимерного ПАВ. В зависимости от конкретных условий состав полимерного ПАВ может изменяться. Основой является углеводородный полимер с одной из названных выше функциональных групп. Добавка также содержит технический углерод, который дополнительно стабилизирует вяжущее, что положительно влияет на его термоокислительную устойчивость. Для удобства применения в составе добавки используется минеральное индустриальное масло И-40А, которое снижает вязкость системы. В случае использования полимеров-диенов в качестве основы полимерного ПАВ «Мобит» для предотвращения их окисления при хранении используются антиоксиданты, такие как пространственно затрудненные фенолы, например ионол (2,6 детрит – бутилфенол) или НТ 2246, а также фосфиты (фосфит НФ). Их дозировка составляет 0,5 – 1 % на

полимер. Они хорошо растворимы в полимерах и предотвращают их деструкцию и структурирование при температуре переработки битумных композиций. Битумные композиции, содержащие 1-2 % полимерного ПАВ «Мобит», могут выдерживаться при 150-160 °С в течение 3-6 часов. В «Мобите» отсутствуют компоненты с неприятным запахом.

Присутствующие в составе полимерного ПАВ стабилизаторы и вещества (технический углерод и др.) не только улучшают свойства композиции, но и положительно влияют на термоокислительную устойчивость полимерной добавки и битума. Имеет место также взаимодействие с углеводородным полимером частичек технического углерода, которые адсорбируют битум и создают дополнительное препятствие для проникновения воды к поверхности минерального наполнителя и отделению его от битума [50]. Вещества, предотвращающие окисление полимерной основы, - пространственно-затрудненные фенолы, например ионол (2,6 детрит-бутилфенол), НГ-2246, или фосфиты (фосфит NФ), хорошо растворимы в полимерах и предотвращают их деструкцию и структурирование при технологических температурах приготовления вяжущего с полимерным ПАВ и асфальтобетонных смесей на их основе.

Таким образом, полимерные поверхностно-активные добавки улучшают обволакивание поверхности минеральных материалов битумом, увеличивают его адгезию к минеральной поверхности. Присутствие в полимерной композиции антиоксиданта (ионол или фосфит) и технического углерода приводит к стабилизации всей системы, а следовательно, к замедлению старения битума. Все это вместе взятое в полимерной композиции позволяет улучшить структуру и свойства вяжущего [75].

С целью изучения влияния на деформационно-прочностные характеристики горячего асфальтобетона модифицирующей добавки полимерного ПАВ, а также новой адгезионной добавки – «Адгезол» были приготовлены плотные горячие асфальтобетонные смеси типа «А» (каркасной структуры) и типа «Б» (полукаркасной структуры) на основе исходного битума БНД 60/90, содержащего адгезионные добавки. Составы плотного асфальтобетона щебенистого типа «А» и «Б» были подобраны в соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2009. В качестве сравнения были исследованы асфальтобетонные смеси, содержащие традиционную адгезионную добавку «Амдор - 9». Содержание адгезионных добавок «Мобит» и «Адгезол» в вяжущем составило 1,5 % по массе, а «Амдор» – 0,5%.

Контрольные смеси одинакового гранулометрического состава были приготовлены на БНД 60/90. Результаты определения показателей физико-механических свойств асфальтобетона типа «А» и «Б» с применением адгезионных добавок и без них приведены в табл. 2.4-2.6, а также на рис. 2.8-2.9.

Таблица 2.4

Физико-механические свойства асфальтобетона каркасной структуры (типа «А»)
с применением адгезионных добавок

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Средняя плотность, г/см ³	Водонасыщение, % по массе	Предел прочности при сжатии, при t °С, МПа			Коэффициент водостойкости	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Маршала), МПа	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Никольского), МПа
			0	20	50			
БНД 60/90+Адгезол (1,5 %)	2,43	1,45	12,54	5,83	1,25	1,00	5,45	2,76
БНД 60/90+ Мобит (1,5 %)	2,42	1,70	9,67	3,73	1,35	1,00	5,18	2,42
БНД 60/90 + Амдор (0,5 %)	2,43	1,25	11,75	4,08	1,33	1,00	5,23	2,10
БНД 60/90 (контрольный)	2,43	1,69	11,59	3,83	0,98	0,98	5,00	1,94

98

Таблица 2.5

Физико-механические свойства асфальтобетона полукаркасной структуры (типа «Б»)
с применением полимерно-битумного вяжущего или адгезионных добавок

Наименование и содержание модификатора или ПАВ в вяжущем	Средняя плотность, г/см ³	Водонасыщение, % по массе	Предел прочности при сжатии, при t °С, МПа			Коэффициент водостойкости	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Маршала), МПа	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Никольского), МПа
			0	20	50			
БНД 60/90+ Мобит (1,5 %)	2,41	1,75	8,03	4,35	1,31	1,00	4,85	2,53
БНД 60/90+Амдор (0,5 %)	2,41	1,21	11,45	5,42	1,29	0,90	4,98	2,50
ПБВ 60 (ДСТ 30-01)	2,42	1,32	7,38	4,68	1,73	0,89	6,15	2,70
БНД 60/90+ Мобит (2,0 %)	2,42	1,96	8,10	4,69	1,50	1,00	4,93	2,53
БНД 60/90 (контрольный)	2,42	1,39	10,40	3,5	1,07	1,00	4,68	2,43

Таблица 2.6

Физико-механические свойства асфальтобетона каркасной структуры (типа «А») с применением полимерно-битумного вяжущего и адгезионной добавки «Мобит»

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Средняя плотность, г/см ³	Водонасыщение, % по массе	Предел прочности при сжатии, при t °С, МПа			Коэффициент водостойкости	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Маршала), МПа	Предел прочности при сдвиге, при 50 °С (метод Никольского), МПа
			0	20	50			
ПБВ 60 (ДСТ 30-01)	2,43	1,48	9,60	5,03	1,83	0,91	6,67	2,51
ПБВ 60 + «Мобит» (1,5 %)	2,41	1,77	7,35	3,78	1,60	0,95	6,81	2,43
БНД 60/90 контрольный)	2,43	1,69	11,59	3,83	0,98	0,98	5,00	1,94

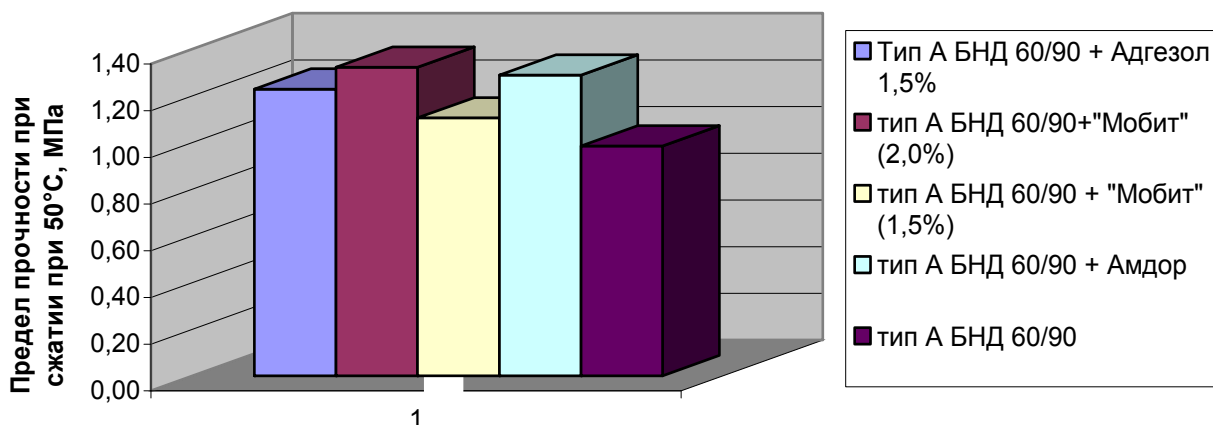


Рис. 2.8. Зависимость предела прочности при сжатии при 50°C модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от вида адгезионной добавки

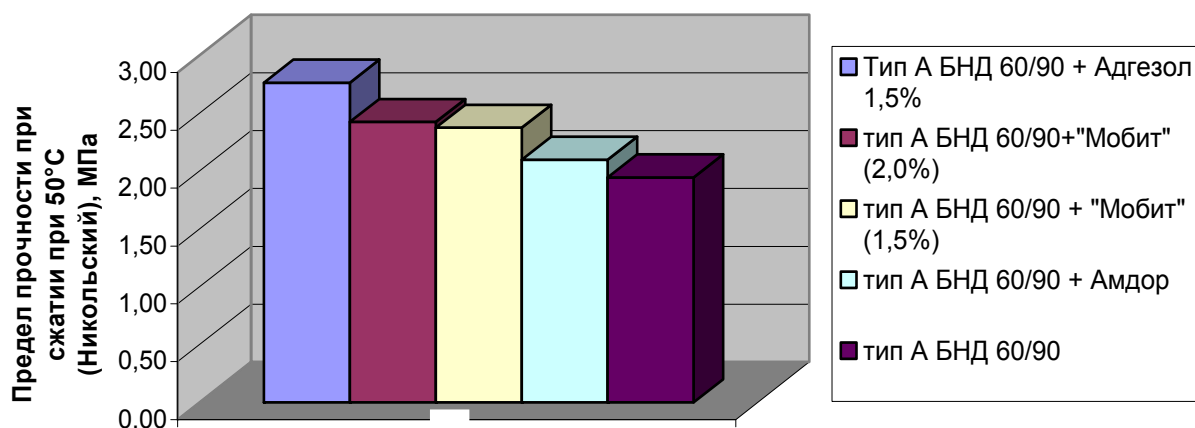


Рис. 2.9. Зависимость предела прочности при сдвиге (по методу Никольского) модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от вида адгезионной добавки

Рассмотрим изменения физико-механических и деформативно-прочностных показателей асфальтобетона типа «А», произошедшие в результате введения различных адгезионных добавок (см. табл. 2.4).

Предел прочности при сжатии при 0°C у асфальтобетона типа «А» на основе БНД 60/90 равен 11,59 МПа, что находится на пределе требований по ГОСТ 9128-2009 для III дорожно-климатической зоны. Практически не произошло изменений при применении ПАВ «Амдор», величина показателя осталась почти без изменений - 11,75 МПа. При введении в вяжущее ПАВ «Адгезол» исходный показатель предела прочности при сжатии при 0°C у асфальтобетона типа «А» был несколько выше 12,54 МПа. При применении полимерного ПАВ «Мобит» указанный показатель - 9,67 МПа, что показывает положи-

тельное влияние добавки на деформативность асфальтобетона в сравнении с контрольным составом. Таким образом, в области низких температур стандартный показатель прочности при сжатии при 0 °С для асфальтобетона типа «А» оказывает наиболее значительное положительное влияние на деформативность асфальтобетона при применении ПАВ «Мобит», что объясняется наличием полимерного компонента в составе добавки.

Рассматривая зависимость предела прочности при сжатии при 50 °С у асфальтобетона типа «А» от наличия адгезионной добавки было отмечено положительное влияние всех рассмотренных ПАВ. Так, величина показателя предела прочности при сжатии при указанной температуре увеличилась в 1,25-1,35 раза в сравнении с контрольным составом (см. рис. 2.8).

Положительное влияние применения адгезионных добавок отмечено на показатели прочности каркасного асфальтобетона при сдвиге, оцениваемом как по методу Никольского, так и по методу Маршала. При применении адгезионных добавок величина показателей прочности при сдвиге увеличивается на 10-30 % в сравнении с контрольным составом (см. рис. 2.9).

Отмечено положительное влияние ПАВ на физико-механические показатели асфальтобетона типа «Б», но эффект применения добавок был несколько меньше в сравнении с результатами испытания асфальтобетона каркасной структуры (см. табл. 2.5).

В целом проведенный эксперимент показал, что применение адгезионных добавок положительно влияет на устойчивость асфальтобетона типа «А» к пластическим деформациям, а применение «Мобит» положительно сказывается на деформативности каркасного асфальтобетона в области низких температур.

2.5. Прогнозирование работоспособности модифицированного горячего асфальтобетона каркасной структуры в процессе эксплуатации в дорожном покрытии

Проблема надежности прогноза работоспособности асфальтобетона в дорожном покрытии охватывает широкий круг вопросов: от применения методов экспериментальных лабораторных исследований до приемов математической обработки результатов и построения экспериментально-статистических моделей. Обеспечение высокого уровня долговечности дорожных покрытий требует применения при их строительстве высококачественных материалов, эффективность которых должна быть доказана с помощью различных лабораторных методов. Для повышения достоверности оценки эффективности применения модифицированного каркасного асфальтобетона взамен традиционного при строительстве покрытий необходимо проведение исследования, условия испытания в котором наиболее приближены к реальным.

Широкий диапазон колебаний температуры асфальтобетонных покрытий в процессе эксплуатации и значительная зависимость прочностных и деформативных свойств асфальтобетонов от режима нагружения обуславливают специ-

фическую особенность работоспособности асфальтобетонных покрытий – нестационарность (т.е. изменчивость) их эксплуатационных характеристик, проявляющуюся в непрерывных изменениях эксплуатационных показателей покрытия вследствие погодных-климатических воздействий и транспортных нагрузок. Но более значительных перемен следует ожидать в результате изменения свойств асфальтобетона, которые будут происходить в результате физико-химических процессов, протекающих при старении материала при его эксплуатации в покрытии. Ранее проведенные исследования [20, 50] показали, что интенсивность старения асфальтобетона в покрытии в основном определяется свойствами вяжущего, составом и свойствами компонентов минеральной части, а также климатическими условиями и характером нагрузок, при которых эксплуатируется материал в покрытии.

Таким образом, для прогноза работоспособности модифицированного асфальтобетона по показателю устойчивости против образования пластических деформаций на покрытии необходимо установить влияние модификаторов на изменение предела прочности при сдвиге каркасного асфальтобетона в течение срока его службы. Следует ожидать значительных изменений показателей сдвигоустойчивости асфальтобетона при его эксплуатации в покрытии в зависимости от вида вяжущего, а также содержания модификатора в вяжущем.

Исследования [20, 83] показали, что интенсивно процессы старения протекают при технологических процессах изготовления, транспортирования и укладки асфальтобетонной смеси. При указанных технологических процессах битум находится в виде тонких пленок на поверхности каменных зерен при высоких температурах и свободном доступе воздуха, что создает благоприятную возможность протекания термоокислительных процессов в битуме, приводящих к старению. В дальнейшем при эксплуатации асфальтобетона в покрытии в летний период при температурах покрытия до 50 °С происходит процесс эксплуатационного старения материала. В холодные периоды года разрушение асфальтобетона происходит в связи с длительным воздействием воды и попеременным замораживанием и оттаиванием, которые усугубляются динамическим воздействием автотранспорта.

Ранее было установлено [51], что применение полимерных модификаторов, в частности синтетического каучука типа СКС-30 АРКМ-15, позволяет уменьшить скорость протекания окислительных процессов и тем самым способствует значительному повышению термоокислительной устойчивости модифицированного битума и повышению долговечности асфальтобетона на его основе. Однако влияние разных типов и марок каучуков, а также адгезионных добавок различных видов на интенсивность старения асфальтобетона каркасной и полукаркасной структуры до настоящего времени изучено недостаточно.

Для оценки влияния каучуков типов СКД, СКС-30 АРКПН, СКС-30 АРКМ-15, СКС-30 АРКМ-27, а также адгезионных добавок «Адгезол», «Амдор» и полимерной адгезионной добавки «Мобит» на физико-механические свойства асфальтобетона были приготовлены асфальтобетонные смеси типов

«А» и «Б» на вяжущем БКВ 60/90 с содержанием каучука в количестве 2,0; 2,5; 3,0 % по массе, а при исследовании влияния ПАВ на свойства асфальтобетона было приготовлено вяжущее, полученное путем введения 1,5 % ПАВ по массе в битум БНД 60/90. Контрольные смеси одинакового гранулометрического состава были приготовлены на БНД 60/90. Составы плотного асфальтобетона каркасной структуры типа «А» и полукаркасной типа «Б» были подобраны в соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2009. Результаты определения показателей физико-механических свойств асфальтобетона типов «А» и «Б» с применением БКВ или исходного битума БНД приведены в табл. 2.1-2.2. Для исследования были приготовлены асфальтобетонные образцы – цилиндры ($d=h=71,4$ мм) каждого исследуемого состава. Содержание вяжущего в исследуемых асфальтобетонных смесях было подобрано по показателям физико-механических свойств смеси на основе БНД 60/90 и составило 4,9 % на 100 % минерального остова.

Методика исследования заключалась в следующем:

- первый этап. Оценка долговечности образцов в лабораторных условиях соответствовал старению при технологическом процессе приготовления асфальтобетонных смесей. Для этого смеси готовили при предельно высокой температуре 155-160 °С, и перед формовкой при указанной температуре приготовленную смесь выдерживали в течение 30 минут. После чего формовали образцы каждого состава. Затем половину образцов по стандартной методике подвергали испытанию для определения первоначальных показателей физико-механических свойств;

- второй этап. При оценке долговечности моделировал старение асфальтобетона в летний период эксплуатации в покрытии. Для этого оставшиеся образцы обеих смесей (тип «А» и тип Б) прогревали при 70 °С в термостате по 10 часов в течение 30 суток;

- третий этап. Оценки долговечности заключался в полном водонасыщении асфальтобетонных образцов с последующим поперечным замораживанием и оттаиванием. Для этого образцы после окончания прогрева (2-го этапа) выдерживали 1 сутки в нормальных температурно-влажностных условиях, а затем выдерживали 1,5 часа под вакуумом для насыщения водой, а потом на 15 суток помещали в воду. По окончании водонасыщения образцы подвергали попеременному замораживанию (4 часа при -20 °С) и оттаиванию (4 часа при +20° С) в количестве 100 циклов.

По окончании 100 циклов образцы испытывали по стандартной методике для определения показателей физико-механических свойств и показателей сдвигустойчивости. Все перечисленные этапы воздействия на асфальтобетонные образцы приняты за один условный год эксплуатации покрытия. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.7-2.10 и на рис. 2.9-2.19.

Таблица 2.7

Физико-механические свойства асфальтобетона каркасной структуры (типа «А»)
на модифицированном битуме до испытания и после одного условного года эксплуатации

Наименования и содержание модификатора в вяжущем	R ₀ , МПа		W, %		К т.ч., (R ₀ /R ₅₀)		Rсд, МПа Маршал		R ₅₀		Rсд, МПа (Никольский)		tgφ		C		R ₂₀		Коэф-т водо- стойкости	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
СКД 3 %	7,65	9,23	1,36	1,50	5,67	9,25	5,89	5,70	1,35	1,00	2,95	2,83	0,9501	0,9311	0,3523	0,3452	3,37	3,29	1,00	1,00
СКД 2,5 %	9,77	10,70	1,17	1,42	6,51	10,38	5,98	5,70	1,50	1,03	2,46	2,47	0,9411	0,9222	0,339	0,3322	4,9	4,78	0,98	0,98
СКД 2 %	9,43	9,80	1,68	1,87	10,49	14,49	4,90	4,60	0,90	0,68	2,15	2,17	0,9302	0,9023	0,3268	0,3169	4	3,9	0,98	0,97
СКС-30 АРКПН 3 %	10,65	9,82	1,39	1,40	9,13	9,24	6,82	6,41	1,17	1,07	2,97	2,97	0,9607	0,9319	0,3695	0,3584	3,9	3,8	1,00	1,00
СКС-30 АРКПН 2,5 %	9,72	9,12	1,47	1,80	8,10	8,42	5,40	5,16	1,20	1,08	2,59	2,62	0,9519	0,9233	0,3541	0,3435	4,75	4,63	0,9	0,89
СКС-30 АРКПН 2 %	8,75	10,60	1,35	1,65	8,35	12,47	5,06	4,75	1,05	0,85	2,28	2,28	0,9397	0,9115	0,3444	0,3341	4,08	3,98	1,00	1,00
СКС-30 АРКМ-27 3 %	11,63	11,18	1,33	1,48	9,56	10,93	5,85	5,68	1,22	1,02	2,91	2,87	0,9638	0,9445	0,3785	0,3709	5,12	4,99	1,00	1,00
СКС-30 АРКМ-27 2,5 %	11,37	11,25	1,72	2,00	6,50	7,73	5,39	5,12	1,75	1,46	2,72	2,75	0,9522	0,9332	0,3609	0,3568	4,87	4,75	1,00	1,00
СКС-30 АРКМ-27 2 %	11,16	10,58	1,26	1,95	8,27	9,07	5,17	4,88	1,35	1,17	2,17	2,18	0,9384	0,9196	0,3515	0,3444	5,12	4,99	0,98	0,97
СКС-30 АРКМ-15 3 %	11,37	9,37	1,27	1,38	8,22	7,45	5,89	5,57	1,38	1,26	3,02	2,98	0,9728	0,9533	0,4073	0,3991	3,95	3,85	1,00	1,00
СКС-30 АРКМ-15 2,5 %	10,71	9,17	1,57	1,74	8,07	7,62	5,52	5,20	1,33	1,20	2,90	2,87	0,9605	0,9413	0,3897	0,3819	5,72	5,58	0,75	0,75
СКС-30 АРКМ-15 2 %	9,72	10,23	1,82	1,92	7,77	10,30	5,21	4,99	1,25	0,99	2,58	2,57	0,9495	0,9305	0,3812	0,3736	4,53	4,42	1,00	1,00

Таблица 2.8

Физико-механические свойства асфальтобетона каркасной структуры (типа «А») на битуме, модифицированном ПАВ, до испытания и после одного условного года эксплуатации

Наименования и содержание модификатора в вяжущем	R ₀ , МПа		W, %		К т.ч., (R ₀ /R ₅₀)		Rсд, МПа Маршал		R ₅₀		Rсд, МПа (Никольский)		tgφ		C		R ₂₀		Коэф-т водостойкости	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
БНД 60/90 + Адгезол 1,5 %	12,54	11,63	1,45	1,60	10,23	11,28	5,45	5,25	1,23	1,03	2,76	2,75	0,9297	0,8972	0,2891	0,2789	5,83	5,68	1,00	1,00
БНД 60/90+ «Мобит» (2,0 %)	9,67	10,20	1,70	1,69	7,32	9,13	5,18	4,95	1,32	1,12	2,42	2,42	0,9348	0,9067	0,3056	0,2964	3,73	3,64	0,87	0,86
БНД 60/90 + «Мобит» (1,5 %)	10,13	11,72	1,20	1,40	9,19	11,53	5,14	4,83	1,10	1,02	2,37	2,38	0,9301	0,9022	0,2894	0,2807	3,64	3,55	0,91	0,90
БНД 60/90 + Амдор (0,5 %)	11,75	11,75	1,25	1,40	9,14	13,16	5,23	4,76	1,29	0,89	2,10	2,02	0,9357	0,9076	0,3104	0,3011	4,08	3,98	1,00	1,00
ПБВ 60 (ДСТ 30-01)	9,60	5,83	1,48	1,60	5,29	4,10	6,67	6,47	1,81	1,42	2,51	2,43	0,9493	0,9256	0,3839	0,3743	5,03	4,9	0,91	0,90
ПБВ 60 + «Мобит» (1,5 %)	7,35	9,97	1,77	1,92	4,28	6,67	6,81	6,65	1,72	1,49	2,43	2,42	0,9502	0,9264	0,3889	0,3792	3,78	3,69	0,86	0,85
БНД 60/90 (контрольный)	11,59	11,62	1,69	1,91	11,79	16,76	5,00	4,50	0,98	0,69	1,94	1,97	0,9231	0,8862	0,2805	0,2693	3,83	3,73	0,98	0,98

Таблица 2.9

Физико-механические свойства асфальтобетона полукаркасной структуры (типа «Б»)
на битуме, модифицированном синтетическим каучуком, до испытания и после одного условного года эксплуатации

Наименования и содержание модификатора в вяжущем	R ₀ , МПа		W, %		К т.ч., (R ₀ /R ₅₀)		Рсд, МПа Маршал		R ₅₀		Рсд, МПа (Никольский)		tgf		С		R ₂₀		Коэф-т водо- стойкости	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
СКД 2,5 %	11,69	10,70	1,78	1,98	7,97	9,88	5,66	5,38	1,47	1,08	2,66	2,31	0,92	0,9016	0,3148	0,3085	6,28	6,12	0,91	0,90
СКС 30 АРКПН 2,5 %	14,75	12,13	2,25	2,39	12,02	11,75	5,01	4,80	1,23	1,03	2,21	1,96	0,9403	0,9215	0,3421	0,3352	6,78	6,61	1,00	1,00
СКС 30 АРКМ 27 2,5 %	10,38	10,35	1,43	1,67	7,71	9,41	5,15	4,95	1,35	1,10	2,62	2,16	0,9255	0,9069	0,3404	0,3336	4,9	4,78	1,00	1,00
СКС 30 АРКМ 15 2,5 %	13,46	10,88	1,70	1,73	10,07	10,37	6,26	6,03	1,34	1,05	3,05	2,67	0,9355	0,9168	0,3702	0,3628	5,77	5,63	0,99	0,98
БНД 60/90	6,40	10,62	1,39	1,53	6,00	15,47	4,68	4,20	1,07	0,69	2,43	1,97	0,912	0,8801	0,27	0,2605	3,5	3,41	1,0	1,00

94

Таблица 2.10

Физико-механические свойства асфальтобетона полукаркасной структуры (типа «Б»)
на битуме, модифицированном ПАВ, до испытания и после одного условного года эксплуатации

Наименования и содержание модификатора в вяжущем	R ₀ , МПа		W, %		К т.ч., (R ₀ /R ₅₀)		Рсд, МПа Маршал		R ₅₀		Рсд, МПа (Никольский)		tgf		С		R ₂₀		Коэф-т водо- стойкости	
	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после	до	после
БНД 60/90+ «Мобит»	8,03	9,77	1,75	1,82	6,15	8,26	4,85	4,64	1,31	1,18	2,53	2,39	0,9238	0,9007	0,2946	0,2872	4,35	4,24	0,83	0,82
БНД 60/90 + «Амдор»	11,45	11,60	1,21	1,42	8,88	11,23	4,98	4,61	1,29	1,03	2,50	2,36	0,9237	0,9006	0,2998	0,2923	5,42	5,28	0,9	0,89
ПВВ 60 ДСТ 30-01	7,38	6,47	1,32	1,58	4,27	4,35	6,15	5,78	1,73	1,49	2,70	2,32	0,9328	0,9141	0,3719	0,3645	4,68	4,56	0,89	0,89
БНД 60/90 (контрольный)	6,40	10,62	1,39	1,53	6,00	15,47	4,68	4,20	1,07	0,69	2,43	1,97	0,912	0,8801	0,27	0,2605	3,5	3,41	1,0	1,00

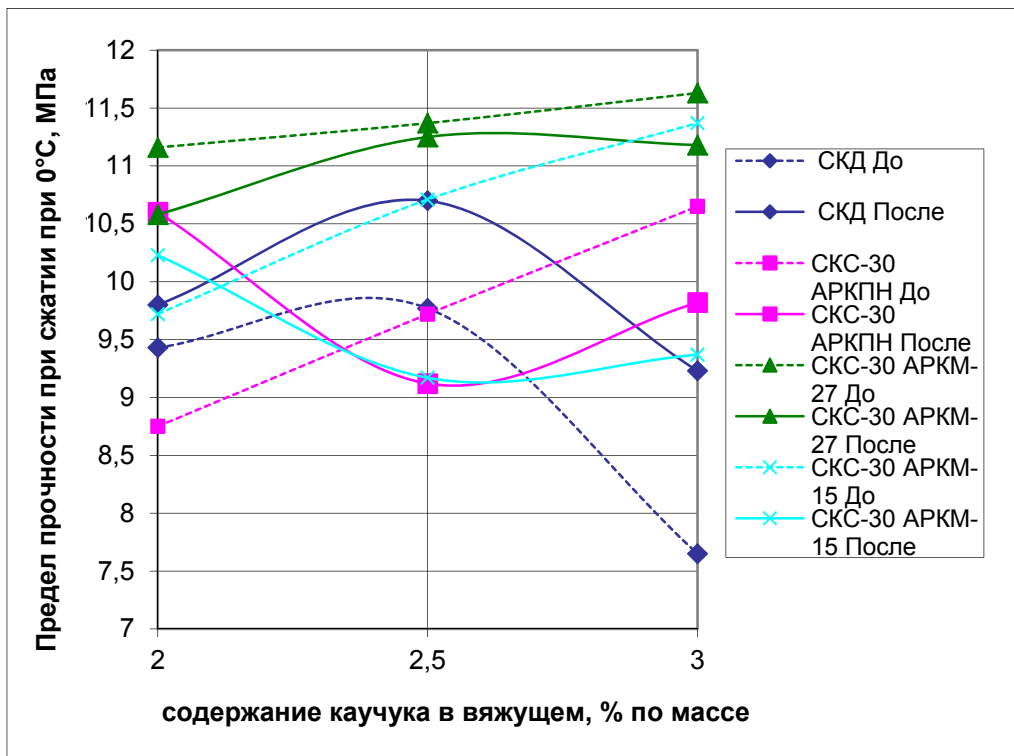


Рис. 2.10. Зависимость предела прочности при сжатии при 0°C модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

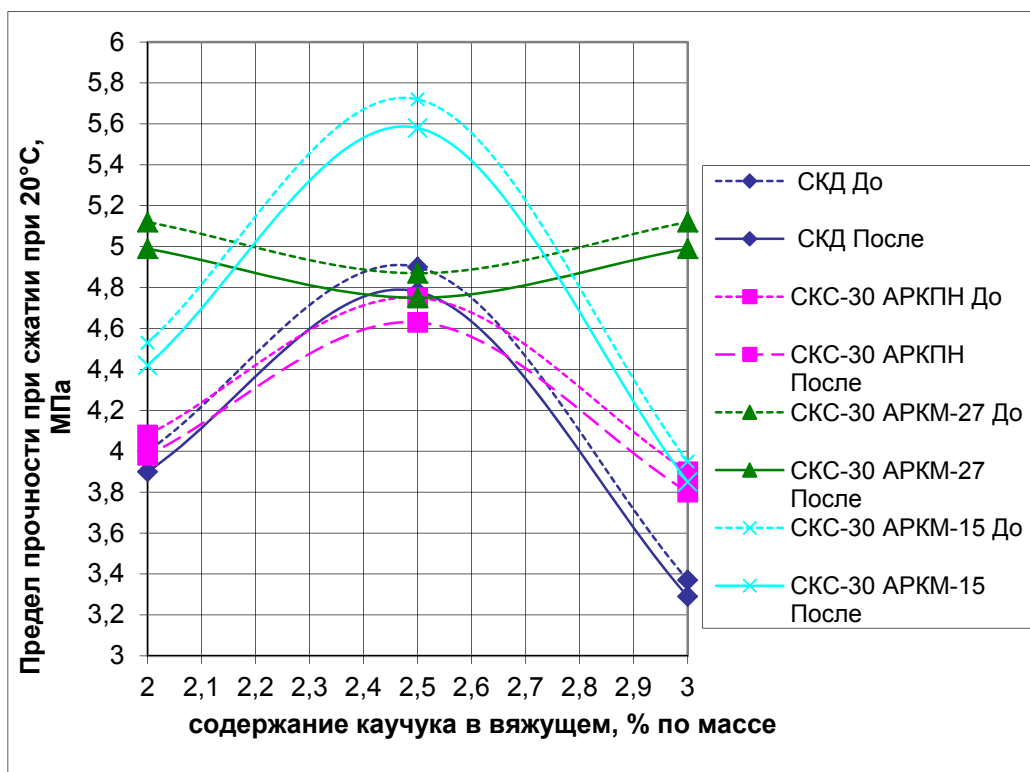


Рис. 2.11. Зависимость предела прочности при сжатии при 20°C модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

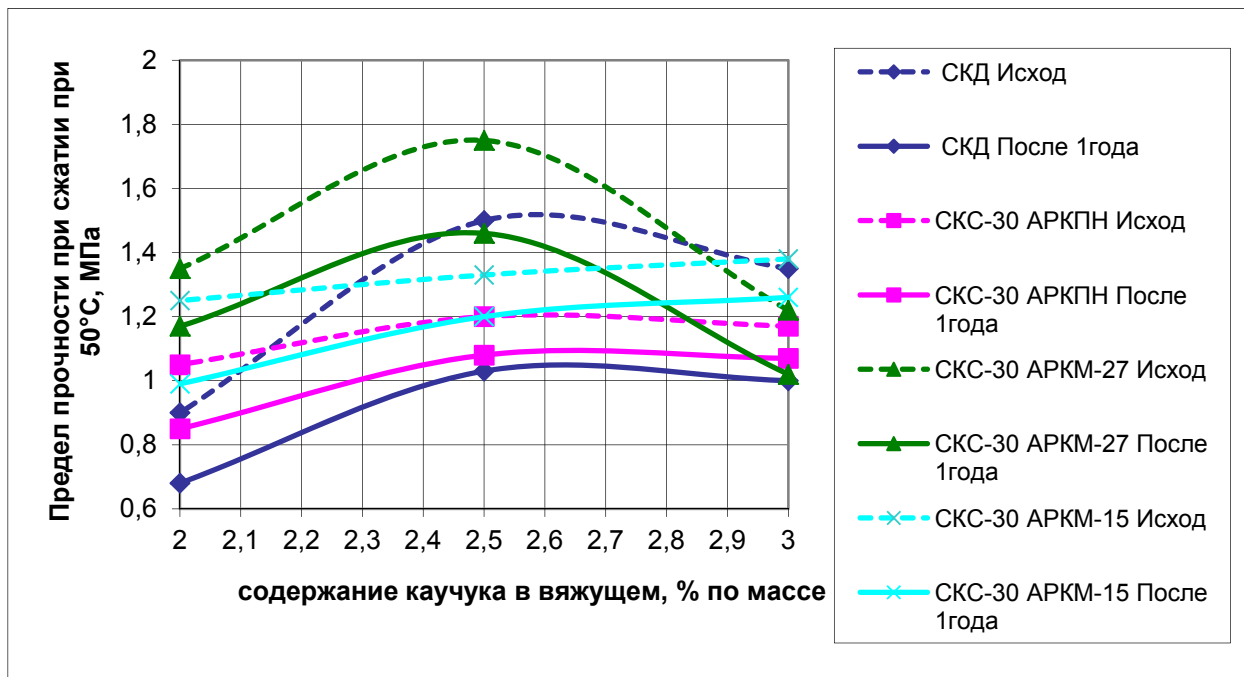


Рис. 2.12. Зависимость предела прочности при сжатии при 50⁰С модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

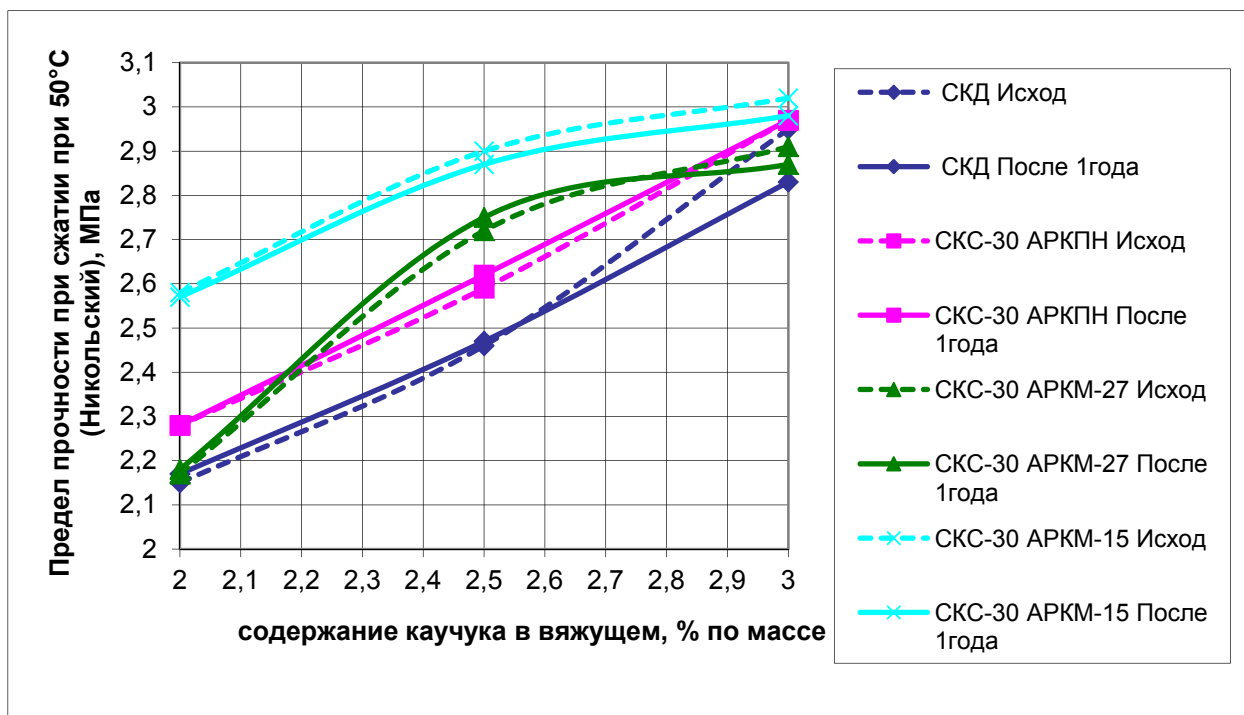


Рис. 2.13. Зависимость предела прочности при сдвиге (по методу Никольского) модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

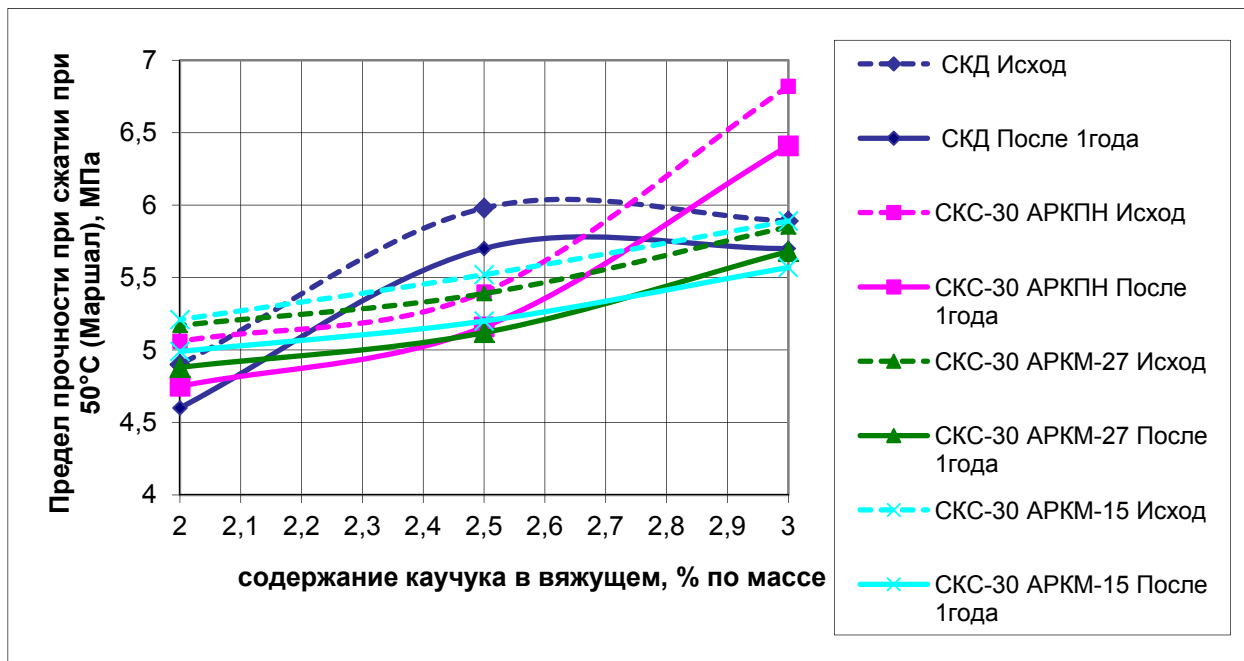


Рис. 2.14. Зависимость предела прочности при сдвиге (по методу Маршала) модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

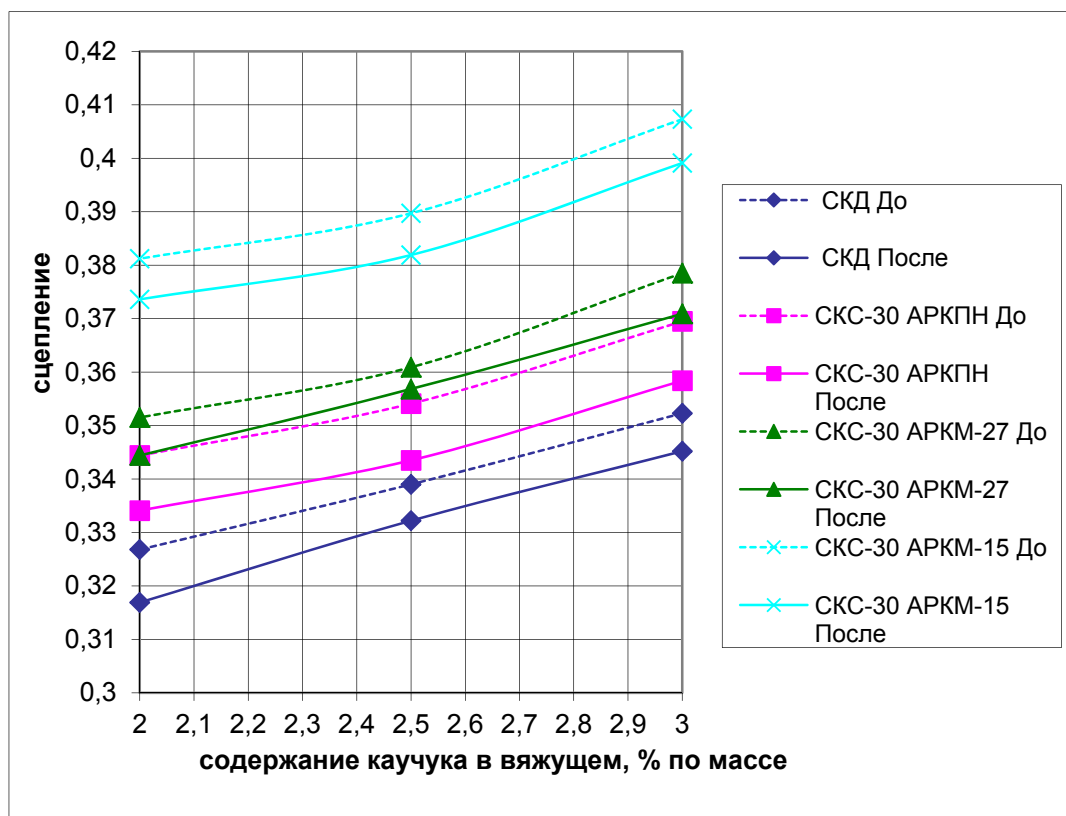


Рис. 2.15. Зависимость сцепления модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

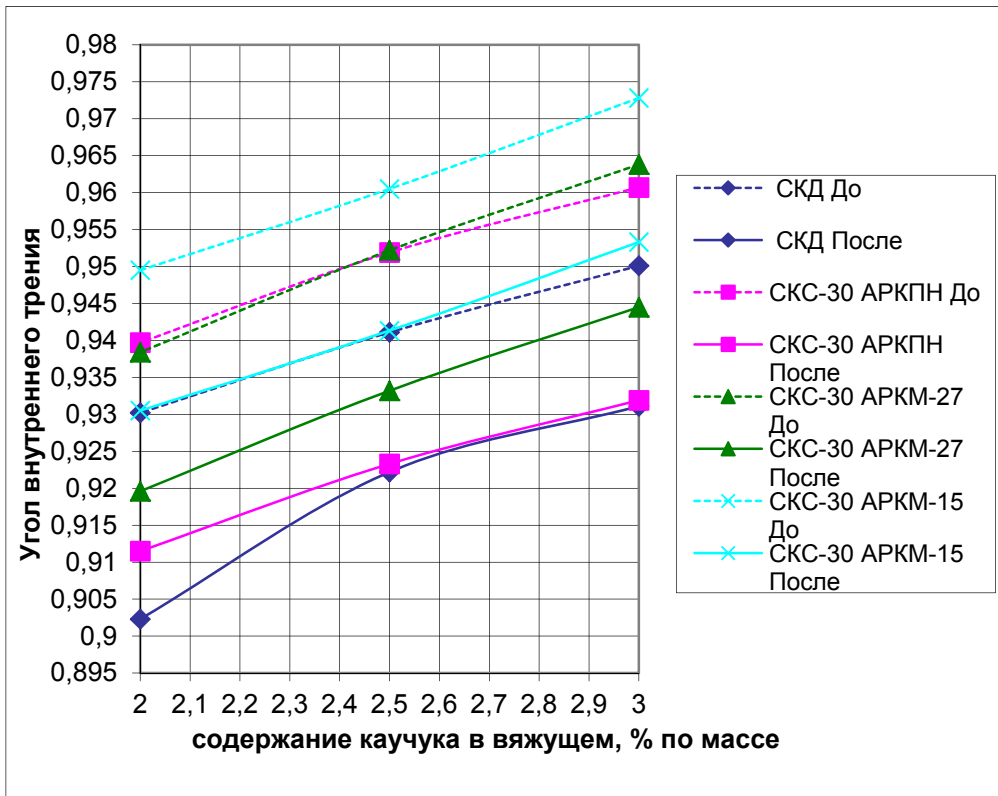


Рис. 2.16. Зависимость угла внутреннего трения модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

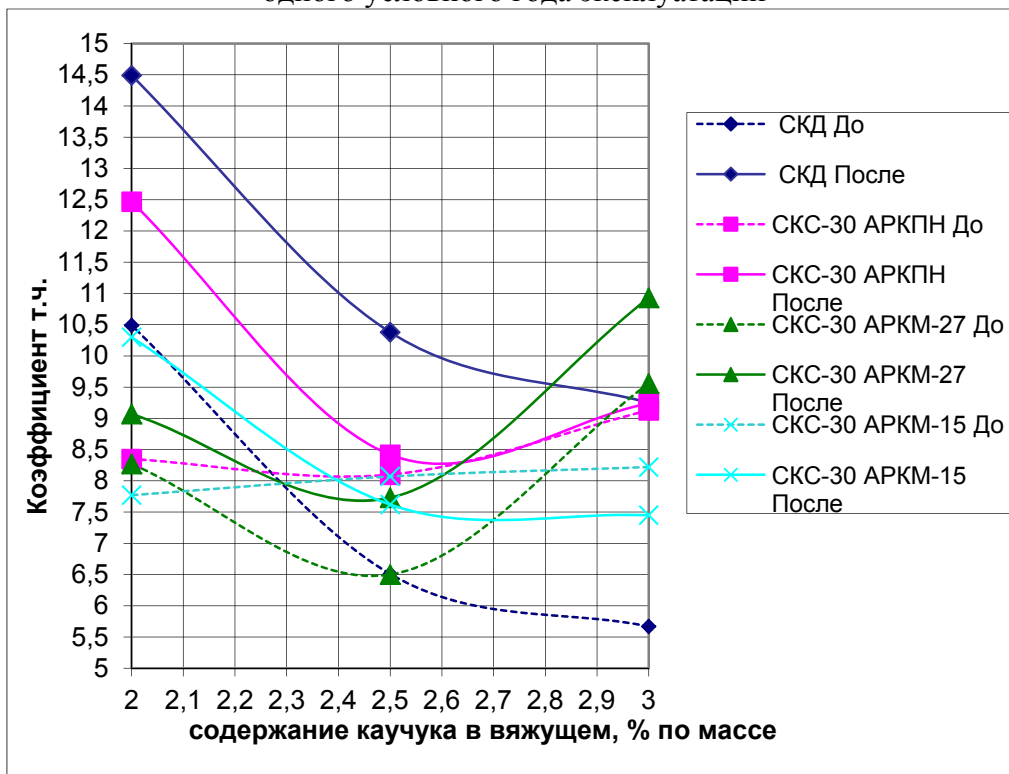


Рис. 2.17. Зависимость коэффициента температурной чувствительности модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

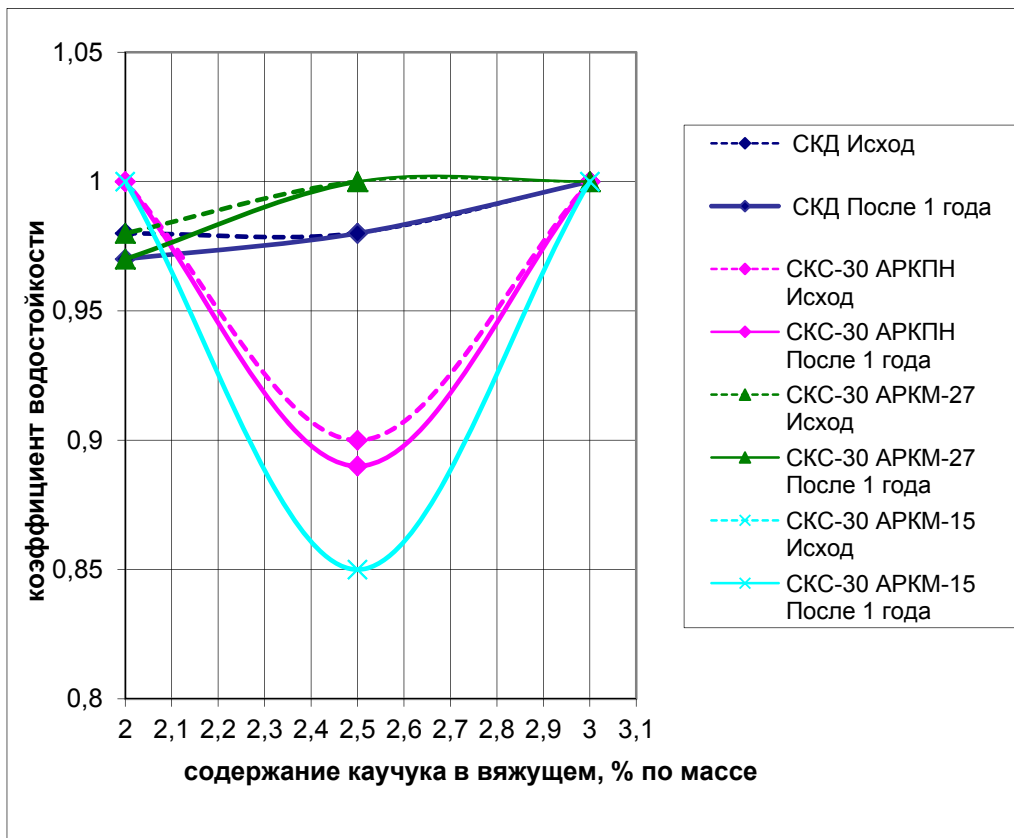


Рис. 2.18. Зависимость коэффициента водостойкости модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

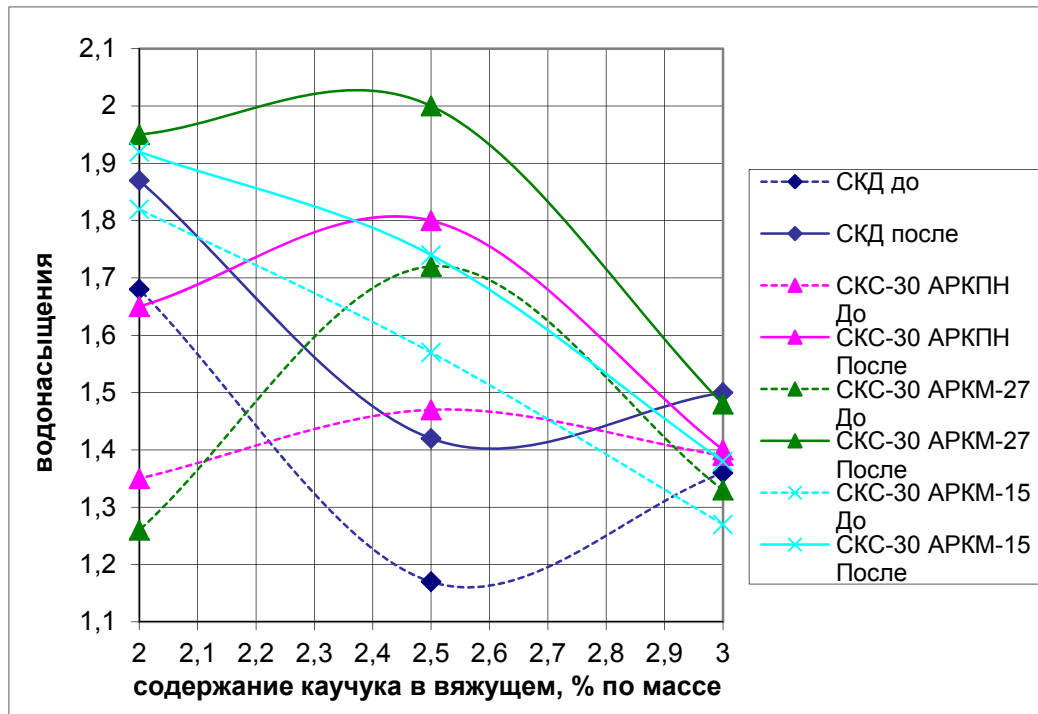


Рис. 2.19. Зависимость водонасыщения модифицированного асфальтобетона каркасной структуры (тип «А») от содержания модификатора в вяжущем после одного условного года эксплуатации

Рассмотрим изменения физико-механических и деформативно-прочностных показателей модифицированного и традиционного асфальтобетона, произошедшие в результате старения после воздействий, соответствующих одному условному году эксплуатации.

После старения предел прочности при сжатии при 0°C у традиционного асфальтобетона типа «А» на основе БНД 60/90 показатель практически не изменился (11,59 МПа исходный показатель, после старения 11,62 МПа). Не произошло изменений при применении ПАВ «Амдор», величина показателя осталась без изменений - 11,75 МПа. При введении в вяжущее ПАВ «Адгезол» исходный показатель был несколько выше 12,54 МПа, после старения незначительно снизился, примерно на 8 %. При применении полимерного ПАВ «Мобит» исходный показатель 10,13 МПа, что показывает положительное влияние добавки на деформативность асфальтобетона в сравнении с контрольным составом. После старения показатель несколько увеличился до 11,7 МПа. Таким образом, в области низких температур стандартный показатель прочности при сжатии при 0°C для асфальтобетона типа «А» как с применением ПАВ, так и без них остался в пределах требований ГОСТ 9128-2009. Значительного положительного влияния ПАВ на деформативность асфальтобетона не установлено.

Модифицированные асфальтобетоны каркасной структуры в зависимости от вида добавки и её содержания имели показатель прочности при сжатии при 0°C в пределах от 7,6 до 11,6 МПа (см. рис. 2.10.). Наиболее заметное положительное влияние отмечено при применении 3 % каучука типа СКД. Так, предел прочности при сжатии при 0°C у модифицированного асфальтобетона типа «А» составил 7,6 МПа, что показывает высокий положительный эффект от применения модификатора для снижения жесткости асфальтобетона.

После старения выявлены две тенденции, характерные для модифицированного асфальтобетона. Для синтетического каучука типа СКД, дивинилстирольного термоэластопласта ДСТ 30-01 наблюдается некоторое снижение показателя прочности при 0°C , т.е. положительный эффект на снижение жесткости сохранялся. Для остальных модификаторов наблюдается повышение показателя прочности, т.е. после климатических воздействий при старении асфальтобетона положительный эффект на показатель предела прочности при сжатии при 0°C снижается.

После старения показатель предела прочности при сжатии при 50°C для традиционного асфальтобетона типа «А» снизился практически на треть, что можно объяснить резкими изменениями, произошедшими в результате старения во внутренней структуре материала. Так, показатель сцепления у традиционного асфальтобетона снизился с 0,281 до 0,269, а угол внутреннего трения уменьшился с 0,923 до 0,886 (см. табл. 2.5). В меньшей степени, но аналогичная ситуация с падением показателя предела прочности при сжатии при 50°C наблюдается при применении ПАВ «Амдор», величина показателя снизилась с 1,29 до 0,89 МПа. При введении в вяжущее ПАВ «Адгезол» исходный показатель снизился несколько меньше - с 1,23 до 1,03 МПа. При применении поли-

мерного ПАВ «Мобит» показатель предела прочности при сжатии при 50⁰С почти не изменился с 1,1 до 1,02 МПа. Наибольший положительный эффект от применения полимерного ПАВ проявляется и в показателях сцепления и угла внутреннего трения асфальтобетона. Как до старения, так и после указанные показатели у состава с «Мобит» выше в сравнении с асфальтобетонами, где были использованы «Адгезол» или «Амдор».

Таким образом, наибольший положительный эффект при применении ПАВ для улучшения прочности каркасного асфальтобетона при повышенных температурах наблюдается при использовании полимерного ПАВ «Мобит».

Модифицированные асфальтобетоны каркасной структуры в зависимости от вида добавки и её содержания имели исходный показатель прочности при сжатии при 50⁰С в пределах от 0,9 до 1,81 МПа. Наилучшие значения показателя были установлены при применении 2,5 - 3 % по массе каучуков типа СКД, СКС-30 АРКМ-27 и СКС-30 АРКМ-15, а также термоэластопласта ДСТ 30-01. Наименьший эффект наблюдается при применении добавки в количестве 2 % по массе, а также при применении каучука СКС-30 АРКПН.

После старения показатель предела прочности при сжатии при 50⁰С для модифицированных асфальтобетонов типа «А» снизился для всех рассмотренных модификаторов, но в гораздо меньшей степени, чем для традиционного асфальтобетона с применением ПАВ «Адгезол» или «Амдор». В наилучшей степени показали устойчивость при старении по показателю предела прочности при сжатии при 50⁰С асфальтобетон с содержанием 2,5 % каучука СКС-30 АРКМ-15 или с добавкой ДСТ 30-01. Для всех вышеуказанных модификаторов, положительно повлиявших на прочность асфальтобетона при высокой температуре, показатели сцепления и угла внутреннего трения имеют наилучшие значения как исходных составов, так и подвергнутых старению.

Оценивая изменение показателей предела прочности при сдвиге по методу Никольского и стандартного показателя по методу Маршала было отмечено незначительное изменение величины указанных показателей в результате старения. Наименьшие значения показателей имеют традиционный асфальтобетон типа «А» на БНД 60/90, а также состав с применением ПАВ «Амдор». Наиболее высокие значения предела прочности при сдвиге имеют каркасные асфальтобетоны, содержащие 2,5 - 3 % каучуков всех исследованных типов или термоэластопласта ДСТ 30-01. Несколько меньший эффект от применения полимерного ПАВ «Мобит». Но в целом можно отметить следующее – после одного условного года эксплуатации значения показателей предела прочности при сдвиге по методу Никольского и стандартного показателя по методу Маршала изменились незначительно.

В результате старения у традиционного каркасного асфальтобетона, а также с применением ПАВ «Амдор» и «Адгезол» отмечается повышение зависимости прочности материала от температуры, которую в эксперименте оценивается по показателю коэффициента температурной чувствительности. В наименьшей степени зависимость прочности от температуры по исходным зна-

чениям, а также в результате старения показали составы, в которых в качестве модификаторов были использованы каучуки типа каучука СКС-30 АРКМ-15 и СКС-30 АРКМ-27 с содержанием 2,5 % добавки в вяжущем или с применением полимера ДСТ 30-01.

Таким образом, проведенный эксперимент выявил значительный положительный эффект от применения модификаторов СКС-30 АРКМ-15 и СКС-30 АРКМ-27 с содержанием 2,5 % добавки или с применением полимера ДСТ 30-01 для повышения деформационно-прочностных показателей асфальтобетона каркасной структуры. Хороший эффект для улучшения структуры и свойств каркасного асфальтобетона установлен и при применении полимерного ПАВ «Мобит», что позволяет рекомендовать его для практического применения не только для улучшения водостойкости асфальтобетона, но и для повышения деформационно-прочностных показателей.

Рассмотрим изменения деформативно-прочностных показателей модифицированного и традиционного асфальтобетона, произошедшие в результате старения после воздействий, соответствующих одному условному году эксплуатации, для асфальтобетона полукаркасной структуры (тип «Б»).

После старения предел прочности при сжатии при 0 °С у традиционного асфальтобетона типа «Б» на основе БНД 60/90 показатель изменился в сторону ухудшения (6,40 МПа – исходная величина показателя, соответственно после старения 10,62 – МПа). Это свидетельствует о значительном повышении жесткости асфальтобетона, снижении его трещиностойкости вследствие изменения структуры битумной пленки на минеральных зернах. Таким образом, традиционное асфальтобетонное покрытие становится склонным к появлению трещин и других дефектов по причине повышенной жесткости асфальтобетона в области низких температур.

Не произошло изменений по пределу прочности при сжатии при 0 °С при применении ПАВ «Амдор», величина показателя осталась без изменений (11,45 МПа - исходный показатель, после старения - 11,60 МПа). При применении полимерного ПАВ «Мобит» исходный показатель 8,03 МПа, что показывает положительное влияние добавки на деформативность асфальтобетона в сравнении с контрольным составом. После старения показатель несколько увеличился до 9,77 МПа, что, вероятно, свидетельствует об удалении излишнего количества пластификатора, входящего в состав ПАВ «Мобит». Таким образом, в области низких температур стандартный показатель прочности при сжатии при 0 °С для асфальтобетона типа «Б» как с применением ПАВ, так и без них остался в пределах требований ГОСТ 9128-2009. Наиболее значительное положительное влияния ПАВ на деформативность асфальтобетона установлено при использовании «Мобит».

Модифицированные асфальтобетоны полукаркасной структуры в зависимости от вида добавки и её содержания имели показатель прочности при сжатии при 0 °С в пределах от 7,38 до 14,75 МПа (рис. 2.20). Наиболее заметное положительное влияние отмечено при применении 2,5 % каучука типа СКС-30

АРКМ-27, так предел прочности при сжатии при 0⁰С у модифицированного асфальтобетона типа «Б» составил 10,38 МПа, что показывает значительный положительный эффект от применения модификатора для снижения жесткости асфальтобетона.

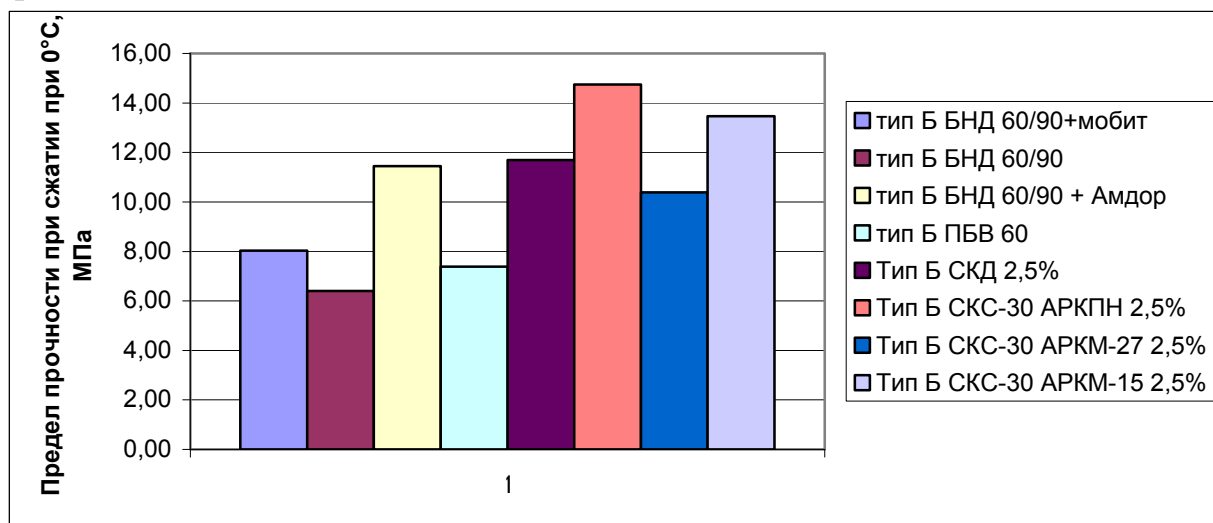


Рис. 2.20. Зависимость предела прочности при сжатии при 0⁰С модифицированного асфальтобетона полукаркасной структуры (тип «Б») после одного условного года эксплуатации

После старения для модифицированного асфальтобетона проявляются две тенденции. Для синтетического каучука типа СКД,

дивинил-стирольного термоэластопласта ДСТ 30-01 наблюдается некоторое снижение показателя прочности при 0⁰С, т.е. положительный эффект на снижение жесткости сохранялся, что можно объяснить очень высоким содержанием пластификатора в модифицированном вяжущем. Для остальных рассмотренных модификаторов наблюдается повышение показателя прочности при 0⁰С, т.е. после климатических воздействий при старении асфальтобетона положительный эффект от применения модификатора на пластичность асфальтобетона в области низких температур снижается.

После старения показатель предела прочности при сжатии при 50⁰С для традиционного асфальтобетона типа «Б» снизился практически на 10-20 %, что можно объяснить резкими изменениями, произошедшими в результате старения во внутренней структуре материала. Так, показатель сцепления у традиционного асфальтобетона снизился с 0,270 до 0,2605, а угол внутреннего трения уменьшился с 0,912 до 0,8801 (см. табл. 2.6). В меньшей степени, но аналогичная ситуация с падением показателя предела прочности при сжатии при 50⁰С наблюдается при применении ПАВ «Амдор», величина показателя снизилась с 1,29 до 1,03 МПа. При применении полимерного ПАВ «Мобит» показатель предела прочности при сжатии при 50⁰С почти не изменился - с 1,31 до 1,18 МПа. Наибольший положительный эффект от применения полимерного ПАВ проявляется и в показателях сцепления и угла внутреннего трения асфальтобетона. Как до старения, так и после указанные показатели у состава с «Мобит» выше в сравнении с асфальтобетонами, где был использован «Амдор».

Модифицированные асфальтобетоны каркасной структуры в зависимости от вида добавки и её содержания имели исходный показатель прочности при сжатии при 50 °С в пределах от 1,23 до 1,73 МПа. Наилучшие значения показателя были установлены при применении 2,5 % по массе каучуков типа СКД, СКС-30 АРКМ-27 и СКС-30 АРКМ-15, а также термоэластопласта ДСТ 30-01. Наименьший эффект наблюдается при применении каучука СКС-30 АРКПН.

После старения показатель предела прочности при сжатии при 50 °С для модифицированных асфальтобетонов типа «Б» снизился для всех рассмотренных модификаторов, но в гораздо меньшей степени, чем для традиционного асфальтобетона или при использовании ПАВ «Амдор». В наилучшей степени показали устойчивость при старении по показателю предела прочности при сжатии при 50 °С асфальтобетон с содержанием 2,5 % каучука СКС-30 АРКМ-27 или с добавкой ДСТ 30-01. Для всех вышеуказанных модификаторов, положительно повлиявших на прочность асфальтобетона при высокой температуре, показатели сцепления и угла внутреннего трения имеют наилучшие значения как исходных составов, так и подвергнутых старению.

Оценивая изменение показателей предела прочности при сдвиге по методу Никольского и стандартного показателя по методу Маршала было отмечено незначительное изменение величины указанных показателей в результате старения. Наименьшие значения показателей имеют традиционный асфальтобетон типа «Б» на БНД 60/90, а также состав с применением ПАВ «Амдор» и состав с добавкой ДСТ 30-01. Наиболее высокие значения предела прочности при сдвиге имеют полукаркасные асфальтобетоны, содержащие 2,5 % каучука по массе вяжущего, что наблюдается для каучуков исследованных типов. Несколько меньший эффект от применения полимерного ПАВ «Мобит». Но в целом можно отметить следующее – после одного условного года эксплуатации значения показателей предела прочности при сдвиге по методу Никольского и стандартного показателя по методу Маршала изменились незначительно.

В результате старения у традиционного асфальтобетона, а также с применением ПАВ «Амдор» отмечается повышение зависимости прочности материала от температуры, которую в эксперименте оценивали по показателю коэффициента температурной чувствительности. В наименьшей степени зависимость прочности от температуры по исходным значениям, а также в результате старения показали составы, в которых в качестве модификаторов были использованы каучуки типа каучука СКС-30 АРКМ-15 и СКС-30 АРКМ-27 с содержанием 2,5 % добавки в вяжущем или с применением полимера ДСТ 30-01.

Таким образом, проведенный эксперимент выявил значительный положительный эффект от применения модификаторов СКС-30 АРКМ-15 и СКС-30 АРКМ-27 с содержанием 2,5 % добавки, а также с применением полимера ДСТ 30-01 для повышения деформационно-прочностных показателей асфальтобетона полукаркасной структуры. Хороший эффект для улучшения структуры и свойств полукаркасного асфальтобетона установлен и при применении полимерного ПАВ «Мобит», что позволяет рекомендовать его для практического

применения не только для улучшения водостойкости асфальтобетона, но и для повышения его деформационно-прочностных показателей.

2.6. Обоснование реологической модели, описывающей влияние модификаторов битумов и адгезионных добавок на возникновение пластических дефектов на дорожном покрытии из асфальтобетона каркасной структуры

Одним из важнейших факторов, влияющих на структуру и деформационно-прочностные характеристики асфальтобетона, является строение битумной пленки на минеральном материале. Для материалов с коагуляционными структурными связями, согласно [20, 60], характерно нахождение части битумных пленок в зоне действия сил межмолекулярного взаимодействия с поверхностью минеральных зерен, изменяющего структуру и свойства битума в пограничных слоях. Наряду с адсорбционным взаимодействием, охватывающим граничный слой битума, изменение структуры битумных пленок происходит из-за действующих поверхностных сил минерального материала, влияние которых очень широко распространяется перпендикулярно к поверхности минерального материала. Битум, попадая в зону их действия, претерпевает структурные изменения. Его высокомолекулярные соединения, проявляя «эстафетное действие», образуют цепочки, перпендикулярные к поверхности минеральных зерен и напоминающие собой ориентированные структуры типа «жидких кристаллов». Прочность связи звеньев цепочки по мере удаления от зерна падает, и на расстоянии нескольких микрометров (10^{-6} м) практически равна нулю, битум приобретает объемные свойства [20,60].

В ориентированном слое битума И.В. Королев [60, 61] выделяет три зоны с характерной структурой и физико-механическими свойствами: твердообразную, структурированную и диффузную (рис. 2.21).

Твердообразная зона, граничащая с поверхностью минерального материала, в основном представлена адсорбционным слоем. Минеральные зерна, покрытые пленкой такой же толщины, как и твердообразная зона, между собой не слипаются, так как пленка не обладает клеящей способностью. Толщина твердообразной зоны на минеральных зернах не превышает микрометра.

Структурированная зона состоит из упорядоченно расположенных высокомолекулярных компонентов битума, вытянутых в цепочку и ориентированных в направлении минеральной подложки.

Диффузная зона – переходная между ориентированным слоем и объемным битумом, в которой вязущее частично имеет упорядоченное строение. Толщина зоны наиболее активно изменяется с изменением температуры. Резкого перехода между ориентированным слоем и объемным битумом, а также внутри слоя между зонами нет. В зависимости от природы и размера зерен и содержания в битуме асфальтенов толщина ориентированного слоя меняется от долей микрометра до нескольких микрометров и, следовательно [61], к битум-

ным пленкам в асфальтобетоне применимы положения физико-химической механики тонких жидких пленок и поверхностных явлений, разработанные П.А. Ребиндером и его учениками.

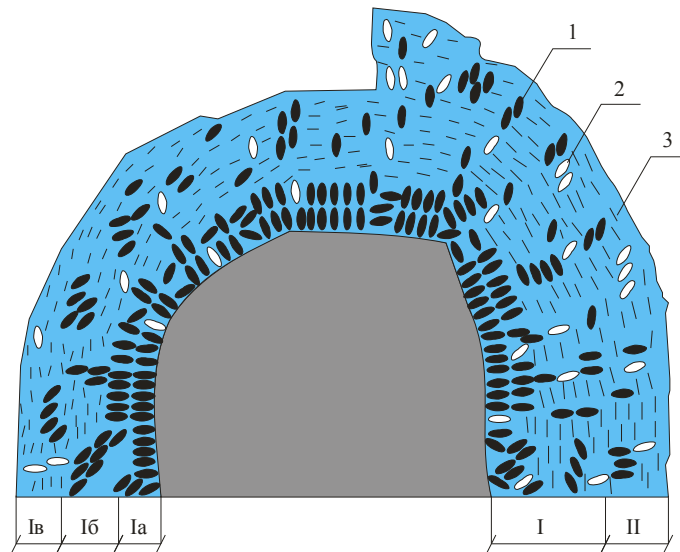


Рис. 2.21. Строение битумной пленки:

I-ориентированный слой, II - объемный битум, Ia - твердообразная зона, Ib - структурированная зона, Ib - диффузная зона,
1 - асфальтены, 2 - ароматические углеводороды, 3 - парафино-нафthenовые углеводороды

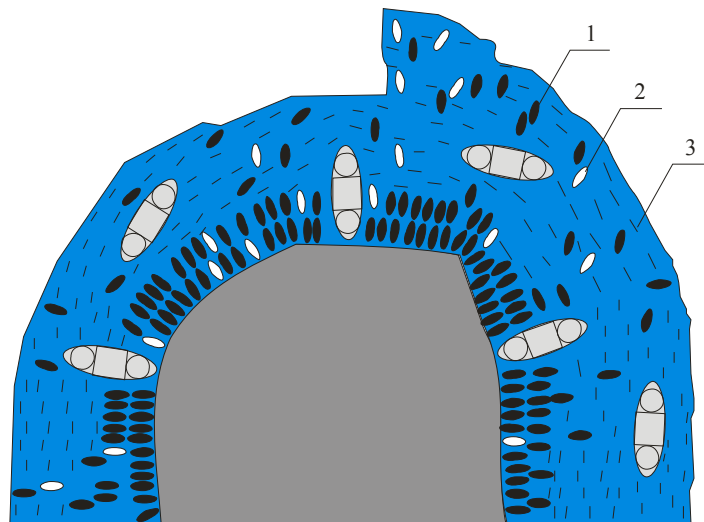


Рис. 2.22. Строение битумной пленки с применением ПВВ:

1 - асфальтены, 2 - ароматические углеводороды, 3 - парафино-нафthenовые углеводороды

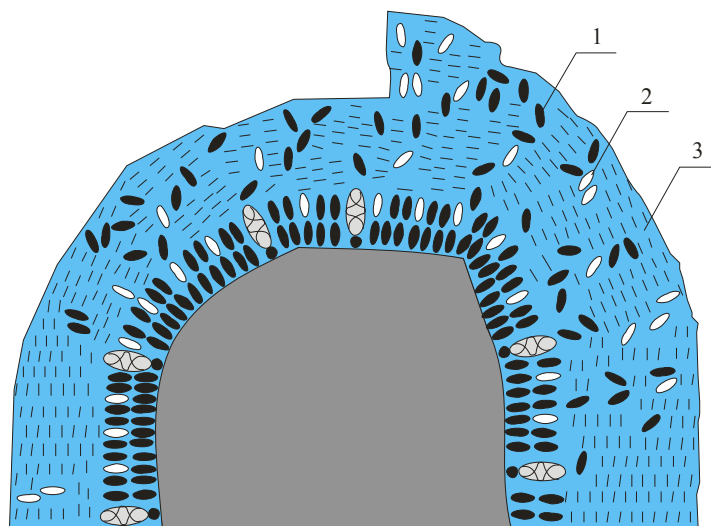


Рис. 2.23. Строение битумной пленки с ПАВ «Мобит»:
1 - асфальтены, 2 - ароматические углеводороды, 3 - парафино-нафтеновые углеводороды

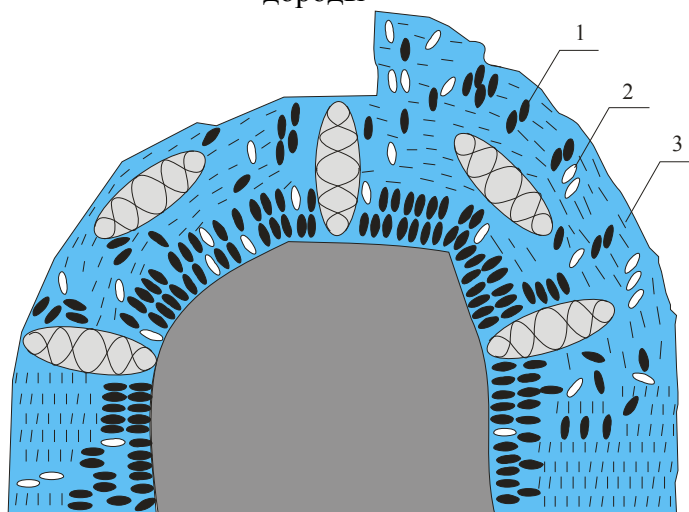


Рис. 2.24. Строение битумной пленки с применением БКВ:
1 - асфальтены, 2 - ароматические углеводороды, 3 - парафино-нафтеновые углеводороды

Модификация битума пластифицирующими и высокополимерными добавками изменяет структуру ориентированного слоя битума. Наиболее вероятно, что наиболее значительные изменения происходят в структурированной и диффузной зоне ориентированного слоя битума, которые предположительно имеют строение, показанное на рис. 2.21-2.24. Так, присутствие макромолекул полимера значительно увеличит диффузную зону, что в целом является положительным моментом, т.к. чем меньше в асфальтобетоне свободного битума, тем выше его устойчивость к пластическому течению. Однако в модифицированном битуме присутствует значительное количество инертного пластификатора, наличие которого в битумных пленках отрицательно скажется на структурированной зоне ориентированного слоя битума.

Согласно Дерягину [35], граничные слои жидкости находятся в поле дей-

ствия поверхностных сил, структура же расположения молекул в ориентированном слое жидкости упорядочена, что связано с более высокой, чем при действии поверхностных сил, энергией взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела. Толщина ориентированного слоя возрастает с увеличением молекулярной массы и асимметрии молекул жидкости. Таким образом, битумные пленки в модифицированном асфальтобетоне, вследствие присутствия высокомолекулярных частиц дивинилстирольного термоэластопласта или синтетического каучука, отличаются значительно большей толщиной в сравнении с традиционным асфальтобетоном, что и позволяет объяснить положительный эффект применения полимеров на деформативно-прочностные свойства асфальтобетона.

А.С. Колбановская установила, что свойства традиционных нефтяных битумов в тонких пленках существенно зависят от характера поверхности, на которой адсорбирован битум. На активной поверхности с уменьшением толщины битумных слоев (менее 10 мкм) резко увеличивается когезия, являющаяся следствием ориентации структурных элементов битума или их «обломков». В более толстых слоях битума ориентационный эффект ощущается значительно слабее [56, 57]. Таким образом, можно достичь значительного эффекта и при модификации битума поверхностно-активными добавками. Толщина ориентированного слоя битума в этом случае будет меньше, чем при применении высокополимерных добавок, но ориентация к минеральной поверхности выше, что позволит повысить прочность битумных пленок и прочностные свойства асфальтобетона. Модификация битума поверхностно-активными веществами позволит получить наиболее значительный эффект при применении соединений с большей молекулярной массой, что подтверждается результатами определения деформативно-прочностных характеристик асфальтобетона с применением полимерного ПАВ «Мобит».

Для подтверждения вышеприведенных положений был проведен эксперимент по изучению структурно-механических показателей модифицированного асфальтобетона. Известно, что в напряженно-деформированном состоянии в дорожном покрытии асфальтобетон проявляет комплекс сложных структурно-механических свойств: упругость, пластичность, ползучесть, релаксацию напряжений, накопление деформаций при многократных приложениях нагрузки. Совокупность указанных свойств наиболее полно позволяет оценить физическое состояние асфальтобетона и его поведение в покрытии. Наиболее полно перечисленные свойства асфальтобетона можно определить методами реологии – науки, рассматривающей образование и развитие деформаций во времени. Каждому материалу присущи индивидуальные реологические свойства. В наибольшей степени реологические свойства асфальтобетона определяются процессами деформации, происходящими в структурированных битумных пленках, которые могут широко различаться по реологическим свойствам в зависимости от их состава и свойств битума. Другие факторы (тип минерального материала, соотношение наполнителя и заполнителя в минеральном остове и

др.) незначительно влияют на реологические свойства асфальтобетона, поскольку сами минеральные частицы являются полностью упругими и претерпевают в процессе деформирования асфальтобетона только малые упругие деформации [91, 92].

К важнейшим показателям асфальтобетона, определяющим сдвигоустойчивость покрытия, относятся параметры, характеризующие зависимости вязкости (когезионного сцепления) от скорости деформирования и температуры. Экспериментальные зависимости деформативно-прочностных свойств асфальтобетона от скорости деформирования возможно охарактеризовать структурно-реологическими показателями. Асфальтобетон, являясь сложным реологическим телом, характеризуется вязкоупругими и вязкопластичными свойствами, которые в сильной степени зависят от температурно-временных условий деформирования. Необратимое деформирование асфальтобетона при сдвиге наблюдается только при таких касательных напряжениях, которые превышают статический предел текучести, поэтому рассматриваемый показатель оказывает решающее влияние на колеобразование покрытия [91].

В соответствии с уравнением Кулона сопротивление асфальтобетона сдвигу представлено в виде суммы составляющих: статического предела текучести $\tau_0 = p \cdot \operatorname{tg} \varphi$ и сцепления $C(t, T)$:

$$\tau_p = p \cdot \operatorname{tg} \varphi + C(t, T), \quad (2.45)$$

где τ_p - предельное напряжение сдвига, МПа; p - нормальное напряжение на площадке сдвига, МПа; $\operatorname{tg} \varphi$ - коэффициент внутреннего трения асфальтобетона; $C(t, T)$ - сцепление при расчетных условиях испытания, МПа.

Сцепление характеризует вязкие свойства асфальтобетона, которые зависят от времени действия нагрузки (скорости деформирования) и температуры асфальтобетона. Вязкость материалов принято изучать в условиях чистого сдвига. При плоскопараллельном сдвиге противоположных плоскостей образца со скоростью V (рис. 2.25) относительная скорость необратимой деформации (градиент скорости сдвига) выражается следующей зависимостью:

$$\gamma^* = \frac{V}{h}, \quad (2.46)$$

где h - высота образца.

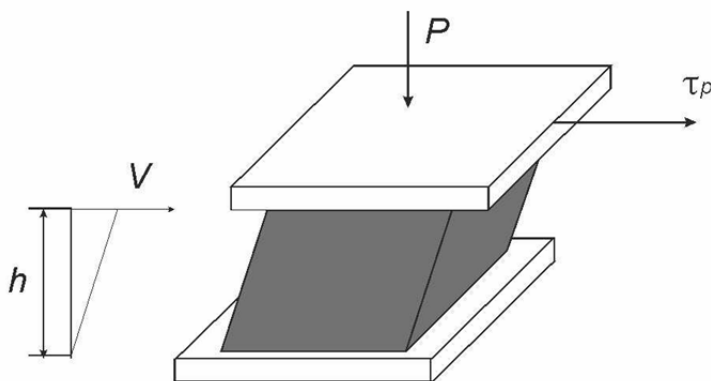


Рис. 2.25. Схема деформирования асфальтобетона при сдвиге

Статический предел текучести, соответствующий начальной (нулевой) скорости деформирования, оказывается выше у асфальтобетона типа «А» по сравнению с типом «Б», что и отражено в ГОСТ 9128-2009, где минимальный коэффициент внутреннего трения у асфальтобетона типа «А» равен 0,87, а у типа «Б» - 0,76. При высоких скоростях деформирования, соответствующих испытаниям образцов при одноосном сжатии в лаборатории, более высокое сопротивление сдвигу показывает асфальтобетон типа «Б» по сравнению с типом «А». Однако при малых скоростях деформирования, соответствующих условиям образования колеи в покрытии, наоборот, большим сопротивлением сдвигу характеризуется асфальтобетон типа «А» по сравнению с типом «Б».

Условия испытания асфальтобетона, такие как скорость деформирования, температура и напряженное состояние, определяют сопротивление сдвигу и величину пластической деформации. Поэтому при оценке сдвигоустойчивости необходимо применять методики испытаний асфальтобетонных образцов, соответствующие реальным условиям деформирования покрытия.

Реологические свойства горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона на основе различных модификаторов и адгезионных добавок (время релаксации θ , время ретардации τ , модуль упругости E , вязкость практически не разрушенной структуры η_m , коэффициент вязкой податливости λ), кинетические характеристики P_1 и P_2 определяли по методике, изложенной [20].

Время релаксации θ является важнейшим показателем свойств асфальтобетона. Чем меньше время релаксации, тем меньше жесткость асфальтобетона, что очень важно при низких температурах для повышения трещиностойкости дорожных покрытий. С другой стороны, чем больше время релаксации при высоких температурах, тем выше устойчивость асфальтобетона к образованию пластических деформаций. Время ретардации (время упругого последствия) τ также свидетельствует об упругих свойствах асфальтобетона. Вязкость практически не разрушенной структуры η_m показывает деформационную устойчивость асфальтобетона.

В основу вышеуказанной методики для изучения структурно-реологических свойств асфальтобетона положена модель Богуславского, приведенная на рис. 2.26 [20].

Для исследований были приготовлены образцы горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типов «А» и «Б», содержащего в качестве модифицирующих добавок синтетические каучуки типа СКД, СКС-30 АРКПН, СКС-30 АРКМ-15, СКС-30 АРКМ-27, термоэластопласт ДСТ 30-01, свойства которых приведены в первой главе. Содержание модификатора в вяжущем, в пересчете на сухое вещество (без учета пластификаторов и т.д.), находилось в количестве 2,0 - 3,0 % по массе. В качестве контрольных были исследованы образцы горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типов «А» и «Б» на основе битума БНД 60/90. Результаты исследования приведены в табл. 2.11-2.14.

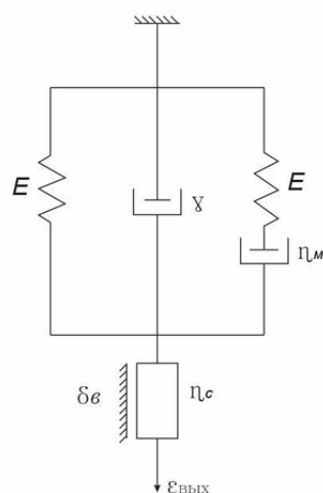


Рис. 2.26. Механическая модель асфальтобетона Богуславского

Таблица 2.11

Влияние синтетического каучука и термоэластопласта ДСТ на структурно-реологические свойства горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа «А»

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Температура испытания, °С	Структурно-реологические показатели				
		Время релаксации, сек.	Время ретардации, сек.	Коэффициент вязкости, ППа·с	Кинетические характеристики	Предел прочности при сжатии, МПа
СКД, 3 %	0	28600	20,98	10,57	0,0131	7,65
	50	21896	48,95	0,92	0,0306	1,30
СКД, 2,5 %	0	28600	27,97	9,45	0,0219	9,75
	50	18304	41,96	0,84	0,0378	1,50
СКД, 2,0 %	0	28600	34,97	7,77	0,0262	9,50
	50	10296	41,96	0,69	0,0341	0,95
СКС 30 АРКПН, 3 %	0	28600	34,97	8,83	0,0219	10,50
	50	16087	48,95	0,58	0,0622	1,15
СКС 30 АРКПН, 2,5 %	0	28600	23,98	22,04	0,0219	9,70
	50	12418	34,97	0,98	0,0219	1,20
СКС 30 АРКПН, 2 %	0	28600	20,98	17,65	0,0131	12,72
	50	8998	34,97	1,12	0,0219	1,05
СКС 30 АРКМ 27, 3 %	0	28600	27,97	12,01	0,0175	11,65
	50	21012	48,95	0,98	0,0416	1,20
СКС 30 АРКМ 27, 2,5 %	0	28600	13,99	22,48	0,0039	12,37
	50	19861	34,97	0,97	0,0219	1,75

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Температура испытания, °С	Структурно-реологические показатели				
		Время релаксации, сек.	Время ретардации, сек.	Коэффициент вязкости, тПа·с	Кинетические характеристики	Предел прочности при сжатии, МПа
СКС 30 АРКМ 27 2 %	0	28600	48,95	6,79	0,0306	11,57
	50	16012	48,95	0,79	0,0306	1,35
СКС 30 АРКМ 15, 3 %	0	28600	21,96	7,12	0,0262	10,35
	50	18980	41,96	1,11	0,0262	1,40
СКС 30 АРКМ 15 2,5 %	0	87587	27,97	26,16	0,0057	14,62
	50	14591	34,97	1,02	0,0600	1,30
СКС 30 АРКМ 15, 2 %	0	28600	20,98	16,09	0,0131	11,75
	50	16087	48,95	0,63	0,0622	1,25
ПБВ 60 ДСТ 30-01	0	28200	42,25	9,19	0,0383	9,55
	50	11654	92,20	0,40	0,1219	1,80
БНД 60/90 контрольный	0	32975	33,34	4,39	0,2128	11,62
	50	11015	56,34	0,4	0,0639	1,00

Таблица 2.12

Влияние поверхностно-активных веществ на структурно-реологические свойства горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа «А»

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Температура испытания, °С	Структурно-реологические показатели				
		Время релаксации, сек.	Время ретардации, сек.	Коэффициент вязкости, тПа·с	Кинетические характеристики	Предел прочности при сжатии, МПа
БНД 60/90 + Адгезол 1,5 %	0	34687	27,97	20,07	0,0112	13,40
	50	17301	48,95	0,42	0,0416	1,25
БНД 60/90+ «Мобит»*	0	29722	35,46	6,13	0,0383	9,75
	50	20865	49,30	0,62	0,0422	1,35
БНД 60/90 + Амдор	0	28877	48,01	3,79	0,0693	12,75
	50	21015	29,30	0,39	0,0898	1,30
ПБВ 60 + «Мобит»**	0	28400	39,30	4,29	0,0422	7,30
	50	16387	52,55	0,65	0,0388	1,60
БНД 60/90 + «Мобит»**	0	27375	35,46	13,55	0,0225	10,65
	50	12152	45,21	0,48	0,0346	1,00
БНД 60/90 контрольный	0	32975	33,34	4,39	0,2128	11,62
	50	11015	56,34	0,4	0,0639	1,00

Примечание: * - мобит в гелеобразном состоянии; ** - мобит в жидком состоянии.

Таблица 2.13

Влияние синтетического каучука и термоэластопласта ДСТ на структурно-реологические свойства горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа «Б»

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Температура испытания, °С	Структурно-реологические показатели				
		Время релаксации, сек.	Время ретардации, сек.	Коэффициент вязкости, тПа·с	Кинетические характеристики	Предел прочности при сжатии, МПа
БНД 60/90	0	27301	39,93	2,64	0,1187	6,35
	50	21896	55,94	0,45	0,393	1,00
СКД, 2,5 %	0	28600	20,98	16,02	0,0131	11,75
	50	14591	48,95	0,62	0,0600	1,50
СКС 30 АРКПН, 2,5 %	0	25740	16,99	17,91	0,0005	14,74
	50	19861	34,96	1,14	0,0378	1,40
СКС 30 АРКМ 27, 2,5 %	0	21012	25,94	3,99	0,0622	10,38
	50	14591	34,96	0,74	0,0600	1,50
СКС 30 АРКМ 15, 2,5 %	0	28600	28,95	7,82	0,0306	13,55
	50	21012	48,95	0,77	0,0416	1,55

Таблица 2.14

Влияние поверхностно-активных веществ на структурно-реологические свойства горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона типа «Б»

Наименование и содержание модификатора в вяжущем	Температура испытания, °С	Структурно-реологические показатели				
		Время релаксации, сек.	Время ретардации, сек.	Коэффициент вязкости, тПа·с	Кинетические характеристики	Предел прочности при сжатии, МПа
БНД 60/90 контрольный	0	27301	39,93	2,64	0,1187	6,35
	50	21896	55,94	0,45	0,393	1,00
БНД 60/90+Мобит	0	29861	31,96	4,57	0,0378	8,05
	50	19861	41,96	0,85	0,0378	1,50
БНД 60/90 + Амдор	0	28444	20,98	26,02	0,0047	11,45
	50	18600	48,95	0,85	0,0306	1,37
ПБВ 60 ДСТ 30-01	0	29444	20,98	16,47	0,0047	7,40
	50	21861	41,96	1,24	0,0378	1,82

Анализируя экспериментальные данные, представленные в табл. 2.10 и 2.11, было отмечено значительное возрастание упругих свойств асфальтобетона каркасной структуры и особенно в области повышенных температур. Так, показатель времени релаксации у модифицированного асфальтобетона значительно выше в сравнении с традиционным составом на битуме марки БНД 60/90 и во всем температурном интервале. Увеличение содержания модификатора в вяжущем приводит к значительному повышению вязкости и возрастанию упругих свойств асфальтобетона. Применение в качестве добавки в вяжущее различных ПАВ (см. табл. 2.12-2.13) не менее эффективно в сравнении с полимерными модификаторами положительно влияет на реологические показатели асфальтобетона.

Проведенный эксперимент подтверждает ранее сделанное предположение о положительном влиянии применения модификаторов и ПАВ в органическом вяжущем на сопротивление асфальтобетона сдвигу.

По современным воззрениям кинетику деформирования асфальтобетона от действия сдвигающих напряжений наиболее полно описывает реологическая модель, предложенная Кирюхиным Г.Н. для оценки деформаций асфальтобетонного покрытия [54].

В соответствии с принятой моделью (см. рис. 2.27), деформации в элементе Гука (I) и в элементе Кельвина (II) являются обратимыми, поэтому не влияют на величину остаточной деформации, характеризующую глубину колеи покрытия. При испытании асфальтобетона упруго-эластическую обратимую деформацию необходимо выделять из общей деформации ползучести. Присутствие в реологической модели элемента вязкопластичности (III), состоящего из параллельно соединенных вязкого плунжера и элемента Сен-Венана-Кулона, указывает на то, что необратимые деформации развиваются только при таких сдвигающих напряжениях, которые превышают статический предел текучести, определяемый по уравнению Кулона как произведение нормального напряжения на коэффициент внутреннего трения.

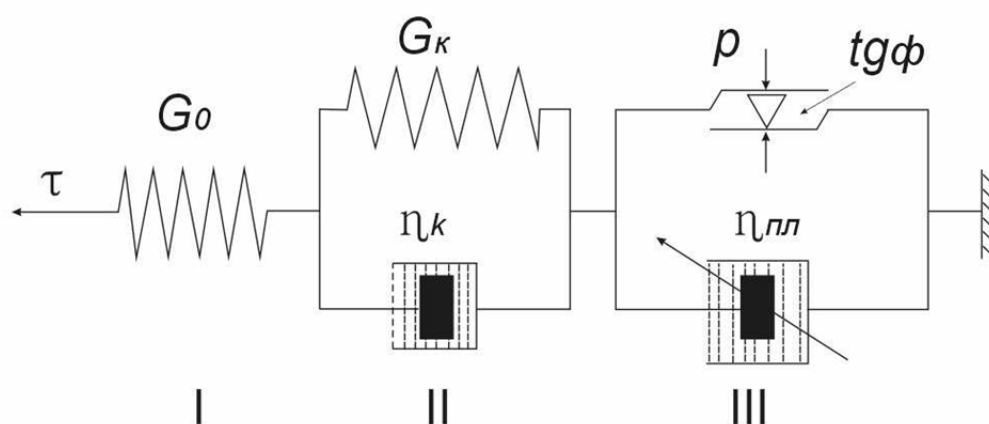


Рис. 2.27. Реологическая модель деформирования асфальтобетона при сдвиге в покрытии.

Скорость течения, характеризующая скорость накопления остаточной деформации, по Г.Н. Кирюхину, связана степенной зависимостью с величиной действующих напряжений. Пластическая вязкость η_{nl} является неньютоновской (эффективной), т.е. зависящей от скорости необратимой деформации, что отмечается стрелкой на плунжере.

Можно отметить, что результаты эксперимента находятся в соответствии с рассматриваемой реологической моделью асфальтобетона и введение ПАВ или полимерных модификаторов повышает влияние элемента вязкопластичности (III) и тем самым повышает статический предел текучести асфальтобетона и сдвигоустойчивость дорожного покрытия.

Контрольные вопросы

1. Назовите, что означает понятие структура асфальтобетона. Зависимость свойств асфальтобетона от его структуры?
2. Какие функции выполняют минеральные материалы – песок, минеральный порошок и щебень в асфальтобетоне?
3. Какие показатели асфальтобетона нормированы в ГОСТ 9128-2009?
4. Перечислите основные факторы разрушения асфальтобетона. Назовите, какую роль играет качество нефтяного дорожного битума в обеспечении долговечности асфальтобетона в дорожном покрытии?
5. Область применения, достоинства и недостатки горячих и холодных асфальтобетонов?
6. В чем заключается преимущество горячего модифицированного асфальтобетона от традиционного материала, приготовленного на вязких дорожных битумах?
7. Охарактеризуйте влияние климатических и эксплуатационных условий на работу асфальтобетона в дорожных конструкциях?
8. Каково влияние особенностей воздействия транспортных нагрузок на работу асфальтобетона в дорожном покрытии (на уклонах, в зоне торможения, влияние интенсивности и состава движения)?

ГЛАВА 3. УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ И КАЧЕСТВА РЕМОНТА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДНОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА

3.1. Применение в отечественном и зарубежном дорожном строительстве жидких вяжущих материалов и холодных асфальтобетонов на их основе

Вопросам строительства и ремонта дорожных покрытий из холодных асфальтобетонных смесей посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей: П.И. Перегуда, Ф.Н. Пантелеева, Н.И. Иванова, Ю.И. Калгина, Е.Н. Козловой, В.О. Гельмера, И.В. Королева, В.П. Лаврухина и многих других [20, 51, 60, 65, 67, 91, 92]. Большинство из них были направлены на улучшение качества холодных асфальтобетонных смесей, часть из которых была уже применена на производстве.

Впервые в СССР жидкие битумы были применены в 1928-1929 гг. для обработки грунтовых и гравийных дорог [87]. Первые работы по устройству асфальтовых дорожных покрытий, укладываемых в холодном состоянии, относятся к 1929-1931 гг. Указанную холодную смесь, состоящую из дробленого известняка и мягкого битума, укладывали на улицах Москвы и Ленинграда.

Уже первые работы показали, что асфальтобетонное покрытие из холодных смесей хорошо уплотняется даже при небольшой толщине (2-4 см), постепенно приобретает необходимую прочность, после формирования очень медленно изнашивается и не подвергается растрескиванию. Широкое опытное строительство с применением холодных смесей и различных классов жидких битумов началось в 1936 г. На основе полученного производственного опыта в конце 30-х годов под руководством А.И. Лысихиной разработаны «Временные технические условия на жидкие битумы» впоследствии – ГОСТ 1972-43 «Битумы нефтяные жидкие».

Авторы указанного документа, первоначально, не имели достаточной ясности в вопросе о роли свойств жидкого битума и минеральной части в вопросе формирования структуры холодного асфальтобетона. Позднее, в послевоенные годы, в результате исследований, проведенных в СоюзДорНИИ (А.И. Лысихина, Е.Н. Козлова, А.В. Волков, Л.Н. Ястребова и др.), были разработаны методы испытаний жидких битумов (ГОСТ 2400-51) и введен новый ГОСТ 1972-52 «Битумы нефтяные жидкие». После этого с применением указанных жидких битумов были построены сотни километров покрытий из холодного асфальтобетона.

В 60-х годах под руководством Михайлова В.В. и Колбановской А.С., вышеуказанный ГОСТ на жидкие битумы был пересмотрен и разработан новый ГОСТ 11955-66 «Битумы нефтяные дорожные жидкие улучшенные».

Исследования холодных асфальтобетонов, проведенные в 60-х годах в СоюзДорНИИ (П.И. Перегуд, Б.А. Козловский, Ф.К. Ломанов, Ф.Н. Пантелеев,

Е.Н. Козлова, М.Б. Сокольская и др.), позволили разработать ГОСТ 15147-69 «Смеси холодные асфальтобетонные дорожные. Технические требования». Для приготовления холодных асфальтобетонов было предложено применять три вида разжиженных битумов, полученных путем компаундирования вязкого битума с разжижителями определенного вида, быстрогустеющие, густеющие со средней скоростью и медленногустеющие. Минеральную часть холодных асфальтобетонов по вышеуказанным техническим требованиям проектировали из карбонатных пород с добавлением до 25 % песка или гравийных высевок.

На основе проведенных в «СоюзДорНИИ» исследований были разработаны рекомендации, которые применялись при устройстве покрытий из холодного асфальтобетона в разных дорожно-климатических зонах СССР.

В последующие годы коллективом сотрудников «СоюзДорНИИ», МАДИ и др. организаций был разработан ГОСТ 9128-76, который объединил требования к горячим, теплым и холодным асфальтобетонным смесям. Принципиальным положением нового стандарта, объединившего в одну группу все асфальтобетонные смеси, было разделены на четыре марки горячих и теплых смесей и две марки для холодных смесей. Гранулометрические составы минеральной части соответствующих типов горячих, холодных, теплых смесей были приняты едиными.

Вышеуказанный подход с внесением новых изменений был сохранен в последующих редакциях упомянутого ГОСТ, т.е. в ГОСТ 9128-84, ГОСТ 9128-97, ГОСТ 9128-2009.

Широкое распространение за рубежом холодный асфальтобетон получил в 60-х годах в США. Он значительно отличался от асфальтобетона, применяемого в то время в нашей стране: по характеру используемого вяжущего материала, а также по технологии приготовления и укладки смеси. В США в качестве вяжущего применяли быстрогустеющий жидкий битум, обеспечивающий быстрое формирование покрытия. Строительства которого применяли смесь, содержащую минеральные материалы мельче 5 мм: гашеную известь – 0,5 - 1,0 %, вязкий битум (с пенетрацией 80 - 100) – 7,0 % и быстро улетающий разжижитель (газолин) – 1,5 %. Для нижнего слоя применяли асфальтобетонную смесь с максимальным размером зерен 25 мм. Покрытие уплотнялось пневмокатками. Смесь формировалась в течение нескольких суток, но из-за быстрого испарения разжижителя такой асфальтобетон терял технологическую подвижность.

В Финляндии использовались асфальтобетонные смеси, приготавливаемые на основе жидких битумов марок В 330/430, В 500/650 или нефтяных вяжущих. Максимальный размер используемых зерен – 20 мм, содержание вяжущего находилось в пределах 3 - 4,5 % и зависело от гранулометрического состава смеси. Для улучшения сцепления битума с каменным материалом использовались адгезионные добавки. Качественное приготовление этих смесей осуществлялось в специальных мобильных установках МХ – 30С финской фирмы

«Калоттиконе», в которых отсутствует сушильный барабан, но имеется специальная емкость для эмульсии и турбоагрегат для производства пара.

В Бельгии холодные асфальтобетонные смеси готовят на основе жидких битумов, модифицированных протеином. Протеин, пластифицируя битум, одновременно улучшает его адгезию к минеральным материалам. Содержание протеина, выполняющего роль ПАВ, составляет 0,5 % к массе битума. Такие холодные смеси содержат дробленого щебня 50 %, песка 40 %, минерального порошка 10 % и 6,5 % вяжущего. Подобные смеси предназначены для длительного хранения и перевозки на большие расстояния [87].

В настоящее время в США используют холодные асфальтобетонные смеси, содержащие в своем составе специальное битумное вяжущее. Они получили название «Веспро-асфальт». Содержание модифицированного битума в смеси составляет 5,7 - 6,2 % по массе минеральной части. Технология применения «Веспро-асфальта» предусматривает очистку выбоины от мусора и обломков старого асфальтобетона. Холодную асфальтобетонную смесь укладывают в выбоину, а затем уплотняют легким трамбованием или под движением колес автомобиля. Однако стоимость такой смеси значительно превосходит традиционные холодные смеси, что не позволило ей получить широкое распространение.

Иногда, учитывая временный характер и не слишком высокое качество аварийного ремонта, умышленно идут на упрощение и удешевление как самого ремонтного материала, так и технологии его приготовления и применения. По такому пути пошла дорожная служба г. Хельсинки, которая уже более 20 лет ежегодно выпускает около 3000 т складированной холодной смеси для неотложного ремонта покрытий и временной заделки траншейных разрывов на городских улицах. В ее состав входят щебень до 8 мм, песок и битумная эмульсия (7 - 8 %). Готовят ремонтную смесь холодным способом в обычной бетономешалке периодического действия и складывают на открытой площадке. Перед использованием зимой смесь отогревается в теплом помещении.

В Польше для снижения температуры замерзания воды в состав эмульсии вводят хлористый кальций и синтетические волокна для уменьшения сроков формирования асфальтобетона.

В Германии выпуском холодного асфальтобетона занимается фирма «Romex». Смесь имеет следующий состав: щебень фр. до 5 мм – 65 %, дробленый песок – 24 %, тонкодисперсный наполнитель – 1 % и концентрат (65 кг на 1 тонну смеси). Концентрат представляет собой водную эмульсию, содержащую битум, ПАВ, разжижитель и полимер.

Однако, несмотря на широкое распространение холодных асфальтобетонных смесей на битумных эмульсиях, существуют страны, где считают что их использование, по технологическим причинам - рискованное и нецелесообразное мероприятие. Покрытие из холодного асфальтобетона на битумных эмульсиях окончательно формируется лишь после испарения из него воды. Замерзшая влага со временем разрушает асфальтобетон и может привести к его растрескиванию.

На основе значительного опыта применения сформировались требования к холодному асфальтобетону, которые заключаются в следующем:

1. Холодная асфальтобетонная смесь должна оставаться длительный срок времени (не менее 6 месяцев) в рыхлом виде, не слеживаясь в период хранения;
2. После укладки холодная смесь при температуре выше $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ должна быть способна уплотниться;
3. После уплотнения полученное асфальтобетонное покрытие должно обладать достаточной прочностью, теплоустойчивостью и водонепроницаемостью.

В условиях современного дорожного движения, когда резко повысилась интенсивность транспортного потока, значительно возросли осевые нагрузки грузовых автомобилей и доля автомобилей повышенной грузоподъемности, необходимо иметь высокие эксплуатационные характеристики асфальтобетонных покрытий. В этой связи сегодня назрела настоятельная необходимость в разработке новых составов холодных асфальтобетонных смесей, имеющих повышенные физико-механические свойства. Применяемые в настоящее время горячие технологии строительства и ремонта асфальтобетонных покрытий, автомобильных дорог являются источником загрязнения окружающей среды. Используемые при этом горячие асфальтобетонные смеси имеют ряд недостатков: склонность к старению, способность уплотняться только при температурах не менее 80°C , малая пластичность при температуре укладки менее 100°C , невозможность проведения работ при пониженных температурах окружающего воздуха. Видимо, будущее за органическими вяжущими материалами, способными обеспечить все требуемые характеристики асфальтобетона, но при его использовании в холодном виде.

Ремонт дорожного покрытия осуществляется различными методами, средствами и материалами, в совокупности определяющими качество, срок службы и стоимость ремонтных работ. Главная цель выполнения дорожно-ремонтных работ – обеспечение на эксплуатируемой дороге безопасного движения транспортных средств с разрешённой скоростью. Но зачастую виды и технологии работ по ремонту покрытия назначаются не исходя из необходимого перечня работ, а исходя из технологических возможностей дорожной организации. Это, в совокупности с применением недостаточного качества дорожно-строительных материалов, приводит к тому, что отремонтированные участки покрытий уже через 2 - 3 года, а иногда и через год требуют повторного ремонта.

Причин образования повреждений несколько, например, выбоины возникают из-за недостаточного сопротивления материала покрытия касательным усилиям от транспортных средств, выбивающих и выдергивающих из покрытия отдельные каменные частицы. В районах, в которых наблюдаются многократные переходы температуры воздуха в холодный период года через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, асфальтобетон работает в очень сложных условиях, что приводит к усталостному трещинообразованию. Наиболее часто появление трещин наблюдается на го-

родских дорогах и улицах, что обусловлено сложным напряженно-деформированным состоянием дорожной одежды в условиях бокового обжатия проезжей части бордюрами. Сами по себе трещины не оказывают существенного влияния на комфортность проезда по автомобильной дороге и практически не сказываются на скорости движения автомобилей. Однако их развитие приводит за счет проникания влаги в нижележащие слои и расшатывания структуры материалов конструктивных слоев под действием процессов замораживания - оттаивания к возникновению раскрытых трещин и выбоин.

Дорожно-ремонтные работы в России планируются и выполняются чаще всего весной с наступлением устойчивой теплой (не ниже +5 °С) и сухой погоды, хотя порой может возникать потребность в проведении и срочного внепланового ремонта практически в любое время года и при любых погодных условиях [3].

Выбор технологического способа ремонта асфальтобетонного покрытия должен отвечать следующим требованиям:

- 1) высокое качество заделки дефекта, соответствующее показателям плотности, прочности, ровности и шероховатости основной части покрытия;
- 2) продолжительный срок службы отремонтированного участка дорожного покрытия;
- 3) доступность требуемых дорожно-строительных материалов, машин и установок для выполнения ремонта по выбранной технологии;
- 4) сложность реализации намеченного способа ремонта в различных погодных условиях;
- 5) сроки закрытия и открытия движения транспорта по отремонтированному участку покрытия;
- 6) низкая стоимость дорожно-ремонтных работ из расчета на единицу площади покрытия, включающая затраты на дорожно-строительные материалы, а также стоимость эксплуатации машин и установок для выполнения ремонта по выбранной технологии.

Выбор того или иного метода и технологии ремонта асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог и мостов и др. дорожных сооружений должен определяться основной целью - достижением максимально-продолжительного времени службы отремонтированного покрытия.

Наиболее распространенной технологией ремонта асфальтобетонных покрытий является метод заделки выбоин и других дефектов горячей плотной асфальтобетонной смесью, известный как метод ямочного ремонта. Распространённость его объясняется широкой сетью имеющихся у дорожных организаций асфальто-смесительных установок, доступностью традиционных исходных материалов (щебень, песок, минеральный порошок, вязкий дорожный битум) для приготовления горячих асфальтобетонных смесей и значительным опытом выполнения подобных работ.

Подготовка ремонтируемого места покрытия горячей асфальтобетонной смесью включает в себя следующие операции:

- 1) очистку поверхности дороги от пыли, грязи и влаги;
- 2) разметку границ ремонта выбоин прямыми линиями вдоль и поперек оси дороги с захватом неразрушенного слоя покрытия на 3–5 см, при этом несколько близко расположенных выбоин объединяют одним контуром или картой;
- 3) вырезку, вырубку или холодное фрезерование материала ремонтируемого места покрытия по очерченному контуру на всю глубину выбоины, но не менее толщины слоя покрытия, при этом боковые стенки должны быть вертикальными;
- 4) очистку дна и стенок места ремонта от мелких кусков, крошки, пыли, грязи и влаги;
- 5) обработку дна и стенок тонким слоем жидкого (горячего) или разжиженного битума или битумосодержащей эмульсии.

При использовании ремонтного материала, полученного по холодным технологиям, подготовка выбоины к ремонту сводится фактически только к тщательной ее очистке от пыли, мусора и влаги путем продувки высокоскоростной струей воздуха и обработке поверхности выбоины битумной эмульсией. Операция обрезки или фрезерования асфальтобетона вокруг выбоины по технологии может не производиться.

Низкое качество и малые сроки службы отремонтированных горячей смесью участков покрытия объясняются прежде всего недостаточной подготовкой дефектных участков к последующему ремонту, остыванием горячей смеси по причине её транспортировки в не приспособленных для сохранения тепла транспортных средствах, что приводит к чрезмерному остыванию асфальтобетонной смеси к моменту её использования, низкому качеству уплотнения асфальтобетонной смеси и другим нарушениями правил и технологий ведения дорожно-ремонтных работ (укладка смеси на мокрую поверхность, без требуемой подгрунтовки ремонтной ниши и т.д.).

При использовании горячей технологии качество ямочного ремонта покрытия сильно подвержено влиянию погодных условий. Значительно в меньшей степени такое влияние сказывается при применении для ремонта покрытия холодных асфальтобетонных смесей и материалов на основе жидких или разжиженных битумов (например, органо-минеральных смесей). В этом случае ремонт можно вести не только по мокрой поверхности покрытия, но даже и при небольших отрицательных температурах воздуха (до -5... -10 °С), хотя для качества работ более предпочтительны положительные температуры.

Рассматривая горячую и холодную технологию ремонта асфальтобетонных покрытий, следует отметить, что прочность и водостойкость традиционного холодного асфальтобетона, приготовленного на жидком или разжиженном битуме, значительно ниже, чем горячего, а для формирования структуры требуется больше время. Наиболее перспективными и экономически выгодными представляются холодные технологии, позволяющие проводить ремонт дорожного покрытия в течение года с использованием холодных асфальтобетонных сме-

сей, способных обеспечить проведение круглогодичного ремонта дорожных покрытий. Таким образом, применение холодных асфальтобетонных смесей для ремонта дорожных покрытий является одной из реальных альтернатив традиционному способу использования для ямочного ремонта горячих асфальтобетонных смесей. Для приготовления смесей по такой технологии необходимо использовать жидкие модифицированные нефтяные битумы.

3.2. Структура и свойства традиционного холодного асфальтобетона на основе разжиженных вязких битумов и пути повышения его качества

Известно, что холодный асфальтобетон является искусственным строительным материалом конгломератной структуры, состоящим из смеси зернистых минеральных материалов, объединенных жидким битумным вяжущим, полученным разжижением вязких нефтяных битумов различными растворителями. Холодный асфальтобетон является одним из наиболее сложных строительных материалов. Это обусловлено не столько значительным количеством входящих в его состав компонентов, сколько сложностью физико-химических процессов, происходящих при их объединении.

Ранее проведенные исследования показали, что холодный асфальтобетон относится к материалам с коагуляционной структурой и ярко выраженными вязкопластическими свойствами [51]. Последнее обусловлено тем, что сцепление частиц в коагуляционных структурах осуществляется через тонкие прослойки жидкой среды. Прямые контакты между твердыми частицами минерального остова отсутствуют, и слабые межмолекулярные силы сцепления обуславливают прочность всего материала. Следовательно, толщина структурированных битумных пленок и её свойства являются определяющими. Поэтому взаимодействие жидкого битума с поверхностью минеральной части является одним из главных факторов, определяющих свойства холодного асфальтобетона.

Н.Н. Иванов установил, что прочность асфальтобетона определяется сцеплением его частиц между собой и внутренним трением между ними [83]. Сопротивление трению определяется крупностью зерен минеральной части, степенью их окатанности и однородности. С повышением содержания в асфальтобетонных смесях одноразмерных частиц сопротивление трению увеличивается и уменьшается при разноразмерных.

Исследования, проводимые под руководством Н.Н. Иванова, показали, что угол внутреннего трения изменяется очень мало в зависимости от температуры и несколько больше от количества вяжущего в смеси [41, 42, 43]. С точки зрения прочности и теплоустойчивости холодного асфальтобетона сцепление его частиц между собой представляет больший интерес, чем угол внутреннего трения. Сцепление частиц асфальтобетона зависит главным образом от вязкости битума, его когезии и адгезии к минеральным материалам. Для приготовления традиционных холодных смесей применяют жидкие битумы по ГОСТ 11955-82,

отличающиеся вследствие малой вязкости и наличия растворителя малой величиной когезии. К тому же применяемые для приготовления жидкого битума вязкие окисленные битумы марок БН и БНД по ГОСТ 22245-90, как правило, характеризуются недостаточными адгезионными свойствами. Наличие разжижителя значительно снижает и без того недостаточное сцепление вязкого исходного битума с минеральной поверхностью. К тому же приготовление холодных смесей происходит при более низких температурах в сравнении с горячими асфальтобетонными смесями, что также влияет на величину адгезионных свойств жидкого битума к минеральным материалам. Таким образом, низкие адгезионные и когезионные свойства жидких битумов приводят к низкой прочности, водостойкости и недостаточной устойчивости холодного асфальтобетона при высоких положительных температурах.

Улучшение гранулометрического состава холодных смесей, повышение количества минерального порошка незначительно улучшают вышеуказанные свойства холодного асфальтобетона. И даже наоборот, чрезмерное количество минерального порошка приводит к формированию очень тонких пленок, которые по мере увеличения вязкости жидкого битума в процессе эксплуатации за счет испарения разжижителя ещё более истончаются, что приводит к ускоренному старению дорожного покрытия. Подвергаясь воздействию климатических факторов, через 3-4 года эксплуатации в покрытии очень тонкие битумные пленки в холодном асфальтобетоне становятся хрупкими, интенсивно стареют, что приводит к накоплению деформаций и преждевременному разрушению покрытий. По указанной причине значительная часть покрытий из холодного асфальтобетона, устроенных в 60–70-х годах, была преждевременно разрушена, что привело к сокращению объема применения холодных смесей при устройстве асфальтобетонных покрытий.

Таким образом, вследствие применения жидких битумов недостаточного качества в традиционном холодном асфальтобетоне при повышенных температурах сцепление резко снижается и покрытие с его применением приобретает повышенную деформационную текучесть, теряя при этом устойчивость. Потеря устойчивости ведет к значительным пластическим деформациям на покрытии в виде волн, колеиности и др. Процесс разрушения покрытия усиливается интенсивным старением холодного асфальтобетона вследствие чрезмерно тонких битумных пленок.

Задача повышения качества холодного асфальтобетона, таким образом, состоит в том, чтобы для приготовления холодного асфальтобетона применять жидкие органические вяжущие, которые позволили бы сохранить все признаки холодных асфальтобетонных смесей, но при этом бы обеспечили более стабильное сцепление частиц в асфальтобетоне и более толстые пленки на зернах.

Исходя из вышесказанного для увеличения объема применения холодных асфальтобетонных смесей необходимо решение следующих задач:

- повысить прочность и теплоустойчивость холодного асфальтобетона;

- улучшить коррозионную стойкость (водостойкость) за счет повышения адгезионных свойств жидких битумов;
- сократить время формирования структуры уплотненного слоя из холодного асфальтобетона и уменьшить количество испаряемого разжижителя.

Решение вышеуказанных задач невозможно при применении традиционных окисленных битумов. Объёмы производства окисленных битумов марок БН и БНД по ГОСТ 22245-90 составляют наиболее значительную часть от объема всех дорожных битумов. По данным «Росдорконтроль» Росавтодора (Федерального дорожного агентства) значительная часть получаемых на нефтеперерабатывающих заводах окисленных битумов-невысокого качества, как правило, по причине применяемой технологии производства [51, 81].

Таким образом, применяемые в настоящее время традиционные технологии получения окисленных битумов на нефтеперерабатывающих заводах России не позволяют обеспечивать массовое производство жидких битумов с необходимыми характеристиками качества. Основным направлением получения высококачественных вяжущих является модификация жидких нефтяных битумов, которая позволит обеспечить требуемые характеристики жидкого вяжущего, необходимую сдвигоустойчивость, трещиностойкость и износостойкость холодного асфальтобетона.

Для направленного изменения структуры и свойств холодного асфальтобетона необходимо применять жидкие вяжущие, содержащие структурообразующие и поверхностно-активные добавки. Как показывают исследования [51], особенно высокий эффект наблюдается при применении полимерных добавок. Битумы с добавками полимеров являются вяжущими нового поколения и относятся к комплексным органическим вяжущим. Для модификации жидких битумов необходима разработка способа, позволяющего не только ввести полимер в жидкий битум, но и получить вяжущее с необходимой условной вязкостью.

В настоящее время в дорожном строительстве применяются способы приготовления жидкого битума путем разжижителя вязких битумов различными разжижителями – лигроином, керосином, соляровым маслом, мазутом и др. Технологический процесс приготовления жидкого битума состоит из следующих операций:

- нагрев вязкого битума в битумном котле, снабженном системой обогрева до температуры 100 °С для получения жидких битумов класса БГ и 120 °С для классов СГ и МГ;
- подача разжижителя в котел и перемешивание его с вязким битумом в соответствующих пропорциях при помощи циркуляции и др. способами;
- выдача готового жидкого битума.

Вводя в указанный технологический процесс изменение в виде замены разжижителя на раствор полимера, можно получить жидкое битумно-полимерное вяжущее с условной вязкостью, соответствующее маркам традиционных жидких битумов, но отличающееся улучшенными свойствами вследствие присутствия полимера. Полимерная добавка, вводимая в битум в виде

раствора, позволит улучшить физико-механические свойства холодного асфальтобетона, а применяемый при приготовлении раствора полимера разжижитель-получить жидкий битум с необходимой вязкостью. Указанный способ не предусматривает дополнительного применения растворителя для разжижения вязкого битума. Однако главным вопросом в реализации указанного способа улучшения свойств жидкого битума является правильный выбор полимерного модификатора.

Условия эксплуатации нефтяных битумов в дорожных покрытиях, а также ранее разработанные теоретические положения [51] позволили сформулировать следующие требования к высокомолекулярным соединениям, предназначенным для модификации жидких битумов:

- полимер должен быстро и полностью растворяться до молекулярного уровня в дисперсионной среде нефтяного битума;
- макромолекулы полимера должны обладать склонностью к ассоциации и при определенном содержании в битуме образовывать пространственную структурную сетку;
- полимер должен образовывать в битуме такую структурную сетку, которая была бы устойчива к деструкции при технологических воздействиях в процессе приготовления асфальтобетонных смесей и дальнейшей эксплуатации асфальтобетона в покрытии;
- способ модификации битума, определяемый индивидуальными особенностями конкретного класса полимера, должен отвечать всем критериям технико-экономической эффективности.

Из вышеперечисленных классов полимеров (см. гл.2) предъявленным требованиям в наибольшей степени удовлетворяют эластомеры и термоэластопласты, поэтому в настоящее время они имеют наибольшее применение для улучшения свойств вязких дорожных битумов. Полимеры приведённые во 2 главе являются наиболее подходящими и для модификации жидких битумов.

Каков же механизм влияния полимеров на структуру и свойства жидкого битума, рассмотрим современные представления о структуре жидких нефтяных битумов.

В отношении разжиженных нефтяных битумов вопросы их структурообразования, а также зависимости свойств от структурообразующих факторов исследованы недостаточно. Современные представления о направленном структурообразовании жидких битумов базируются на исследованиях, проведенных в 60-70-х годах А.С Колбановской, В.В. Михайловым и др. исследователями.

Согласно А.С. Колбановской [57], введение небольшого количества разжижителя в битум I структурного типа с коагуляционным каркасом из асфальтенов приводит к частичной пластификации межкаркасной дисперсионной среды. Однако этого количества разжижителя недостаточно, чтобы нарушить взаимодействие между асфальтенами и, следовательно, привести к разрушению асфальтенового каркаса. При увеличении концентрации разжижителя в указанном типе битума происходит разрушение структурного каркаса асфальтенов,

что сопровождается резким снижением вязкости, и дальнейшее повышение количества разжижителя превращает битум в разбавленную суспензию асфальтенов.

В битуме III структурного типа происходят аналогичные вышеуказанному явления. Отличие заключается в смещении процесса превращения битума в разбавленную суспензию в сторону меньших концентраций разжижителя. У битума II типа введение небольшого количества разжижителя приводит к разжижению дисперсионной среды, быстрому снижению вязкости и при увеличении концентрации разжижителя превращению битума в разбавленную суспензию асфальтенов. Таким образом, влияние разжижителя на структуру свойства битума в основном определяется структурным типом битума и концентрацией разжижителя. Ключ к пониманию структуры разжиженного нефтяного битума предоставляет теория ассоциации полимеров [4, 36], согласно которой ассоциаты отсутствуют в предельно разбавленных системах. С возрастанием концентрации и понижением температуры возникновение ассоциатов неизбежно, при этом на степень ассоциации, кроме концентрации и температуры, оказывает влияние химическое строение структурных единиц, их молекулярная масса, а также химическая природа растворителя.

Процессы структурообразования разжиженных битумов в покрытии из холодного асфальтобетона связаны с удалением разжижителя путем частичного испарения легких фракций разжижителя, диффузии компонентов жидкого битума в поры минерального материала и последующим изменением структуры битума в процессе термоокислительного старения. Исследованиями А.С. Колбановской установлено, что испарение разжижителя более интенсивно происходит в битумах I, затем III и II типа. В битумах II и III типов дисперсных структур остается около 2 % разжижителя, даже при длительном выдерживании в термокамере. Из битума I типа испаряется больше легких фракций, чем было введено при его разжижении [57].

Структурообразование в жидких битумах в значительной мере определяется фракционным и углеводородным составом разжижителя, а также, как было сказано ранее, дисперсной структурой вязкого исходного битума. По А.С. Колбановской, процессы структурообразования в жидких битумах проходят в три стадии. На первой стадии испаряется разжижитель (до 70 %) из дисперсионной среды битума, при этом скорость испарения зависит от структурного типа битума и фракционного состава разжижителя. На второй стадии продолжается улетучивание разжижителя, но с гораздо меньшей скоростью. При этом разрозненные асфальтены в битумах I и III типа агрегируются с развитием элементов структурного каркаса. В конце этого этапа структура несколько приближается к структуре вязкого исходного битума и, по А.С. Колбановской, не зависит от вида разжижителя. На третьей стадии процесс структурообразования связан с изменениями в битуме под влиянием термоокислительных воздействий. При этом для битумов I типа, содержащих много легколетучих фракций, характерно продолжение процесса испарения разжижителя и легких фракций битума, что

усиливает степень формирования асфальтенового каркаса. Напротив, у битумов III и II типа происходят процессы старения за счет процесса окислительной полимеризации и конденсации.

На всех этапах формирования структуры жидких битумов в холодном асфальтобетоне происходят процессы образования адгезионных связей с минеральной поверхностью, устойчивость которых зависит от многих факторов. Известно, что связи, возникающие при контакте битума с поверхностью минеральных материалов, определяются термодинамическими условиями, образующимися в зоне контакта поверхностей смешиваемых материалов. Главный недостаток жидких битумов – слабые молекулярные силы в зоне контакта с минеральной поверхностью. За счет невысокой вязкости жидкие битумы в достаточной мере обволакивают поверхности минеральных частиц в процессе приготовления холодных асфальтобетонных смесей. Однако образуемая на зернах битумная пленка со временем оказывается слишком тонкой, непрочной. Более устойчивая адгезионная связь жидкого битума с минеральным материалом может быть обеспечена при использовании добавок ПАВ. Участвуя в процессе взаимодействия жидкого битума с минеральным материалом, ПАВы облегчают смачивание и растекание жидкого битума по их поверхности, что является необходимым условием хорошего сцепления. Однако наряду с улучшением смачивания и обволакивания для обеспечения надежных связей жидких битумов с минеральной поверхностью требуется повышение прочности тонкого слоя битумной пленки. Добавки полимеров, соединений, имеющих очень высокий молекулярный вес, повышают вязкость среды и создают условия для получения более прочной битумной пленки. Вероятно, положительный максимальный эффект будет при совместном применении добавок полимеров и ПАВ. При этом очень важным условием будет совместимость полимера и ПАВ.

Кроме вышесказанного следует отметить еще один существенный недостаток жидких битумов. В разжиженных нефтяных битумах вследствие ослабленной сетки асфальтенов наблюдается ухудшение теплоустойчивости. Компенсировать снижение теплоустойчивости способна полимерная сетка. Полимеры, в особенности класса эластомеров (синтетические и натуральные каучуки), имеют в силу своего специфического строения огромную молекулярную массу и обладают способностью образовывать ассоциаты в разбавленных системах. Выступая в роли структурирующего компонента в жидком битуме, полимерная сетка при повышенных температурах за счет адсорбции растворителя и мальтеновой части битума позволит повысить теплоустойчивость холодного асфальтобетона, а также сократить процесс структурообразования. Вероятно, что вследствие наличия полимера три вышеуказанных стадии структурообразования жидкого битума не будут столь резко обозначены. Процесс испарения разжижителя на первом этапе структурообразования жидкого битума, содержащего полимерную добавку, будет менее интенсивным в сравнении с традиционным разжиженным битумом. При сохранении легких фракций битума и разжижителя процессы термоокислительной деструкции будут замедлены, что позволит повысить долговечность холод-

ного асфальтобетона.

При хранении и применении холодного асфальтобетона при пониженных температурах полимерная добавка, являясь межструктурным пластификатором и отдавая связанный разжижитель, позволит обеспечить высокую подвижность, удобоукладываемость и неслёживаемость холодной асфальтобетонной смеси.

Присутствие полимера в жидком битуме, предназначенном для приготовления холодных смесей, позволит усовершенствовать технологию дорожных работ с применением холодных смесей. Высокая пластифицирующая способность жидких битумно-полимерных вяжущих позволит устраивать покрытия и проводить ремонт с применением холодных смесей при температурах до 0°C.

Проведенный теоретический анализ показывает, что получение холодной асфальтобетонной смеси, характеризующейся повышенной удобоукладываемостью и минимальной слеживаемостью, и после её укладки обеспечение формирования асфальтобетонного покрытия, обладающего повышенной теплостойкостью и усталостной долговечностью, может быть достигнуто путем применения полимерных добавок в жидком нефтяном битуме, предназначенном для приготовления холодной смеси.

3.3. Закономерности изменения эксплуатационного состояния и прогноз срока службы холодного асфальтобетона в дорожном покрытии с учётом неравномерности приложения транспортной нагрузки и реологических свойств материала

Эксплуатация асфальтобетонных покрытий в настоящее время требует значительных финансовых затрат, в первую очередь связанных с недостаточной надежностью покрытий и связанной с этим необходимостью проведения дорожно-ремонтных работ. Известно [6, 28, 92], что надежность есть свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени в определенных режимах и условиях эксплуатации. Для асфальтобетонного покрытия «надежностью» является безотказная работа в течение заданного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации. При этом рассматривают два основных механизма отказа: случайный (внезапный) и износостойкий (усталостный). Случайный отказ может наступить при непредвиденном проходе сверхнормативных нагрузок, стихийных природных явлениях и др. Более распространенный износостойкий отказ определяется явлениями усталости, т.е. постепенного снижения прочности материала во времени.

Асфальтобетон в покрытии работает в сложном напряженном состоянии. Поэтому при оценке усталостной долговечности следует рассматривать те воздействия, которые имеют место в процессе работы асфальтобетона, и при этом в режиме, наиболее близко отвечающим реальным эксплуатационным условиям [8, 9, 20, 27, 44, 45, 91, 92].

Многолетние исследования, проведенные в ГП «РосдорНИИ» под руководством д.т.н. А.В. Руденского, показали, что режимом испытания асфальтобетона, наиболее близко имитирующим реальные условия работы материала в условиях воздействия на асфальтобетонное покрытие автотранспортной нагрузки, является испытание на усталость при циклическом динамическом изгибе [91, 92].

Известно, что чем больше действующие напряжения, тем быстрее протекают процессы разрушения. Таким образом, при заданном напряжении усталость асфальтобетона определяет время, в течение которого покрытие может выдерживать заданное напряжение без разрушения. Соответственно, динамическую усталость при циклически действующих нагрузках определяют числом циклов, которое выдерживает материал до разрушения. Указанное испытание проводят с материалом как в сухом, так и в водонасыщенном состоянии. Причем в последнем случае оценка долговечности является наиболее достоверной, т.к. основным фактором, приводящим к разрушению асфальтобетона, является воздействие на материал гидродинамических импульсных напряжений в заполняющей поры асфальтобетона воде, вызванных циклическими воздействиями на покрытие движущимся автомобильным транспортом [92].

Расчетная продолжительность одного цикла действия нагрузки в этом режиме составляет около 0,02 с, что соответствует режиму нагружения дорожного покрытия при проезде автомобиля со скоростью 60 км/час [92].

Чем выше скорость автомобиля, тем позже возникает ответная реакция в дорожном покрытии. Исследованиями Е.В. Угловой, О.В. Дровалёвой, Ф.В. Матвиенко [70] процесса деформирования нежестких дорожных одежд, результаты которых отображены на рис. 3.1-3.3, установлены следующие характеристики деформирования асфальтобетона в дорожном покрытии:

- амплитуда прогиба покрытия дорожной одежды капитального типа (толщина асфальтобетонного покрытия 18-25 см) под нагрузкой 100-130 кН не превышает 0,1 - 0,15 мм;

- максимальная амплитуда прогиба покрытия дорожной одежды составляет 0,35 мм при скорости грузового автомобиля 60 км/ч, и соответственно 0,1 - 0,15 мм при скорости 120 км/ч;

- при заполнении двух смежных полос покрытия дорожной одежды капитального типа грузовыми автомобилями с расчетной нагрузкой 100 кН образуется сложная чаша прогиба с амплитудой до 0,4 мм;

- частота нагружения покрытия при проезде двухосного грузового автомобиля составляет 20-35 Гц, пятиосного автопоезда 15 - 65 Гц.

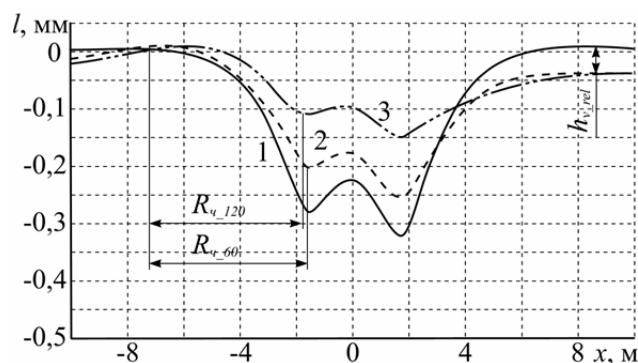


Рис. 3.1. Графики прогиба покрытия под транспортным средством с нагрузкой 140 кН при различных скоростях движения:

1 – в статике, 2 – со скоростью 60 км/ч; 3 – со скоростью 120 км/ч

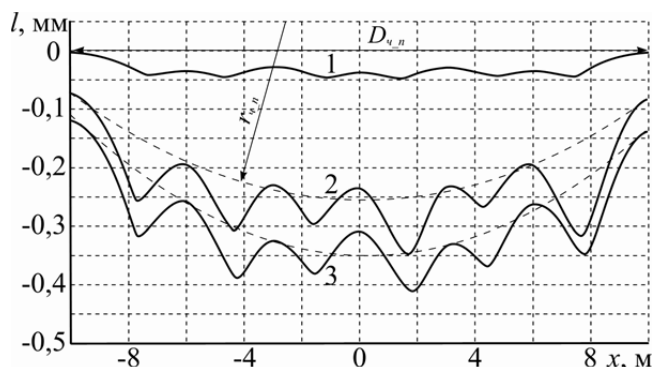


Рис. 3.2. Величина прогиба покрытия от транспортных средств:

1 - полоса движения, заполненная легковыми автомобилями; 2 - полоса движения, заполненная автомобилями с расчетной нагрузкой; 3 - обе полосы движения, заполненные автомобилями с расчетной нагрузкой

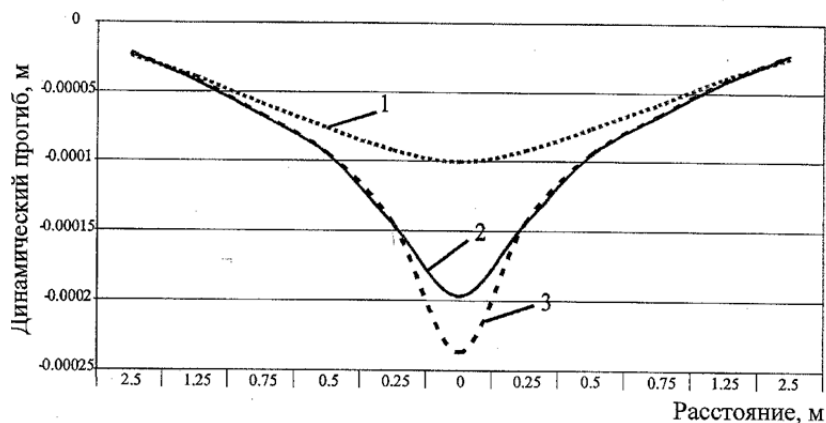


Рис. 3.3. Чаша максимальных динамических прогибов дорожной одежды капитального типа при действии транспортной нагрузки:

1 – на границе основание – грунт земляного полотна; 2 – на границе покрытия основания; 3 – на поверхности покрытия.

Для экспериментального исследования усталостной долговечности холодного модифицированного асфальтобетона на лабораторной установке циклического нагружения были определены условия испытания, моделирующие эксплуатационные режимы эксплуатации покрытия: температура +20 °С, частота нагружения 50 Гц, нагружение образца в режиме постоянной амплитуды про-

гиба величиной от минимального до максимального значения - 0,23; 0,35; 0,50 мм.

В соответствии с вышеуказанными условиями были проведены испытания асфальтобетонных образцов-балочек размером 16x4x2,5 см воздействием циклически прилагаемой нагрузки. Для испытаний были приготовлены образцы холодного асфальтобетона типа Г_х одинакового гранулометрического состава (приведенного в табл. 2.1), но на основе различных вяжущих. Всего было приготовлено три холодных асфальтобетонных смеси. Одна контрольная приготовлена на традиционном жидком битуме СГ 130/200, полученном путём разжижения керосином вязкого битума марки БНД 60/90. Остальные холодные асфальтобетонные смеси были на жидком модифицированном битуме СГ 130/200. В качестве модификаторов, полученных в ОАО «Воронежсинтезкаучук», использованы синтетический стирольный каучук СКС30 АРКМ15 и термоэластопласт ДСТ 30-01. Модификаторы были предварительно растворены в керосине, а затем полученным раствором полимера был разжижен вязкий битум марки БНД 60/90. Содержание модификатора в жидком вяжущем марки СГ 130/200 составляло 4 % по массе в пересчете на сухое вещество. Условная вязкость всех жидких вяжущих перед приготовлением асфальтобетонных смесей была одинакова. В жидком битумно-полимерном вяжущем в качестве адгезионной добавки дополнительно применялся «Мобит» в количестве 1,5 % по массе. Условная вязкость всех вяжущих перед приготовлением холодных смесей была одинакова.

Таблица 3.1

Зерновой состав холодной асфальтобетонной смеси типа Г_х

	Размер зерен, мм, мельче										
	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	< 0.071
Частный остаток	0	0	0	10	15	20	15	12	8	11	9
Полный остаток	0	0	0	10	25	45	60	72	80	91	-
Полный проход	100	100	100	90	75	55	40	28	20	9	-
ГОСТ 9128-2009 для а/б смеси типа Г _х	-	-	-	80-100	62-82	40-68	25-55	18-43	14-30	12-20	-

Показатели физико-механических свойств по ГОСТ 9128-2009, исследованных на усталостную долговечность холодных асфальтобетонов, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Физико-механические показатели модифицированного холодного
асфальтобетона типа Г_х

Наименование показателей	Норма по ГОСТ 9128 для типа Г _х	Применяемое вяжущее		
		Жидкий битум СГ 130/200	Жидкое БПВ на основе ДСТ 30-01	Жидкое БПВ на основе СКС- 30 АРКМ 15
Средняя плотность, г/см ³	Не норм	2,34	2,34	2,36
Водонасыщение, %:	От 5 до 9			
до прогрева		5,2	5,0	4,8
после прогрева		4,5	3,5	4,1
Слеживаемость	Не более 10	8	3	9
Набухание, %:	Не норм.			
до прогрева		0,8	0,7	0,8
после прогрева		0,5	0,2	0,3
Предел прочности при сжатии при t = 20 °С, МПа,	Не менее			
до прогрева:				
- сухих	1,5	1,5	1,58	1,82
- водонасыщенных	1,1	1,2	1,28	1,66
- после длит. водонасыщения	0,8	0,88	1,06	1,36
после прогрева:				
- сухих	1,8	1,73	1,90	2,02
- водонасыщенных	1,6	1,56	1,69	2,04
- после длит. водонасыщения	1,3	1,03	1,42	1,37
Предел прочности при сжатии t= 50°С, МПа:	Не норм.			
до прогрева		0,35	0,56	0,8
после прогрева		0,45	0,87	0,95

Результаты испытаний холодных асфальтобетонов вышеуказанного состава при циклическом нагружении до разрушения приведены в табл. 3.3.

Усталостная долговечность холодного модифицированного и традиционного асфальтобетона

Применяемое вяжущее (наименование модификатора в жидком вяжущем)	Число циклов нагружения до разрушения образца при амплитуде прогиба, мм		
	0,50	0,35	0,23
Асфальтобетонные образцы, испытанные в сухом состоянии			
Жидкий битум СГ 130/200	8034	21874	61510
Жидкий модифицированный битум СГ 130/200 (ДСТ 30-01)	10782	29078	81707
Жидкий модифицированный битум СГ 130/200 (СКС30 АРКМ15)	11312	32116	80695
Асфальтобетонные образцы, испытанные в водонасыщенном состоянии			
Жидкий битум СГ 130/200	4558	12567	35611
Жидкий модифицированный битум СГ 130/200 (ДСТ 30-01)	6180	16164	47502
Жидкий модифицированный битум СГ 130/200 (СКС30 АРКМ 15)	6086	17828	45883

Наличие воды в порах холодного асфальтобетона снижает его усталостную долговечность. Об этом свидетельствуют результаты испытания водонасыщенных образцов. Так, показатель для всех трех составов смесей в среднем в 1,7-1,8 раз меньше усталостной долговечности образцов, испытанных в сухом состоянии. Исходя из полученных данных, коэффициент усталости для всех трёх составов смесей определен равным 0,45.

На основании проведенных экспериментальных исследований усталостной долговечности холодного асфальтобетона с применением полимерных добавок и без них можно сделать следующие выводы:

1. Применение модифицирующих добавок ДСТ и СКС повышает усталостную долговечность холодного асфальтобетона в 1,35 ÷ 1,4 раза;
2. Положительное влияние полимерных добавок установлено как в сухом, так и водонасыщенном состоянии;
3. В наибольшей степени повышает усталостную долговечность и физико-механические свойства холодного асфальтобетона применение синтетического каучука типа СКС.

В целом результаты проведённого эксперимента показали небольшой срок эксплуатации холодного асфальтобетона при непрерывном циклическом нагружении.

Проведенный эксперимент позволяет судить об усталостной долговечности холодного традиционного и модифицированного асфальтобетона при циклическом непрерывном действии транспортных нагрузок, но полученных результатов недостаточно для определения срока службы отремонтированного участка покрытия.

По экспериментальным данным, описывающим 6 серий экспериментов (см. табл. 3.3), предлагается построить единую количественную характеристику, описывающую «усталостную долговечность» холодного асфальтобетона при действии транспортной нагрузки в дорожном покрытии.

Эта характеристика должна связать некоторой функциональной зависимостью длительную прочность R испытываемых образцов, а также количество циклов нагружения (N) асфальтобетонных образцов до их разрушения и амплитуды прогиба (M) в отдельном испытании (одинаковые во всех испытаниях каждой серии).

При этом можно исходить из положения о накоплении разрушительной энергии (приводящей к образованию остаточной деформации) испытываемым материалом: в серии из N однотипных нагружений эта энергия в N раз больше аналогичной энергии, связанной с одиночным нагружением. В рамках такого положения разрушение образца происходит при превышении накопленной энергией некоторой критической величины, которую называют длительной прочностью.

Анализ экспериментальных данных описывается следующей зависимостью:

$$R = N \exp(\alpha M), \quad (3.1)$$

где α - некоторый числовой параметр, определяемый свойствами изучаемого материала.

Поясним естественность выбора такой формы предлагаемой зависимости. Дело в том, что рассмотрение вместо числа нагружений N логарифма этой величины (с сохранением неизменными амплитуд деформаций) приводит фактически к прямолинейному расположению экспериментальных точек для всех шести серий (рис. 3.4).

Заметим, что в процессе изучения экспериментальных данных рассматривались и другие модельные зависимости прочности R от N и M . Например, в каждой из шести отдельных серий можно построить зависимость вида

$$R = (N + N_0) \cdot M^\alpha \quad (3.2)$$

с некоторыми параметрами N_0, α .

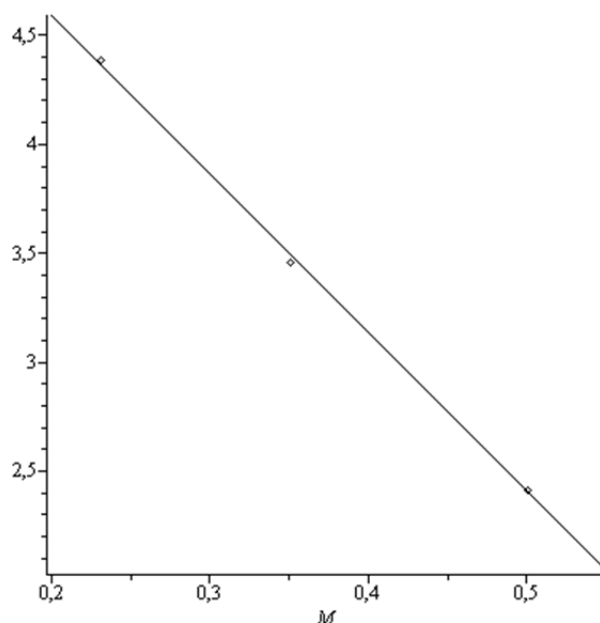


Рис. 3.4. Зависимость логарифмов числа нагружений (до разрушения образца) от амплитуды нагружения для холодного асфальтобетона на модификаторе СКС 30 АРКМ 15 в сухом состоянии (точечные значения – экспериментальные данные, график прямой линии - теоретическая зависимость, построенная по МНК).

График любой такой зависимости проходит в точности через три экспериментальные точки. Однако «итоговая прочность» R оказывается противоречащей визуальному восприятию экспериментальных данных (см. табл. 3.3). Это не позволяет признать состоятельной гипотезу (3.2) для изучаемой прочности.

В рамках принимаемой гипотезы (3.1) эту зависимость удобно записать в логарифмической форме как

$$\ln R = \ln N + \alpha \cdot M \quad (3.3)$$

Для каждой из шести рассматриваемых серий мы имеем три экспериментальные точки, например (для сухого состояния первого из образцов, где в качестве N рассматривается количество нагружений, умноженное на 10^{-3}):

$$M_1=0.23, M_2=0.35, M_3=0.5,$$

$$\ln N_1=\ln (80.7)=4.39, \ln N_2=\ln (32.1)=3.468, \ln N_3=\ln (11.3)=2.42.$$

По стандартным формулам статистики легко построить прямую линию регрессии по данным такого типа. Уравнение искомой линии

$$y = a x + b \quad (3.4)$$

содержит два параметра a и b . Значения этих параметров определяются из системы линейных уравнений, связанных с набором экспериментальных данных $\{(x_k, y_k)\}_{k=1}^n$:

$$(\sum_k x_k^2)a + (\sum_k x_k)b = (\sum_k x_k y_k), (\sum_k x_k)a + nb = (\sum_k y_k) \quad (3.5)$$

В рассматриваемом примере имеем прямую с уравнением

$$\ln N = -7.27 M + 6.045. \quad (3.6)$$

Это означает, что для данного образца $\alpha = 7.27$, а его длительная прочность составляет

$$e^{6.045} = 421.8 \text{ тысяч условных единиц} \quad (3.7)$$

Аналогично рассматриваются остальные 5 серий. Итоговые значения длительной прочности составов образцов асфальтобетона для всех 6 серий (три первые - сухое состояние, три последние - водонасыщенное) приведены ниже:

$$R_{1C} = 421,848; \quad R_{2C} = 432,411; \quad R_{3C} = 329,686; \quad R_{2B} = 251,049; \\ R_{2B} = 250,864; \quad R_{3B} = 194,188.$$

Такие значения прочности можно признать адекватными и соответствующими экспериментальным данным.

На рис. 3.5 приведены графики зависимости числа нагружений (до разрушения образца) от амплитуды нагружения для холодного асфальтобетона на модификаторе СКС 30 АРКМ 15.

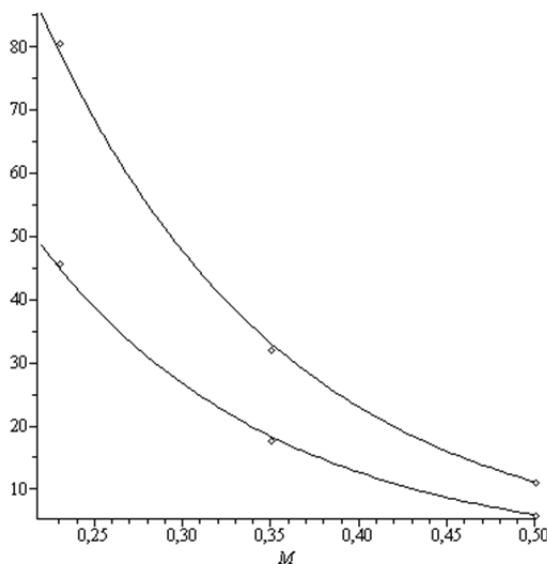


Рис. 3.5. Графики зависимости числа нагружений от амплитуды нагружения (до разрушения образца) для материала N 1 - СГ(СКС); верхний график - сухое состояние, нижний - водонасыщенное

Графики отражают экспоненциальную зависимость (3.1) или, что то же самое,

$$N = R \cdot e^{-\alpha M} \quad (3.8)$$

При этом в качестве R подставлены вычисленные выше значения прочности $R_{1C} = 421,8483208$, $R_{2B} = 251,0497$ соответственно для сухого и водонасыщенного состояния.

На рис. 3.6 приведены аналогичные графики для всех трех материалов (в двух состояниях каждого из них).

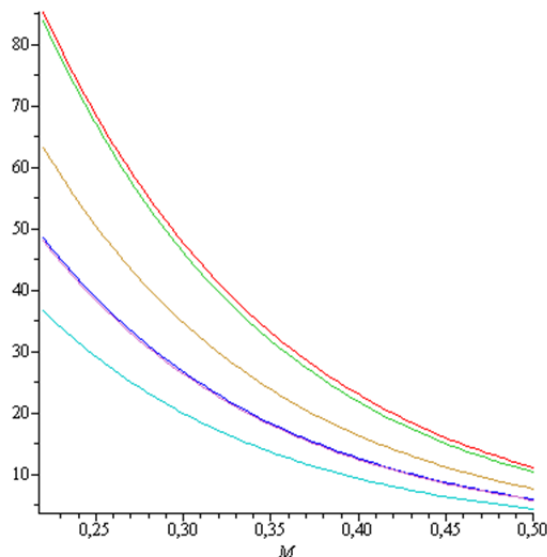


Рис. 3.6. Графики зависимости числа нагружений (до разрушения образца) от амплитуды нагружения для трех исследованных составов асфальтобетона (сверху вниз: 1 - (ДСТ) сухое состояние, 2 - (СКС) сухое состояние, 3 - традиционный жидкий битум, сухое состояние, 4 - (ДСТ) водонасыщенное состояние, 5 - (СКС) водонасыщенное состояние, 6 – традиционный жидкий битум, водонасыщенное состояние).

Примечание. 4-й и 5-й графики практически совпадают.

Расчет срока службы холодного асфальтобетона в дорожном покрытии с учетом неравномерности приложения транспортной нагрузки по полосе движения

Рассмотрим ситуацию приложения разрушительной энергии с последующим накоплением в материале покрытия остаточной деформации на участке отремонтированного покрытия автомобильной дороги на следующем модельном примере.

Ширину полосы движения будем считать равной $L = 3$ м. Каждое колесо усредненного (модельного) автомобиля оставляет на трассе след, ширину которого примем равной $2d = 0,22$ м. Расстояние между осями следов от (левого и правого) колес автомобиля положим равным $2l = 1,7$ м (рис. 3.7).



Рис. 3.7. Схема проезжей части автомобильной дороги:

- а) ширина покрытия $2L$: $[-L, L]$; б) расстояние l от оси дороги до центра «изучаемого участка покрытия»; в) «изучаемый участок» асфальтобетонного покрытия (снизу) $[l-b, l+b]$; г) колесо движущегося автомобиля (сверху), ширина колеса $2d$.

Будем считать, что при движении по полосе автомобиль придерживается её центральной линии. В то же время возможно отклонение оси автомобиля от

центральной линии полосы движения. Будем считать такое отклонение случайной величиной (СВ) и обозначим ее через X . Возможные значения этой СВ расположены в промежутке:

$$[-(L-l-d), (L-l-d)] \quad (3.8)$$

(условие $X+l+d < L$ означает, что автомобиль не выезжает за правую краевую линию разметки полосы движения, и аналогичное условие характеризует левый край указанной полосы (3.8)). В нашем примере обсуждаемый промежуток имеет размеры $[-0.54, 0.54]$ м.

При движении отдельного автомобиля по трассе происходит нагружение каждого участка дорожного покрытия, воспринимающего нагрузку от колеса автомобиля. Рассматривая транспортный поток, можно говорить о многократном нагружении отдельных участков покрытия.

Выделим фрагмент отремонтированного покрытия и свяжем реальную ситуацию на дороге с лабораторными экспериментами, описанными в начале пособия. Наблюдаемый участок покрытия будем считать геометрически равным лабораторному прямоугольному образцу с размерами $(0,04 \times 0,16)$ м.

Считаем при этом, что продольная ось прямоугольника расположена параллельно оси проезжей части и находится на расстоянии l (справа) от последней (рис. 3.8).

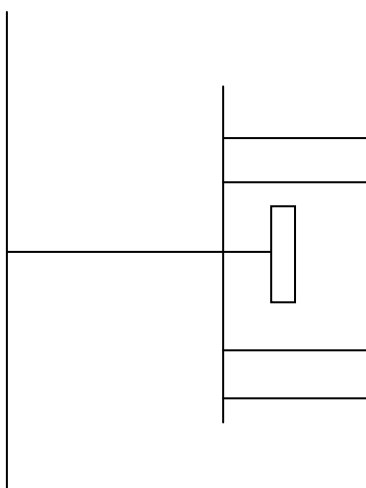


Рис. 3.8. Фрагмент полосы движения проезжей части, на которой схематически показана ось дороги, расстояние от оси до изучаемого прямоугольника – отремонтированного участка покрытия

Дальнейшие обсуждения удобно проводить в упрощенной форме, связывая систему отсчета с центром изучаемого прямоугольника. Отклонение X оси автомобиля от оси дорожной полосы в такой ситуации совпадает с отклонением колеса от продольной оси прямоугольника.

При отклонении X , имеющем ненулевое значение, след от колеса автомобиля может не покрывать обсуждаемый прямоугольник или покрывать его лишь частично (рис. 3.8). Амплитуду полного нагружения будем считать равной $M = 0.15 \text{ мм} = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Для описания неполного нагружения можно ввести, например, кусочно-линейную функцию $h(x)$, определяемую формулой

$$h(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq (d-b) \\ \frac{(b+d)-|x|}{2b}, & (d-b) \leq |x| \leq (d+b) \\ 0, & |x| \geq (d+b) \end{cases} \quad (3.9)$$

В зависимости от значения x , принимаемого случайной величиной X , естественно тогда использовать для амплитуды нагружения следующую формулу:

$$m(x) = M \cdot h(x) \quad (3.10)$$

Случаи, в которых $|X| > (d+b)$ (след от колеса не задевает изучаемый прямоугольник), можно не учитывать при подсчете энергии разрушения.

После таких уточнений можно вычислить энергию, получаемую отремонтированным участком покрытия, например, за сутки. Сравнивая эту суточную величину с вычисленной в экспериментах остаточной (долговременной) прочностью, можно получить более точную оценку срока службы отремонтированного дорожного покрытия.

Итак, считаем, что за сутки по отремонтированному участку покрытия проходит $n = 30000$ автомобилей.

Разобьем промежутки $[-(d+b), (d+b)]$ на малые участки и оценим количество n_k тех автомобилей из транспортного потока, чье отклонение X попадает в один из таких участков $[x_k, x_k + \Delta x_k]$. Количество n_k можно определить по заданному закону распределения СВ X . Как известно, вероятность попадания непрерывной СВ X в заданный малый интервал Δx_k приблизительно равна произведению плотности $f(x_k)$ этой СВ на длину обсуждаемого интервала:

$$P(X \in \Delta x_k) \approx f(x_k) \Delta x_k. \quad (3.11)$$

В свою очередь, число отдельных испытаний СВ X (в большой серии), приводящих к попаданию X в заданный интервал, приблизительно равно

$$n_k = n \cdot P(X \in \Delta x_k). \quad (3.12)$$

Учитывая полученную выше экспоненциальную формулу для энергии разрушения, общую энергию, получаемую рассматриваемым участком покрытия за сутки, можно считать приблизительно равной

$$\begin{aligned} E &= \sum_k n_k \exp(\alpha m(x_k)) = n \cdot \sum_k P(X \in \Delta x_k) \cdot \exp(\alpha m(x_k)) = \\ &= n \cdot \sum_k \exp(\alpha m(x_k)) \cdot f(x_k) \cdot \Delta x_k. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Переходя от суммы к интегралу, получим формулу

$$E = n \cdot \int_{-(d+b)}^{d+b} \exp(\alpha m(x)) \cdot f(x) dx. \quad (3.14)$$

Теперь остается вычислить этот интеграл (точно или приближенно) и подставить в него все значения параметров и функций, участвующих в его записи.

Проведены расчеты для двух распределений СВ X : нормального и равномерного. Пусть сначала X распределена по нормальному (Гауссовскому) закону

с плотностью вероятности

$$f(x) = f_{(a,\sigma)}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3.15)$$

Среднее значение a такого отклонения примем равным нулю, а дисперсию σ зададим исходя из рис. 3.7 и известного "правила 3-х сигм", соотношением

$$3 \sigma = L - l - d, \quad (3.16)$$

т.к. $\sigma = 0.18$ м.

Расчеты будем вести для прямоугольного фрагмента отремонтированного покрытия, расположенного на «самом уязвимом» месте полосы движения. Это означает, что весь интеграл (3.13) сопоставим по своей величине с аналогичным интегралом по промежутку $[-(d-b), (d-b)]$ «больших» значений подынтегральной функции. В силу равенства $\lambda(x) = 1$, выполняющегося на указанном промежутке, эта функция равна $\exp(\alpha M) \cdot f(x)$. Тогда интеграл $\int_{-(d-b)}^{d-b} e^{\alpha M} \cdot f(x) dx$, являющийся оценкой для интеграла из (3.13), равен $e^{\alpha M} \cdot 2 \cdot F\left(\frac{d-b}{\sigma}\right)$, где через F обозначена функция Лапласа. При наших значениях параметров d, b, σ получаем

$$F\left(\frac{d-b}{\sigma}\right) = F\left(\frac{0,11-0,02}{0,18}\right) = F(0,5) = 0,1915.$$

Учтем еще значения $M = 0.15$ мм и коэффициент $\alpha = 7,27$ для одного из составов модифицированных холодных асфальтобетонов, рассмотренных выше (подчеркнем, что в формулах, полученных на основе экспериментов, амплитуда измеряется именно в миллиметрах). Тогда интеграл из (3.16) сопоставим с величиной:

$$\exp(7,27 \cdot 0,15) \cdot 2 \cdot 0,1915 \approx 3 \cdot 2 \cdot 0,1915 \approx 1,15.$$

Вся энергия разрушения, описываемая формулой (3.16), имеет величину порядка 34000 условных единиц. Тогда как длительная прочность образца составляет 421,8 тысяч этих же единиц.

В случае равномерного распределения СВ X на промежутке $[-0,54, 0,54]$ м заметим, что полное нагружение контрольного прямоугольника получается при попадании оси колеса в интервал длины $2(d-b) = 0,18$. Следовательно, вероятность такого нагружения можно считать равной $0,18/1,08 = \frac{1}{6} \approx 0,17$ (вместо $2 \cdot 0,1915 = 0,383$ в случае нормального распределения, рассмотренного выше). Это означает увеличение прогнозируемого срока службы контрольного образца приблизительно в 2,0-2,5 раза.

Учет процессов релаксации напряжений в холодном асфальтобетоне

Прогноз срока службы покрытия будет неверен без учета известного свойства асфальтобетона восстанавливать свою структуру и прочностные показатели за счет релаксации напряжений за время «отдыха», т.е. за период между

приложением транспортной нагрузки. Будем предполагать, что транспортная нагрузка соответствует расчетной прочности дорожной одежды и разовое нагружение не приводит к образованию остаточных пластических деформаций. Введем, например, функцию интенсивности восстановления прочностных показателей асфальтобетона в виде

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t), \quad t \geq 0 \quad (3.17)$$

где λ - некоторый числовой параметр («скорость» восстановления).

Это означает, что при разовом («мгновенном») нагружении материала с последующим промежутком отдыха в течение t секунд ущерб для долговечности составит не $U_0 = e^{\alpha M}$, а меньшую величину:

$$U_0^* = U_0 \cdot \left(1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt \right) = U_0 \cdot (1 - (1 - e^{-\lambda t})) = U_0 e^{-\lambda t}. \quad (3.18)$$

В частности, при бесконечно долгом отдыхе ($t = \infty$) ущерб от разового нагружения покрытия (не имеющего критических значений по амплитуде прогиба покрытия, что может происходить при превышении расчетной нагрузки) полностью компенсируется.

В реальной ситуации для определения параметра интенсивности восстановления естественно обсуждать период частичного восстановления. Будем называть таким термином отрезок времени T , для которого $\exp(-\lambda T) = \frac{1}{2}$.

Зная такой период, можно вычислить параметр λ по формуле $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$.

При прохождении по дороге за сутки транспортного потока из $n = 30$ тысяч автомобилей будем теперь суммировать не сами энергии U_k , а их «ослабленные» варианты U_k^* . Тогда за сутки суммарная (с учетом промежутков отдыха) энергия, принятая элементом отремонтированного полотна, будет равна не nU_0 , а другой величине, а именно

$$\sum_{k=1}^n U_k^* = \sum_{k=1}^n U_0 \exp(-\lambda t_k) = U_0 \cdot \sum_{k=1}^n \exp(-\lambda t_k) = (nU_0) \cdot \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \exp(-\lambda t_k) \right). \quad (3.19)$$

Здесь t_k - время «отдыха» полотна после проезда k -ой машины.

Поправочный коэффициент, отличающий новое значение разрушающей энергии от «старого» значения, равен при таких обсуждениях

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \exp(-\lambda t_k) \right). \quad (3.20)$$

При строго равномерном потоке машин (1 машина за время $\tau = t_k$) этот коэффициент равен $\exp(-\lambda \tau)$. Например, при $\tau = 10$ и скорости восстановления $\lambda = 0,7$ (соответствующей периоду частичного восстановления $T = 1$ сек.) поправочный множитель имеет значение $\approx 0,001$.

Таким образом, понижающий коэффициент 1000 не является реальным,

хотя бы потому, что поток машин, вообще говоря, не является жестко равномерным.

Будем считать каждый промежуток времени t_k между двумя машинами в этом потоке реализацией некоторой случайной величины τ . В этом случае формула (3.18) представляет собой не что иное, как среднее значение функции $Y = h(\tau) = \exp(-\lambda\tau)$ от СВ τ .

Пусть τ распределена по показательному закону с параметром $\mu > 0$. Это означает, что плотность $g_\mu(t)$ распределения СВ τ описывается формулой

$$g_\mu(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0; \\ \mu \exp(-t\mu), & t > 0, \end{cases} \quad (3.21)$$

аналогичной (1), где μ - средняя интенсивность потока ($\mu = 0.1$ для усредненного периода между машинами, равного 10 с).

По известным формулам теории вероятностей среднее значение или математическое ожидание случайной величины $Y = \exp(-\lambda\tau)$ определяется как интеграл

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(\xi) g_\mu(\xi) d\xi.$$

В нашем случае

$$\varepsilon = \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi) g_\mu(\xi) d\xi = \int_0^{\infty} e^{-\lambda\xi} \mu e^{-\mu\xi} d\xi = \mu \int_0^{\infty} e^{-(\lambda + \mu)\xi} d\xi = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (3.22)$$

Например, при $\lambda = 0,7$, $\mu = 0,1$ поправочный коэффициент ε принимает значение $1/8 = 0,125$. Заметим, что в литературе имеются данные о восстановлении холодным асфальтобетоном своих прочностных показателей за доли секунды (а не за одну секунду, как в рассмотренном примере). Это означает, что поправочный коэффициент для такого материала имеет еще меньшее значение (что еще удлиняет срок службы покрытия холодного асфальтобетона).

Таким образом, проведённым анализом установлено:

1) за счет регулирования движения транспортного потока по полосе движения срок службы участка отремонтированного покрытия возрастает в 2,0-2,5 раза;

2) за счет процесса релаксации асфальтобетона между отдельными нагружениями происходит дополнительное значительное увеличение срока службы материала в дорожном покрытии (в 10-50 раз, а в идеальном случае до 1000 раз);

3) учет обоих факторов приводит к увеличению «двухнедельного непрерывного срока» работы холодного асфальтобетона при непрерывном воздействии нагрузки более чем в 100 раз, т.е. до 3-4 лет, что является адекватной оценкой такого срока службы отремонтированного покрытия автомобильной дороги с интенсивностью транспортного потока до 30 000 автомобилей в сутки

при условии применения более качественного модифицированного холодного асфальтобетона, а также качественного водоотвода с дорожного покрытия.

В заключение необходимо отметить, что для получения прогноза срока службы холодного асфальтобетона в дорожном покрытии использована упрощенную модель. Основным объяснением достаточно малого предварительного срока службы, полученного в этой модели, является именно ее упрощенный характер, связанный с рассмотрением изолированного участка асфальтобетонного покрытия. Реальный срок службы покрытия будет существенно ещё выше за счет взаимного влияния друг на друга фрагментов покрытия с достаточно большими общими размерами и массой.

3.4. Повышение качества жидкого битума и холодного асфальтобетона на его основе

Для модификации жидких битумов необходим способ, позволяющий не только ввести полимер в жидкий битум, но и получить вязущее с необходимой условной вязкостью. Вводя в вышеуказанный технологический процесс получения традиционного жидкого битума изменение в виде замены разжижителя на раствор полимера, можно получить жидкое битумно-полимерное вязущее с условной вязкостью, соответствующее маркам традиционных жидких битумов, но отличающееся улучшенными свойствами вследствие присутствия полимера. Полимерная добавка, вводимая в битум в виде раствора, позволяет улучшить физико-механические свойства холодного асфальтобетона, а применяемый при приготовлении раствора полимера разжижитель - получить жидкий битум с необходимой вязкостью [51].

Проведенные исследования [51] показали, что основной задачей подбора параметров раствора полимера является определение необходимого количества растворителя, обеспечивающего полное растворение высокомолекулярного соединения. Было отмечено, что после введения полимера в битум в состоянии межмолекулярного раздробления дополнительное применение растворителя не требуется, а его избыток даже нежелателен для свойств получаемого вязущего. Указанными исследованиями были подобраны вязкостные характеристики растворов каучуков типов СКД, СКС, СКИ и дивинилстирольного термоэластопласта и определен технологический режим приготовления раствора полимера (температура и время перемешивания) для достижения полной однородности раствора. В качестве основного растворителя был принят наиболее эффективный и доступный керосин – для технических целей.

Для приготовления раствора полимера могут использоваться как двухкомпонентные составы (полимер и растворитель), так и трехкомпонентные (полимер, растворитель, разжижитель). При этом количество растворителя (или растворитель + разжижитель) должно быть таково, чтобы условная вязкость раствора, определенная по истечении 50 мл через отверстие диаметром 5 мм, не превышала предела 1000 с для обеспечения возможности его перекачки насо-

сами при производственном применении. Наиболее простым технологическим приемом получения раствора высокомолекулярного соединения является использование двухкомпонентных растворов полимеров в техническом керосине. Для подбора технологических параметров были приготовлены растворы каучуков СКД, СКС, СКИ различной концентрации и определена их условная вязкость. Установлено специфическое влияние типа каучука на условную вязкость раствора при одинаковой концентрации полимера. Так, изопреновый каучук (СКИ) в растворе керосина имеет наибольшую условную вязкость. Дивиниловый каучук (СКД) в растворе керосина проявляет меньшую вязкость. Наименее вязкими в растворе керосина являются стирольные каучуки [51].

Для определения технологических параметров приготовления жидких битумно-каучуковых вяжущих были приготовлены составы жидких битумов на основе растворов каучуков СКС, СКД, СКИ различной концентрации. Количество добавки каучука, в пересчете на сухое вещество, составляло 3-4 % . Исходный битум нагревали до температуры 100 °С, раствор каучука в керосине - до 60-80 °С, после дозировки по массе компоненты перемешивались. Через определенное время перемешивание прекращалось и производились отбор и испытание проб. Время перемешивания определялось по достижению однородности вяжущего, определяемой с помощью стеклянной палочки. Было установлено, что на однородность вяжущего наиболее значительно влияют температура и время перемешивания. Скорость вращения мешалки менее значимо влияет на однородность.

Жидкое битумно-полимерное вяжущее подбирается по его условной вязкости. Для этого в одинаковое исходное количество вязкого битума вводились растворы каучуков в керосине - СКД, СКС, СКИ - 10 и 12 % концентрации в количестве, необходимом для содержания в вяжущем сухого каучука 3; 3,5; 4 % по массе. Проведенными исследованиями [51] установлено, что для достижения условной вязкости применительно к жидкому вяжущему марки 130/200 на основе каучуков СКД, СКИ необходимо ввести в битум БНД 60/90 раствор каучука 10 % концентрации и провести дополнительно очень незначительное разжижение керосином. Применительно к марке вяжущего 130/200 на каучуке СКС концентрация раствора должна быть 12 % с последующим разжижением керосином.

Для приготовления и исследования жидкого вяжущего на основе ДСТ был использован двухкомпонентный раствор полимера в керосине. Были приготовлены растворы ДСТ в керосине 12, 15 и 20%-й концентрации и на их основе были получены жидкие полимерно-битумные вяжущие, содержащие 3,5 % ДСТ в пересчете на сухое вещество. Время перемешивания компонентов жидкого ПБВ составило 20-30 минут. По окончании перемешивания всеготавливаемые составы жидкого вяжущего были однородны. Вяжущее, полученное на основе раствора ДСТ в керосине 10-12%-й концентрации, имеет условную вязкость 70-92 секунды, что соответствует марке жидких битумов СГ 70/130, а при 15 % концентрации условная вязкость - 145 секунд, что соответствует марке СГ

130/200. При дальнейшем повышении концентрации ДСТ в керосине показатель условной вязкости вяжущего резко возрастает. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при применении растворов ДСТ в керосине 10-15 %-й концентрации для разжижения вязкого битума можно получить жидкое вяжущее, которое по величине условной вязкости пригодно для приготовления холодных смесей [51].

С учетом полученных результатов исследований по подбору параметров растворов термоэластопласта ДСТ и синтетических каучуков были приготовлены жидкие модифицированные битумы марки СГ 130/200 с содержанием 4 % по массе добавки полимера. Физико-механические показатели жидких битумно-полимерных вяжущих на основе ДСТ и каучука СКС приведены в табл. 3.4. В качестве контрольного состава был использован жидкий битум марки СГ 130/200, полученный путем разжижения керосином исходного БНД 60/90. Физико-механические показатели жидкого модифицированного битума марки 130/200 на основе каучуков СКС, СКД, СКИ с различным содержанием каучука в вяжущем показаны в табл. 3.5.

Жидкие модифицированные битумы отличаются от традиционного вяжущего повышенной температурой размягчения остатка после удаления разжижителя. В наибольшей степени это установлено для жидкого модифицированного битума на основе ДСТ, где температура размягчения возросла на 20,5 °С. Влияние каучуков на указанный показатель вяжущего значительно меньше. Так, рост температуры размягчения остатка при применении синтетических каучуков составил 2-4,5 °С. Вид и количество полимерной добавки в вяжущем значительно влияют на количество испарившегося разжижителя. Так, максимальное количество испарившегося разжижителя отмечается при введении 3,5 – 4% полимера и наиболее значительно при применении каучуков типа СКД, СКИ. Меньшее количество испарившегося разжижителя установлено при применении каучука СКС в количестве 3-3,5 % по массе [51].

Таблица 3.4

Физико-механические показатели модифицированных жидких битумов

Наименование показателей	Требования ГОСТ 11955-82 для жидкого битума СГ 130/200	Жидкий битум, полученный разжижением исходного БНД 60/90	Жидкий модифицированный битум (4 % полимера по массе)	
			СКС-30 АРКМ-15	ДСТ 30-01
1. Условная вязкость по вискозиметру с отверстием 5 мм при 60 °С, с.	131-200	167	182	188
2. Количество испарившегося разжижителя, %	Не менее 7,0	10,1	19,8	15,9

окончание табл. 3.4

Наименование показателей	Требования ГОСТ 11955-82 для жидкого битума СГ 130/200	Жидкий битум, полученный разжижением исходного БНД 60/90	Жидкий модифицированный битум (4 % полимера по массе)	
			СКС-30 АРКМ-15	ДСТ 30-01
3. Температура размягчения остатка после определения количества испарившегося разжижителя, °С	Не ниже 39	40,5	45	61
4. Сцепление с кварцевым песком	Выдерж. по образцу № 2	К.о. № 2	К.о. № 2	К.о. № 2

Таблица 3.5

Физико-механические показатели жидких битумно-полимерных вяжущих на основе каучуков типа СКС, СКД, СКИ с различным содержанием полимера

Наименование показателей	Жидкий битум СГ 130/200 контрольный	Жидкое битумно-полимерное вяжущее									Требования ГОСТ 11955-82 для СГ 130/200
		СКС			СКД			СКИ			
		Содержание каучука в вяжущем, % по массе									
		3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0	
1. Условная вязкость по вискозиметру с отверстием 5 мм при 60 °С, с	167	173	180	182	180	170	180	193	187	181	131-200
2. Количество испарившегося разжижителя, %	10,1	6,7	14,2	19,8	18,2	19,9	23,6	14,2	20,5	25,0	Не менее 7,0
3. Температура размягчения остатка после определения количества испарившегося разжижителя, °С	40,5	42,5	44	45	41,5	43,5	45	43,5	45	46	Не ниже 39

продолжение табл. 3.5

Наименование показателей	Жидкий битум СГ 130/200 контрольный	Жидкое битумно-полимерное вяжущее									Требования ГОСТ 11955-82 для СГ 130/200
		СКС			СКД			СКИ			
		Содержание каучука в вяжущем, % по массе									
		3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0	
4. Сцепление с кварцевым песком (по ГОСТ 11508-74)	Выд. по обр. № 2	Обр. № 2	Обр. № 2	Обр. № 2	Обр. № 2	Обр. № 2	Обр. № 2	Обр. № 2	Обр. № 2	Обр. № 2	-

Физико-механические показатели холодного асфальтобетона, модифицированного каучуком типа СКС, приведены в табл. 3.6, модифицированного термоэластопластом ДСТ - в табл. 3.7. [51].

Таблица 3.6

Физико-механические показатели холодного асфальтобетона типа «Бх» модифицированного каучуком типа СКС

Наименование показателей	Норма по ГОСТ 9128-2009 для типа «Бх» I марки	Применяемое вяжущее			
		Жидкий битум СГ 130/200	Вяжущее с содержанием 3,5 % СКС	Вяжущее с содержанием 3,5 % СКС + 1% ПАВ «Мобит»	Вяжущее с содержанием 3,5 % СКС + 1 % ПАВ ортофосфорной кислоты
Средняя плотность, г/см ³	Не норм.	2,34	2,35	2,36	2,33
Средняя плотность минерального остова, г/см ³	Не норм.	2,23	2,23	2,26	2,22
Истинная плотность минерального остова, г/см ³	Не норм.	2,67	2,67	2,67	2,67
Истинная плотность смеси, г/см ³	Не норм.	2,48	2,48	2,48	2,48
Остаточная пористость, %	Не более 18	6	6	5	6
Слеживаемость	Не более 10	8	8	9	3

окончание табл. 3.6

Наименование показателей	Норма по ГОСТ 9128-2009 для типа «Бх» I марки	Применяемое вяжущее			
		Жидкий битум СГ 130/200	Вяжущее с содержанием 3,5 % СКС	Вяжущее с содержанием 3,5 % СКС + 1% ПАВ «Мобит»	Вяжущее с содержанием 3,5 % СКС +1 % ПАВ ортофосфорной кислоты
Водонасыщение, %: до прогрева после прогрева	От 5 до 9	5,2	4,59	4,8	7,1
		4,5	4,2	4,1	7,0
Набухание, %: до прогрева после прогрева	Не норм.	0,8	0,6	0,8	0,4
		0,5	0,4	0,3	0,4
Предел прочности при сжатии: при $t = 20^{\circ}\text{C}$, МПа, до прогрева: сухих	Не менее	1,5	1,69	1,82	1,45
		1,1	1,46	1,66	1,12
водонасыщенных		1,2	1,46	1,66	1,12
после длит. водонасыщения	0,8	0,88	0,95	1,36	0,69
после прогрева:					
- сухих	1,8	1,73	1,79	2,02	1,32
- водонасыщенных	1,6	1,56	1,67	2,04	1,19
- после длит. водонасыщения	1,3	1,03	1,13	1,37	0,65
Предел прочности при сжатии $t = 50^{\circ}\text{C}$, МПа: до прогрева после прогрева	Не норм.	0,35	0,66	0,8	0,58
		0,45	0,81	0,95	0,43

Таблица 3.7

Физико-механические показатели холодного асфальтобетона типа Бх,
модифицированного полимером ДСТ

Наименование показателей	Норма по ГОСТ 9128 - 2009 для типа «Бх» I марки	Применяемое вяжущее				
		Жидкий битум СГ 130/200	Жидкое БПВ на основе ДСТ 30-01	Жидкое БПВ на основе ДСТ 30-01 + 1 % ортофосфорной кислоты	Жидкое БПВ на основе ДСТ 30-01 + 1,5 % ПАВ «Мобит»	Жидкое БПВ на основе ДСТ 30-01 с добавкой ПАВ талового пека
Средняя плотность, г/см ³	Не норм.	2,34	2,33	2,33	2,34	2,33
Водонасыщение, % до прогрева после прогрева	От 5 до 9	5,2	6,0	5,3	5,0	5,47
		4,5	5,8	5,4	3,5	4,85
Слеживаемость	Не более 10	8	3	4	3	3
Набухание, % до прогрева после прогрева	Не норм.	0,8	0,48	0,53	0,7	0,23
		0,5	0,18	0,50	0,2	0,13
Предел прочности при сжатии при t = 20°C, МПа, до прогрева: -сухих;	Не менее 1,5	1,5	1,31	1,32	1,58	1,39
		водонасыщенных;	1,1	1,13	0,97	1,28
-после длит. водонасыщения;	0,8	0,88	0,73	0,69	1,06	0,97
после прогрева: -сухих;	1,8	1,73	1,69	1,28	1,90	1,68
		водонасыщенных;	1,6	1,37	1,2	1,69
-после длит. водонасыщения	1,3	1,03	0,99	0,86	1,42	1,26
Предел прочности при сжатии t= 50°C, МПа до прогрева после прогрева	Не норм.	0,35	0,42	0,37	0,56	0,48
		0,45	0,69	0,36	0,87	0,70

Рассматривая физико-механические показатели холодного асфальтобетона, приготовленного на разжиженном керосином исходном битуме, отмечаем, что асфальтобетон отвечает требованиям ГОСТ 9128 по слеживаемости, водона-

сыщению, пределу прочности при 20 °С сухих образцов. Водостойкость и теплостойкость асфальтобетона недостаточны, что объясняется низкой температурой размягчения остатка, недостаточной адгезией применяемого разжиженного битума.

Введение в состав жидкого вяжущего полимеров и адгезионных добавок в значительной мере влияет на физико-механические показатели холодного асфальтобетона. Применение высокополимеров без использования адгезионных добавок позволяет значительно повысить предел прочности при 50 °С. Так, при применении каучука СКС показатель для прогретых образцов увеличивается в 1,8 раза, соответственно при применении ДСТ - в 1,5 раза. При использовании полимерной адгезионной добавки «Мобит» [76] наблюдается заметный рост физико-механических показателей холодного асфальтобетона как с применением СКС, так и с ДСТ. Наилучшие показатели физико-механических свойств у смеси с каучуком СКС. Применение в качестве адгезионной добавки талового пека [51] в составе ДСТ позволило незначительно повысить физико-механические показатели холодного асфальтобетона. Установлен рост прочности при 20 °С сухих и водонасыщенных образцов и незначительное улучшение прочности при 50 °С.

Проведенные экспериментальные исследования холодных асфальтобетонов на основе жидких битумов, модифицированных полимерами ДСТ и СКС, доказали возможность получения холодного асфальтобетона с улучшенными физико-механическими свойствами.

Введение в состав жидкого вяжущего полимеров СКС и ДСТ совместно с адгезионными добавками позволяет повысить теплостойкость в 1,5 – 1,8 раза, прочность в водонасыщенном состоянии - в 1,2 – 1,4 раза в сравнении с традиционным холодным асфальтобетоном.

Все холодные смеси с применением полимеров характеризуются минимальной слеживаемостью. Наилучшими значениями слеживаемости характеризуются холодные смеси с применением термоэластопласта ДСТ.

3.5. Принципиальная схема технологического процесса приготовления жидкого битумно-полимерного вяжущего

Технологический процесс модификации жидких битумов (приготовления жидкого битумно-полимерного вяжущего) заключается в смешении обезвоженного битума с раствором полимера в керосине в определенных пропорциях. Указанный технологический процесс приготовления жидкого битумно-полимерного вяжущего будет различным в зависимости от вида применяемого полимера. Это определяется тем, что отпускная форма с завода-изготовителя дивинилстирольного термоэластопласта – порошок размером до 0,5 см (готовый для растворения), а соответственно для синтетического каучука – это брикеты массой до 40 килограммов, которые необходимо измельчать.

Технологический процесс приготовления битумно-полимерного вяжущего на основе каучуков типа СКС, СКД, СКИ включает следующие операции [51]:

- измельчение брикетов каучука;
- растворение каучуковой крошки в растворителях;
- подготовку вязкого битума (обезвоживание и нагрев до требуемой температуры);
- объединение вязкого битума с раствором каучука в смесительной установке.

При приготовлении битумно-полимерного вяжущего на основе ДСТ технологический процесс начинается с растворения порошка ДСТ в растворителе, а последние две операции без изменения.

Измельчение синтетического каучука, поступающего в виде брикетов массой до 40 кг, производят следующим образом: первоначально брикеты режут пластинчатым пневматическим ножом на пластины толщиной 5-15 см. Пластины затем направляются в роторную дробилку, где измельчаются в крошку размером 0 - 15 мм. От дробилки крошка каучука подается на растворение в емкость, предварительно заполненную растворителем. Растворение крошки проводят в емкости, оборудованной мешалкой, при температуре 60 - 80° С, для чего предусматривают систему паро- или маслообогрева. Перемешивание ведут до получения однородного раствора.

Раствор полимера должен быть однородным, без включения комков и сгустков. Условная вязкость раствора, определяемая по стандартному вискозиметру с отверстием 5 мм при температуре 60°С, должна быть в пределах 60 - 600 секунд.

Приготовленный вышеуказанным способом раствор каучука при помощи шестеренчатого насоса через дозатор подают для объединения с вязким битумом с целью получения жидкого модифицированного битума.

Принципиальная технологическая схема получения жидкого битумно-каучукового вяжущего на примере синтетического каучука представлена на рис. 3.9. Указанная схема была разработана на основе исследований В.И. Микрина [51], посвященных вязким битумно-каучуковым вяжущим.

Каучук в виде брикетов принимают на склад каучука, где его взвешивают и в необходимом количестве подают на агрегат приготовления крошки каучука (5), состоящий из пластинчатого пневматического ножа для резки брикетов и роторной дробилки. Привод пневматического ножа осуществляется от поршневого компрессора (3). Измельченный до частиц размером 0 - 15 мм каучук от дробилки наклонным конвейером (6) подается в аппарат (9), снабженный рамной мешалкой. Предварительно в аппарат (9) насосом (2) со склада (1) подают в необходимом количестве растворитель – керосин, расход которого контролируется лопастным счетчиком жидкости (8). Загрузка крошки производится через открытый люк аппарата (9) при включенной мешалке.

Растворение каучука ведется при повышенной (+60÷+70°С) температуре, для чего аппарат (9) оборудуют системой маслообогрева. Перемешивание ведут

до получения однородного раствора. Ориентировочное время растворения составляет 3-4 часа в зависимости от типа каучука. При достижении высокой вязкости смеси, что может быть обнаружено по возрастанию крутящего момента по валу мешалки аппарата (9), в аппарат (9) подается керосин, нагретый до температуры, соответствующей температуре смеси в указанном аппарате. Все требуемое количество растворителя подается порциями в 3-4 приема. Подача расчетного количества растворителя одновременно нецелесообразна, поскольку он будет препятствовать дальнейшему растворению не полностью растворившегося каучука, адсорбируясь на его поверхности и затрудняя непосредственный контакт с растворителем.

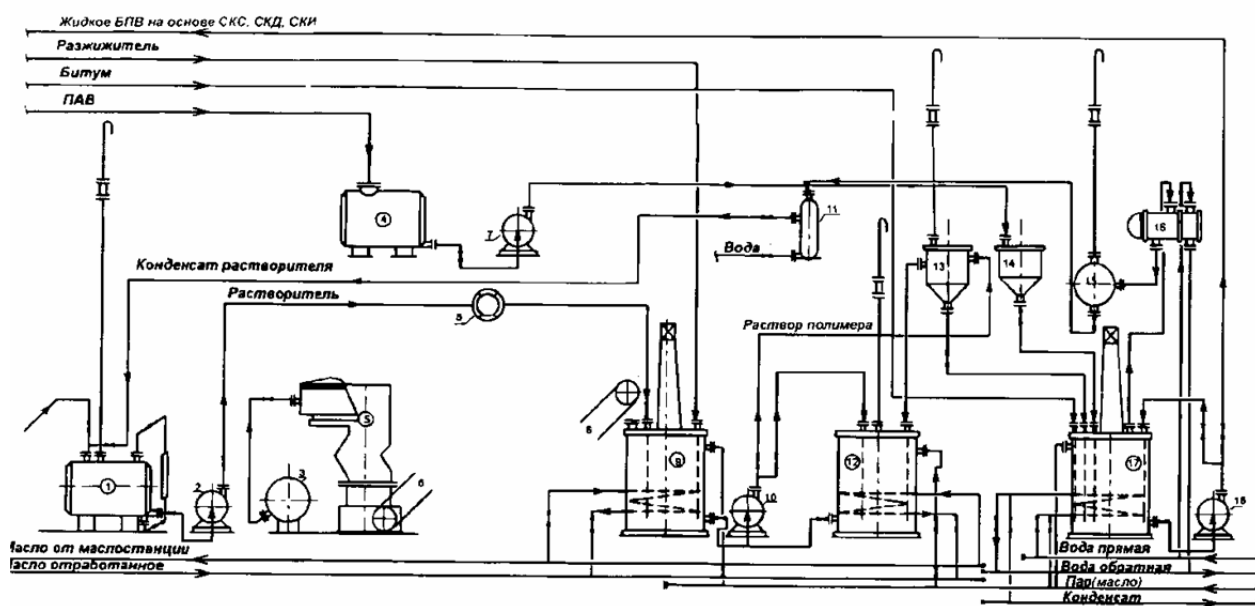


Рис. 3.9. Принципиальная технологическая схема по приготовлению жидкого полимернобитумного вяжущего на основе синтетического каучука типа СКС, СКД, СИ.

Приготовленный 10-12%-й концентрации по массе раствор каучука шестеренчатым насосом (10) перекачивается в аппарат (12), откуда он порциями поступает на смешение с битумом, а аппарат (9) используется для приготовления следующей партии раствора. Раствор, хранящийся в аппарате (12) насосом (10) через объемный дозатор (13) подается в аппарат (17), снабженный лопастной мешалкой. В аппарат (17) при работающей мешалке подается битум, нагретый до температуры 100-110 °С в расчетном количестве. Образующиеся пары растворителя из герметично закрытого аппарата (17) поступают в холодильник (16), охлаждаемый водой, и образующийся конденсат через конденсатор-сборник (15) и отстойник (11) возвращается на склад растворителя для повторного использования. Приготовленное жидкое битумно-полимерное вяжущее на основе синтетического каучука подается в рабочий котел АБЗ для дальнейшего приготовления холодных асфальтобетонных смесей.

Технологический процесс приготовления битумно-полимерного вяжущего на основе полимеров типа СБС включает следующие операции:

- растворение порошкообразного полимера в растворителе;
- подготовку вязкого битума (обезвоживание и нагрев до требуемой температуры);
- объединение вязкого битума с раствором полимера типа СБС в смешивательной установке.

Технологическое оборудование и процесс приготовления вяжущего аналогичен предыдущему, за исключением этапа измельчения (рис. 3.10).

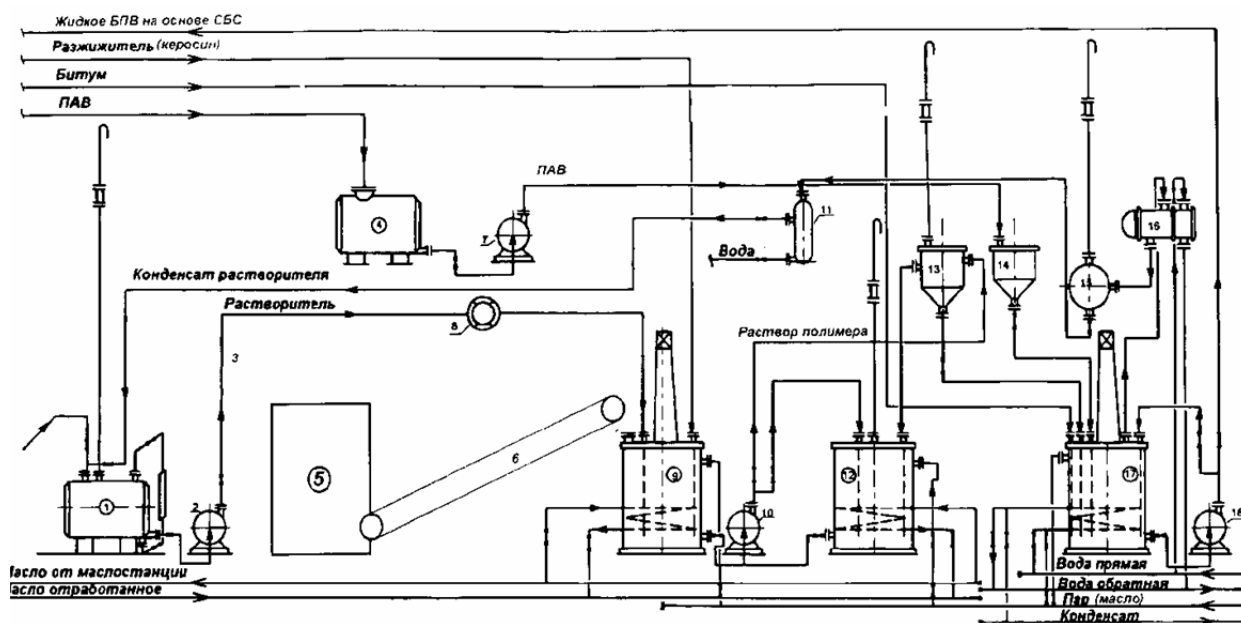


Рис. 3.10. Принципиальная технологическая схема по приготовлению жидкого БПВ на основе полимеров СБС.

Контрольные вопросы

1. Получение традиционных жидких дорожных битумов. Модификация жидких битумов?
2. В чем преимущество холодного модифицированного асфальтобетона от традиционного материала, приготовленного на жидких дорожных битумах?
3. Каковы сезонные и суточные вариации свойств асфальтобетона в дорожных конструкциях?
4. Охарактеризуйте особенности работы асфальтобетона в дорожных покрытиях в разные сезоны года?
5. Проведите сравнение деформативных и прочностных характеристик горячих и холодных асфальтобетонов?
6. Что необходимо учитывать при прогнозе срока службы холодного асфальтобетона в дорожном покрытии?

ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ДОРОЖНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПУТЁМ УСТРОЙСТВА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОБРАБОТОК НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ БИТУМАХ

4.1. Анализ существующих технологий устройства и опыта применения шероховатых поверхностных обработок

Срок службы и транспортно-эксплуатационное состояние дорожных покрытий в значительной степени зависят от своевременности и качества выполнения износостойких слоев. Для обеспечения длительной сохранности дорожного покрытия и создания безопасных условий движения автотранспорта в настоящее время одним из наиболее перспективных способов является устройство шероховатой поверхностной обработки (ШПО). Дополнительные затраты, связанные с устройством на покрытии износостойкого слоя поверхностной обработки, окупают себя снижением расхода топлива за счет увеличения безопасной скорости движения. Кроме этого значительно увеличивается межремонтный срок службы покрытия вследствие защитного действия износостойкого слоя от вредного воздействия погодных и климатических факторов, а также истирающего действия транспортной нагрузки.

На всем протяжении срока службы слоя шероховатой поверхностной обработки происходит постепенное снижение её работоспособности. Одной из наиболее распространенных причин непродолжительной службы слоев поверхностной обработки является недостаточное качество применяемых органических вяжущих, что в первую очередь выражается в низкой устойчивости против отрыва щебня от покрытия. Кроме указанного, на дорогах с тяжелым интенсивным движением срок службы слоя шероховатой поверхностной обработки резко снижается вследствие втапливания щебня в асфальтобетонное покрытие. Как следствие, срок службы поверхностных обработок нередко составляет всего 1-2 года.

Решение проблемы долговечности слоев поверхностных обработок возможно за счет применения органических вяжущих нового поколения – модифицированных битумов. Более высокие качественные показатели модифицированных битумов будут способствовать улучшению структуры слоя ШПО, повышению устойчивости щебня против отрыва от покрытия, повышению сопротивления слоя асфальтобетонного покрытия против втапливания в него зерен щебня. Для обеспечения расчетных скоростей и безопасности автомобильного движения на современных автомагистралях необходимо придать покрытиям высокие эксплуатационные качества. Дорожные покрытия должны обладать хорошими сцепными качествами, которые обеспечат отсутствие скользкости практически в любых погодных условиях. При недостаточном сцеплении, особенно в дождливые периоды и при гололедице, движение транспортных средств

становится аварийно-опасным [55]. Статистика аварийности показывает, что наиболее опасны для движения не обледенелые, а мокрые дороги. В настоящее время установлен 51 фактор, влияющий на значения коэффициента сцепления. К числу основных факторов, влияющих на сцепные качества шероховатой поверхности, относятся: скорость движения транспортного средства, состояние и модель автомобильных шин, толщина и вязкость пленки слоя, находящейся на поверхности воды, температура покрытия и т.д. Однако важнейшим фактором, в значительной степени определяющим значение коэффициента сцепления, является шероховатость покрытия.

Сцепные свойства покрытия, а также ровность относятся к числу основных транспортно-эксплуатационных параметров, определяющих состояние дороги как безопасный в эксплуатации инженерный объект. Многолетние исследования в области защитных конструктивных слоев, проводимые в Государственной службе дорожного хозяйства Министерства транспорта России по руководством Л.М. Цинмана, показали, что весьма ограничен срок эксплуатации автомобильной дороги (не позже 4 – 6-ти лет), когда обоснована технико-экономическая целесообразность устройства на покрытии слоя шероховатой поверхностной обработки без проведения капитального ремонта. Верхние «защитные» слои покрытий должны защищать нижележащие конструктивы дорожных одежд от доступа атмосферной влаги, обладать повышенной шероховатостью и сдвигоустойчивостью, что особенно важно в условиях жаркого климата III - IV дорожно-климатических зон.

Постоянный рост интенсивности и скоростей движения автомобилей по дороге требует соответствующих мероприятий при устройстве покрытий, гарантирующих безопасность движения. К числу таких мероприятий, в первую очередь, относится устройство покрытий, или слоев износа, обладающих требуемой ровностью и обеспечивающих хорошее сцепление колеса автомобиля с покрытием. Назначение слоя износа – предохранить основной слой покрытия от истирания и разрушения, и вместе с тем слой износа должен обеспечить необходимые потребительские качества поверхности дороги – ровность, достаточное сцепление колеса автомобиля с покрытием при любых погодных условиях и т.п. [73].

Одним из наиболее распространенных способов строительства шероховатого слоя износа является устройство поверхностной обработки. Поверхностная обработка дорожных покрытий - это способ создания шероховатой поверхности покрытия и устройства на нем слоя износа или защитного слоя путем нанесения на поверхность покрытия тонкой пленки органического вяжущего, последующего распределения высокосортного щебня и его уплотнения. Различают три вида поверхностной обработки с применением вязкого дорожного битума и битумных эмульсий:

- одиночная обработка, при которой на очищенное от пыли и грязи покрытие разливают органическое вяжущее с последующим распределением щебня определенных фракций и его укаткой;

- одиночная обработка с двукратным распределением щебня. При этом вяжущее наносят в большем количестве, чем в первом случае, и по нему распределяют сначала щебень размером зерен 15-25 мм с прикаткой его катками, а затем щебень фракции 5-10 мм, который укатывают четырьмя-пятью проходами катка по каждому следу со скоростью 2-3 км/ч;

- двойная обработка покрытия с розливом вяжущего в два приема, распределением после каждого розлива щебня и его укаткой. Этот способ применяют при значительных повреждениях покрытий (повышенный износ, большое количество трещин и мелких повреждений), а также на цементобетонных покрытиях [14].

Устройство традиционной поверхностной обработки имеет ряд негативных факторов:

- процесс окончательного формирования поверхностной обработки под колесной нагрузкой продолжается около 14 суток;
- в течение всего срока формирования необходимо производить уход за поверхностной обработкой и ограничивать скорость движения автомобилей;
- потенциальное снижение сцепных качеств покрытия из-за возможного отрыва щебня и выпотевание битума в местах его перелива и связанное с этим снижение коэффициента сцепления покрытия;
- перерасход каменных материалов за счет выметания неприжившегося щебня в процессе устройства поверхностной обработки;
- вдавливание (вдавливание) зерен щебня в поверхность асфальтобетона, особенно при повышенных температурах и значительном приросте интенсивности движения тяжелой части транспортного потока и удельной колесной нагрузки, ведущее к снижению общей шероховатости покрытия.

Основной недостаток технологии устройства поверхностной обработки с отдельным распределением горячего битума и щебня состоит в том, что любое нарушение в организации работ и задержка с распределением щебня приводят к тому, что распределенный битум может остыть и потерять свою подвижность и клеящую способность. В результате щебенки не будут равномерно покрыты битумом и прикреплены к покрытию и одна к другой. Еще большие отрицательные последствия могут возникнуть при задержке с распределением щебня в случае применения в качестве вяжущего битумной эмульсии, процесс распада которой может завершиться частично или полностью до рассыпки щебня.

Несмотря на множество очевидных положительных сторон устройства поверхностной обработки, существует ряд недостатков, которые резко снижают эффективность работ [14]:

- чувствительность к температуре окружающей среды в период строительства;
- недолговечность, особенно в случае тяжелого режима движения транспортных средств и жаркого климата;

- высокая зависимость качества поверхностной обработки от соблюдения технологических регламентов производства работ;
- длительный срок формирования покрытий – до 14 суток, независимо от технологии производства работ;
- перерасход вяжущего и щебня – не систематически, но имеет место быть;
- остается неизменной необходимость ухода за поверхностной обработкой в период ее формирования;
- сохраняется возможность снижения шероховатых свойств поверхностной обработки из-за выпотевания избытка вяжущего или частичного или полного погружения щебенки поверхностной обработки в асфальтобетонное покрытие.

Различают два вида шероховатости – макро- и микрошероховатость. Наличие обоих видов в одинаковой степени необходимо для безопасного движения по мокрым дорогам. Макрошероховатость образует выступающие на поверхности покрытия частицы каменного материала, входящего в состав покрытия. Сцепные, светотехнические, шумовые свойства покрытий определяются главным образом текстурой их поверхности.

При устройстве поверхностной обработки необходимо учитывать особенность процесса изменения микро- и макрошероховатости (а именно ее снижение) поверхности слоя износа во времени. Этот процесс протекает в два этапа: на первом этапе, после открытия движения транспорта, происходит достаточно интенсивное погружение (втапливание) щебня слоя поверхностной обработки в покрытие. Этот процесс интенсивно протекает в первые шесть часов для всех типов асфальтобетона под динамической тяжелой колесной нагрузкой транспортных средств. В период от шести до двенадцати часов процесс «тормозится» до скоростей в 4-7 раз меньших первоначальных. На втором значительно более длительном этапе уменьшается микрошероховатость в результате истирания (т.е. общего износа зерен каменного материала) и полировки зерен щебня.

Проведенные исследования [2, 14] показали, что основное влияние на отражательные свойства, шумовые и сцепные качества, способность удерживать химические реагенты, используемые для борьбы с гололедом, оказывает макрошероховатость покрытий. Изменяя ее, можно в значительных пределах варьировать указанные свойства покрытий. Шероховатые покрытия должны характеризоваться низким бликующим эффектом и резким уменьшением количества брызг за движущимся транспортным средством в сырую погоду, снижением шума. При отсутствии макрошероховатости, даже хорошо дренированная канавками и прорезями шипа, колесо автомобиля не может быстро вытеснить воду с площади контакта. На таких покрытиях коэффициенты сцепления резко снижаются с ростом скорости движения. Высокая макрошероховатость позволяет большему количеству воды «скрыться» внутри текстуры поверхности, а не разливаться по поверхности в виде сплошной водяной пленки. На макрошоро-

ховатых покрытиях снижается возможность возникновения бликов от освещения фар, значительно сокращается количество брызг, поднимаемых колесами автомобилей, улучшается обзорность дорожной разметки.

Микрошероховатость – это шероховатость поверхности выступающих частиц. Если макрошероховатость необходима для отвода слоя воды, попадающего в зону контакта колеса при его взаимодействии с мокрой дорогой, то микрошероховатость обеспечивает разрыв тонких пленок воды, оставшейся на поверхности выступающих частиц, что оказывает большое влияние на сцепные качества покрытия. При высоких скоростях движения автомобилей и отсутствии микрошероховатости резина протектора на выступе шероховатости не может быстро разрушить пленку воды, так как для этого необходима высокая мгновенная концентрация напряжений.

Существующие методы строительства позволяют регулировать только параметры макрошероховатости поверхности покрытий, изменяя глубину погружения щебня в процессе уплотнения макрошероховатого слоя и крупность самого щебня в процессе проектирования смеси. Некоторое влияние на микрошероховатость достигается использованием смеси прочного и слабого щебня, а также применением искусственных и натуральных каменных материалов с собственными высокими значениями микрошероховатости.

Стабильность параметров микрошероховатости во времени, т.е. способности каменных материалов противостоять образованию скользкой поверхности в процессе шлифования, определяется в основном минералогическим составом и структурой исходной горной породы [2]. Поверхность каменных материалов и изверженных бескварцевых пород (габбро, сиениты, базальты и пр.), состоящих из минералов с высокой и средней прочностью и имеющих, как правило, скрытокристаллическую и мелкозернистую структуру, приобретает значительную скользкость. Скользкость материалов из карбонатных пород еще выше. Полиминеральные изверженные породы с содержанием кристаллов кварца (граниты) обладают более высоким коэффициентом трения (сцепления).

Минимальной скользкостью (т.е. высоким коэффициентом сцепления) обладают песчаники с известняковым, глауконитовым и другими цементами, твердость которых по сравнению с твердостью кристаллов кварца ниже в 1,5 - 2,0 раза. Высокая устойчивость против образования скользкой поверхности у полиминеральных пород со значительной разницей в твердости минералов объясняется наличием неравномерного износа минералов. У гранитов кристаллы кварца, оставаясь практически без изменения в процессе шлифования, образуют выступы на поверхности за счет интенсивного износа полевых шпатов и слюды. Более ярко это проявляется у песчаников с невысокой твердостью цементов. Вышесказанное справедливо для пород, состоящих из минералов с большой разницей по твердости, или для материалов, у которых микрошероховатость при износе сохраняется за счет пор. Эти породы в процессе шлифования способны восстанавливать собственную шероховатость.

Наиболее распространенный метод оценки сцепных свойств покрытия – измерение коэффициента сцепления. Он позволяет оценить общую шероховатость покрытия, не разделяя микро- и макрошероховатость, и является наиболее информативным [14, 73]. Коэффициент сцепления шин автомобилей с покрытием является одной из важнейших характеристик безопасности движения по автомобильным дорогам, поскольку длина тормозного пути автомобиля обратно пропорциональна величине коэффициента сцепления. При расчете геометрических элементов дороги учитывают (различают) два коэффициента сцепления: коэффициент сцепления, соответствующий началу пробуксовывания ускоряющегося или проскальзывания заблокированного колеса при его движении в плоскости без боковой силы – коэффициент продольного сцепления, и коэффициент сцепления при движении колеса под углом к плоскости вращения колеса, когда колесо одновременно и вращается, и скользит вбок – коэффициент поперечного сцепления.

В связи с различной жесткостью шины в плоскости качения в боковом направлении величина коэффициента сцепления неодинакова при деформации шины в различных направлениях. Однако в расчетах, связанных с проектированием дорог, условно принимают, что при действии на колесо силы под углом к направлению его качения величина коэффициента сцепления численно равна коэффициенту продольного сцепления.

Исследования [2, 73] показали, что величина коэффициента сцепления зависит главным образом от степени увлажнения покрытия, скорости движения, типа покрытия и параметров его шероховатости. При увлажнении покрытий значение коэффициента сцепления становится существенно зависимым от типа покрытия, его шероховатости, скорости движения и от свойств поверхности шины. Чем более ярко выраженную макро- микрошероховатость имеет покрытие, тем более стабильным и высоким оказывается показатель коэффициента сцепления, и его значения изменяются в меньшей степени. Особенно резко снижается коэффициент сцепления при наличии на покрытии жидкой грязи или гололеда. При наличии шероховатой поверхности покрытия твердые выступы минеральных частиц вдавливаются в резину протектора и поэтому колесо автомобиля проскальзывает при пробуксовывании преимущественно за счет деформации резины. При высоких скоростях движения шина не успевает полностью деформироваться, т.к. времени для этого недостаточно, а следовательно, вдавливание минеральных частиц в резину протектора происходит на меньшую глубину и поэтому коэффициент сцепления шины с покрытием уменьшается. Особенно это проявляется на мокрых и загрязненных, сравнительно гладких покрытиях, когда влага и жидкая грязь являются как бы смазкой, снижающей коэффициент сцепления. Имеются известные зависимости между скоростью качения колеса и соответствующим ей коэффициентом сцепления. На шероховатой поверхности покрытия, или слоя износа, при прохождении автомобиля вода вжимается в «углубления» между минеральными частицами, в результате чего колесо имеет постоянный контакт с поверхностью дороги [2, 14]. Аварий-

ность на дорогах показывает, что периодам снижения величины сцепления (по погодным условиям) соответствует возрастание числа ДТП на автомобильных дорогах. В качестве промежуточной меры снижения аварийности в указанный период и повышения безопасности движения необходимо ограничивать скорости движения транспортных средств, а в качестве профилактической меры следует улучшать сцепные качества покрытий путем устройства соответствующего слоя износа [73].

Простейшим параметром, характеризующим качество шероховатой поверхностной обработки, является наибольшая высота выступов H_{max} , представляющая собой расстояние между высшей и низшей точками профиля выбранного участка поверхности. Однако этот показатель считается нехарактерным из-за значительного искажения геометрии поверхности отдельными глубокими рисками (например, трещинами на дороге), случайно образовавшимися. Поэтому уже с 1945 г. использовался ГОСТ 2789-45, в котором в качестве показателя чистоты (шероховатости) поверхности применялось среднее квадратичное отклонение ее неровностей.

Объективные способы оценки шероховатости поверхностей могут быть разделены на две группы:

- способы, дающие такое изображение профиля поверхности, которое позволяет получить расчетным путем численный показатель степени шероховатости;
- способы, позволяющие оценивать шероховатость поверхности в виде некоторого суммарного (интегрального) численного показателя, находящегося в закономерной зависимости от шероховатости.

Может быть применен способ оценки шероховатости по величине угла, при котором поверхность не рассеивает падающий на нее свет, а отражает его равномерно (при изношенной поверхности). В зависимости от способов приборы для измерения шероховатости делятся на два основных типа: для непосредственного измерения шероховатости поверхности и косвенного определения шероховатости поверхности.

На основании изложенного можно утверждать, что одним из основных мероприятий повышения безопасности движения автомобилей по дорогам, является устройство слоя шероховатой поверхностной обработки, обладающего достаточной шероховатостью. Однако наиболее распространенные на данный момент традиционные способы придания покрытию шероховатых свойств недостаточно оправдывают себя, так как их долговечность составляет 1 - 3 года.

На основе анализа литературы и опыт строительства ШПО, можно сказать следующее: шероховатость поверхности покрытий зависит как от размера и свойств применяемых минеральных материалов, так и от количества и качества вяжущего, расходуемого для устройства слоя износа. Достаточная шероховатость покрытия может быть достигнута применением для верхних слоев высокопрочных минеральных материалов – щебня кубовидной формы весьма узких фракций, песка из отходов дробления, плохо поддающихся шлифовке под действием автомобильных шин. Размеры частиц минерального материала

имеют не меньшее значение, чем их твердость и форма [2]. Для хорошего сцепления колеса автомобиля с покрытием достаточно, чтобы эффективная высота выступов шероховатости была около 0,5 - 2 мм, т.е. поверхность имела шероховатость типа наждачной бумаги. Слишком большая шероховатость покрытия (25 – 30 мм) может увеличить боковое скольжение, т.к. общее число контактов уменьшается, а также повысить уровень шумового (акустического) дискомфорта. Кроме того, крупные частицы более подвержены шлифованию движением, чем частицы меньшего размера из той же горной породы. Лучшим материалом для слоя износа следует считать щебень кубовидной формы из прочных изверженных пород размером 5-7, 7-10, 10-12, 12-15 и 15-20 мм – в зависимости от интенсивности движения и доли в ее составе тяжелых транспортных средств.

Во всей существующей на сегодняшний день научной и нормативно-рекомендательной литературе в совокупности рассмотрены и предложены научно и экспериментально обоснованные решения к основным требованиям сохранности слоев ШПО. Так, определены требования к каменному материалу по его физико-механическим свойствам в зависимости от условий работы слоя ШПО, а также к его фракционному составу в зависимости от твердости покрытия на основе традиционных вяжущих, расходу зерен минерального материала. То же можно сказать и о традиционных вяжущих материалах. В работе К.Д. Кудрявцева (ГТУ МАДИ) объективно решен вопрос о влиянии погодноклиматического режима местности на втапливаемость щебня слоя ШПО в нижележащий асфальтобетон, в котором эксплуатируется автомобильная дорога, а также решен вопрос о расчетном определении требуемого размера щебня. К.Д. Кудрявцевым предложена объективная модель для расчетного обоснования потребности толщины слоя вяжущего при устройстве слоя ШПО.

Но все же одним из важнейших факторов, определяющим сохранность слоев ШПО во времени и обеспеченность связей в комплексе взаимодействующих компонентов, формирующих слой ШПО, при прочих равных условиях, является качественное битумное вяжущее. Ведь вяжущее в сложной физико-механической конструкции шероховатого слоя является единственным звеном, нарушение работоспособности которого приводит к скачкообразному снижению коэффициента сцепления и разрушению слоя как конструкции. Причем отрыв всего нескольких зерен щебня является причиной лавинообразного возникновения значительных по площади участков разрушений. И насколько бы тщательно ни были бы подобраны параметры шероховатости, физико-механические свойства минерального материала, его зерновой состав и расход – все это становится неактуальным, когда начинается необратимый процесс цепного разрушения слоя. Ведь, по сути, наличие краевого эффекта на ничтожно малых участках разрушений и концентрация высоких механических напряжений приводят к цепной реакции разрушения слоя и образованию критически опасных обнаженных мест покрытия, где на поверхности имеется слой остаточного вяжущего, а коэффициент сцепления на этом участке стремится к нулю.

В настоящее время дорожные битумы по многим показателям не удовлетворяют требованиям нормативных документов и в значительной степени предрасположены к ускоренному старению и потере своих реологических свойств [1, 51, 61, 63, 85, 90, 91, 101]. Для обеспечения оптимального уровня эксплуатационной надежности ШПО ставится задача применения вяжущего с повышенными показателями теплоустойчивости, объемной упругости, пластичности, адгезии, когезии и устойчивости к старению.

4.2 Теоретические предпосылки повышения срока службы ШПО с применением битумно-полимерных вяжущих

Основной причиной низкого качества поверхностной обработки, выполненной как традиционным способом отдельного распределения материалов, так и с синхронным распределением битума и щебня, являются нарушения связей в системе «Транспортный поток - щебень - вяжущее - покрытие» (рис. 4.1).

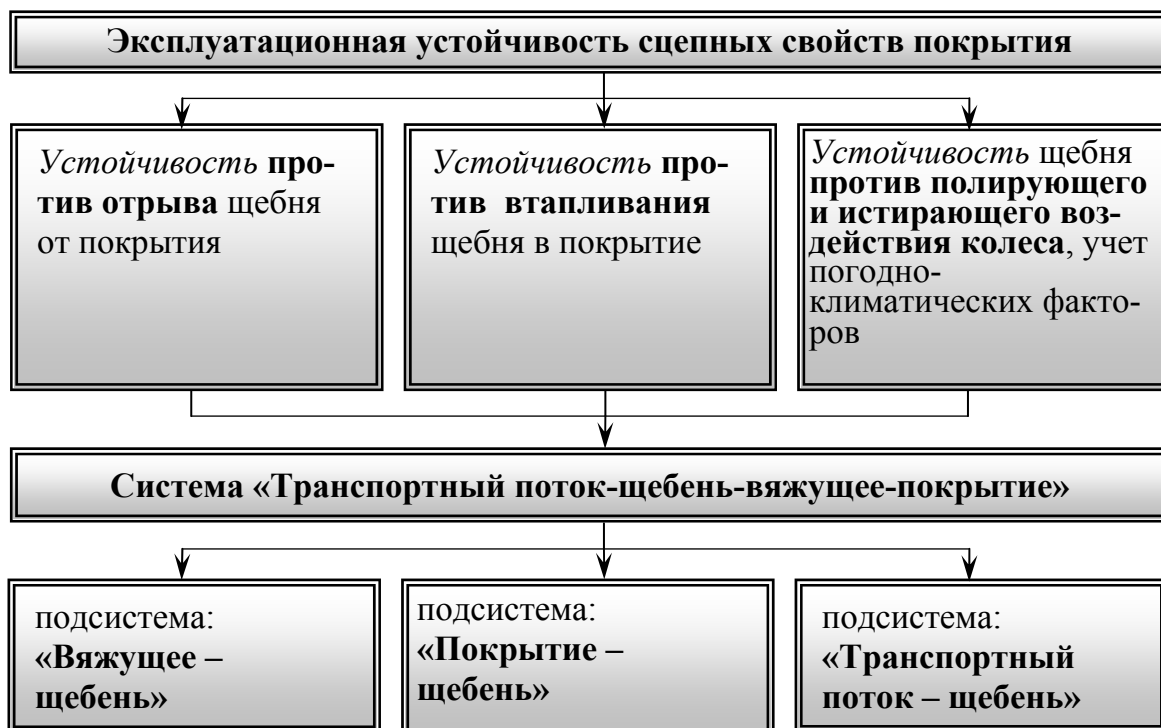


Рис. 4.1. Модель эксплуатационной устойчивости сцепных свойств покрытия с шероховатой поверхностной обработкой

Для проведения анализа и выявления причин недостаточной стабильности слоев ШПО, а также поиска теоретико-практического решения этой проблемы необходимо системно рассмотреть комплекс факторов, определяющих эксплуатационную устойчивость слоя шероховатой поверхностной обработки.

В период службы ШПО происходят изменения микро- и макрошероховатости слоя износа, обусловленные следующими процессами:

- на первом этапе формируется макрошероховатость покрытия со слоем износа. На начальном этапе службы ШПО определяющую роль в сохранности слоя играют свойства вяжущего. После открытия движения транспорта начинается выдергивание щебенки с образованием обнаженных мест в слое износа там, где произошло нарушение связей в подсистеме «вяжущее - щебень»;
- на втором этапе происходит снижение макрошероховатости за счет погружения (втапливания) сохранившегося щебня слоя износа в покрытие. Скорость втапливания щебня в покрытие в основном определяется твердостью асфальтобетона, т.е. взаимодействием в подсистеме «покрытие-щебень». На процесс втапливания щебня в покрытие в качестве сопутствующих факторов оказывают влияние климатические условия, интенсивность и состав транспортного потока и др.;
- на третьем этапе эксплуатации шероховатость покрытия со слоем износа снижается в результате изменения также макрошероховатости, но уже за счет износа самого каменного материала, т.е. истирания и полировки зерен щебня в слое ШПО за счет движения транспортного потока [2,14].

Таким образом, в подсистеме «Транспортное средство - щебень» максимальная сохранность микрошероховатости достигается правильным выбором вида каменного материала для соответствующих условий эксплуатации. Наиболее сложным вопросом в обеспечении эксплуатационной устойчивости сцепных свойств покрытия с шероховатой поверхностной обработкой является определение оптимальных связей в подсистемах «Вяжущее - щебень» и «Щебень - покрытие».

Во многих работах и научного, и нормативно-рекомендательного характера уделяется внимание улучшению адгезионных свойств самого вяжущего и активации поверхности частиц каменного материала. Действительно, это важная задача и она в настоящее время получила достаточно успешное решение как на теоретическом так и практическом уровне. Но тот факт, что вяжущий компонент в слое шероховатой поверхностной обработки (в частности, при использовании технологии втапливания минерального материала в асфальтобетонный слой) находится в основном в объемном состоянии, требует в значительно большей мере внимания обеспечению когезионной стабильности вяжущего, повышения его упруго--деформационных свойств во всем диапазоне эксплуатационных температур. Даже при использовании традиционных вяжущих и каменных материалов исследование фактов локальных разрушений шероховатого слоя выявляет причину, указывающую на разрыв когезионных связей вяжущего компонента, в то время как оторванные щебенки были полностью покрыты битумом. Следовательно, адгезионные связи в достаточной мере обеспечиваются соблюдением технологических требований при устрой-

стве шероховатого слоя, в то время как когезионный фактор обуславливается внутренними объемными связующими силами, которые устанавливаются на стадии обеспечения свойств самого вяжущего компонента.

Сейчас, безусловно, сформулированы единые теоретические требования, определяющие долговечность и работоспособность слоев ШПО. Однако детально работа составляющих механизмов процесса работы слоя и условия потери стабильности его отдельных элементов изучена недостаточно.

На основании исследований [14] и опыта эксплуатации шероховатых поверхностных обработок сформулируются основные требования к битумам в системе «вяжущее - щебень» при устройстве слоев ШПО:

- битум должен обладать высокими адгезионными и когезионными свойствами. Функции битума как органического вяжущего материала при устройстве ШПО заключаются в том, чтобы обеспечивать роль связывающего элемента, т.е. надежно крепить минеральный материал к существующему асфальтобетонному покрытию. Недостаточные адгезионные и когезионные свойства вяжущего являются первой причиной потери минерального материала при эксплуатации слоев поверхностной обработки;
- битум должен обладать необходимой теплостойкостью и деформативными характеристиками при всем годовом диапазоне температур, который может достигать 90-100 °С и более, поскольку покрытие в жаркий летний период нагревается до 60 °С, а в зимнее время охлаждается до минус 30 °С и ниже. Недостаточная теплостойкость и деформативные характеристики вяжущего становятся причиной потери минерального материала при эксплуатации слоев ШПО в летнее и в зимнее время на покрытии автомобильной дороги;
- битум должен обладать стабильностью свойств во времени, т.е. в течение всего срока эксплуатации слоев ШПО должен быть устойчивым к старению под воздействием климатических, радиационных факторов и т.п.

Механизм образования адгезионных связей определяется рядом факторов, наиболее значимым из которых является фактор химического взаимодействия между кислотными и щелочными компонентами битума и минеральным материалом. Химическими компонентами битума, обеспечивающими адгезионные свойства, являются нафтеновые углеводороды, обладающие природной кислотностью (анионоактивностью). Поэтому битум обладает, как правило, хорошей адгезией к поверхности минеральных материалов основных пород, имеющих щелочной характер. Материалы, имеющие кислую поверхность, например кварцевые пески и гранит, не образуют устойчивых связей с функциональными группами анионного типа битума. В присутствии воды углеводородные молекулы ионизируются и пленки битума приобретают отрицательный заряд, что еще более ослабляет связи битума с материалами, имеющими кислую поверхность. Такая химическая несовместимость битума с кислым камен-

ным материалом при воздействии воды в процессе эксплуатации слоя ШПО может приводить как к полному, так и частичному отделению минерального материала поверхности слоя [51, 57, 83, 84, 92].

Рассмотрим, как битум справляется со второй задачей – обеспечением прочностных и деформативных характеристик во всем диапазоне эксплуатационных температур. При высоких положительных температурах окружающей среды битум является недостаточно теплоустойчивым, что приводит к образованию пластических деформаций на асфальтобетонных покрытиях и снижению их твердости. Применение недостаточно теплоустойчивых битумов также приводит к образованию дефектов в слое ШПО и снижению сцепных свойств покрытий. Нормированная ГОСТ 22245-90 температура размягчения вязких битумов находится на уровне 35-51 °С (в зависимости от марки), что является явно недостаточным для обеспечения требуемой теплоустойчивости слоя ШПО.

При низких отрицательных температурах, до минус 30 °С – минус 40 °С в зимнее время, битумы становятся хрупкими. Так, например, если действующий ГОСТ 22245-90 допускает применение битума марки БН 60/90 с температурой хрупкости по методу «Фрааса» до -6 °С и ненормированной растяжимостью при 0 °С, то, очевидно, такой битум не в состоянии обеспечить требуемую деформативность слоя. При многократном воздействии динамических нагрузок, температурных перепадах в условиях увлажнения, замораживания и оттаивания образуются микротрещины в битумных пленках в объеме слоя ШПО. Это приводит к нарушению его сплошности и облегчает доступ воды в поры и микропоры минеральных зерен, что в дальнейшем стимулирует развитие повреждений в слое вплоть до физического его разрушения [31, 51, 92].

Таким образом, битум недостаточно устойчив к образованию трещин и недостаточно теплоустойчив, чтобы обеспечить требуемую долговечность слоев ШПО.

Проанализируем, как битум сохраняет свои свойства во времени, т.е. насколько битум устойчив к старению под воздействием технологических и эксплуатационных факторов. Битумы, выпускаемые на нефтеперерабатывающих заводах России, относятся к окисленным и характеризуются недостаточной устойчивостью к старению, что объясняется в первую очередь особенностью их производства. Технологические операции при устройстве износостойкого слоя, проводимые при высоких температурах и свободном доступе воздуха, приводят к изменению структуры и свойств битума в результате реакций окислительной полимеризации и конденсации. При последующей эксплуатации в слое ШПО такой битум быстро стареет, что приводит прежде всего к формированию в нём жесткой коагуляционной сетки асфальтенов и, как следствие, повышению хрупкости и снижению адгезионных свойств битума. Это ускоряет процесс развития повреждений в слое ШПО.

Резюмируя вышесказанное, можно заключить, что для повышения качества битумов, применяемых в дорожном строительстве для устройства поверхностных обработок, необходимо:

- значительное повышение температуры хрупкости вяжущего до температур $-25...-30$ °С. Температура хрупкости вяжущего должна быть не выше зимних расчетных температур для того, чтобы при достижении этих температур битум не становился хрупким;
- увеличение растяжимости вяжущего, особенно при низких температурах. Следует стремиться к более высоким значениям данного показателя для того, чтобы при наиболее холодной температуре воздуха вяжущее сохраняло бы необходимую работоспособность;
- повышение теплостойкости вяжущего. Температура размягчения вяжущего должна быть не ниже значений, необходимых для обеспечения требуемой теплостойкости слоя ШПО с учетом региональных климатических условий;
- улучшение адгезионных свойств, особенно к минеральным материалам кислых пород;
- повышение стабильности свойств вяжущего во времени для того, чтобы обеспечить длительную эксплуатацию слоя ШПО.

С 1996 по 2000 гг. «Краснодаравтодор» проводил крупномасштабный эксперимент по выбору оптимального модификатора битума, используемого в качестве вяжущего при устройстве поверхностной обработки. В качестве модификаторов битумов были приняты ДСТ 30-01 и раствор каучука СКС в сланцевом масле [51].

Приготовление модифицированного битума на основе ДСТ 30-01 проводилось в Красноармейском ДРСУ «Краснодаравтодора». Количество модификатора в битуме, предназначенном для устройства поверхностной обработки, составляло 2,25 - 3,5 % по массе. Модификация битума проводилась в мешалке с принудительным перемешиванием. Битум, нагретый до температуры 160 °С, подавался в мешалку в количестве 0,805 тонн, при такой же температуре в мешалку подавался жидкий битум – 0,16 тонн и ДСТ 30-01 – 0,035 тонн. Затем ингредиенты перемешивались в течение 3 - 4 часов до получения однородной массы.

В качестве каменного материала для устройства ШПО использовался щебень фракции 7 - 15 мм, полученный дроблением гравия. Перед укладкой производилось чернение щебня жидким битумом.

В 1996 г. на дороге «Темрюк – Краснодар – Кропоткин» была устроена поверхностная обработка с применением модифицированного битума. Расход вяжущего составил 1,0-1,1 л/м². При устройстве поверхностной обработки отмечалось хорошее закрепление щебня на поверхности распределенного модифицированного битума. Время формирования слоя сократилось до 3-4 часов. По истечении указанного времени при движении транспорта отрыв зерен щебня от вяжущего не наблюдался.

По окончании зимнего периода было установлено, что часть полосы наката участков с поверхностной обработкой подвергнута процессу шелушения, что явилось следствием неудовлетворительного сцепления модифицированного битума с щебнем.

В 1997 г. было принято решение по дополнительному применению БП-3 в качестве ПАВ. Особенность данного ПАВ – малая устойчивость к действию температур свыше 120 °С. Это обстоятельство привело к решению повысить активность жидкого битума, применяемого при чернении щебня. С этой целью в жидкий битум, нагретый до температуры 100-110 °С, подавался БП-3 в количестве 0,7 % от массы с дальнейшим перемешиванием в котле путем циркуляции.

В 1997 году было построено 20,3 км поверхностной обработки на автомобильной дороге «Темрюк – Краснодар – Кропоткин» с применением черненого щебня жидким битумом с БП-3 и модифицированного ДСТ 30-01 битума.

Весной 1998 г. были обследованы участки поверхностной обработки, устроенные в 1997 г. с применением модифицированного ДСТ битума и ПАВ при чернении щебня. Было установлено, что поверхностная обработка хорошо перезимовала, каких-либо дефектов обнаружено не было. В связи с этим в 1998-99 гг. было построено уже 141,7 км поверхностной обработки по указанной выше технологии.

В 1999 г. «Краснодаравтодор» определил изменение шероховатости поверхностной обработки, устроенной в 1996 г. как на традиционном битуме, так и на модифицированном. За три года эксплуатации поверхностная обработка на модифицированном битуме имела более высокие показатели шероховатости, чем на обычном битуме, а также снижения шероховатости за это время было не одинаково. В большей мере шероховатость поверхностной обработки уменьшилась на традиционном битуме, чем на модифицированном ДСТ битуме.

Обследование поверхностной обработки, устроенной в 1996-2000 гг. на дороге «Темрюк – Краснодар – Кропоткин», проведено 6.08.2001 г. [51]. При визуальном осмотре установлено, что на участках с поверхностной обработкой, устроенной в 1996 г., наблюдается процесс шелушения. Участки поверхностной обработки, построенные в 1997-1999 гг., находятся в хорошем состоянии. Шероховатость этих участков по истечении 4 лет эксплуатации оставалась средней.

В 1996-2000 гг. на дорогах «Кореновск – Тимошевск», «Темрюк – Краснодар – Кропоткин», «Тимошевск – Славянск – Крымск» и других дорогах Краснодарского края была устроена поверхностная обработка с применением битума, модифицированного раствором каучука СКС. Общая протяженность участков поверхностной обработки составила 790 км. Приготовление битумно-каучукового вяжущего осуществлялось на базе Кореновского и Павловского ДРСУ. Раствор каучука на указанные базы поставлялся в железнодорожных цистернах «Воронежавтодором». В Кореновском ДРСУ модификация битума производилась в горизонтальной емкости объемом 50 м³ (реакторе), снабжен-

ной барбатором для подачи воздуха. В емкость подавали 30 тонн битума, нагретого до температуры 190 °С, и включали воздуходувки с расходом воздуха 1 л/кг в минуту. Затем в емкость подавали раствор каучука в керосине и сланцевом масле в количестве 3,9 тонн в течение 2-х часов. Окисление контролировалось по изменению температуры размягчения. В Павловском ДРСУ приготовление БКВ осуществлялось в окислительной установке «СИ-204». Последовательность операций та же, что и в Коренновском ДРСУ.

В 1999 г. «Краснодаравтодором» определялась шероховатость поверхностной обработки, устроенной на битумно-каучуковом вяжущем и битуме. Шероховатость поверхностной обработки, устроенной на битуме, за 3 года эксплуатации уменьшилась практически до критической величины, в то время как шероховатость поверхностной обработки, устроенной на битумно-каучуковом вяжущем, практически не изменилась (с 3,7 до 3,1 см).

В августе 2001 года комиссией были обследованы автомобильные дороги, на покрытии которых были устроены поверхностные обработки с применением битумно-каучукового вяжущего [51]. Осмотром установлено, что все участки поверхностных обработок, устроенных в 1996 - 2000 гг. на наиболее грузонапряженных маршрутах, находятся в хорошем состоянии. Разрушений и иных дефектов не обнаружено.

Одновременно определяли шероховатость поверхностной обработки. По истечении 5 лет эксплуатации шероховатость оценивалась как средняя. В то время как поверхностная обработка, выполненная на битуме, была устроена повторно.

Таким образом, проведенные работы показали, что применение битумно-каучукового вяжущего и битума, комплексно модифицированного ДСТ-30-01 и ПАВ, при устройстве поверхностной обработки позволяет увеличить срок её службы в сравнении с обычной не менее чем в 1,5 раза.

Обобщая все вышесказанное, можно отметить, что в настоящее время назрела актуальная необходимость в обосновании повышения срока службы слоев шероховатой поверхностной обработки на основе полимерно-битумного вяжущего, а также решения задачи оптимизации параметров слоя ШПО с учетом устройства ее на поверхности модифицированного асфальтобетона и на основе модифицированного вяжущего. Необходимо обосновать целесообразность применения конкретных видов модифицированных вяжущих взамен традиционных битумов при устройстве слоев шероховатой поверхностной обработки дорожных покрытий, исследовать влияние различных видов модифицированных вяжущих на сохранность слоя, исследовать втапливаемость щебня слоя поверхностной обработки в асфальтобетонное покрытие на основе традиционных и модифицированных битумов, разработать модели, описывающие сохранность слоя поверхностной обработки, а также характеризующие твердость различных типов асфальтобетонных покрытий в зависимости от вида применяемого модификатора. Кроме того, требуется разработать методику определения расхода вяжущего для устройства поверхностной обработки до-

рожного покрытия, а также вид и количество модификатора вяжущего, определить нижние границы расходов вяжущего, фракции применяемого щебня для наиболее распространенных типов покрытия.

4.3. Математические методы исследования ШПО, искусственные нейроны и нейронные сети

Для того чтобы решать сложные и плохо формализуемые задачи имеется направление, которое называется искусственные нейронные сети. Применение других математических методов приближения функций многих переменных представляет собой весьма непростую в математическом отношении и трудную при численной реализации проблему. Искусственные нейронные сети состоят из нейроноподобных элементов, соединенных между собой в сеть [102].

Различают статические и динамические нейронные сети. В статических нейронных сетях изменение параметров системы происходит по некоторому алгоритму в процессе обучения. После обучения параметры сети не меняются. В динамических нейронных сетях отображение внешней информации и ее обработка осуществляется в виде некоторого динамического процесса, то есть процесса, зависящего от времени.

Нейроны организованы в нейронные сети, выполняющие различные функции. В основе искусственной нейронной сети лежит элемент - искусственный нейрон. Математическая модель нейрона представляет собой абстрактный элемент, который имеет несколько входов и один выход.

Структурная модель искусственного нейрона имеет вид, показанный на рис. 4.2.

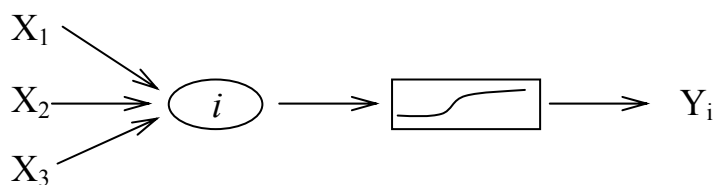


Рис. 4.2. Структурная модель искусственного нейрона

На вход i -го нейрона подается набор сигналов x_j . Далее эти сигналы суммируются с некоторым весом w_{ij} и к результату прибавляется постоянная величина b_i . Получается некоторая величина u_i .

Для получения значения y_i на выходе вычисляется $f(u)$ – функция активации, или передаточная функция. На выходе получается значение функции: $y_i = f(u_i)$.

Нами используются статические искусственные нейроны.

Виды функции активации могут быть различными. Наиболее характерная – сигмаидальная функция активации, или функция отклика, график которой показан на рис. 4.3.

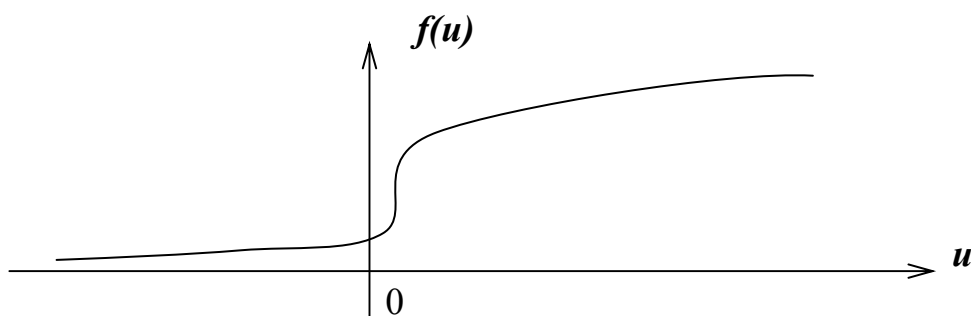


Рис. 4.3. Характерный вид сигмаидальной функции активации

Часто используются также радиальные базисные функции с функцией активации, показанной на рис. 4.4

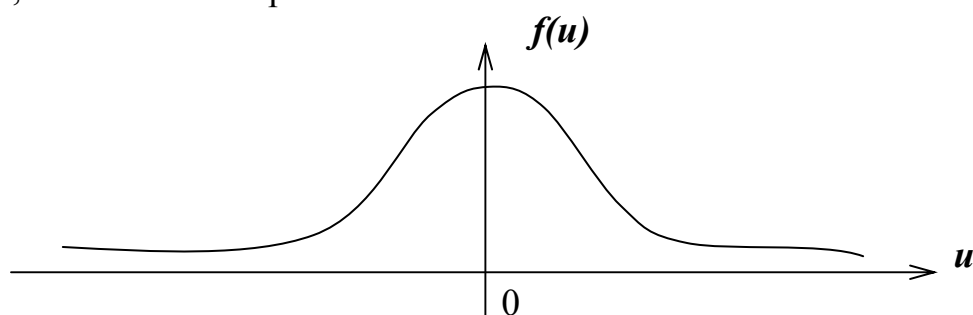


Рис. 4.4. Вид радиальной базисной функции

Для нейрона сигмаидальная функция активации применяется в виде униполярной функции:

$$F(u) = \frac{1}{e^{-\beta u} + 1}, \quad (4.1)$$

где параметр $\beta > 0$. Чаще всего на практике полагают $\beta = 1$. Важным свойством сигмаидальной функции является её дифференцируемость и простое выражение для её производной.

Искусственные нейроны должны воспроизводить сигналы, лежащие в самых разных диапазонах. Однако он может выдавать значение $[0, 1]$ или $[-1, 1]$. Для приведения в соответствие моделируемых сигналов и сигналов

нейрона данные масштабируются, то есть делается замена $y \rightarrow \frac{y}{y_{\max}}$. Таким образом, при построении нейронной сети все значения функции не выходили за пределы $[0, 1]$ или $[-1, 1]$, если условие выполнено, можно получить искомые величины.

Все особенности нейронных сетей заключаются в их структуре. Такой подход называется коннекционизмом. Согласно этой точке зрения можно получить отображение любой структуры данных, используя для этого соответствующее соединение однотипных стандартных нейронов.

Фактически для решения большинства задач достаточно трёхслойных нейронных сетей. Первый слой нейронов сети называется входным, последний слой – выходным. Нейроны, не имеющие прямых связей с входами и выходами сети, называются внутренними (внутренние слои нейрона).

4.3.1. Обучение сети

Для получения работающей искусственной нейронной сети необходимо выбрать тип используемого нейрона, определить конфигурацию сети и произвести ее обучение и тестирование на имеющемся наборе обучающих примеров.

На вход сети подаются некоторые известные сигналы, а на выходе ожидается получение известного выходного сигнала. При этом вся настройка системы заключается в выборе весов входов нейронов w_{ij} и смещений b_i . Эти параметры представляют собой некоторые числа, которые нужно подобрать на основе процедуры обучения так, чтобы на известных примерах система давала правильные ответы в виде значений функции на выходе. Система модифицирует свои параметры по мере предъявления ей новых примеров с тем, чтобы наиболее точно воспроизводить выходной сигнал. Такое обучение системы называется обучением с учителем. Возможно также обучение без учителя, когда нейросети просто предъявляются разные примеры данных.

Важно иметь представление о принципиальной возможности отобразить сложную структуру данных с помощью искусственных нейронных сетей. Представимость непрерывных отображений на основе трёхслойной нейросети является следствием теоремы «Колмогорова – Арнольда» о представимости функции многих переменных в виде суперпозиции и сумм функции одной переменной.

Целевую функцию E в простейшем случае одного нейрона можно записать в виде

$$\frac{1}{2}(d - f(u))^2, \quad (4.2)$$

где d - результат примера, $f(u)$ – выход нейрона.

В процессе обучения надо подобрать параметры нейрона так, чтобы попасть в точку d .

На практике нейрон обучают так, чтобы $E \rightarrow \min$. Для этого используются различные процедуры обучения, основанные на поиске минимума функций. В итоге необходимо добиться того, чтобы разница между тем, что выдает сеть, и нашими данными была минимальна (рис. 4.5).

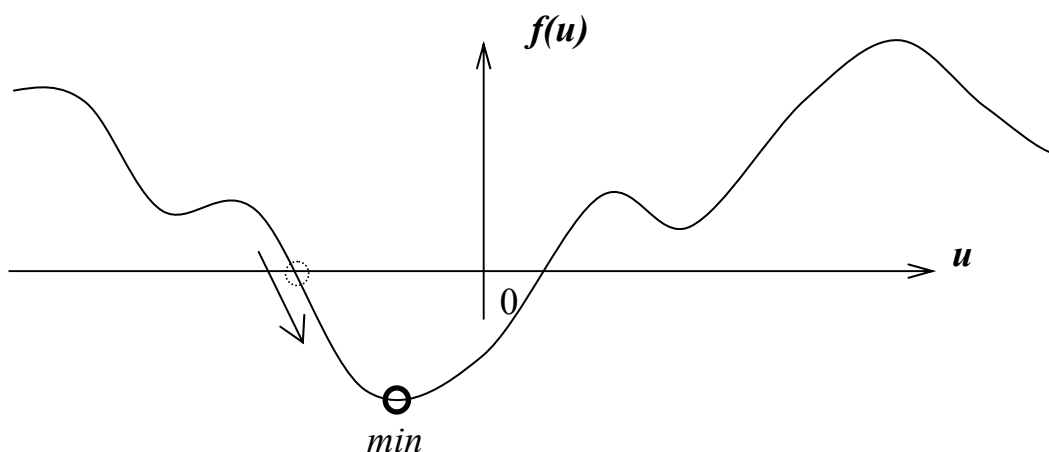


Рис. 4.5. Зависимость целевой функции от параметров сети

Если функция $E(w)$ гладкая, то поиск минимума функции можно осуществлять, делая мелкие шаги, то есть изменяя (w) таким образом, чтобы на каждом шаге уменьшалось значение $E(w)$.

Часто для построения приближений используются радиальные базисные функции. Наиболее распространен вид функции Гаусса.

Если $u = c$, то $\varphi(0) = 1$ и в точке c функция имеет максимум.

Хорошие результаты для параметров радиальных функций можно получить при использовании алгоритма самоорганизации. Данные примеров формируются внутри кластера и представляются центральной точкой, определяющей среднее значение всех элементов этого кластера (рис. 4.6)

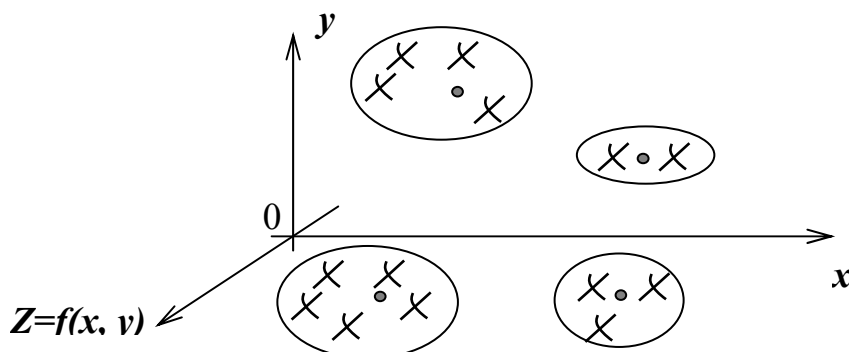


Рис. 4.6. Группы точек, образующих кластеры

Центр кластера принимается за центр соответствующей радиальной базисной функции. По этой причине количество радиальных функций равно количеству кластеров и не может корректироваться алгоритмом самоорганизации. Если обучающие данные представляют непрерывную функцию, то начальные значения центров размещаются в первую очередь в точках, соответствующих всем максимальным и минимальным значениям функции. Данные об этих центрах и их ближайшем окружении впоследствии убирают из обучающего множества, оставшиеся центры равномерно распределяются в множестве, образованном оставшимися элементами. Существуют и иные алгоритмы определения центра.

Часто используется метод наискорейшего спуска. Идея метода состоит в нахождении направлений наискорейшего приближения к минимуму целевой функции. Нужно ввести корректировку весов, чтобы разница между этими векторами была минимальной (выходным и точным значением). На рис. 4.7 показан пример.

Геометрически задача сводится к нахождению точки M (*min*) на поверхности E , то есть ищется абсолютный минимум – точка M . Поиск минимального значения E соответствует самой глубокой впадине. Сложность задачи легко себе представить, если вообразить, что мы ищем самое глубокое ущелье горной местности. Чтобы достичь точки M , нужно:

- оказаться на склоне, ведущем к этому минимуму.
- двигаться по склону к наинизшей точке кратчайшим путем.



Рис. 4.7. Характерный вид зависимости функции ошибки (целевой функции) от двух параметров сети

Если система имеет много локальных минимумов, то неправильная исходная точка приведет к нахождению не абсолютного, а локального минимума. При этом качество обучения (то есть близость E к нулю) может оказаться как высоким, так и низким независимо от алгоритма спуска.

4.3.2. Практическое применение нейронных сетей

В настоящее время существует большое число нейропакетов (в том числе свободно распространяемых), в которых реализованы алгоритмы проектирования и обучения нейронных сетей. Мы отметим характерные этапы работы таких программ на основе анализа пакета Neural Networks, приложения к программе STATISTICA (SNN) (рис. 4.8).

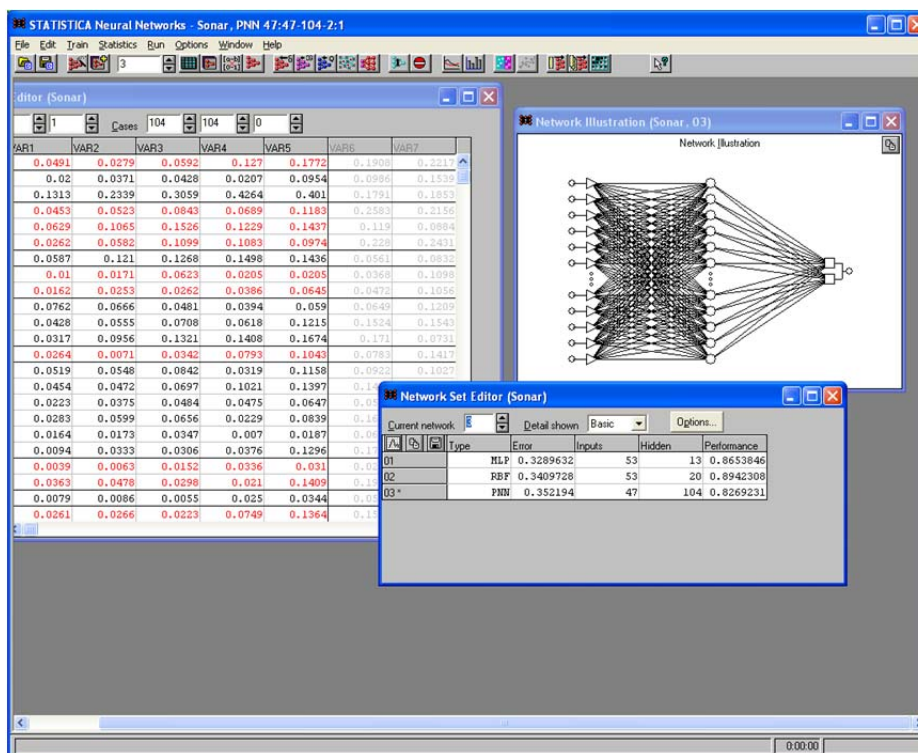


Рис. 4.8. Общий вид окна пакета Neural Networks (приложения к STATISTICA (SNN))

В пакете SNN реализованы основные типы нейронных сетей, реально используемые в решении задач, а также алгоритмы быстрого обучения, автоматическое конструирование сети и отбор переменных.

Для работы нужно ввести данные и организовать обучение. Обычно имеется несколько входных и выходных переменных. Выходная переменная чаще всего одна. Одним из важнейших критериев адекватности подобранной нейронной сети является минимизация среднеквадратичной ошибки. Кроме того, пользователь сам задает количество эпох обучения (циклов обучения, стадий). В нашем случае задаём количество эпох – 100. Способ обучения (построения) модели – «обратная прогрессия». Шаг обучения сети по всем слоям равен 0,1 единицы измерений входов и выходов параметров эксперимента. Таким образом, последовательно, на каждом этапе работы мастера, задаем параметры построения нейронной модели. Отметим также, что в качестве вариантов базисных функций сети для выбора оптимальной можем предоставить «радиальную функцию» и «многоуровневый персептрон». Функции «PNN» и «GRNN», а также «линейную» не используем в связи с особенностями решаемой задачи.

Создание нового набора данных: *DataSet*→*File New*, здесь нужно указать число входных и выходных переменных. Данные можно импортировать из других программ в режиме *File*→*Open* путем:

- использования буфера обмена *Windows*;
- доступа к различным базам данных посредством *ODBC*;
- использования модуля управления данными *Data Management*.

На вход нейронной сети могут подаваться числовые данные, а номинальные переменные должны быть переведены в числовую форму.

Работа с данными осуществляется редактором *DataSet editor*. Он позволяет редактировать данные общепринятым образом. Важно задать типы переменных и наблюдений. Типы переменных и наблюдений задаются с помощью команд меню.

Правка переменных производится в режиме *EditVariables*. Правка наблюдений – *Edit Cases*. Наблюдения бывают обучающие (черный заголовок и черное содержание), контрольные (красный), тестовые (синий) и неучитываемые (серый). Переменные различают: входная – черный заголовок, выходная – синий, входная/выходная и неучитываемая – серый. Можно выделить разные типы наблюдений по блокам.

Сеть пакета SNN может содержать слои для пре- и пост-прецессирования, в которых соответствующие исходные данные приводятся к виду, подходящему для входа сети, а выходные – к виду, удобному для интерпретации. Данные желательно нормировать. Для создания сети можно воспользоваться "кнопкой автоматического построения сети" *NetWork File New → CreateNew NetWork*.

Для того чтобы создать сеть, нужно:

- задать тип переменных в *DataSet Editor*;
- выбрать тип сети (*Type*);
- задать значение параметров (*Steps, Lookahead* - только для временных рядов. *Steps* – число шагов, по которым делается прогноз вперед. *Look ahead* – на сколько шагов вперед делается прогноз);
- задать число слоев (для многослойных сетей);
- задать число скрытых элементов;
- создать сеть - *Create*.

4.4. Исследование работоспособности слоя шероховатой поверхностной обработки на основе традиционных и модифицированных битумов

Работоспособность поверхностной обработки – технико-экономический показатель, характеризующий полезную работу дорожного покрытия с шероховатой поверхностью за время её службы. Работоспособность ШПО считается исчерпанной, когда сцепные свойства покрытия приходят в состояние, при котором необходимо повторное устройство поверхностной обработки. При этом причиной снижения сцепных свойств ШПО может быть: потеря микрошероховатости самого минерального материала (во всех возможных формах его проявления: шлифуемость, погодные факторы и т.д.); потеря каркасной геометрии (макрошероховатости) из-за втапливания минеральных зерен в покрытие (здесь, как следствие, наблюдается нарушение нормальных проектных условий водоотведения из зоны контакта колеса с покрытием) либо скачкообразное снижение коэффициента сцепления в случае потери стабильности вяжущего и отрыва минеральных зерен от покрытия. Поскольку одним из базовых факторов

сохранности слоя поверхностной обработки являются свойства вяжущего (см. п. 4.1), поэтому для изучения связей в подсистеме «вяжущее - щебень» нами были проведены исследования по сохранности макрошероховатости (структуры) слоя ШПО в зависимости от применяемого модификатора и свойств модифицированных битумов, физико-механические показатели которых приведены во второй главе.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы: битумно-каучуковые вяжущие с применением синтетических каучуков общего назначения типов СКД, СКС-30АРКПН, СКС-30АРК, СКС-30АРКМ- 27, СКС-30 АРКМ-15 с содержанием полимера в вяжущем в количестве 2,0-3,0 %, а также полимерно-битумное вяжущее марки ПБВ 60, содержащее 3,5 % модификатора ДСТ 30-01, и битум марки БНД 60/90 с применением полимерного ПАВ «Мобит» в количестве 2,0 % по массе. Как следует из данных, полимерно-битумное вяжущее отличается от битума повышенной температурой размягчения и более высокими значениями показателей деформативных свойств (глубина проникания иглы и растяжимость при 0 °С). У битума с добавкой «Мобит» за счет применения ПАВ более высокое сцепление с гранитом. Наилучшим комплексом физико-механических показателей обладают битумно-каучуковые вяжущие, которые обладают повышенными показателями деформативных свойств (растяжимостью и глубиной проникания иглы при 0°С) и сцеплением с минеральным материалом.

О структурной сохранности слоя поверхностной обработки судили по результатам испытаний по методу «Vialit». Этот метод является реализацией физической модели однофакторного воздействия на связи в системе «вяжущее - щебень» путем динамического ударного воздействия. Это позволяет судить о величине адгезии вяжущего к щебню и объемной когезии самого вяжущего, а также об устойчивости этих свойств при различных температурах и фракциях применяемого щебня (описание метода приведено во второй главе).

На начальном этапе исследования был выбран диапазон температур от -10 до 50 °С, а в качестве вяжущих были использованы полимерно-битумное вяжущее марки ПБВ 60, содержащее 3,5 % модификатора ДСТ 30-01, и битум марки БНД 60/90 с применением полимерного ПАВ «Мобит». Расход вяжущего составил минимальный уровень 0,4 л/м. Результаты испытаний слоя ШПО с применением в качестве вяжущего ПБВ и битума с добавкой «Мобит» по методу «КиШ» приведены на рис. 4.9.

Как следует из результатов испытаний с применением ПБВ и битума с ПАВ «Мобит» (см. результаты, приведенные во 2-й главе), во всем диапазоне исследованных температур битум с добавкой ПАВ обеспечивает более высокую сохранность щебенки в слое ШПО в сравнении с полимерно-битумным вяжущим. Это можно объяснить более высоким сцеплением битума с гранитным щебнем в сравнении с указанным показателем полимерно-битумного вяжущего. Таким образом, проведенное исследование показало, что в диапазоне температур -10...+20 °С определяющим показателем сохранности слоя ШПО и

устойчивости связей в системе «вяжущее - щебень» являются адгезионные свойства вяжущего. Наличие у вяжущего эластичности и повышенных значений показателей деформативных свойств в указанном диапазоне температур менее значительно повлияло на сохранность слоя поверхностной обработки.

Полученные предварительные результаты исследования показали, что наиболее определяющим показателем сохранности слоя ШПО в диапазоне температур $-10...+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ является показатель сцепления вяжущего с минеральным материалом. Вместе с тем при более высоких температурах (до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) высокая теплоустойчивость модифицированного битума позволит заметно повысить эффективность его применения. Таким образом, в диапазоне температур $-10...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ наиболее эффективным будет применение модифицированных битумов, которые отличаются не только повышенной деформативностью и теплоустойчивостью, но и улучшенными адгезионными связями с минеральными материалами. К таким вяжущим относятся битумно-каучуковые, получаемые на основе синтетических каучуков общего назначения различных типов [51]. Поэтому была изучена возможность применения для устройства слоев ШПО битумно-каучуковых вяжущих. Указанные вяжущие в силу технологии их получения отличаются повышенным сцеплением с минеральным материалом, высокими физико-механическими характеристиками и внутренними объемными связями. Для исследований был принят диапазон температур $-10...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. к. потери минерального материала при испытании по методу «КиШ» увеличиваются при повышении температуры (см. рис. 4.9).

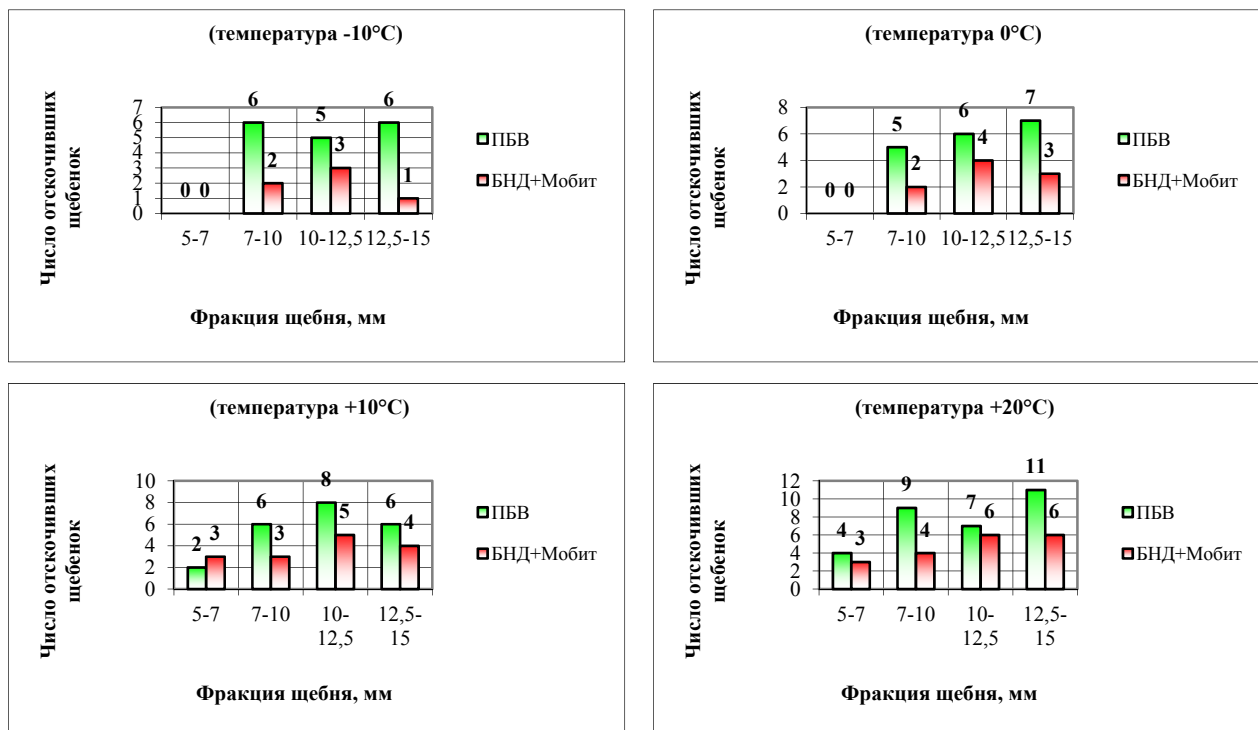


Рис. 4.9. Зависимость сохранности слоя ШПО от вида вяжущего, крупности применяемого щебня и температуры испытания

Как показали результаты эксперимента, значительную роль для сохранности минеральных частиц в слое ШПО играет фракция (размер) применяемых щебенки. На приведенных диаграммах на рис. 4.9, отчетливо видно, что чем меньше размер применяемого щебня, тем выше его сохранность в слое во всем диапазоне рассматриваемых температур. Поэтому в качестве фактора, применяемого для дополнительной оценки сохранности слоя ШПО, нами был введен *относительный условный показатель погружения* (ОУП), т.е. условная относительная высота обволакивания зерна щебня вяжущим. Для наименьшей фракции применяемого щебня (5-7 мм), величина погружения которого в слой вяжущего максимальна (а следовательно, удерживающая способность близка к идеальной) для фиксированного значения расхода вяжущего, условный относительный показатель принят за единицу.

Для более крупных фракций значение ОУП составляет долю единицы в зависимости от глубины погружения зерна в слой вяжущего и конкретно составляет соответственно для фракций: 5-7 мм – 1 ед.; 7-10 мм – 0,7 ед.; 10-12 мм – 0,58 ед.; 12-15 мм – 0,47 ед.; 15-20 – 0,35 ед. Эти величины для тех же фракций щебня, но иного расхода вяжущего (например, 0,6 л/м² или более) имеют те же самые значения. Из этого можно сделать вывод о том, что главным фактором, определяющим долговечность слоя ШПО, являются свойства вяжущего, определенные при любом его фиксированном расходе для заданной фракции щебня.

Результаты оценки сохранности слоя ШПО с применением битумно-каучукового вяжущего на основе синтетических каучуков общего назначения типов СКД, СКС-30 АРКПН, СКС-30 АРКМ-27, СКС-30 АРКМ-15 с содержанием полимера в вяжущем в количестве 2,0 - 3,0 % показаны на диаграммах на рис. 4.10 - 4.15.

Как следует из результатов, более высокая сохранность слоя характерна для условной высоты погружения со значением ближе к единице с более высоким расходом вяжущего (0,6 л/м²), а также при нормальных и отрицательных температурах -10...20 °С. Наименьшая сохранность слоя ШПО наблюдается при низком значении показателя высоты погружения, наименьшем расходе вяжущего и повышенных температурах (50 °С). При рассмотрении зависимости сохранности слоя ШПО от вида применяемого модификатора было отмечено, что наиболее эффективным является применение каучуков типа СК-30 АРКПН, СКС-30 АРКМ-15 и соответственно менее эффективными являются каучуки типа СКД и СКС-30 АРКМ - 27.

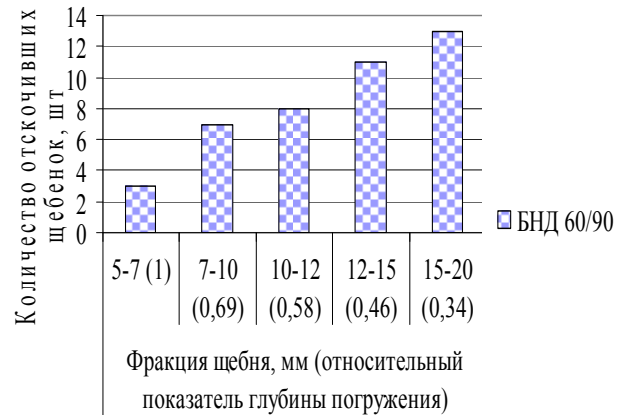
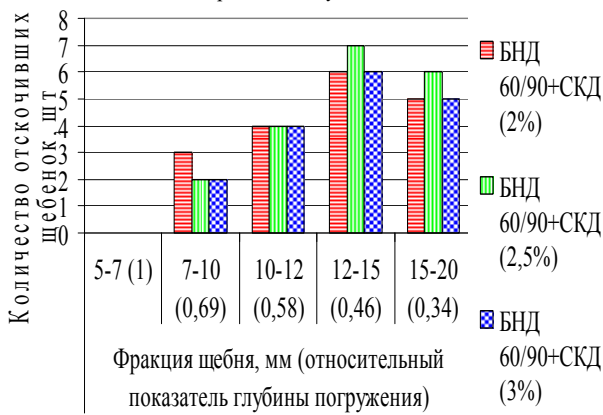
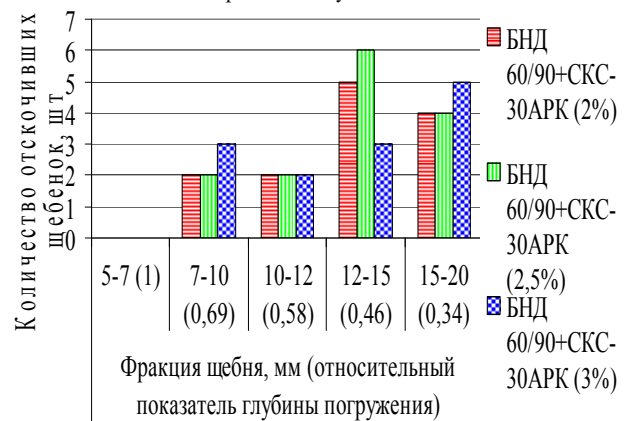
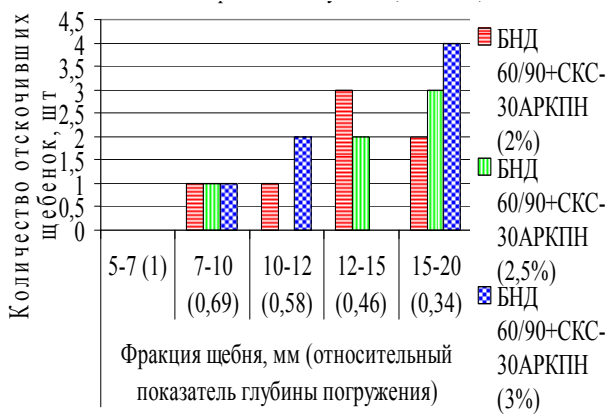
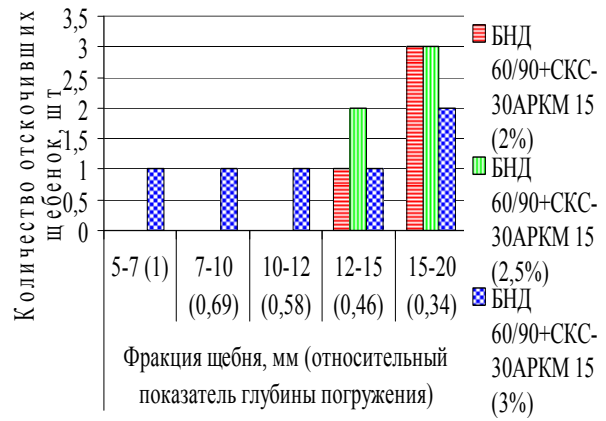
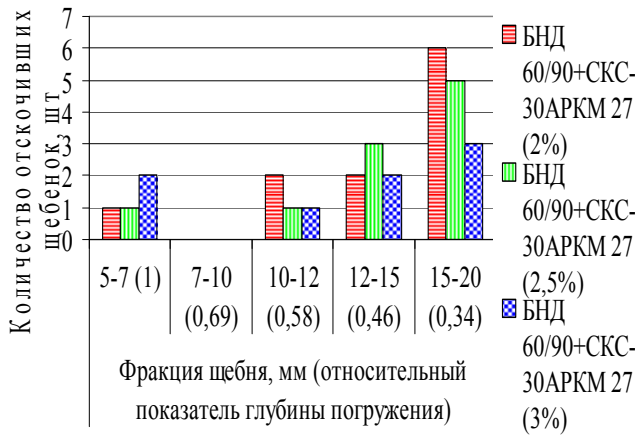


Рис. 4.10. Зависимость сохранности слоя ШПО на основе БКВ от типа каучука, его содержания в вяжущем и фракции щебня при температуре испытания $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и расходе вяжущего $0,4\text{ л/м}^2$

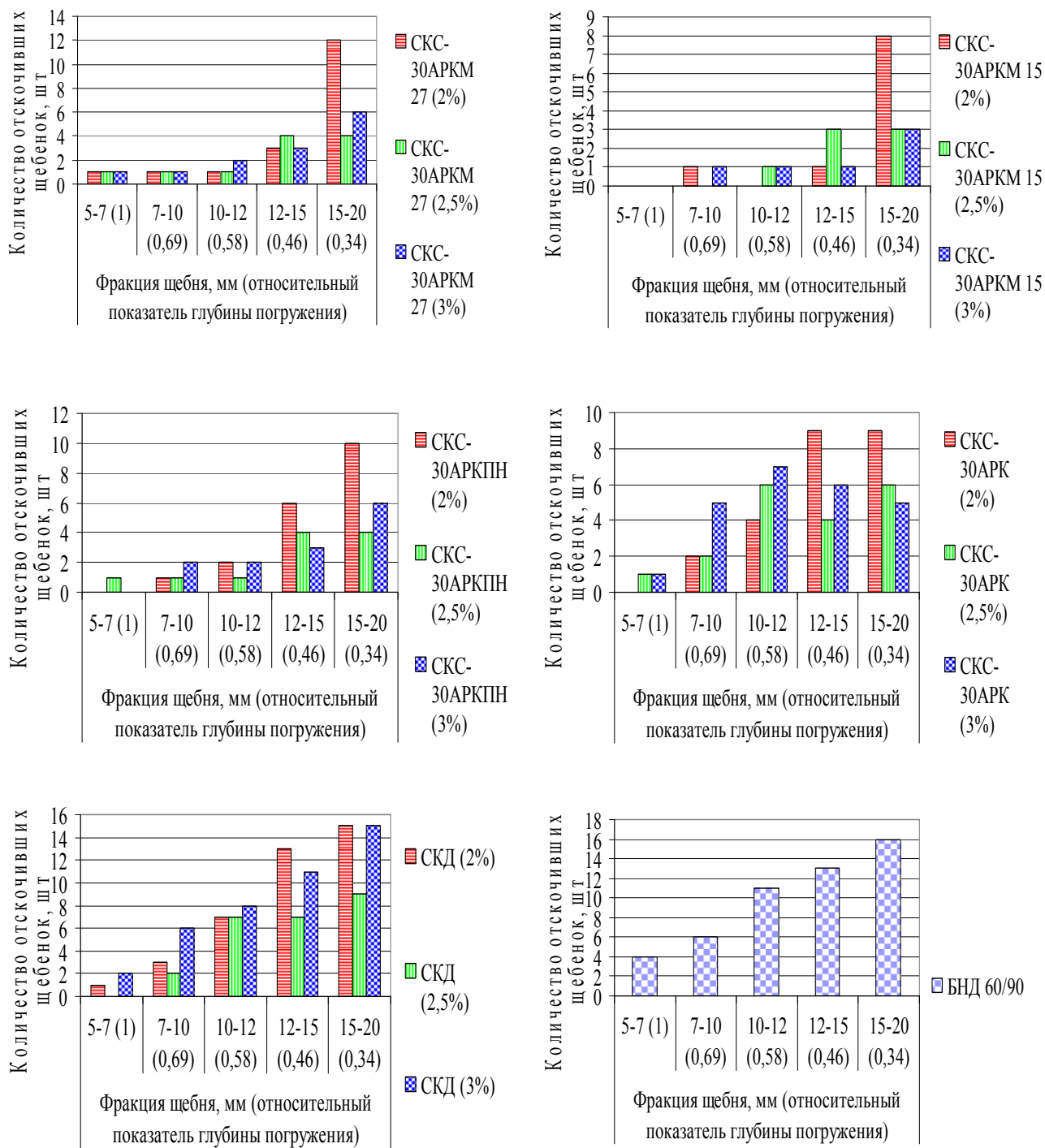


Рис. 4.11. Зависимость сохранности слоя ШПО на основе БКВ от типа каучука, его содержания в вяжущем и фракции щебня при температуре испытания $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и расходе вяжущего $0,4\text{ л/м}^2$

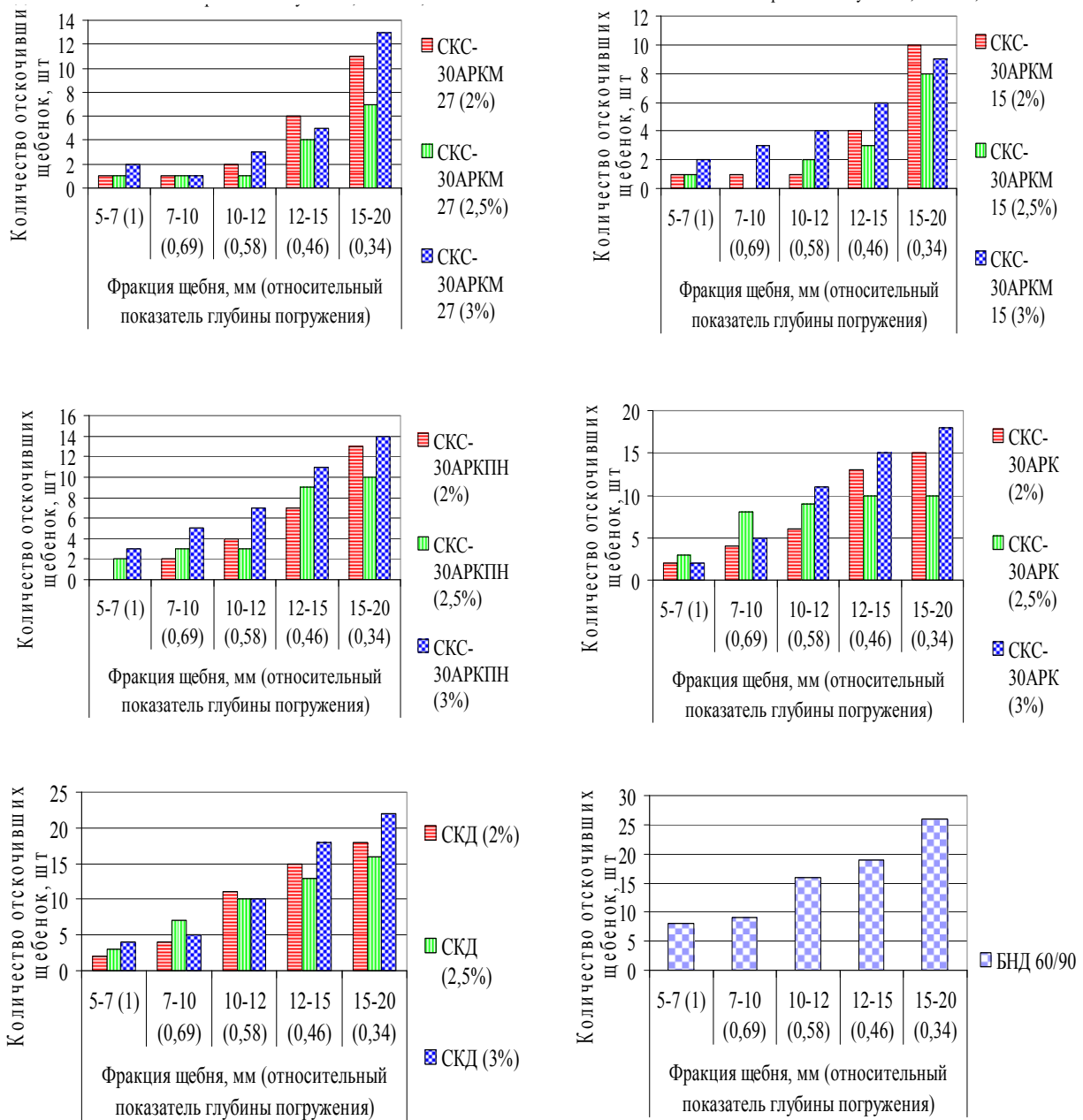


Рис. 4.12. Зависимость сохранности слоя ШПО на основе БКВ от типа каучука, его содержания в вяжущем и фракции щебня при температуре испытания $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и расходе вяжущего $0,4\text{ л/м}^2$

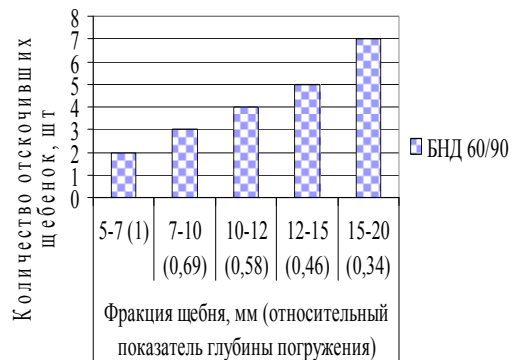
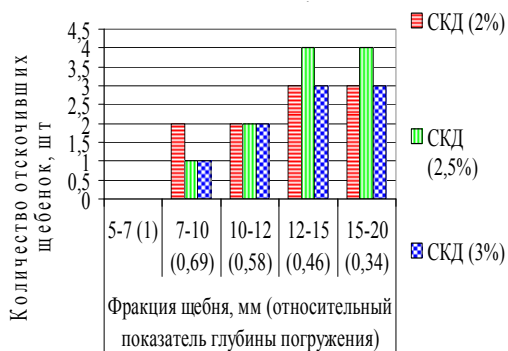
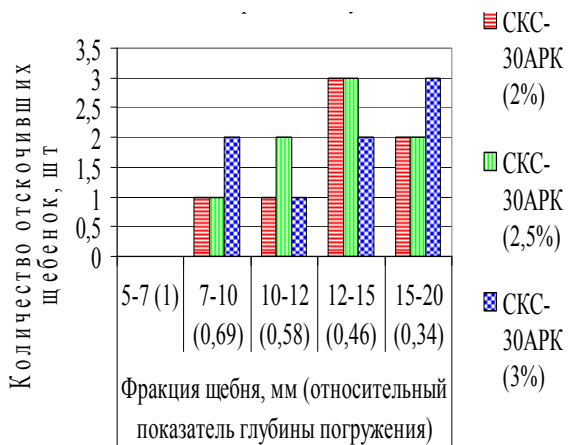
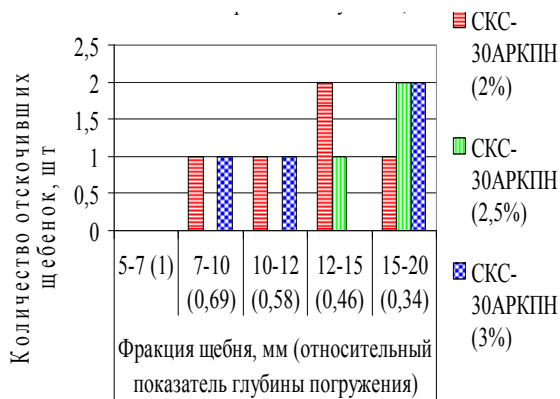
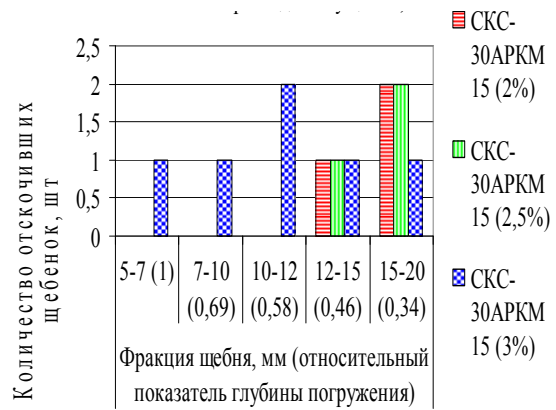
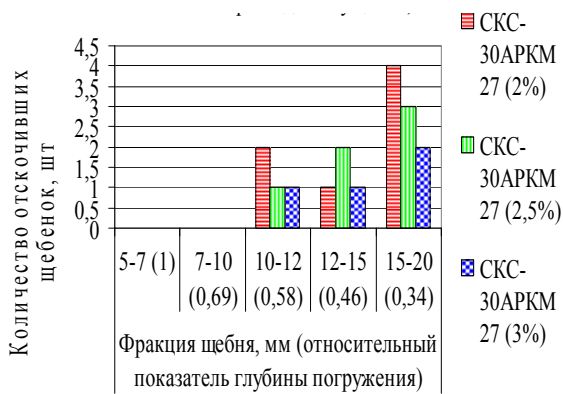


Рис. 4.13. Зависимость сохранности слоя ШПО на основе БКВ от типа каучука, его содержания в вяжущем и фракции щебня при температуре испытания $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и расходе вяжущего $0,6\text{ л/м}^2$

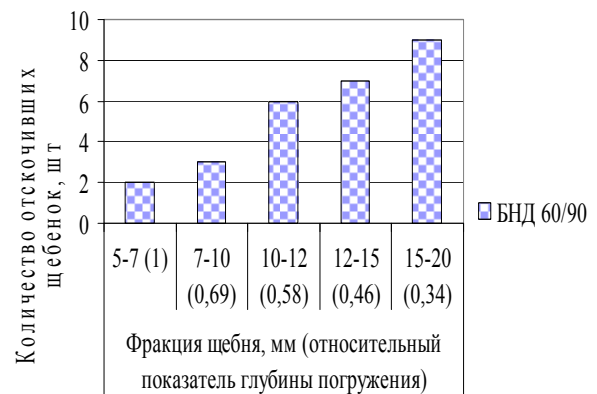
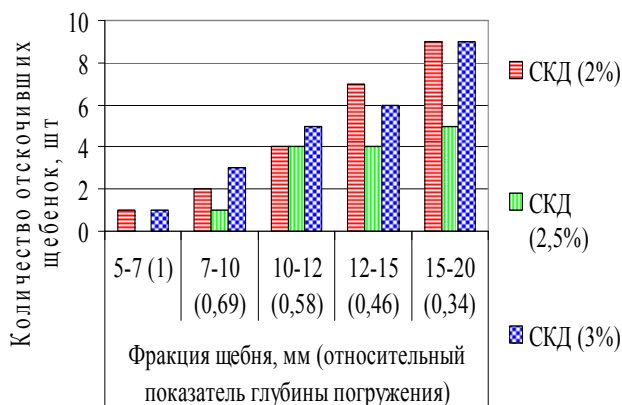
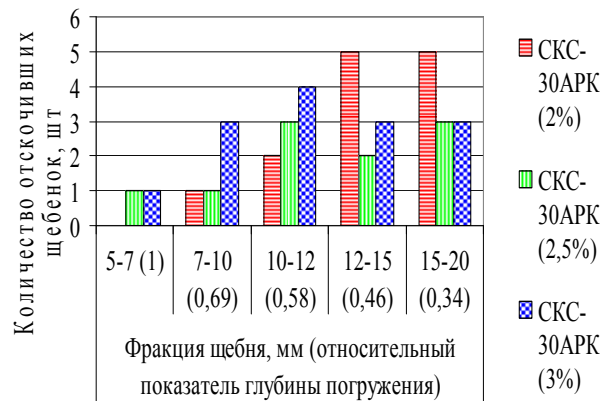
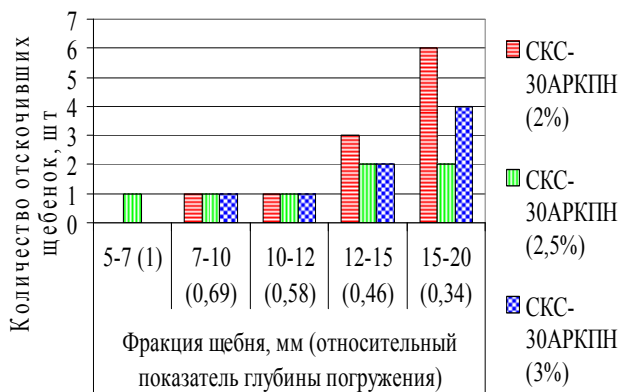
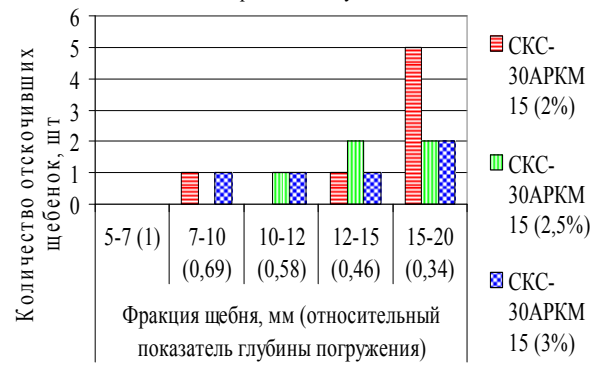
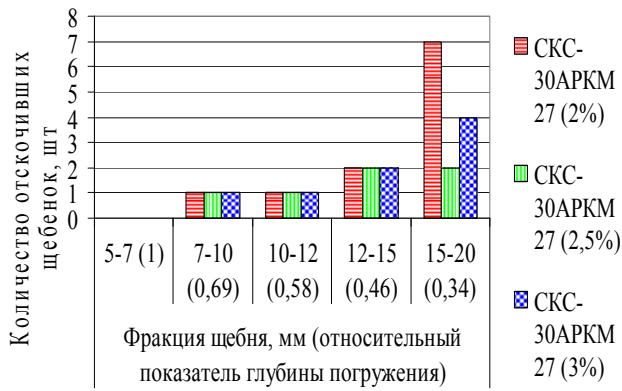


Рис. 4.14. Зависимость сохранности слоя ШПО на основе БКВ от типа каучука, его содержания в вяжущем и фракции щебня при температуре испытания $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и расходе вяжущего $0,6\text{ л/м}^2$

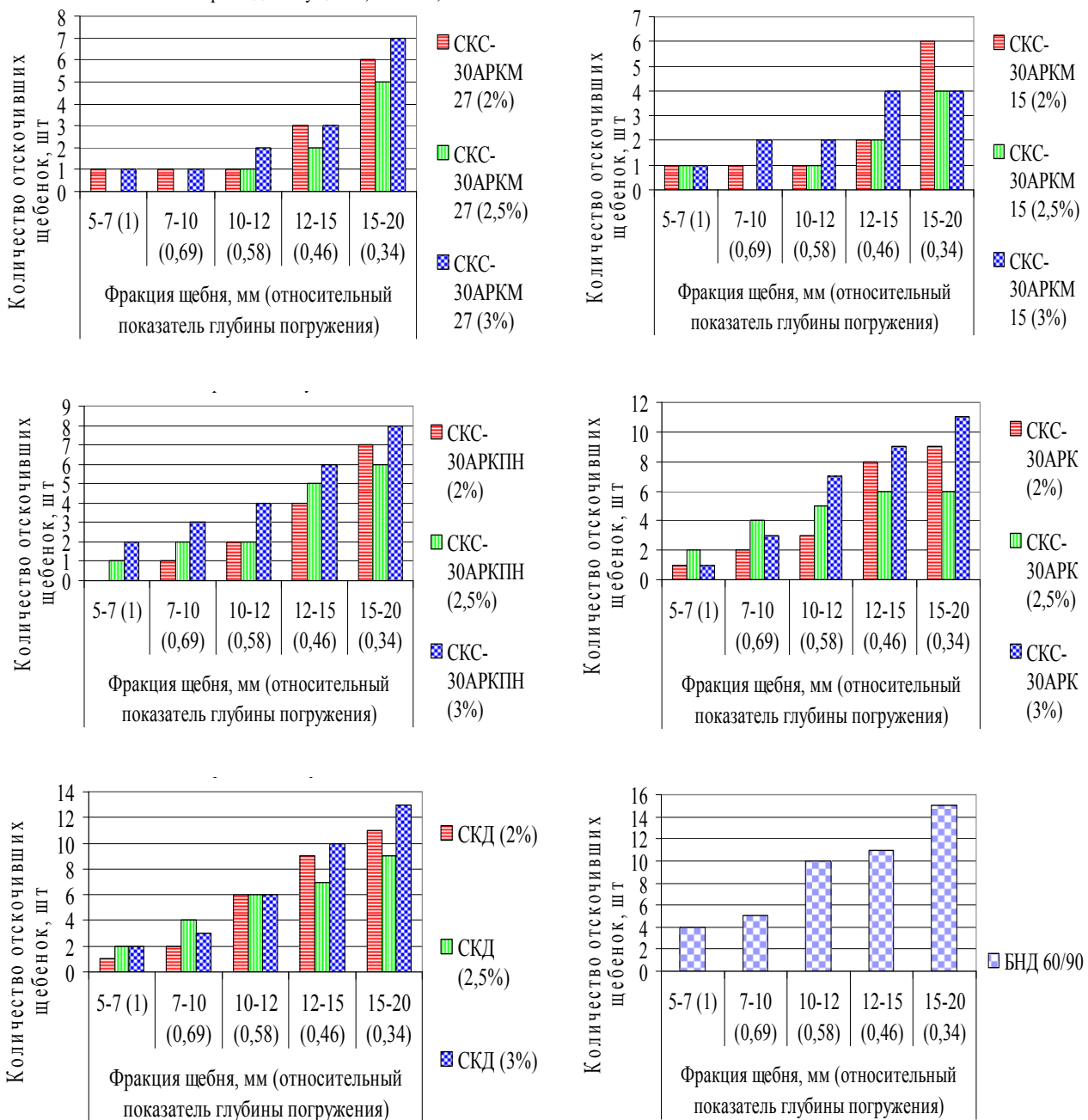


Рис. 4.15. Зависимость сохранности слоя ШПО на основе БКВ от типа каучука, его содержания в вяжущем и фракции щебня при температуре испытания $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и расходе вяжущего $0,6\text{ л/м}^2$

Применение БКВ на основе каучуков СКС-30 АРКПН или СКС-30 АРКМ-15 с расходом $0,6\text{ л/м}^2$ при более высоких значениях показателя высоты погружения щебня (т.е. для фракций щебня 5-7 и 7-10 мм) в наибольшей степени позволяет повысить сохранность слоя ШПО.

Наиболее низкая сохранность слоя ШПО во всем диапазоне температур при любых значениях показателя условной высоты погружения и расходе вяжущего установлена при применении традиционного битума марки БНД 60/90.

Проведенный эксперимент позволил установить более высокую эффективность применения модифицированных битумов для повышения сохранности слоя ШПО, а также определить оптимальные технологические параметры при устройстве слоя ШПО: расход модифицированного вяжущего, фракцию применяемого щебня, вид используемого модификатора.

4.5. Исследование процесса втапливания слоя ШПО в асфальтобетонные покрытия на основе традиционных и модифицированных битумов с различной степенью твердости

В подсистеме «покрытие - щебень» рассматривают изменения шероховатости слоя ШПО, обусловленные втапливанием щебня слоя износа в асфальтобетонное покрытие. На процесс втапливания щебня в качестве сопутствующих факторов оказывают влияние климатические условия, интенсивность и состав транспортного потока. В России температура верхних слоев покрытий в летнее время достигает 50-60 °С. Рост грузоподъемности транспортных средств, а также рост интенсивности движения в первую очередь тяжелого транспорта, является одной из основных причин образования пластических деформаций асфальтобетонных покрытий и определяющим фактором снижения шероховатости поверхностных обработок покрытий за счет втапливания щебня.

Скорость втапливания щебня из слоя ШПО в покрытие во многом зависит от твердости асфальтобетона, которая в основном определяется его структурой и вязкопластическими свойствами. С точки зрения эксплуатационной сохранности слоев ШПО в течение всего срока службы, необходимо обеспечить повышение структурной жесткости асфальтобетонного покрытия и его вязкости при высоких температурах, т.е. обеспечить его высокую твердость и сдвигоустойчивость. Одним из существенных недостатков асфальтобетона как дорожно-строительного материала, применяемого для строительства асфальтобетонных покрытий, является большая зависимость его прочностных и деформативных показателей от температуры. Так, в исследованиях А.В. Руденского было установлено, что значения показателей вязкости горячего плотного асфальтобетона в дорожном покрытии при изменении среднесуточной температуры в зависимости от периода года изменяются в тысячи раз [92].

Асфальтовый бетон относят к твердым телам, особенностью которых является наличие собственной формы, определенного объема и высокого сопротивления изменению под воздействием внешних сил. Это физическое состояние асфальтобетона зависит от температуры и скорости и продолжительности действия внешних сил. Сопротивление внешним силам с повышением температуры или длительности их действия снижается. При этом наблюдается преобладание вязкопластических свойств, приводящих к значительным необратимым деформациям. В исследованиях [92] была установлена зависимость деформативно-прочностных свойств асфальтобетона от физико-механических и физико-химических свойств дорожных битумов.

Одним из наиболее перспективных путей повышения величины сцепления в асфальтобетоне является воздействие на физико-механические свойства вяжущего. В зависимости от конкретных требований и технических условий применения с целью улучшения свойств асфальтобетона используют введение различных добавок. Например, добавки полимеров применяют для улучшения деформативности и теплоустойчивости асфальтобетона. Микро-армирующие добавки предназначены для локализации процесса образования и развития микротрещин, макроармирующие - для локализации и предотвращения развития крупных трещин в асфальтобетонном покрытии. Однако влияние полимерных модификаторов битумов на твердость асфальтобетонных покрытий изучено недостаточно.

Исходя из поставленной цели следует ожидать значительного влияния свойств битума, модифицированного различными полимерами, на показатели твердости асфальтобетона.

В практике дорожного строительства используются битумы, модифицированные добавками типа СБС (отечественные – ДСТ 30-01 и импортные – типа «Кратон-Д» и др.), полимерной композиции «Каудест-Д», растворов синтетических каучуков типа СКС и др. [81]. Значительное распространение на юге России получила полимерно-армирующая добавка РТЭП, вводимая непосредственно в асфальтобетонную смесь. Каждый из вышеперечисленных модификаторов обладает определенным комплексом свойств и, как следствие, оказывает различное влияние на свойства асфальтобетона, в том числе на его твердость в покрытии. Поэтому актуальным является вопрос сравнительного анализа твердости асфальтобетона с применением различных модификаторов. Он приобретает особую остроту в связи с тем, что вопросы максимальной эффективности использования того или иного модификатора при строительстве дорожных покрытий в разных дорожно-климатических зонах России до настоящего времени не решены.

С целью установления влияния различных модификаторов на твердость горячего плотного асфальтобетона нами были проведены исследования. Подбор состава минеральной части асфальтобетона осуществлялся в соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2009 для асфальтобетона типа «Б». С целью повышения внутреннего трения в материале для проектирования состава минеральной части асфальтобетонной смеси были использованы гранитный щебень кубовидной формы и искусственный песок из отсева дробления гранита. Оптимальное содержание обычного или модифицированного битума в каждом составе асфальтобетонной смеси определялось экспериментальным методом.

Для оценки влияния добавок полимеров на твердость асфальтобетона были приготовлены асфальтобетонные смеси на модифицированных битумах, фи-

зико-механические свойства которых приведены в табл. 2.13. Контрольная смесь одинакового гранулометрического состава была приготовлена на БНД 60/90 и БНД 90/130. Физико-механические показатели асфальтобетонов всех составов, определенные по методикам ГОСТ 12801-98, приведены в табл. 4.1.

Из данных табл. 4.1 следует, что асфальтобетон на основе различных модификаторов обладает (в сравнении с асфальтобетоном на традиционном битуме) пониженной температурной чувствительностью (соотношение R_0/R_{50}), что свидетельствует о меньшей зависимости прочности асфальтобетона с применением модификаторов от температуры. Так, РТЭП улучшает указанный показатель в 1,6 раза, каучук СКС - примерно в 1,5 раза, «Кратон Д-1101» - в 1,3 и «Каудест-Д» - в 1,1 раза. Асфальтобетоны на основе модификаторов характеризуются повышенной теплоустойчивостью в сравнении с асфальтобетоном на битуме. Так, РТЭП повышает прочность при 50 °С смесей на 74 % , каучук СКС на 10-48 % в зависимости от вязкости вяжущего и содержания в нем полимера, «Кратон Д-1101» - на 10-20 % и «Каудест-Д» - на 4-15 % в зависимости от вязкости вяжущего. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что добавки модификаторов положительно влияют на сцепление в асфальтобетонной смеси.

Твердость асфальтобетонных образцов вышеприведенного состава оценивали по методике [103]. Под твердостью дорожного покрытия принимали глубину погружения в материал покрытия конуса заданной формы под определенной динамической нагрузкой и при температуре покрытия 20, 30 и 50 °С. Для определения твердости покрытия использовали твердомер ТК-1 конструкции Казахского филиала СоюзДорНИИ.

Результаты эксперимента по оценке твердости асфальтобетона вышеуказанного состава (табл. 4.1) приведены на рис. 4.16 - 4.20.

Наименее твердым является образец асфальтобетона типа «Б», приготовленного на традиционном вязком дорожном битуме марки БНД 90/130. Применение модификаторов значительно повышает твердость асфальтобетона, среди которых наиболее эффективна полимерная композиция «Каудест-Д», полученная на основе альфаметилстирольных каучуков, и раствор каучука типа СКС. Менее значительно повышает твердость асфальтобетона полимерно-армирующая добавка РТЭП.

Положительный эффект синтетических каучуков на показатель твердости асфальтобетона можно объяснить большой молекулярной массой модификатора, что, как было ранее установлено, влияет на структуру и прочность битумных пленок на минеральных зернах асфальтобетона.

Таблица 4.1

Физико-механические свойства плотных модифицированных асфальтобетонов типа «Б» на основе различных модификаторов

Вид и содержание модификатора в вяжущем, марка вяжущего	Средняя плотность, г/см ³	Водонасыщение по объему, %	Набухание по объему, %	Водостойкость	Водостойкость при длительном водонасыщении	Предел прочности при сжатии, МПа, при температурах, °С			Теплопроводность R ₀ /R ₅₀
						50	20	0	
Без модификатора, на основе БНД 60/90	2,36	4,1	0,27	0,95	0,8	1,15	2,73	6,1	5,5
РТЭП 1,5 % по массе от мин. части	2,42	1,7	0,14	0,85	0,75	2,0	5,5	9,4	4,7
«Кратон-Д», (2-х стадийн. способ получения ПБВ 130)	2,41	1,07	0,05	0,80	0,72	1,2	3,9	6,2	5,17
«Кратон-Д», (1-стадийн. способ получения ПБВ90)	2,35	3,9	0,07	0,85	0,72	1,4	3,8	5,8	4,14
Раствор каучука СКС-2,5 % в БКВ 90/130	2,41	2,2	1,1	0,95	0,85	1,25	3,28	6,05	4,84
Раствор каучука СКС -3,0 % в БКВ60/130	2,39	2,8	0,2	1,0	0,85	1,38	3,25	6,4	4,6
Раствор каучука СКС – 3,0 % в БКВ 60/90	2,38	2,43	од	1,0	1,0	1,71	3,98	6,51	3,8
«Каудест – Д» -5,7 % в ПБВ 90/130	2,39	2,07	0,3	0,85	0,73	1,3	4,0	6,3	4,85
«Каудест-Д» - 5,7 % в ПБВ 60/90	2,39	1,77	0,2	0,88	0,79	1,2	3,4	7,2	6,0
Требования ГОСТ 9128-2009 на горячий асфальтобетон типа «Б» для III ДКЗ	-	1,5-4,0	-	>0,9	>0,85	>1,2	>2,5	<11,0	-
То же для IV ДКЗ		1,5-4,0	-	>0,85	>0,75	>1,3	>2,5	<13,0	-

Для выяснения влияния типа синтетического каучука на твердость асфальтобетона были исследованы образцы, в которых в качестве модификатора битума были использованы синтетические каучуки общего назначения типов СКД, СКС-30 АРКПН, СКС-30 АРК, СКС-30 АРКМ-27 и СКС-30 АРКМ-15.

Применение добавок каучука в вяжущем позволяет увеличить прочность асфальтобетона при 50 °С в 1,1-1,8 раза в сравнении традиционным вариантом в зависимости от содержания и типа каучука. Не уступает влиянию каучуков применение дивинил-стирольного термоэластопласта марки ДСТ 30-01. Применение полимерно-битумного вяжущего, полученного на основе исходного вязкого битума путем введения в него 3,5 % ДСТ, позволило увеличить прочность асфальтобетона при 50°С в 1,8 раза. Применение полимерной адгезионной добавки «Мобит» позволило увеличить прочность асфальтобетона при 50 °С в 1,6 раза, что несколько меньше, чем при применении наиболее эффективных полимерных модификаторов, но достаточно высокий результат. Рассматривая результаты испытания асфальтобетона полукаркасной структуры типа Б, можно отметить, что применение модификаторов оказывает примерно равнозначный эффект на прочность асфальтобетона при 50 °С. Так, применение ДСТ увеличивает показатель в 1,8 раза, добавки «Мобит» в 1,5 раза, а при введении каучуков наблюдается увеличение прочности в 1,4 - 1,6 раза, в зависимости от содержания и типа каучука. Зависимости твердости для асфальтобетона типа «Б» от применяемого модификатора, количества полимера в вяжущем и температуры испытаний приведены на рис. 4.16. - 4.20.

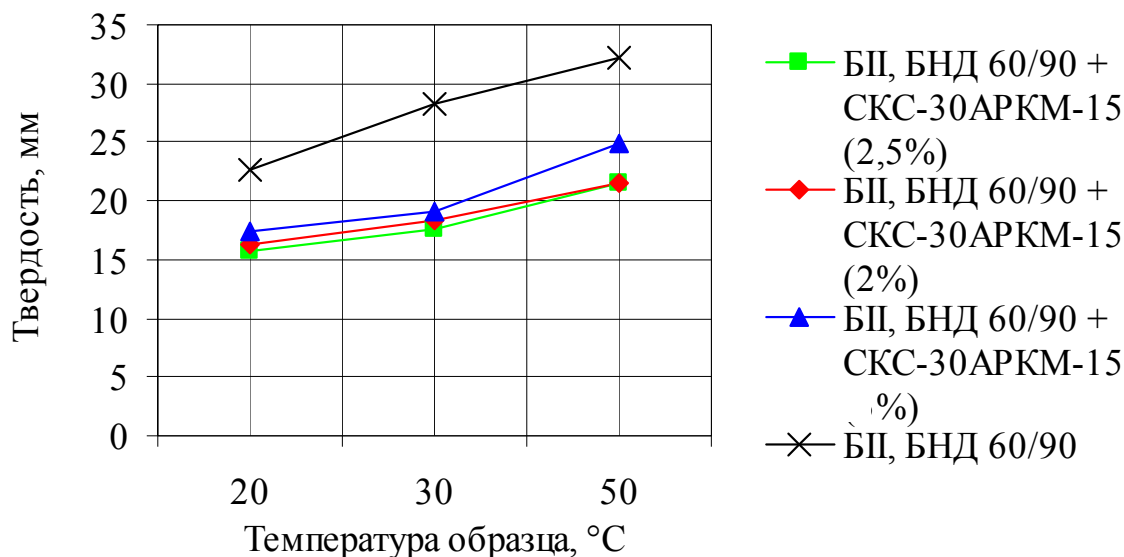


Рис. 4.16. Зависимость твердости асфальтобетона типа «Б» на основе модификатора типа СКС-30АРКМ-15 от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

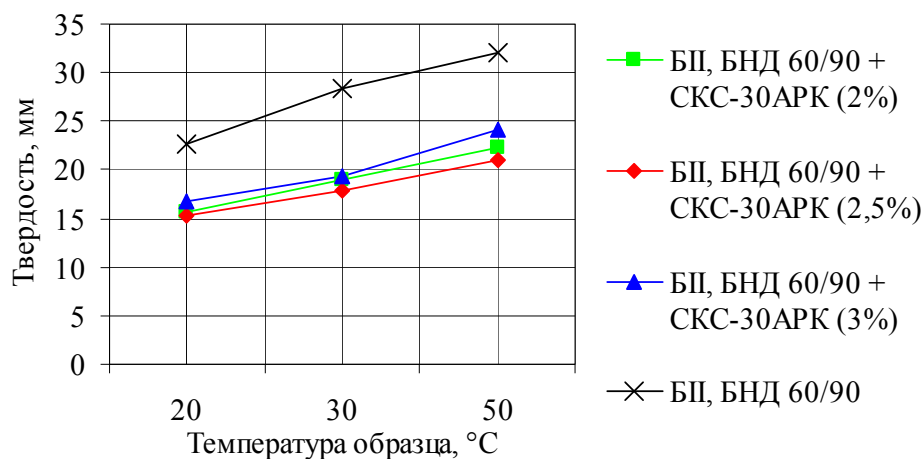


Рис 4.17. Зависимость твердости асфальтобетона типа «Б» на основе модификатора типа СКС-30 АРК от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

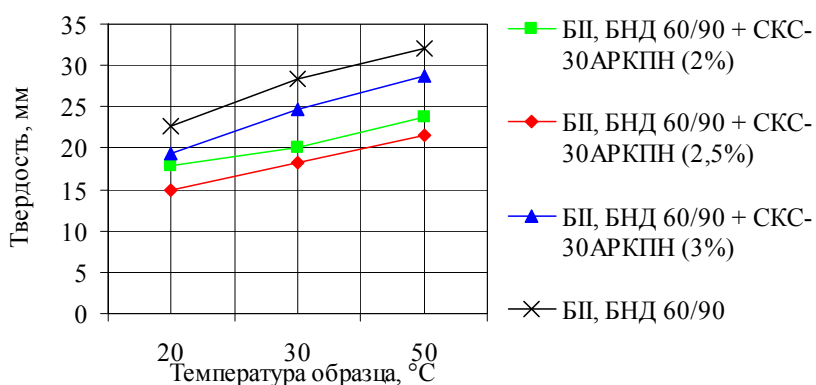


Рис.4.18. Зависимость твердости асфальтобетона типа «Б» на основе модификатора типа СКС-30 АРКПН от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

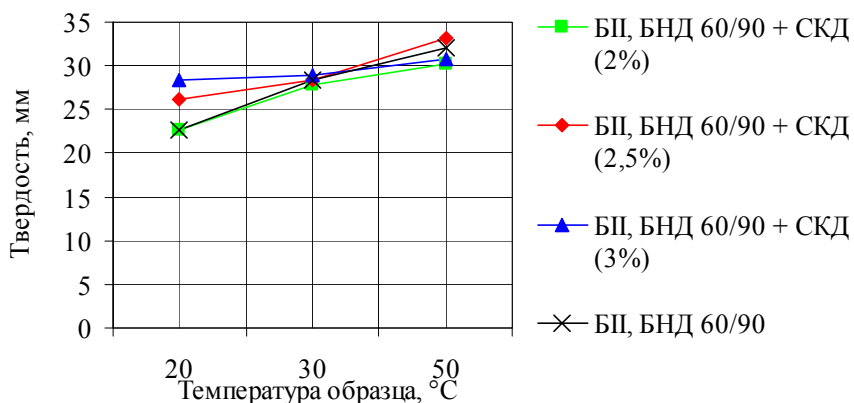


Рис 4.19. Зависимость твердости асфальтобетона типа «Б» на основе модификатора типа СКД от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

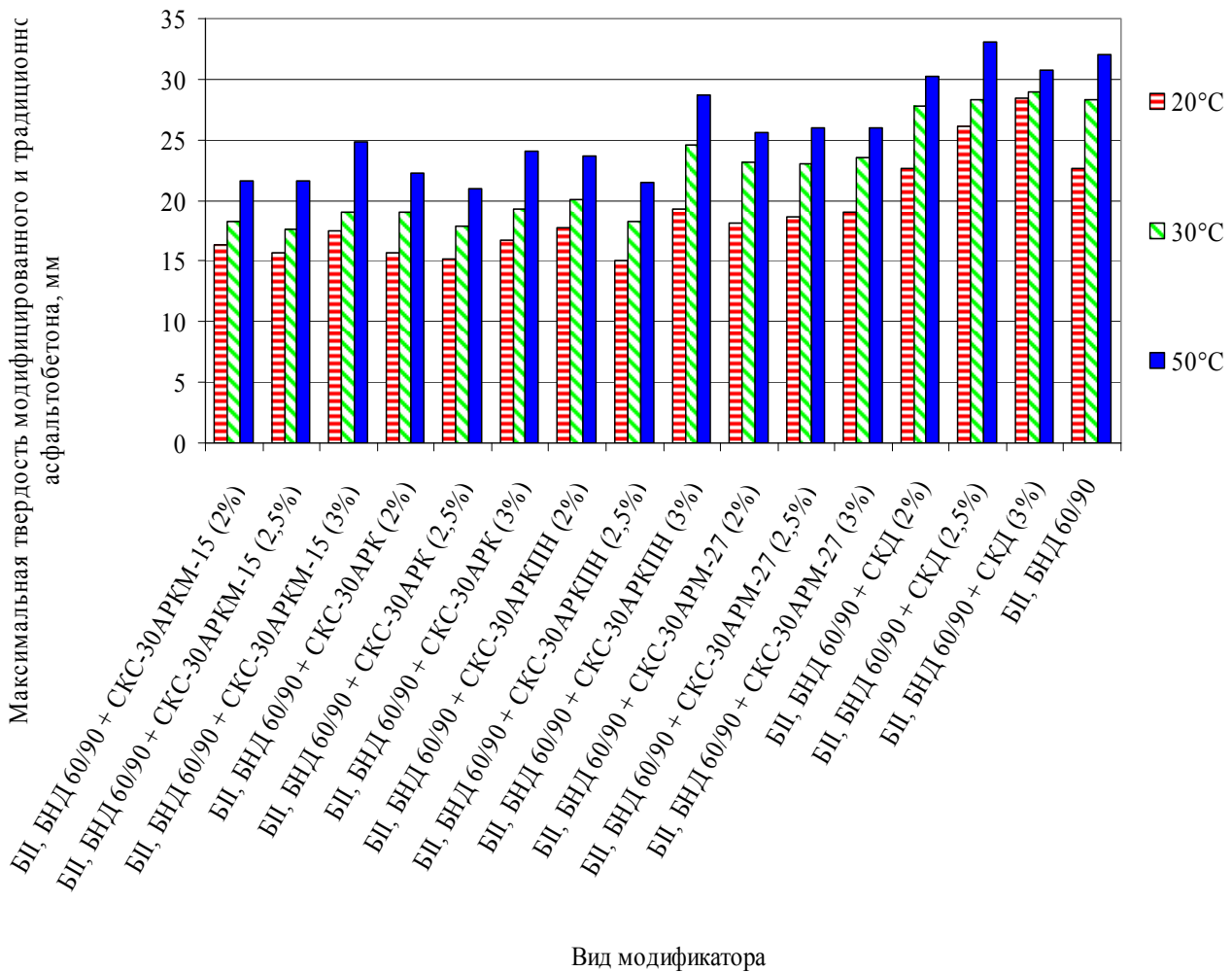


Рис.4.20. Зависимость максимальной твердости модифицированного асфальтобетона типа «Б» от вида модификатора, его количества в вяжущем и температуры испытания

Как следует из результатов испытаний, модифицированный синтетическим каучуком асфальтобетон даже при минимальном содержании полимера в вяжущем обладает большей твердостью в сравнении с традиционным асфальтобетоном. При сравнении результатов оценки твердости асфальтобетонов, модифицированных синтетическими каучуками общего назначения типов СКД, СКС-30 АРКПН, СКС-30 АРКМ-27, СКС-30 АРКМ-15 с содержанием полимера в вяжущем в пределах 2,0 - 3,0 %, можно отметить, что максимальная твердость асфальтобетона практически во всех случаях установлена при содержании модификатора в вяжущем в количестве 2,5 %, в пересчете на сухое вещество в растворе каучука в сланцевом масле (см. рис. 4.9-4.14).

Далее аналогично рассмотрим зависимости твердости для асфальтобетона каркасной структуры типа «А» от применяемого модификатора, количества полимера в вяжущем и температуры испытаний, которые приведены на рис. 4.21 - 4.26.

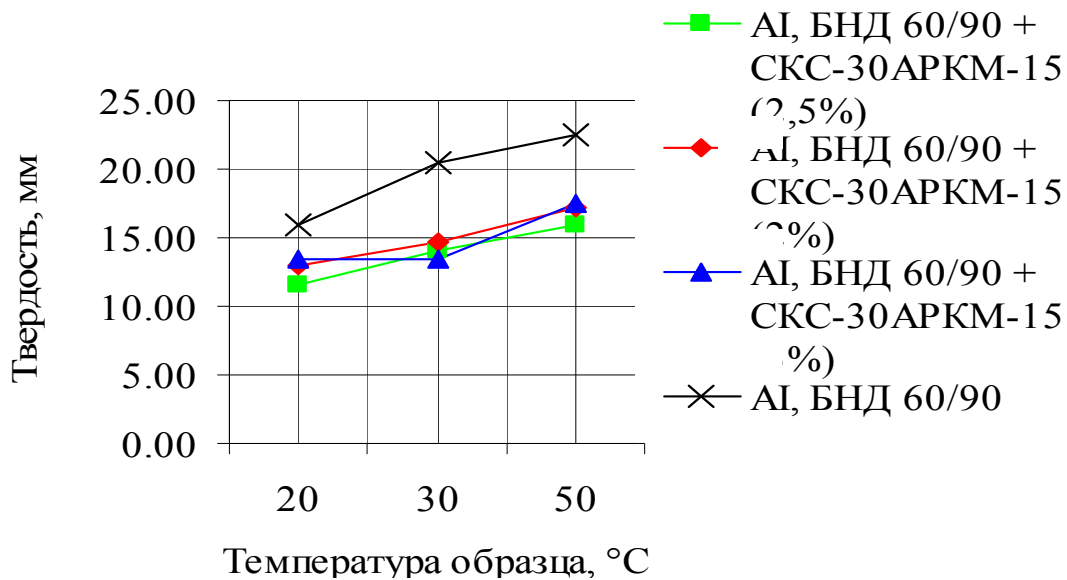


Рис.4.21. Зависимость твердости асфальтобетона типа «А» на основе модификатора типа SKC-30 ARKM-15 от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

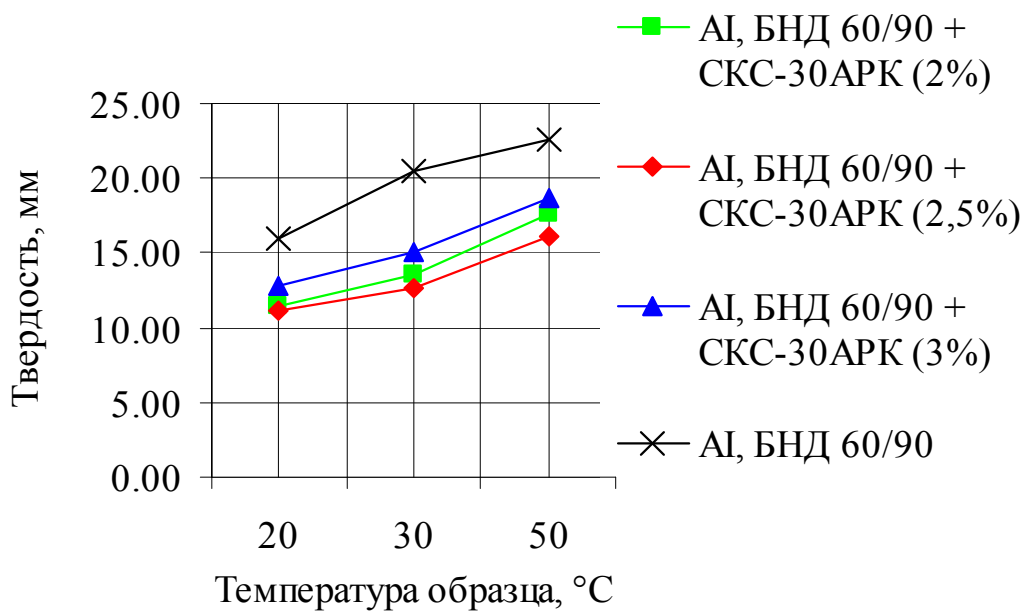


Рис.4.22. Зависимость твердости асфальтобетона типа «А» на основе модификатора типа SKC-30 ARK от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

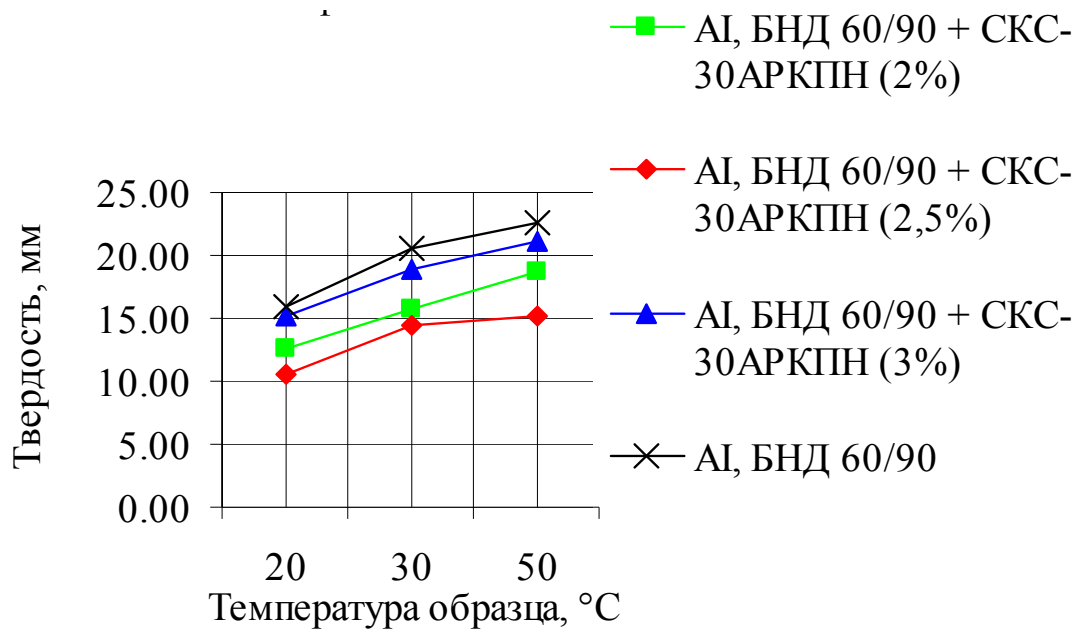


Рис. 4.23. Зависимость твердости асфальтобетона типа «А» на основе модификатора типа СКС-30 АРКПН от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

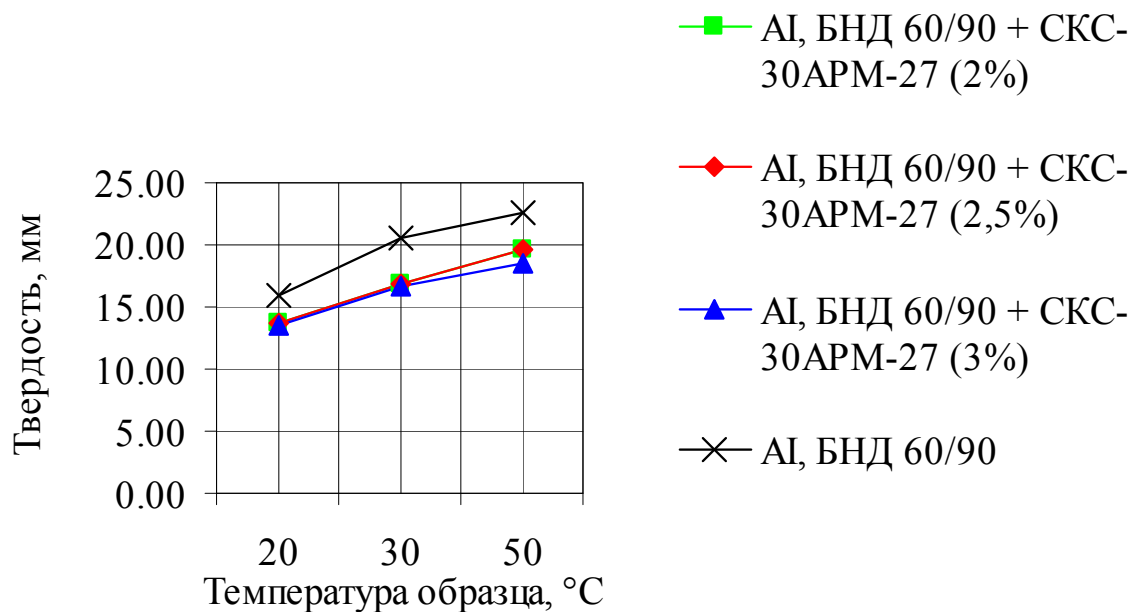


Рис.4.24. Зависимость твердости асфальтобетона типа «А» на основе модификатора типа СКС-30 АРКМ-27 от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

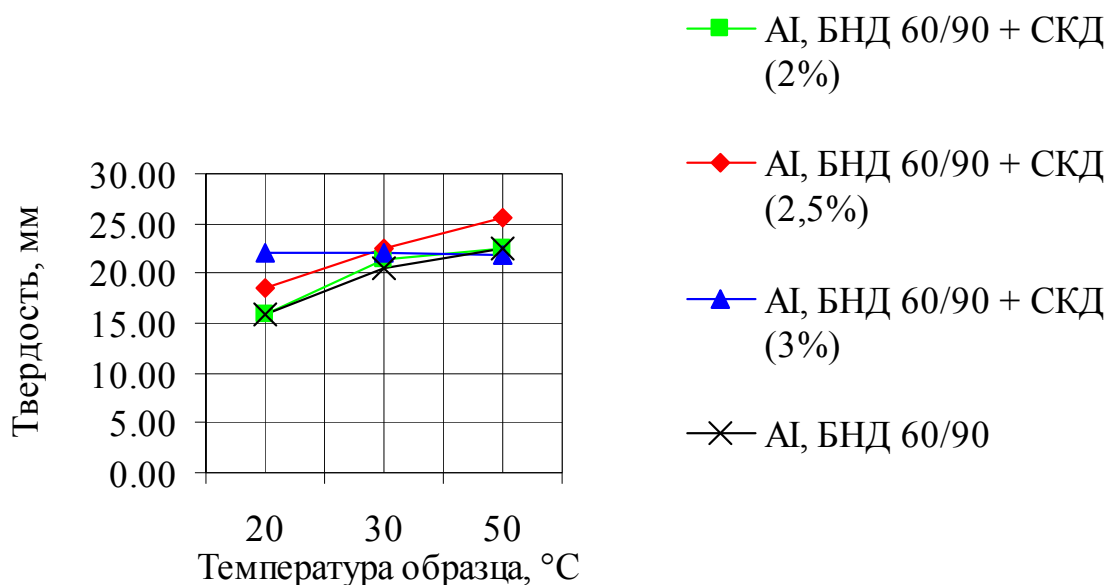


Рис.4.25. Зависимость твердости асфальтобетона типа «А» на основе модификатора типа СКД от температуры испытания и содержания модификатора в вяжущем

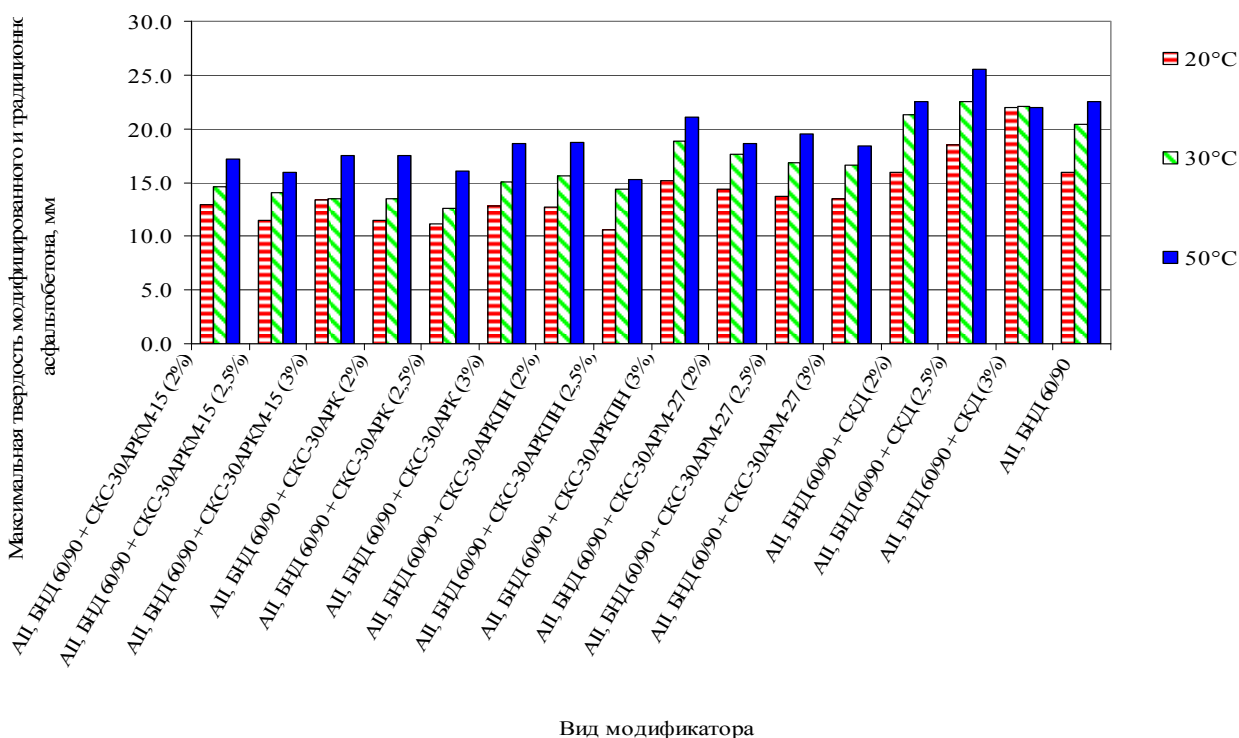


Рис.4.26. Зависимость максимальной твердости модифицированного асфальтобетона типа «А» от вида модификатора, его количества в вяжущем и температуры испытания

Оценивая влияние различных типов каучуков на твердость асфальтобетона при различных температурах (см. диаграмму на рис. 4.20, 4.26), было отмечено, что наибольший положительный эффект производят бутадиенстирольные каучуки типов СКС-30 АРКМ-15 и СКС-30 АРК при температурах 20 - 50 °C и со-

ответственно наименьший эффект установлен при применении дивиниловых каучуков типа СКД. В целом при применении в качестве модификаторов синтетических каучуков общего назначения показатель твердости асфальтобетона улучшается в 1,2-1,5 раза.

Таким образом, проведенный эксперимент позволил установить, что поверхностная обработка, выполненная на асфальтобетонных покрытиях с применением модификаторов, дольше сохраняет требуемую шероховатость вследствие большей устойчивости модифицированного асфальтобетона к втапливанию щебня в покрытие.

4.6. Прогнозирование долговечности слоя ШПО на основе модифицированных битумов на асфальтобетонных покрытиях различной твердости

Проведенными экспериментальными исследованиями показано, что на долговечность слоя ШПО в подсистемах «вяжущее - щебень» и «щебень - покрытие» определяющее влияние оказывает целый ряд факторов: температура, вид модификатора и его содержание в вяжущем, расход вяжущего в слое ШПО, тип «А» асфальтобетона (в том числе по твердости) и применяемого для его приготовления вяжущего и т.д. Таким образом, прогноз долговечности слоя ШПО с применением битума, модифицированного различными добавками, является сложной многовариантной задачей. Для решения такой задачи необходима разработка методики, позволяющей на основе некоторого экспериментального ряда выбрать оптимальное количественное значение важнейших факторов, при которых прогноз долговечности слоя ШПО был бы наиболее благоприятным. Для разработки такой методики наиболее эффективным является применение нейронных сетей.

При проведении экспериментов для изучения взаимосвязей в подсистеме «вяжущее - щебень» был получен экспериментальный ряд для битумов, модифицированных полимерными добавками с разным их процентным содержанием в некотором диапазоне расхода вяжущего, а также с использованием всех фракций щебня и при разных температурных условиях испытаний. Результаты испытаний в подсистеме «вяжущее - щебень» фиксировались по итоговому параметру – «количество отскочивших щебенки».

Во втором типе испытаний в подсистеме «щебень - покрытие» фиксировался тип вяжущего, применяемого для приготовления смесей и процентное содержание в нем модификатора, температура асфальтобетона, число ударов при испытании, а результат оценивался по итоговому параметру – «твердости асфальтобетона». Таким образом, был получен экспериментальный ряд в рассматриваемых подсистемах, что позволяет построить и обучить нейронную сеть, которая будет предсказывать выходные параметры в виде числа отскочивших щебенки или твердости не только для значений параметров, которые фиксировались в экспериментах, но и для других значений параметров, которые непосредствен-

но в данных экспериментах не задавались, а находятся как внутри экспериментального диапазона, так и вне его. Каждому типу вяжущего (модификатора) и каждой подсистеме будет соответствовать своя сеть искусственных нейронов. В итоге для моделирования экспериментальных результатов для 15 рассмотренных составов вяжущего потребуется 30 небольших нейронных сетей.

Исходные данные для одного из примеров имеют вид таблицы, в которой первые столбцы представляют собой входные параметры, а последний столбец – значение выходного параметра.

Пример матрицы ввода данных по количеству отскочивших щебенки для вяжущего БНД 60/90+СКС-30 АРКПН приведен на рис. 4.27 (исходный массив состоит из 90 записей).

	VAR1	VAR2	VAR3	VAR4	VAR5	
01	0.4	-10	6.5	2	0	
02	0.4	-10	8.5	2	1	
03	0.4	-10	11	2	1	
04	0.4	-10	13.5	2	3	
05	0.4	-10	17.5	2	2	
06	0.4	20	6.5	2	0	
07	0.4	20	8.5	2	1	
08	0.4	20	11	2	2	
09	0.4	20	13.5	2	6	
10	0.4	20	17.5	2	10	
11	0.4	50	6.5	2	0	
12	0.4	50	8.5	2	2	
13	0.4	50	11	2	4	
14	0.4	50	13.5	2	7	
15	0.4	50	17.5	2	13	
16	0.4	-10	6.5	2.5	0	
17	0.4	-10	8.5	2.5	1	
18	0.4	-10	11	2.5	0	
.....						
74	0.6	50	13.5	2.5	5	
75	0.6	50	17.5	2.5	6	
76	0.6	-10	6.5	3	0	
77	0.6	-10	8.5	3	1	
78	0.6	-10	11	3	1	
79	0.6	-10	13.5	3	0	
80	0.6	-10	17.5	3	2	
81	0.6	20	6.5	3	0	
82	0.6	20	8.5	3	1	
83	0.6	20	11	3	1	
84	0.6	20	13.5	3	2	
85	0.6	20	17.5	3	4	
86	0.6	50	6.5	3	2	
87	0.6	50	8.5	3	3	
88	0.6	50	11	3	4	
89	0.6	50	13.5	3	6	
90	0.6	50	17.5	3	8	

Рис.4.27. Общий вид окна программы после ввода исходной информации по результатам испытаний по методу «Виалит» для вяжущего БНД 60/90+СКС-30 АРКПН, различных фракций щебня, температур и расходов вяжущего

Процесс построения алгоритмом программы всех возможных вариантов нейронных сетей выполняется с определенными параметрами, определяемыми пользователем или же формируемыми автоматически с помощью мастера по-

строения сетей. Учитывая особенности теории нейронных сетей и опыт их применения в решении научно-практических задач, можно сказать, что задача построения искомой математической модели для процессора нейронных сетей не является сложной и может быть широко использована на практике.

В качестве визуального анализа достоверности (степени адекватности) построенной математической модели можно представить таблицу, в которой для всей выборки представлены расчетные значения моделируемой функции, соответствующие им целевые значения, т.е. контрольные (целевые) значения выходной переменной, абсолютную и среднеквадратическую ошибку. Анализ данной таблицы показал, что абсолютные отклонения не более 3 единиц и не менее 2-х единиц включительно не превышают 3,8 % результатов, а соответственно абсолютные отклонения со значением, не превышающим единицу, составляют 96,2 % результатов. Это говорит о том, что построенная таким образом функция обеспечит достоверность результата решения задачи о количестве отскочивших щебенки с достоверностью 96,2 % и погрешностью в одну щебенку. Ниже на рис. 4.28 представлены основные статистические характеристики выбранного варианта сети и среднеквадратические и абсолютные ошибки по заданной выборке.

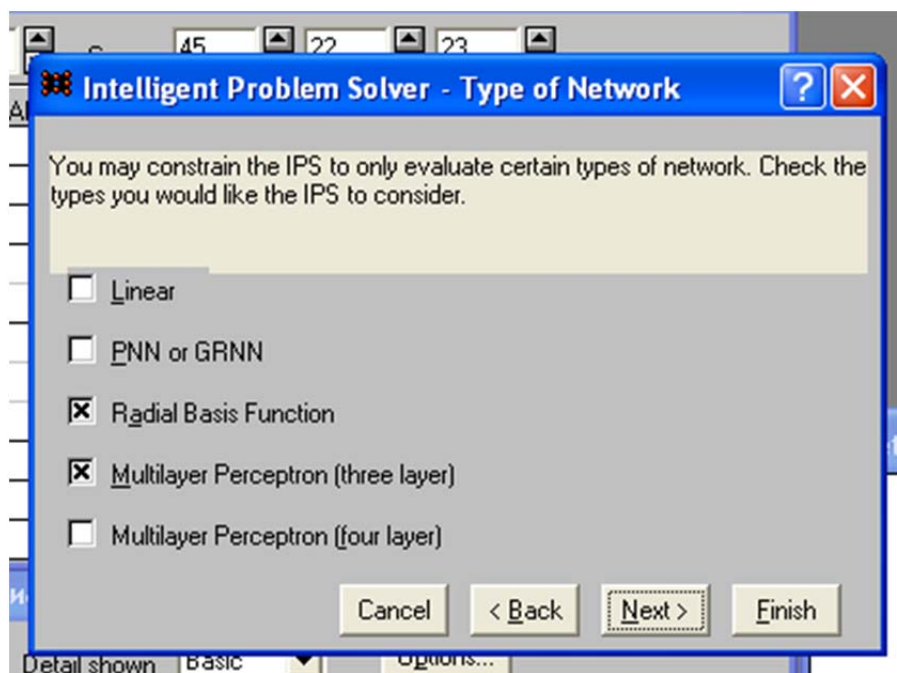


Рис.4.28. Окно «мастера» программы по вводу параметров для моделирования нейронной сети

Outputs shown: Variables [Run] <-Data Set

RMS Error Train 0.9031 Verify 1.142 Test 1.452

	VAR5	T. VAR5	E. VAR5	Error
01	-0.2268	0	-0.2268	0.01744
02	0.1837947	1	-0.8162	0.06279
03	0.7815258	1	-0.2185	0.01681
04	1.504851	3	-1.495149	0.1150115
05	3.025142	2	1.025142	0.07886
06	-0.126411	0	-0.126411	0.009724
07	0.7519627	1	-0.248	0.01908
08	2.055386	2	0.05539	0.00426
09	3.624956	6	-2.375044	0.1826957
10	6.757076	10	-3.242924	0.2494557
11	1.913951	0	1.913951	0.147227
12	3.569036	2	1.569036	0.1206951
13	5.921814	4	1.921814	0.1478318
14	8.549828	7	1.549828	0.1192176
15	13.10525	13	0.1052542	0.008096
16	-0.2268	0	-0.2268	0.01744

Рис. 4.29. Рассчитанные промежуточные значения функции, целевые значения, соответствующая им среднеквадратическая и абсолютные ошибки для значений исходной выборки

Главной отличительной особенностью использования в качестве математической модели технологии нейронных сетей, а также ее достоинством по сравнению с аналитически-формульным методом является ее очевидность (открытость) и доступность просмотра параметров и оценки качества смоделированной сетевой поверхности для всех значений входов и выходов, составляющих узловой массив исходных данных. Таким образом, мы наглядно представляем себе, с какой степенью точности сформированная сеть отвечает исходному массиву данных с любым уровнем дискретности, а также простоту вычисления нужного количества промежуточных значений функции внутри и снаружи исходного экспериментального диапазона и решения задач поиска краевых условий смоделированной функции.

После того как наиболее адекватная нейросетевая система была смоделирована, структура ее слоев имеет вид, представленный на рис. 4.30.

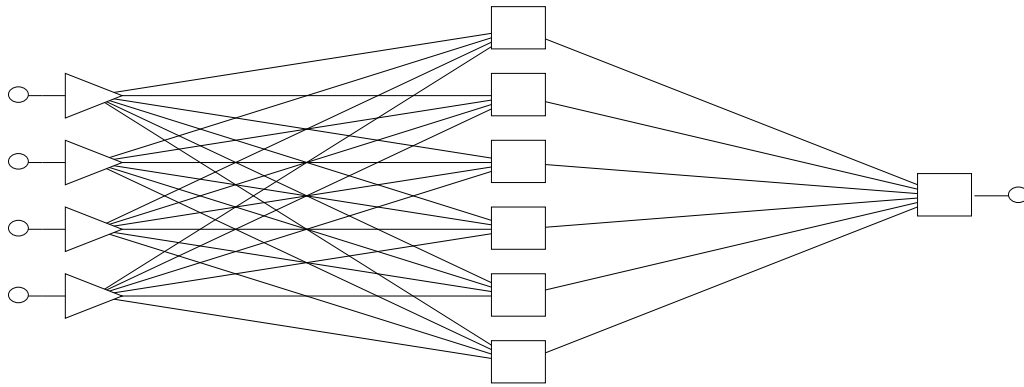


Рис.4.30. Вид структуры нейронной сети (связи входов и выходов) для модели удерживающей способности вяжущего БНД 60/90+СКС-30 АРКПН

Причем важно отметить, что смоделированная нейросеть в каждом конкретном случае (применение другого модификатора) может (и будет) отличаться от других, а следовательно, иметь другую структуру, в том числе и графическую. Это связано с особенностями алгоритмических принципов построения нейронных сетей.

Способности человека распознавать зрительные образы значительно превосходят возможности компьютерных алгоритмов, в том числе и нейронных сетей. Но, к сожалению, они ограничены лишь двух-, самое большее - трехмерными объектами. В этом случае рассмотрим результат работы смоделированных нами нейронных сетей в объемной форме, последовательно освобождая два входа (входных параметра) и получая соответствующие им поверхности отклика.

Рассмотрим смоделированные поверхности отклика (рис. 4.31-4.34), описывающие удерживающую способность вяжущего (испытания по «Виалиту»). В нижеприведенных графиках параметры $X(Var(i))$, $Y(Var(j))$ - входы, а в качестве $Var(i)$, $Var(j)$ используются параметры: $Var(1)$ - расход вяжущего, $Var(2)$ - температура испытания, $Var(3)$ - среднее значение фракции щебня, $Var(4)$ - процентное содержание модификатора в вяжущем. В случаях, когда $Var(4)$ не участвует в построении поверхности, сформированная нейросетевая модель не нуждается в этом входе (входной переменной), т.е. вход $Var(4)$ не оказывает значительного влияния на поведение выходов.

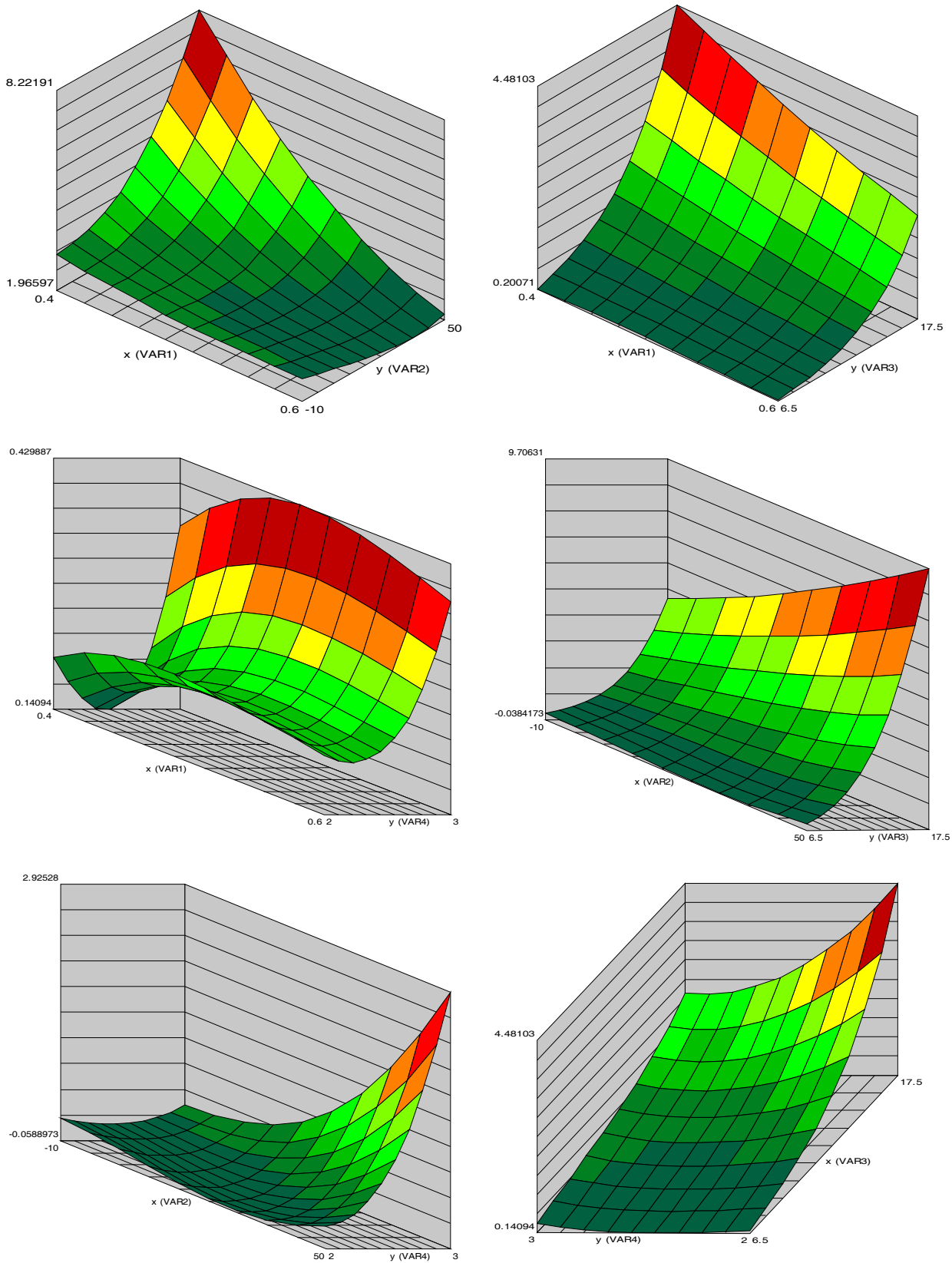


Рис.4.31. Поверхность отклика для вяжущего БНД 60/90+СКС-30АПКМ-15 для $Var(1)$, $Var(2)$, $Var(3)$, $Var(4)$

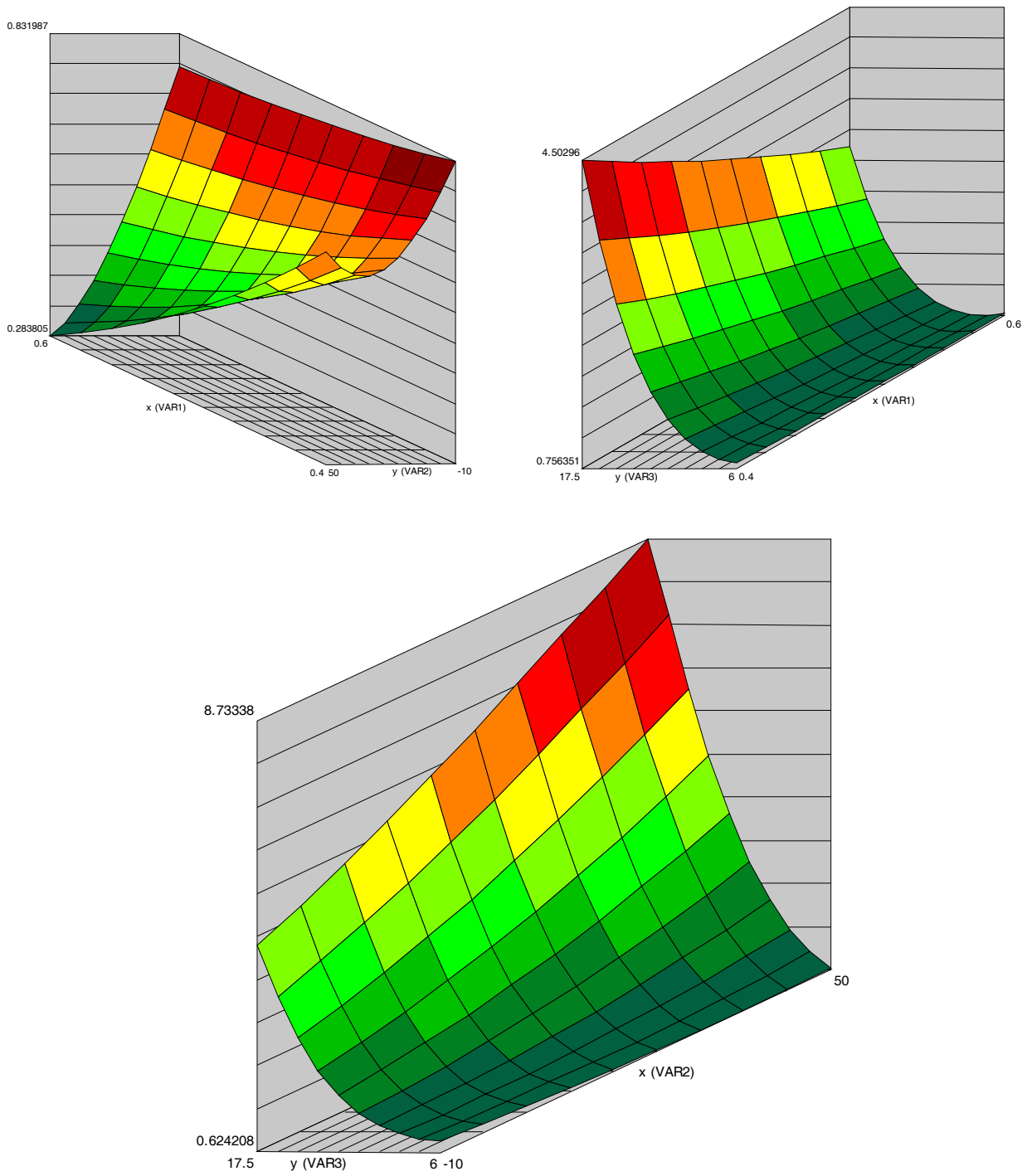
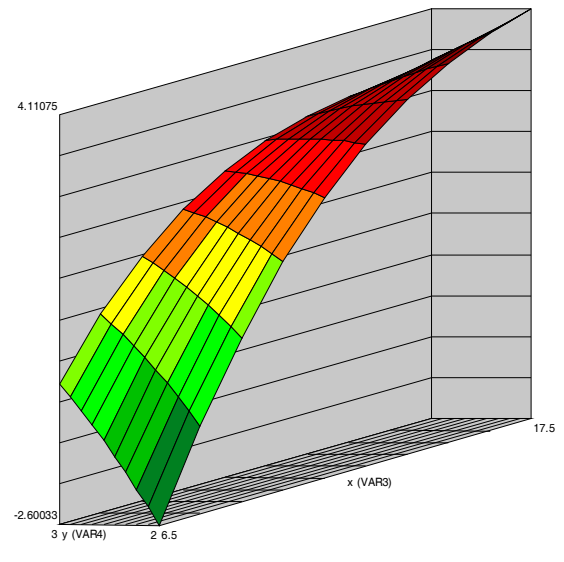
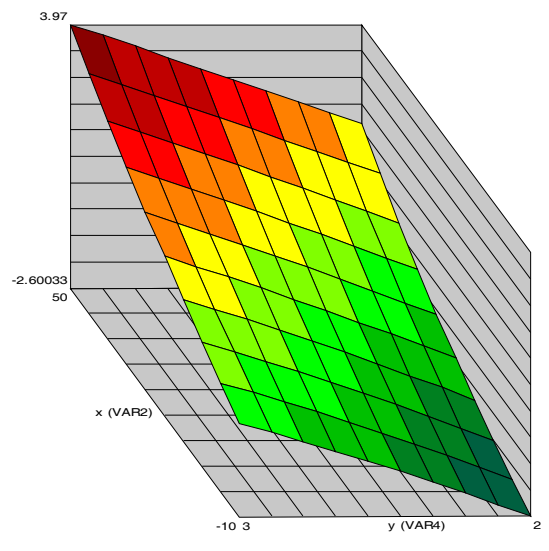
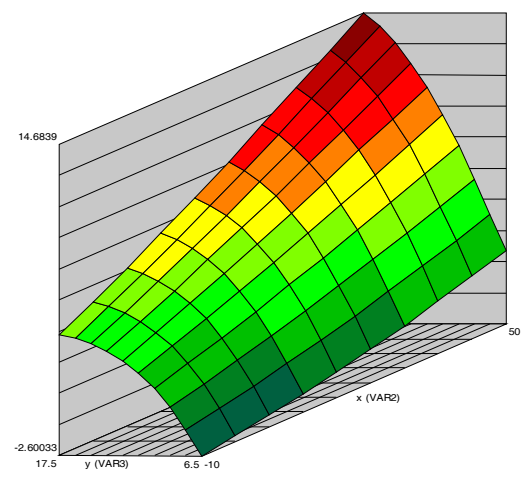
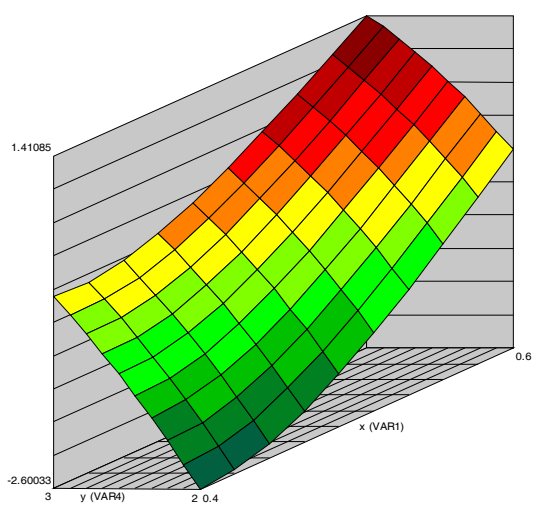
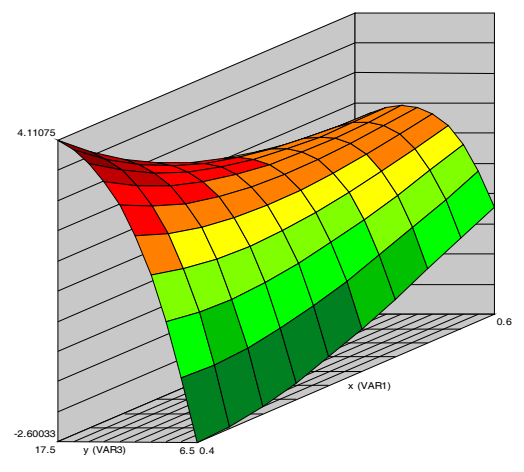
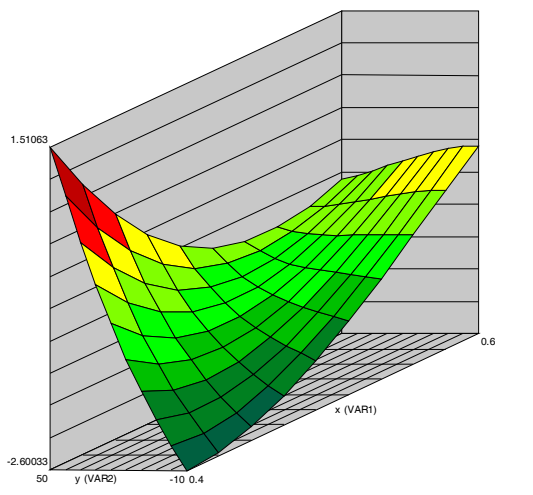
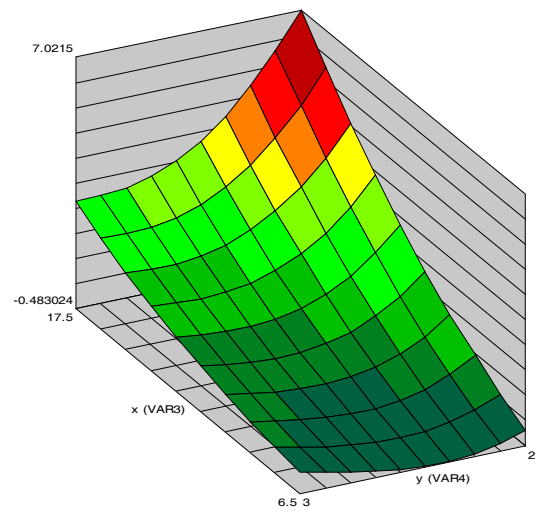
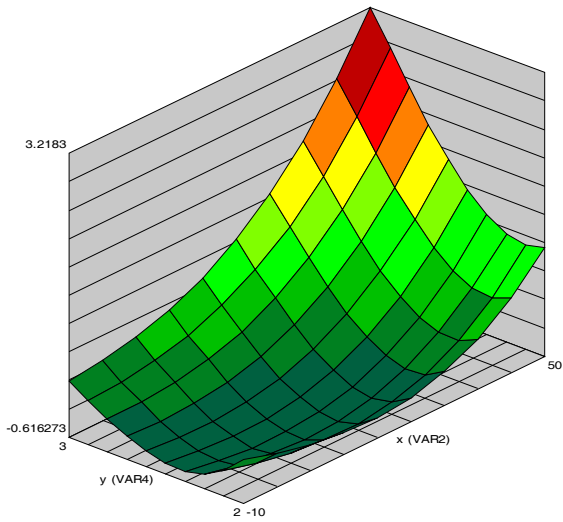
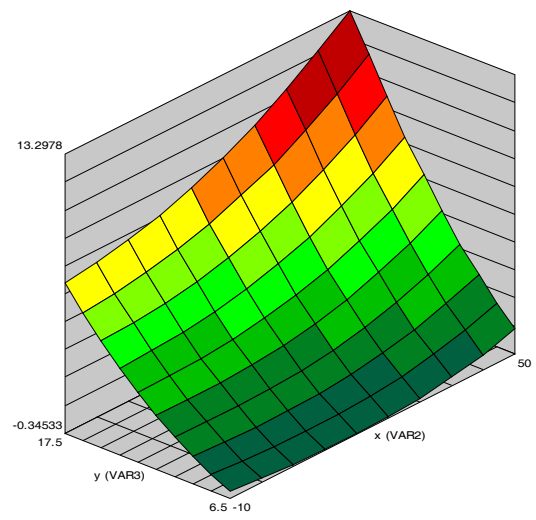
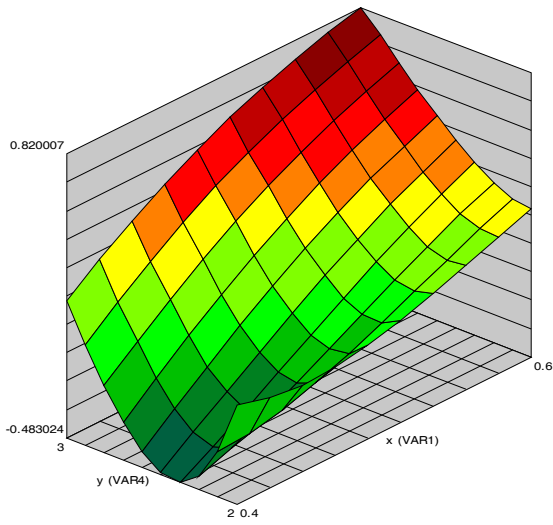
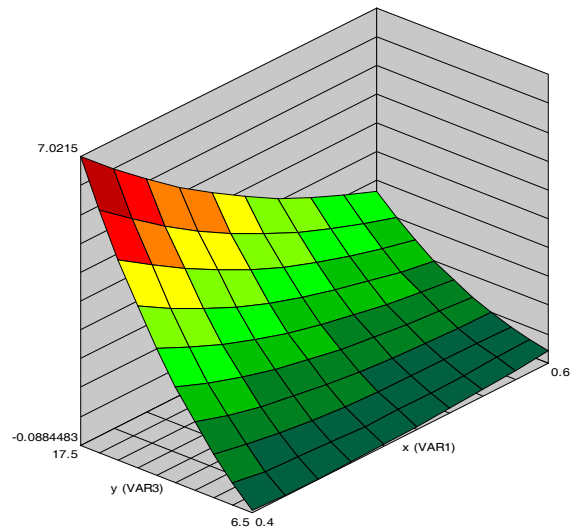
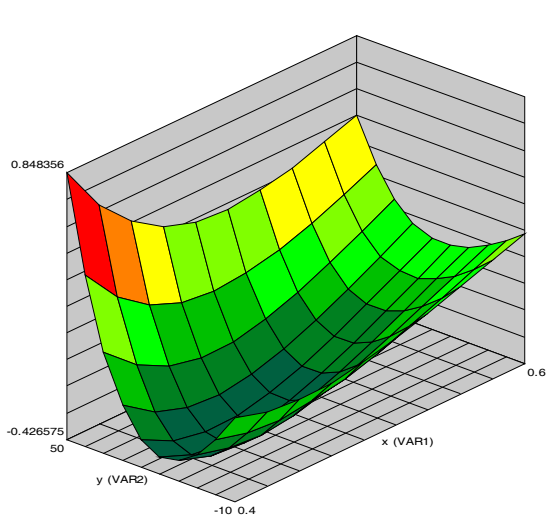


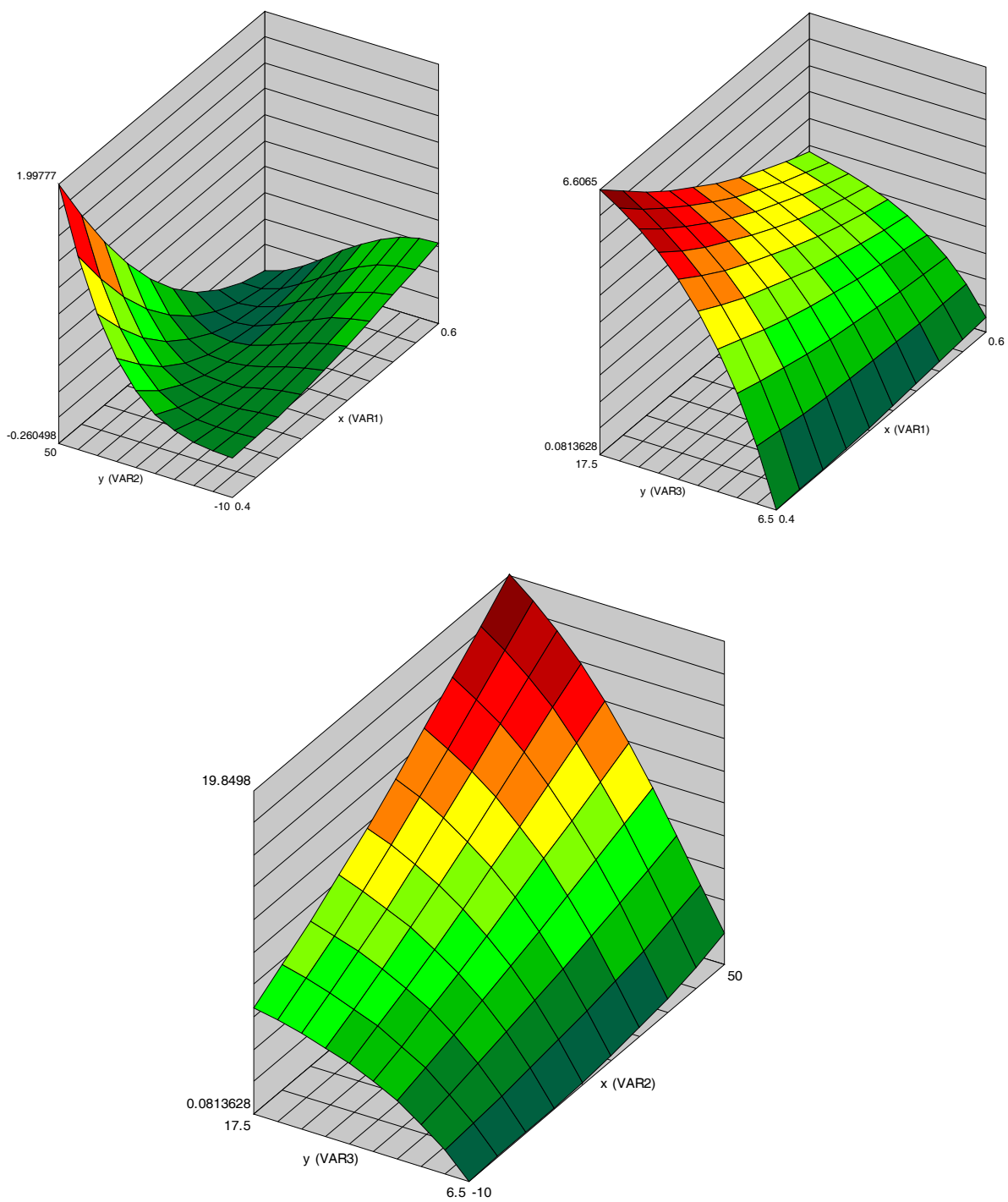
Рис.4.32. Поверхность отклика для вяжущего БНД 60/90+СКС 30АРКМ-27 для $Var(1)$, $Var(2)$, $Var(3)$



начало **Рис.4.33** Поверхность отклика для вяжущего БНД 60/90 + СКД для $Var(1)$, $Var(2)$, $Var(3)$



продолжение **Рис.4.33** Поверхность отклика для вяжущего БНД 60/90 + СКД для $Var(1)$, $Var(2)$, $Var(3)$



окончание **Рис.4.33.** Поверхность отклика для вяжущего БНД 60/90 + СКД для $Var(1)$, $Var(2)$, $Var(3)$

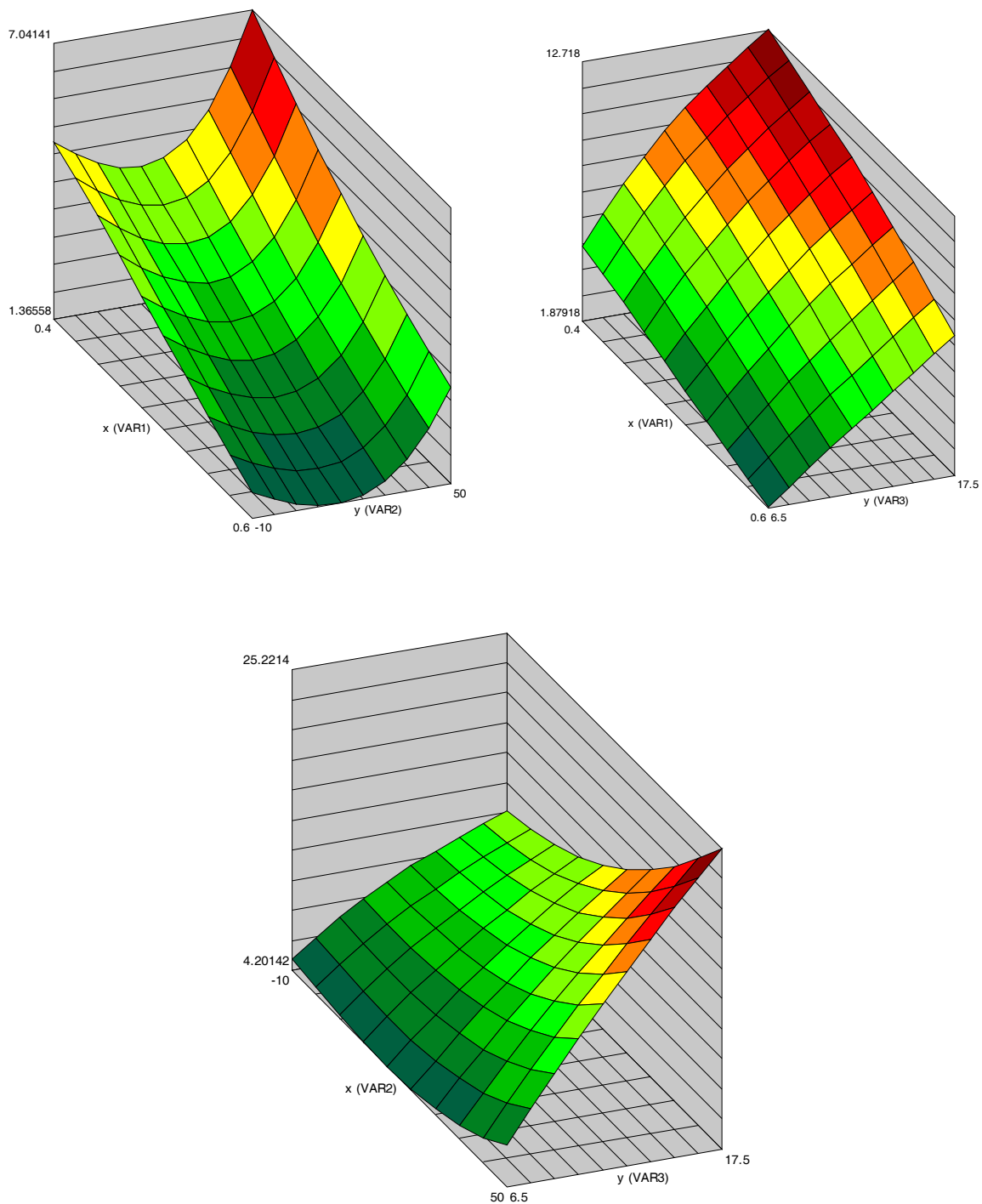


Рис.4.34. Поверхность отклика для вяжущего БНД 60/90 для $Var(1)$, $Var(2)$, $Var(3)$

Рассматривая графические зависимости ШПО на основе традиционного битума, можно отметить, что наибольшее количество отскочивших щебенки, т.е. наихудшая сохранность слоя ШПО в подсистеме «вяжущее - щебень», наблюдается при наименьшем расходе вяжущего, наибольшей средней крупности щебня и в зоне температуры +50 °С. При рассмотрении графических зависимостей сохранности слоя ШПО на основе битумов, модифицированных раз-

личными типами синтетического каучука, отмечаем, что полученные зависимости имеют более сложный характер. Так, рассматривая влияние вышеуказанных факторов на сохранность слоя, установлено, что наибольшее количество отскочивших щебенки также соответствует наибольшей средней крупности применяемого щебня при расходе вяжущего и в зоне температуры $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зависимость сохранности слоя ШПО от количества каучука в вяжущем отлична в зависимости от применяемого типа модификатора. Для модификаторов типа СКС-30 АРКМ -15, СКС-30 АРК наилучшая сохранность соответствовала составу при содержании каучука в количестве 2,0 % по массе, соответственно, СКС-30 АРКПН - 2,5 %, а для каучуков СКД и СКС-30АРКМ-27 содержание каучука незначительно повлияло на количество отскочивших щебенки, но исходя из необходимости введения наименьшего количества дорогого полимера в вяжущее, при котором происходит изменение его структуры [51], также следует считать оптимальным содержание добавки - 2,0 % по массе.

Предлагаемая методика определения эффективности применения какой-либо добавки, предназначенной для улучшения свойств битумов при устройстве слоев ШПО, позволяет получить наиболее достоверный прогноз сохранности слоя в подсистеме «вяжущее - щебень».

Далее представим смоделированные поверхности отклика в подсистеме «щебень - покрытие», условно описывающие твердость асфальтобетона типа «Б» на основе различных модификаторов. На нижеприведенных графиках параметры $X(Var(i))$, $Y(Var(j))$ - это входы, а в качестве $Var(i)$, $Var(j)$ используются параметры: $Var(1)$ - процентное содержание модификатора в вяжущей части асфальтобетона, $Var(2)$ - температура испытания, $Var(3)$ - число ударов груза.

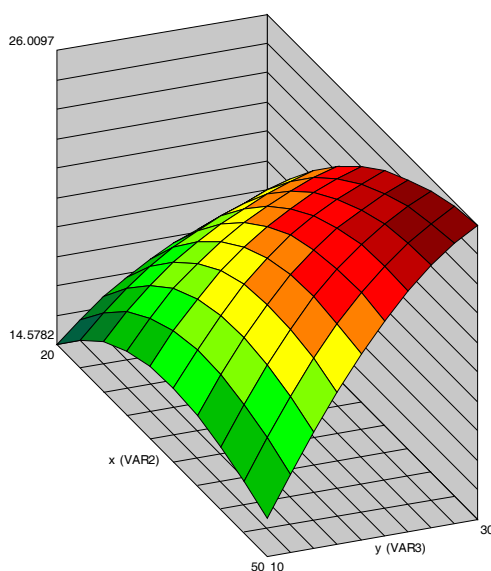


Рис.4.35. Поверхность отклика твердости асфальтобетона типа «Б» марки П для вяжущего БНД 60/90+СКС-30АРКМ -27 и параметров $Var(2)$, $Var(3)$

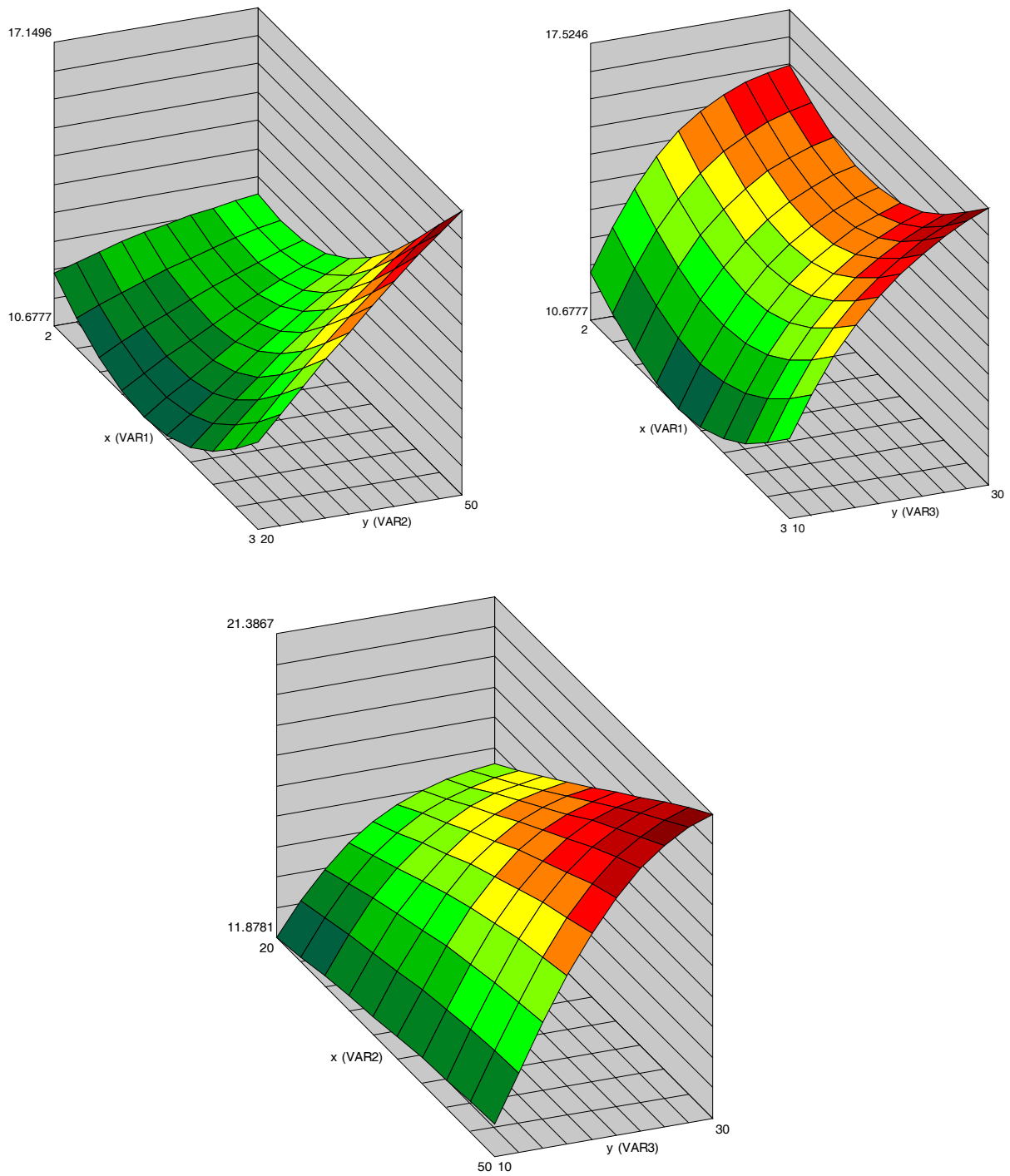


Рис.4.36. Поверхность отклика твердости асфальтобетона типа «Б» марки II для вяжущего БНД 60/90+СКС-30АРКМ-15 для параметров $Var(1)$, $Var(2)$, $Var(3)$

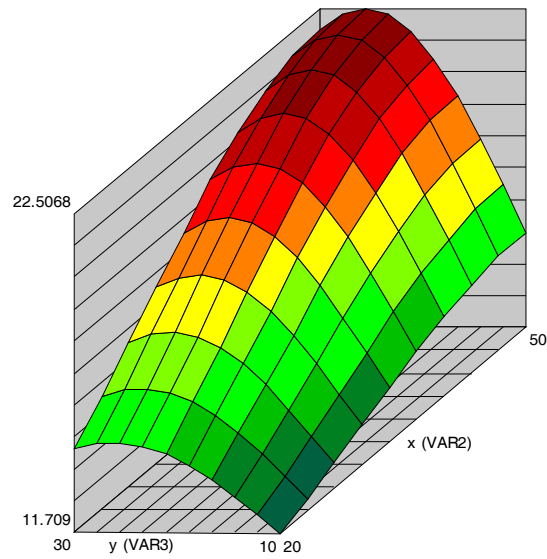


Рис.4.37. Поверхность отклика твердости асфальтобетона типа «Б» марки II для вяжущего БНД 60/90+СКС-30АРК для параметров $Var(1), Var(2)$

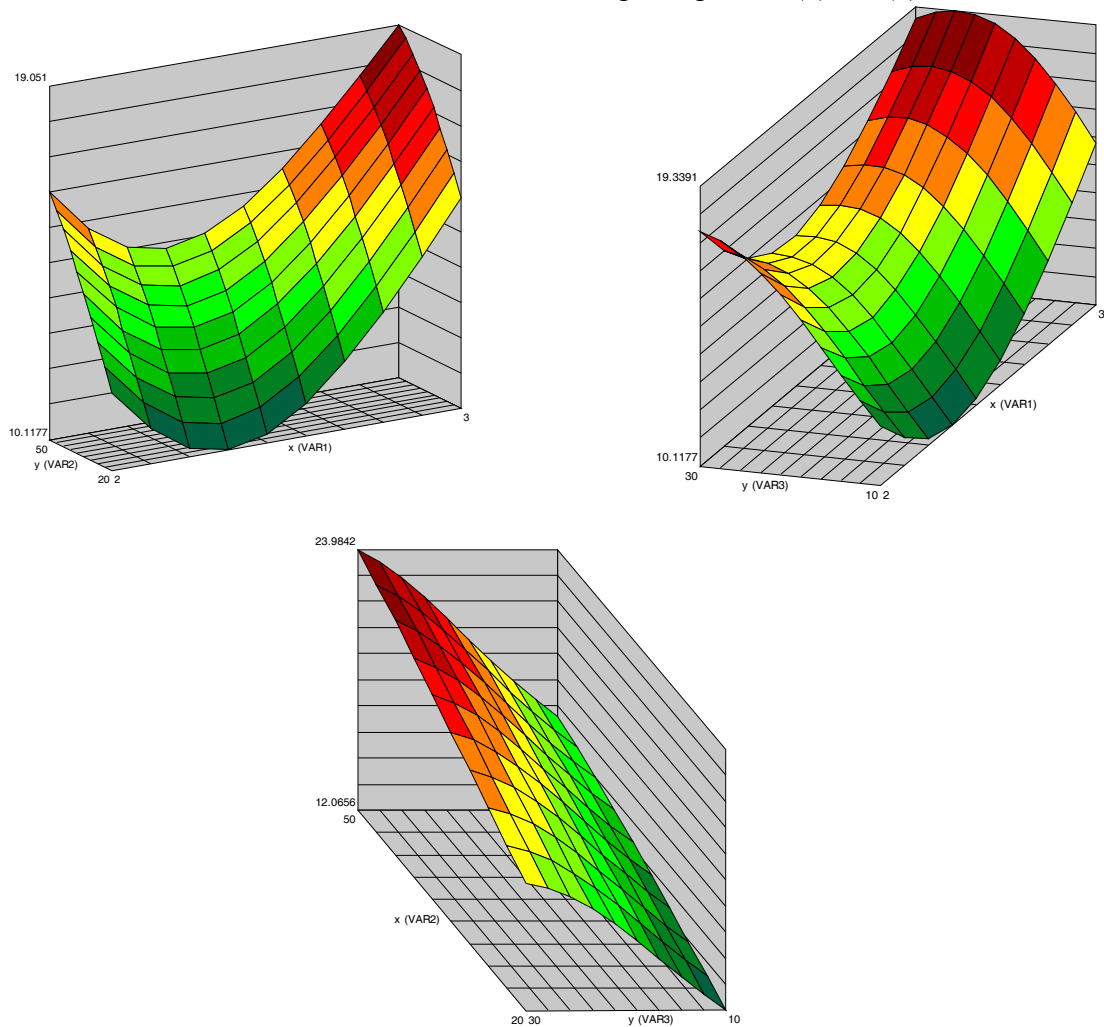


Рис. 4.38. Поверхность отклика твердости асфальтобетона типа «Б» марки II для вяжущего БНД 60/90+СКС-30АРКПН для параметров $Var(1), Var(2), Var(3)$

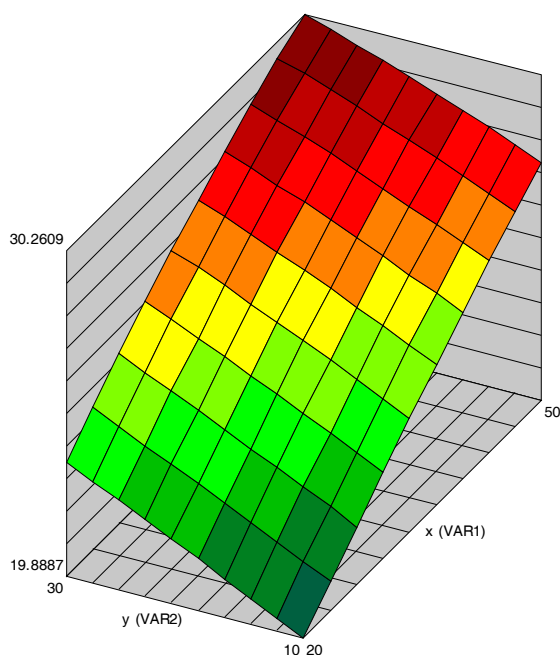


Рис.4.39. Поверхность отклика твердости асфальтобетона типа «Б» марки II для вяжущего БНД 60/90 для $Var(1)$ - температура испытания, $Var(2)$ - число ударов

Рассматривая графические зависимости твердости асфальтобетона на основе традиционного битума (рис. 4.35 – 4.39.), отмечаем, что наибольшее проникновение в материал, т.е. наихудшая сохранность слоя ШПО из условия втапливания в покрытие в подсистеме «щебень - покрытие» наблюдается при температуре $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ при максимальных нагрузках. Практически аналогичная ситуация, но при меньших значениях глубины втапливания отмечена и при использовании модифицированных битумов для приготовления асфальтобетонных смесей. Оценивая влияние количества модификатора в вяжущем на твердость асфальтобетона при использовании различных типов каучуков, было отмечено, что наилучшая твердость, т.е. наибольшая долговечность слоя ШПО исходя из сохранности слоя из условия минимального втапливания в подсистеме «щебень-покрытие», наблюдалась при содержании каучука в вяжущем в количестве 2,5 % по массе.

Таким образом, предлагаемая методика определения эффективности применения модифицированного битума при устройстве слоев ШПО позволяет получить наиболее достоверный прогноз сохранности слоя в подсистеме «щебень-покрытие» с определением оптимального количества модификатора.

Обоснования увеличения срока службы слоя ШПО выполнено на основе анализа изложенной модели работы слоя с учетом полученных трехмерных графических зависимостей, а также принимая во внимание методику расчета толщины верхнего шероховатого слоя, определяемую из условия его износостойкости и планируемого срока службы, предложенную Эрастовым А.Я. и развитую

Кудрявцевым К.Д. В соответствии с предложенной нами моделью снижение работоспособности в любом сечении слоя поверхностной обработки не наступит, если в каждый момент времени эксплуатации не произойдет отрыв щебня от покрытия, а под колесной нагрузкой транспортных средств щебень не впитается на величину, соответствующую потере свойств водоотведения из зоны контакта колеса с шероховатой поверхностью и соответствующую потере сцепных свойств макрошероховатости, а также в течение всего срока службы каменный материал будет устойчив к истиранию (т.е. опять же к уменьшению полезной толщины шероховатого слоя) и шлифованию поверхности минерального материала.

Таким образом, для решения практической задачи повышения эксплуатационной долговечности слоя ШПО необходимо, опираясь на проведенные ранее исследования, решить вопрос об определении требуемого размера щебня и оптимального расхода модифицированного вяжущего. Поскольку решение такой задачи для всех рассмотренных ранее вяжущих является сильно разветвленным и, следовательно, не целесообразным, поэтому сузим наши входные параметры до двух видов асфальтобетонного покрытия (на традиционном битуме и модифицированном вяжущем), на которых планируем устроить слой ШПО, а также используем вяжущее, которое при испытаниях по методу «Vialit» показало наилучшие результаты по удерживающей способности. Это – состав БНД 60/90+СКС30 АРКМ-15.

Требования к каменным физико-механическим свойствам каменного материала для устройства слоев ШПО изучены весьма широко и могут быть приняты в соответствии с [99].

Далее необходимо определить параметры шероховатости слоя ШПО по условию обеспечения отвода воды из зоны контакта колеса с шероховатой поверхностью. Это рекомендуется выполнять в соответствии с прил. 4 ВСН 38-90 или [103].

Для решения вопроса о назначении требуемого размера зерен минерального материала обратимся к ранее указанной работе К.Д. Кудрявцева, где этот вопрос изложен весьма подробно. Мы же его коснемся в области исследованной нами твердости асфальтобетона на основе модифицированного вяжущего.

Отличительная особенность данной методики, изложенная в научной работе К.Д. Кудрявцева, в случае применения асфальтобетонов на основе модифицированных вяжущих, состоит в том, что выделенные им группы асфальтобетонов по твердости получают некоторое смещение в сторону менее каркасных структур асфальтобетона. Все типы асфальтобетонов становятся в известной степени «жестче», чем и обеспечивается более длительный по временному параметру процесс втапливания щебня. Посредством этого обеспечивается более длительное (на срок до 5 лет) время сохранения параметров шероховатости (в т.ч. по условиям водоотведения), которые мы задаем слою ШПО при его проектировании.

Износ (истирание минерального материала) в течение предполагаемого нами срока службы поверхностной обработки определим в соответствии с [103] таким образом.

1. Толщина верхнего шероховатого слоя определяется из условия его износоустойчивости и планируемого срока службы. Годовой износ поверхности покрытия может быть определен по формуле

$$h_{\Gamma} = (a + b \times Q) \times K_{\text{тех}} , \quad (4.3)$$

где h_{Γ} – износ поверхности покрытия, мм/год; a – скорость износа за счет воздействия природных факторов, зависящая от материала покрытия, мм/год; b – удельный износ от воздействующей нагрузки и вида материалов покрытия, мм/млн. кН; Q – грузонапряженность (суммарная нагрузка от всех осей на покрытие за год) млн. кН/год, определяется по формуле

$$Q = 0,01 \times N_{\text{ср}} , \quad (4.4)$$

где $N_{\text{ср}}$ – приведенная средняя интенсивность движения, авт/сут.; $K_{\text{тех}}$ – коэффициент, применяемых технологических машин и материалов (от 1,0 до 1,3) зависящий от качества содержания поверхности покрытия.

2. Износ поверхностного слоя за рассчитываемый период времени определяется по формуле

$$h_{\Gamma_{\text{и}}} = a \times T + \frac{b \times (\gamma \times 0,01 \times N_{\text{ср}}) \times ((K \times q)^T - 1)}{K \times q - 1} , \quad (4.5)$$

где $h_{\Gamma_{\text{и}}}$ – износ поверхностного слоя покрытия за T лет, мм; T – планируемый срок службы поверхностного слоя, лет; γ – коэффициент приведения размерности ($\gamma = 1,0$), $(\text{мм}^2 \times \text{сут}) / (\text{авт.} \times \text{млн. кН})$; $N_{\text{ср}}$ – приведенная средняя интенсивность движения, авт/сут.; K – коэффициент, учитывающий повышение количества тяжелых машин в составе транспортного потока (1,05–1,07); q – параметр роста интенсивности движения, рассчитывается по формуле

$$q = 1 + \frac{P}{100} , \quad (4.6)$$

где P – процент ежегодного прироста интенсивности движения, %;

3. Планируемый износ не должен превышать допустимого значения, указанного в [107].

Толщина поверхностного слоя рассчитывается по формуле

$$h_{\text{п.с.}} = K_{\text{ср}} \times h_{\Gamma_{\text{и}}} , \quad (4.7)$$

где $h_{\text{п.с.}}$ – толщина шероховатого поверхностного слоя покрытия, мм;

$K_{\text{ср}}$ – коэффициент, учитывающий условия работы поверхностного слоя (если поверхностный слой работает с верхним слоем покрытия совместно, $K_{\text{ср}}$ составляет от 1,2 до 1,3); $h_{\Gamma_{\text{и}}}$ – износ поверхностного слоя покрытия за T лет, мм, определяется по формуле (4.3).

Толщина верхнего слоя по покрытию рассчитывается по формуле

$$h_{в.с.п.} = h_{в.с.р.} \times h_{п.с.}, \quad (4.8)$$

где $h_{в.с.п.}$ - толщина верхнего слоя покрытия, совместно работающего и устраиваемого с шероховатым поверхностным слоем, мм; $h_{в.с.р.}$ – расчетная толщина верхнего слоя покрытия, мм (определяется расчетом на прочность по ОДН 218.046-01).

Если поверхностный слой покрытия - самостоятельно работающий и устраиваемый слой, то для тонких слоев толщиной не более 25 мм $K_{ср}$ составляет от 1,1 до 1,2; для слоев толщиной от 25 до 40 мм $K_{ср}$ составляет от 1,5 до 2.

Кроме износостойкости толщина поверхностного слоя связана с проектируемыми параметрами шероховатости.

Толщина шероховатого поверхностного слоя не может быть меньше наибольшей высоты профиля шероховатости согласно условию

$$h_{п.с.} \geq R_{max}, \quad (4.9)$$

где R_{max} – наибольшая высота профиля шероховатости, мм.

Толщина шероховатого поверхностного слоя не может быть меньше максимального диаметра элементов макрошероховатости согласно условию

$$h_{п.с.} \geq Q_{max}, \quad (4.10)$$

где Q_{max} – максимальный диаметр элементов, мм.

Если поверхностный слой входит в состав верхнего слоя покрытия (совместно работающего и устраиваемого), то минимальная толщина верхнего слоя покрытия сравнивается по условию

$$h_{в.с.п.} \geq 5 \times Q_{max}, \quad (4.11)$$

На последнем этапе определяем оптимальный (минимально требуемый) расход модифицированного или улучшенного вяжущего, который обеспечит сохранность слоя на протяжении повышенного срока службы. Сделать это можно простым решением нейронной сети: для определенной в ранее изложенной методике размера зерен минерального материала, для температуры 50° С найдем краевое значение расхода вяжущего, при котором количество отскокившего щебня будет минимально. В частности, для рассматриваемого вяжущего БНД 60/90+СКС-30АРКМ-15 получим следующие результаты (табл. 4.2):

Таблица 4.2

Краевые (минимальные положительные) значения функции
для заданного размера щебня

Фракция щебня, мм	Требуемый расход вяжущего, л/м ²
5-7	0,5
7-10	0,65
10-12	0,78
12-15	0,85
15-20	1,03

Решая все ранее рассмотренные задачи, проектируются параметры слоя ШПО таким образом, чтобы за предполагаемое время ее службы ни в одном из элементов системы не наступило критическое состояние работоспособности слоя ШПО, ведущее, в конечном итоге, к снижению коэффициента сцепления и разрушению слоя.

Контрольные вопросы

1. Виды поверхностных обработок дорожных покрытий. Применяемые материалы?
2. Назовите оптимальные технологические параметры при устройстве слоя ШПО по расходу модифицированного вяжущего, фракции применяемого щебня, виду используемого модификатора?
3. Какие факторы влияют на сохранность слоя ШПО при эксплуатации автомобильной дороги?
4. Какие виды испытаний выполняют при оценке качества устройства и прогнозе долговечности ШПО?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Асфальтобетон является основным строительным материалом, который применяется при строительстве и ремонте дорожных покрытий. Поэтому подробная характеристика свойств материала и составляющих его компонентов, сведения о путях повышения качества асфальтобетона и методах оценки его долговечности имеют чрезвычайно важное практическое значение.

Повышение эффективности строительства и ремонта дорожных покрытий может быть достигнуто путем использования научных разработок в области применения в составе асфальтобетонных смесей модифицированных вяжущих. Учет специфических особенностей асфальтобетона необходим для правильного выбора вида, типа асфальтобетона и применяемых для его приготовления компонентов, и, в первую очередь, органического вяжущего. Только после тщательного анализа климатических и эксплуатационных условий работы асфальтобетонного покрытия в дорожной конструкции, рационального выбора всех компонентов асфальтобетона, оценки усталостных свойств компонентного состава асфальтобетона можно будет обеспечить требуемое качество и долговечность дорожного асфальтобетонного покрытия.

Полученные результаты и выводы исследований:

1. Обосновано целесообразность применения модифицированных вяжущих на основе полимерных адгезионных добавок, а также модификаторов - полимеров типа СБС или синтетических каучуков взамен традиционных дорожных битумов для повышения срока службы дорожных покрытий и их устойчивости к пластическим деформациям.

2. Установлено, что применение синтетических каучуков или полимеров типа СБС повышает предел прочности при сдвиге каркасного асфальтобетона в 1,2-1,5 раза, а при использовании полимерной адгезионной добавки «Мобит» в 1,3 раза в сравнении с асфальтобетоном на нефтяном битуме.

3. Исследован процесс усталостного разрушения модифицированного асфальтобетона каркасной структуры в режимах, имитирующих работу материала в дорожном покрытии, и установлено, что деформационно-прочностные и физико-механические показатели асфальтобетона в наибольшей степени сохраняются при применении модификаторов – синтетических каучуков типов СКД, СКС-30 АРКМ-15, СКС-30 АРКМ-27, а также полимерной адгезионной добавки «Мобит».

4. Определены структурно-реологические показатели асфальтобетона на основе полимерных адгезионных добавок, а также полимеров типа СБС или синтетических каучуков и обоснована реологическая модель, описывающая вязко-пластические свойства асфальтобетона и его поведение в дорожном покрытии.

5. Установлено оптимальное содержание полимерной адгезионной добавки «Мобит» и синтетических каучуков различных типов из условия обеспечения повышенной устойчивости дорожного покрытия к возникновению пластических деформаций и деформационно-прочностных характеристик асфальтобетона.

6. Экспериментально-теоретически обоснована возможность удлинения срока службы холодного асфальтобетона в дорожном покрытии до 4-х лет с учётом неравномерности приложения транспортной нагрузки и реологических свойств материала.

7. Установлено, что применение полимерных модификаторов повышает усталостную долговечность холодного асфальтобетона при непрерывном действии транспортной нагрузки до разрушения в 1,3-1,4 раза в сравнении с традиционным материалом на жидком нефтяном битуме.

8. Экспериментально установлено, что совместное применение полимерных модификаторов и адгезионных добавок позволяет повысить предел прочности на сжатие при 20 °С холодного асфальтобетона в 1,8 раза, а водостойкость в 1,4 раза в сравнении с традиционным материалом.

9. Определены рецептурно-технологические параметры приготовления жидкого битумно-полимерного вяжущего и холодных модифицированных асфальтобетонных смесей. Подобраны составы холодных модифицированных асфальтобетонных смесей с минимальным значением слеживаемости, среди которых наилучшие значения у смесей с применением полимера типа СБС.

10. На основании данных лабораторных экспериментов доказана высокая эффективность применения модифицированных битумов для повышения работоспособности слоев ШПО и определены оптимальные технологические параметры при устройстве слоя по расходу модифицированного вяжущего, фракции применяемого щебня, виду используемого модификатора.

11. С целью повышения долговечности слоев ШПО разработана и обоснована методика определения наиболее эффективного вяжущего, ее расхода и фракции используемого щебня. Показано, что в качестве математического обеспечения при определении оптимальных величин указанных факторов целесообразно применять нейронные сети.

12. Доказано, что более высокая сохранность слоя характерна для условной высоты погружения со значением ближе к единице с более высоким расходом вяжущего ($0,6 \text{ л/м}^2$), а также при нормальных и отрицательных температурах ($-10...+20 \text{ }^\circ\text{C}$). Показано, что наименьшая сохранность слоя ШПО наблюдается при низком значении показателя высоты погружения, наименьшем расходе вяжущего и повышенных температурах ($50 \text{ }^\circ\text{C}$).

13. Выявлены зависимости сохранности слоя ШПО от вида применяемого модификатора и отмечено, что наиболее эффективным является применение каучуков типа СКС-30 АРКПН, СКС-30АРКМ-15 и соответственно менее эффективными являются каучуки типа СКД и СКС-30 АРКМ - 27. Показано также, что применение БКВ на основе каучуков СКС-30 АРКПН или СКС-30 АРКМ-15 с расходом $0,6 \text{ л/м}^2$ при более высоких значениях показателя высоты погружения щебня (фракций щебня 5-7 и 7-10 мм) в наибольшей степени позволяет повысить сохранность слоя ШПО.

14. Доказано, что наиболее низкая сохранность слоя ШПО во всем диапазоне температур, при любых значениях показателя условной высоты погружения и расходе вяжущего наблюдается при применении традиционного битума марок БНД.

15. Экспериментально установлено, что модифицированный асфальтобетон даже при минимальном содержании полимера в вяжущем обладает большей твердостью по сравнению с традиционным асфальтобетоном. Показано, что максимальная твердость асфальтобетона наблюдается при содержании в вяжущем модификатора типа СКД, СКС-30 АРКПН, СКС-30 АРКМ-27, СКС-30 АРКМ-15 в количестве 2,5 % в пересчете на сухое вещество.

16. Выявлено, что как для традиционных, так и для модифицированных битумов наиболее низкая сохранность слоя ШПО из условия втапливания в покрытие наблюдается при температуре $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ и при максимальных нагрузках.

17. Установлено оптимальное количество модификатора в вяжущем при использовании различных типов каучуков по показателю твердости асфальтобетона. Проведен прогноз долговечности слоя ШПО на основе традиционного и модифицированного асфальтобетона и показано, что наилучшая твердость, т.е. наибольшая долговечность слоя ШПО исходя из условия минимального втапливания в покрытие наблюдается при применении модифицированного асфальтобетона с содержанием каучука в вяжущем в количестве 2,5 % по массе.

Знания по выше указанным вопросам позволят студентам ориентироваться в разработке и применении технологии, позволяющих повысить качество строительства и ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахметова Р. С. Дорожные битумы нефтеперерабатывающих заводов СССР и современные требования, предъявляемые к их качеству / Р. С. Ахметова, В. В. Фрязинов, Л. Р. Торбеева // Труды БашНИИ. — 1968. — Вып. 8. — С. 159—167.
2. Астров В.А. Разработка требований к шероховатости дорожных покрытий и средств контроля шероховатости. Труды СоюзДорНИИ, вып. 22, Балашиха Московской обл.- 1970.- С. 88 - 135.
3. Автомобильные дороги. СНиП 3.06.03-85/ Госстрой СССР.- М., 1986. - 111с.
4. Артеменко А. И. Органическая химия / А. И. Артеменко. – М.: Высш. шк., 2002. – 559 с.
5. Березников А. В. Влияние условий окисления на состав и свойства окисленных битумов / А. В. Березников: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1975. — 20 с.
6. Бируля А. К. Работоспособность дорожных одежд / А. К. Бируля, С. И. Михович. — М.: Транспорт, 1968. — 172 с.
7. Битумные материалы / под ред. А. Дж. Хойберга; пер. с англ. — М. : Химия, 1974. — 248 с.
8. Богуславский А. М. Основы реологии асфальтобетона / А. М. Богуславский, Л. А. Богуславский. — М. : Высш. шк., 1972. — 200 с.
9. Богуславский А. М. Прогнозирование сдвиго- и трещиностойкости асфальтобетонных аэродромных покрытий / А. М. Богуславский // Строительство аэродромов: Тр. МАДИ. — М., 1974. — Вып. 57. — С. 49—58.
10. Богуславский А. М. Зависимость реологических свойств асфальтобетона от его состава и структуры / А. М. Богуславский, И. А. Сархан, Л. Г. Ефремов // Автомобильные дороги. — 1977. — № 8. — С. 22—24.
11. Бодан А. Н. Влияние химического состава на структуру битумов / А. Н. Бодан [и др.] // Повышение качества дорожных битумов: Тр. СоюзДорНИИ. — М., 1975. — Вып. 80. — С. 75—79.
12. Бодан А. Н. Роль температуры в процессе получения окисленных битумов / А. Н. Бодан // Исследование свойств битумов, применяемых в дорожном строительстве: Тр. СоюзДорНИИ. — М., 1970. — Вып. 46. — С. 48—54.
13. Бодан А. Н. Влияние температуры окисления на состав и свойства битумов / А. Н. Бодан, О. М. Кулик, В. И. Храпко // Структурообразование, методы испытаний и улучшения технологии получения битумов: Тр. СоюзДорНИИ. — М., 1971. — Вып. 49. — С. 141—150.
14. Васильев А., Шамбар П. Поверхностная обработка с синхронным распределением материалов. - М.: Трансдорнаука, 1999. - 80 с.

15. Виноградов М. В. Термохимическое и кинетическое исследование процесса окисления битума / М. В. Виноградов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1971. — 20 с.
16. Валильев А. П. Причины образования колеи и пути их устранения. Наука и техника в дорожной отрасли - 1999, №2. - С.6-9.
17. Валильев А. П. Проблемы разработки методов прогнозирования глубины колеи на автомобильных дорогах. Проблемы строительства и эксплуатации а/д в начале XXIв. Сборник научных трудов МАДИ. - М., 2000.
18. Гнатенко Г.Ф., Досвід використання поверхнево-активних речовин для підвищення водотійкості асфальтобетонного покриття. / Гнатенко Г.Ф., Ефремов С.В., Жданюк В.К., Золотарев В.О. // Автошляховик України. — 1999. - №1. — С. 38 – 39.
19. Гезенцевей Л. Б. Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов / Л. Б. Гезенцевей. — М. : Стройиздат, 1971. — 225 с.
20. Гезенцевей Л. Б. Дорожный асфальтобетон / Л. Б. Гезенцевей, Н. В. Горелышев, А. М. Богуславский. — М. : Транспорт, 1985. — 350 с.
21. Гезенцевей Л.Б. Пути улучшения структурно-механических свойств асфальтобетона. Автореферат докт. дисс. - М., 1964.
22. Глинка Н.Л. Общая химия./В. А. Рабинович. – Ленинградское отделение, 1982. – 780 с.
23. ГОСТ 9128-2009 Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. - М., 1998.
24. Гордеев С. О. Деформации и повреждения дорожных асфальтобетонных покрытий / С. О. Гордеев. — М., 1963. — 132 с.
25. Гоглидзе В.М. Разработка положений сдвигоустойчивых и износостойких полужестких и дорожных покрытий. Дис. д-р техн. наук/ МАДИ, М., 1980.
26. Горелышев Н. В. Принципы структурообразования асфальтобетона / Н. В. Горелышев // Тр. СоюзДорНИИ. — М., 1979. — Вып. 7. — 117 с.
27. Горелышев Н. В. Асфальтобетон и другие битумо-минеральные материалы / Н. В. Горелышев. — М. ; Можайск: Терра, 1995. — 176 с.
28. Горелышев Н.В. Без дефектов и ремонтов. Дороги России XXI века. - № 3, 2002. - с. 56 – 57.
29. Гохман Л. М. Битумно-полимерное вяжущее с применением дивинилстирольных термоэластопластов / Л. М. Гохман // Тр. СоюзДорНИИ. — М., 1971. — Вып. 50.
30. Гохман Л. М. Структура полимерно-битумных композиций на основе ДСТ в зависимости от типа дисперсных структур битумов / Л. М. Гохман // Тр. СоюзДорНИИ. — М., 1975. — Вып. 80.
31. Гохман Л. М. Полимерно-битумные вяжущие материалы на основе СБС для дорожного строительства / Л. М. Гохман [и др.] : Информационный сборник. — М.: Информавтодор, 2002. — Вып. 4. — 112 с.
32. Грудников И. Б. Производство нефтяных битумов / И. Б. Грудников. — М.: Химия, 1983. — 192 с.

33. Гун Р. Б. Нефтяные битумы / Р. Б. Гун. — М.: Химия, 1973. — 286 с.
34. Гун Р. Б. Производство нефтяных битумов / Р. Б. Гун, И. Л. Гуревич. — М.: РосИНТИ, 1960. — 311 с.
35. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. — М.: Наука, 1973. — 270 с.
36. Догадкин Б. А. Химия эластомеров / Б. А. Догадкин. — М.: Химия, 1972. — 391 с.
37. Зайцевский И.В., Свиридов А.П., Слесарев Д.А. Нейронные сети и их приложения. М.МЭИ, 2002. — 95 с.
38. Золотарев В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В. А. Золотарев. — Харьков: Высш. шк., 1977. — 155 с.
39. Илиополов С. К. Органические вяжущие для дорожного строительства: учеб. пособие для вузов / С. К. Илиополов [и др.]. — М.: Изд-во Юг, 2003. — 428 с.
40. Иллиополов С. К. Асфальтобетон повышенной прочности / С. К. Иллиополов, О. К. Безродный, Е. М. Баранова // Материалы всероссийской научно-технической конференции. Актуальные проблемы дорожно-транспортного комплекса России. — Краснодар: КубГТУ, 1999 — 57 с.
41. Иванов Н. Н. К обоснованию показателей механических свойств асфальтобетонных смесей. / Н. Н. Иванов, М. Я. Телегин // Сб. Исследования органических вяжущих материалов и физико-механических свойств асфальтовых смесей. - Дориздат. — 1949. - С. 106-133.
42. Иванов Н. Н. Определение требуемой прочности асфальтобетона с учетом его пластичности и конкретных условий работы покрытий. / Н. Н. Иванов, А. В. Руденский // Труды СоюзДорНИИ. — 1967. - Вып. 11. - С. 41-49.
43. Иванов Н. Н. Развитие требований к асфальтобетонным и другим битумо-минеральным покрытиям и их практическое значение. / Н. Н. Иванов // Доклады и сообщения нанаучно-технических совещаниях по строительству дорог. - М. — 1963. - С. 24-31.
44. Ильин С. В. Влияние температурного режима и интенсивности движения на колеобразование дорожного покрытия в условиях Краснодарского края./ С. В. Ильин, Н.С. Дараган // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современные технические решения по повышению надежности автомобильных дорог». — Краснодар, 2001. - С. 69-71.
45. Ильин С. В. Обеспечение сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий исходя из условий их эксплуатации. / Ильин С. В. // Дис. кан. техн. наук.: МАДИ. — М., 2004. — С. 186.
46. Калгин Ю. И. Научно-технический отчет по теме «Анализ отечественного и зарубежного опыта применения модифицированных битумов с разработкой рекомендаций по перспективным направлениям их получения и использования» (Госконтракт № ЮУ-11—81/1 между ГСДХ Минтранса РФ и ФГУП Воронежский НПЦ РосдорНИИ). — Воронеж, 2001. — 150 с.

47. Калгин Ю. И. Экономическая целесообразность применения модифицированных битумов при устройстве верхних слоев асфальтобетонных покрытий / Ю. И. Калгин // Дороги России 21 века. — 2002. — № 3. — С. 69—71.
48. Калгин Ю. И. Опыт применения битумно-каучукового вяжущего / Ю. И. Калгин, В. В. Чересельский // Актуальные вопросы строительства: Материалы Всерос. науч.-техн. конф., посв. 40-летию строит. ф-та Мордов. ун-та. — Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. — С. 401—405.
49. Калгин Ю. И. Как продлить дорожный век / Ю. И. Калгин, В. В. Чересельский // Автомобильные дороги // 2003. — № 1. — С. 86—87.
50. Калгин Ю. И. Техничко-экономические аспекты повышения межремонтных сроков дорожных одежд / Ю. И. Калгин // Научный вестник ВГАСУ. Серия: дорожно-транспортное строительство. — Воронеж, 2003. — Вып. 1. — С. 47—51.
51. Калгин Ю. И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов / Ю.И. Калгин. — Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. — 272 с.
52. Калгин Ю. И. Улучшение свойств асфальтобетонных смесей добавками синтетических каучуков / Ю. И. Калгин, Н. И. Свиридова // Материалы науч.-практ. конф. «Дороги Башкирии — 2003». — Уфа: Изд-во ГУП ИНХП, 2003. — С. 54—58.
53. Кузнецов Ю.В. Во всём диапазоне скоростей. Юридические и технические аспекты проблемы зимней скользкости дорожных покрытий и пути их решения. // Дороги России 21 века. М. - С.54-57.
54. Кирюхин Г. Н. Повышение сдвигоустойчивости асфальтобетона с добавками полимеров / Г. Н. Кирюхин, В. М. Юмашев // Автомобильные дороги. — 1992. — № 7—8. — С. 18—22.
55. Ковалев Я.Н. Исследования температурного режима дорожных покрытий из песчаного асфальтобетона и уточнение требований к температурным свойствам применяемых битумов. Автореферат канд. дисс. — Минск, 1963.
56. Колбановская А. С. Структурообразование дорожных битумов / А. С. Колбановская, А. Р. Давыдова, О. Ю. Сабсай // Физико-химическая механика дисперсных структур. — М.: Наука, 1966. — С. 103—113.
57. Колбановская А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. — М. : Транспорт, 1973. — 246 с.
58. Колбановская А. С. Регулирование процессов структурообразования нефтяных битумов добавками дивинил-стирольного термоэластопласта / А. С. Колбановская, Л. М. Гохман, К. И. Давыдова // Коллоидный журн. — Т. 34, № 4. — 1972. — С. 6—17.
59. Колбановская А. С. Полимерно-битумное вяжущее на основе дивинил-стирольных термоэластопластов для асфальтового бетона / А. С. Колбановская, Л. М. Гохман, К. И. Давыдова // Труды координационных совещаний по гидротехнике. — Л.: Энергия, 1972. — Вып. 74.

60. Королев И.В. Дорожный теплый асфальтобетон - Киев: Вища школа, 1984-198с.
61. Королев И. В. Модель старения битумной пленки на минеральных зернах в асфальтобетоне / И. В. Королев // Известия вузов. Строительство и архитектура. — 1981. — № 8. — С. 63—67.
62. Кретов В. А. Эффективный путь повышения срока службы дорожных одежд / В. А. Кретов, В. П. Лаврухин // Наука и техника в дорожной отрасли. — 1999. — № 3. — С. 16—19.
63. Кретов В. А. Проблемы повышения качества дорожных битумов: экономические и технические аспекты / В. А. Кретов, А. В. Руденский // Дороги России 21 века. — 2002. — № 3. — С. 62—65.
64. Ладыгин Б.И., Ким А.Х., Шумчик К.Ф. - ДАН БССР, 1969, т. XIII, №2.
65. Ладыгин Б. И. Прочность и долговечность асфальтобетона / Б. И. Ладыгин [и др.]. — Минск : Наука и техника. — 1972. — 285 с.
66. Ладыгин Б.И., Яцевич И.К. Принцип расчета предельной вязкости битума, минеральных бетонов по условиям сдвигоустойчивости дорожного покрытия. Доклад АН БССР. XI, №8, 1967, 56-716.
67. Лаврухин В. П. Усталостная долговечность асфальтобетонов на модифицированных битумах / В. П. Лаврухин, Ю. И. Калгин, В. Т. Ерофеев // Вестник Мордов. ун-та. — 2001. — № 3—4. — С. 128—135.
68. Лаврухин В. П. Свойства асфальтобетонов на модифицированных битумах / В. П. Лаврухин, Ю. И. Калгин // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2002. — № 1. — С. 14—18.
69. Лаврухин В. П. Физико-механические свойства и усталостная долговечность асфальтобетонов на модифицированных битумах / В. П. Лаврухин, Ю. И. Калгин, В. Т. Ерофеев // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. — Н. Новгород, 2003. — Вып. 6. — С. 89—99.
70. Михайлов А.А. Усталостная долговечность модифицированного холодного асфальтобетона при воздействии интенсивных транспортных нагрузок / А.А. Михайлов, Ю.И. Калгин, А.В. Лобода// Научный Вестник ВГАСУ «Строительство и архитектура». - 2012. - № 4(24). — С. 85-95.
71. Методические рекомендации по оценке сдвигоустойчивости асфальтобетона. — М.: Росавтодор, 2002. — 20 с.
72. Немчинов М.В., Веселый Г.М. Причины образования колеяности на покрытиях автомобильных дорог. Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Новые технологии, конструкции и материалы в строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог». Краснодар: Изд-во КубГТУ. - С. 178 – 183.
73. Немчинов М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобиля. - М.: Транспорт, 1985.

74. Никольский Ю.Е., Гмыря Б.С. Новый эффективный способ оценки сдвигоустойчивости асфальтобетона// Автомобильные дороги. - 1992 - №11-12. – С. 20-21.
75. Обзорная информация об отечественных и зарубежных методах предотвращения колееобразования на асфальтобетонных покрытиях в условиях современных транспортных нагрузок. – М.: Росавтодор, 2005. – 130 с.
76. Патент 2211846 Российская Федерация, МПК⁷ C08L 95/00, 53/02 C04B 26/26. Способ получения полимерно-битумного вяжущего (ПБВ). Заявители и патентообладатели: Калгин Ю.И., Кондратьев А.Н., Лаврухин В.П., Юдин В.П. – № 2002120569/04; заявл. 02.08.2002, опубликован 10.09.2003, Бюл. № 25.
77. Першин М. Н. Сланцевые вяжущие в дорожном строительстве / М. Н. Першин [и др.]. — М. : Транспорт, 151 с.
78. Печенный Б. Г. Битумы и битумные композиции / Б. Г. Печенный. — М.: Химия, 1990. — 256 с.
79. Подольский Вл. П. Определение экономической эффективности дорожно-ремонтных работ / Вл. П. Подольский, Ю. И. Калгин // Вестник отделения строительных наук. — М., 2004. — С. 312—318.
80. Платонов А.П. Полимерные материалы в дорожном и аэродромном строительстве. - М.: Транспорт, 1994. – 157 с.
81. Применение полимерно-битумных вяжущих на основе блоксополимеров типа СБС: сб. статей. — М.: Центр метрологии, испытаний и сертификации МАДИ(ТУ), 2001. — 108 с.
82. Ребиндер П.А. Образование и механические свойства дисперсных структур / П.А. Ребиндер// Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1983. – Т. 8. № 2. - С. 162-170.
83. Розенталь Д. А. Изменение свойств дорожных битумов при контактировании с минеральным наполнителем / Д. А. Розенталь, А. М. Сыроежко // Химия и технология топлив и масел. — 2000. — № 4. — С. 41—45.
84. Руденская И. М. Органические вяжущие для дорожного строительства / И. М. Руденская, А. В. Руденский. — М.: Транспорт, 1984. — 229 с.
85. Руденская И. М. Реологические свойства битумов / И. М. Руденская, А. В. Руденский. — М. : Высш. шк., 1967. — 118 с.
86. Руденский А. В. Анализ работы асфальтобетонных покрытий как конструкций с нестационарными характеристиками / А. В. Руденский // Тр. ГипродорНИИ. — 1979. — Вып. 27. — С. 66—78.
87. Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия на модифицированных битумах/ А.В. Руденский, Ю.И. Калгин; Воронеж.гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2009. – 143 с.
88. Руденский А. В. Опыт строительства дорожных асфальтобетонных покрытий в разных климатических условиях / А. В. Руденский. — М.: Транспорт, 1983. — 64 с.

89. Руденский А. В. Повышение эффективности и качества строительства дорожных асфальтобетонных покрытий / А. В. Руденский. — М.: Транспорт, 1982. — 61 с.
90. Руденский А. В. Закономерности усталостного разрушения дорожных одежд / А. В. Руденский, Б. С. Радовский, С. В. Коновалов // Тр. ГипродорНИИ. — 1975. — Вып. 10. — С. 3—8.
91. Руденский А. В. Реологические свойства битумоминеральных материалов / А. В. Руденский, И. М. Руденская // М.: Высш. шк., 1971. — 131 с.
92. Руденский А. В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А. В. Руденский. — М.: Транспорт, 1992. — 255 с.
93. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение: учеб. пособие для строительных вузов. — М.: Высш. шк., 2003. — 701 с.
94. Салль А.О. Труды СоюзДорНИИ. — Вып. 34. - М., 1969. — С. 34-38.
95. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов// Изв. вузов. Строительство и архитектура. -1985. - №8. - С. 58-64.
96. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Химмлер К.Г. Полимерные композитные материалы в строительстве. - М.: Стройиздат, 1988. - 308с.
97. Томпсон Д. К. Каучуковые модификаторы / Битумные материалы: Асфальты, смолы, пеки / под ред. А. Дж. Хойберга. — М.: Химия, 1974. — С. 216—241.
98. ТУ 2294-001-41201704—97. Растворы каучуков в сланцевом масле для дорожного строительства. — Воронеж, 1997. — 11 с.
99. ТУ 5718-004-03443057—98. Битумно-каучуковые вяжущие для дорожного строительства. — Воронеж, 1998. — 10 с.
100. Шумчик В.К. Исследования сдвигоустойчивости асфальтобетонных композитов для дорожных покрытий. Автореферат канд. дисс. — Минск, 1997. — 19 с.
101. Эфа А. К. О причинах структурного старения битума / А. К. Эфа [и др.] // Химия и технология топлив и масел. — 2002. — № 2. — С. 38—43.
102. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика. /
103. Технические указания по устройству дорожных покрытий с шероховатой поверхностью. ВСН 38-90. — М.: Транспорт, 1990. — 46 с.
104. Mechanical properties of an inorganic oil absorbent hardener for asphalt pavement of heavy traffic roads. / Ando Yutaka, Yamada Masaru // Mem. Fac. Eng. / Osaka City Univ. — 1996. — 37. — P. 69 – 78.
105. Modifizierte Walzasphalte im Spurbildungstestvergleich. / Radenberg M. // Asphalt (BRD). — 1997. — 31, №4. — P. 20 – 24.
106. Modifizierte Walzasphalte im Spurbildungstestvergleich. / Radenberg M. // Asphalt (BRD). — 1997. — 31, №4. — P. 20 – 24.
107. Widerstand von Asphalt fahrbahnbefestigung gegen Spurrinnenbildung. Bemessungstechnische Grundl. Teli 1 / Gratz B. // Bitumen. — 1998. — 60, № 4. — P. 136 – 141.

108. Мелик-Багдасаров М.С., Гиоев К.А., Мелик-Багдасарова Н.А. Строительство и ремонт дорожных асфальтобетонных покрытий: Учебное пособие. - Белгород: Издательство «КОНСТАНТА», 2007. - 159 с.
109. Галдина В.Д. Модифицированные битумы: Учебное пособие. - Омск: Изд. СибАДИ, 2009. - 228 с.
110. Надыкто Г.И., Прокопец В.С. Дорожный асфальтобетон: Учебное пособие. - Омск: Изд. СибАДИ, 2009. - 154 с.
111. Салихов М.Г., Ежова С.В. Физико-химические и технологические основы производства и применения дорожно-строительных материалов: Учебное пособие. - Йошкар-Ола, 2009. - 128 с.
112. Филатов С.Ф. Восстановление асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга: Учебное пособие. - Омск: Изд. СибАДИ, 2009. - 72 с.
113. Калашникова Т.Н., Сокальская М.Б. Строительство и ремонт асфальтобетонных покрытий. - М.: «Экон-Информ», 2010. - 344 с.
114. Котлярский Э.В., Акимова Т.Н. Органические вяжущие материалы: Учебное пособие. - М.: Изд. МАДИ, 2012. - 98 с.
115. Ганиева Т.Ф., Абдуллин А.И., Идрисов М.Р. Современные дорожно-строительные материалы: Учебное пособие. - СПб.: Проспект Науки, 2014. - 144 с.

ВВЕДЕНИЕ	3
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	4
Глава 1. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ	9
1.1. Общие сведения о битумах. Состав и структура нефтяных битумов	9
1.2. Модифицированные нефтяные дорожные битумы. Влияние модификаторов на структурообразование и свойства битумов	23
1.2.1. Технические решения, направленные на улучшение качества дорожных битумов. Модифицированный битум	23
1.2.2. Нефтяные дорожные битумы, модифицированные полимерами	24
1.2.3. Нефтяные дорожные битумы, улучшенные поверхностно-активными добавками	33
1.2.4. Резинобитумные вяжущие, полученные совмещением нефтяных битумов и резиновой крошки	39
1.2.5. Отечественный опыт производства и применения резинобитумных вяжущих	44
Контрольные вопросы	48
ГЛАВА 2. ПОВЫШЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО СРОКА СЛУЖБЫ И УЛУЧШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ПОЯВЛЕНИЮ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ	49
2.1. Необратимое деформирование асфальтобетонных дорожных покрытий и пути повышения устойчивости асфальтобетона к возникновению пластических деформаций	49
2.2. Оценка сдвигоустойчивости дорожных асфальтобетонных покрытий и предпосылки повышения их устойчивости к возникновению пластических деформаций путем применения модифицированного битума	57
2.3. Физико-механические и деформационно-прочностные характеристики горячего модифицированного асфальтобетона	71
2.4. Применение полимерных адгезионных добавок для повышения физико-механических и деформационно-прочностных характеристик горячего каркасного асфальтобетона	78
2.5. Прогнозирование работоспособности модифицированного горячего асфальтобетона каркасной структуры в процессе эксплуатации в дорожном покрытии	89
2.6. Обоснование реологической модели, описывающей влияние модификаторов битумов и адгезионных добавок на возникновение пластических дефектов на дорожном покрытии из асфальтобетона каркасной структуры	105
Контрольные вопросы	115
ГЛАВА 3. УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ И КАЧЕСТВА РЕМОНТА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДНОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА	116

3.1. Применение в отечественном и зарубежном дорожном строительстве жидких вяжущих материалов и холодных асфальтобетонов на их основе	116
3.2. Структура и свойства традиционного холодного асфальтобетона на основе разжиженных вязких битумов и пути повышения его качества	112
3.3. Закономерности изменения эксплуатационного состояния и прогноз срока службы холодного асфальтобетона в дорожном покрытии с учётом неравномерности приложения транспортной нагрузки и реологических свойств материала	128
3.4. Повышение качества жидкого битума и холодного асфальтобетона на его основе	143
3.5. Принципиальная схема технологического процесса приготовления жидкого битумно-полимерного вяжущего	150
Контрольные вопросы	153
ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ДОРОЖНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПУТЁМ УСТРОЙСТВА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОБРАБОТОК НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ БИТУМАХ	154
4.1. Анализ существующих технологий устройства и опыта применения шероховатых поверхностных обработок	154
4.2. Теоретические предпосылки повышения срока службы ШПО с применением битумно-полимерных вяжущих	162
4.3. Математические методы исследования ШПО, искусственные нейроны и нейронные сети	169
4.3.1. Обучение сети	171
4.3.2. Практическое применение нейронных сетей	173
4.4. Исследование работоспособности слоя шероховатой поверхностной обработки на основе традиционных и модифицированных битумов	175
4.5. Исследование процесса втапливания слоя ШПО в асфальтобетонные покрытия на основе традиционных и модифицированных битумов с различной степенью твердости	185
4.6. Прогнозирование долговечности слоя ШПО на основе модифицированных битумов на асфальтобетонных покрытиях различной твердости	195
Контрольные вопросы	213
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	213
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	219

Учебное издание

**Калгин Юрий Иванович
Строкин Александр Сергеевич
Тюков Евгений Борисович**

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Учебное пособие

на обложке

*стационарный асфальтобетонный завод Benninghoven Concept muna TBA
http://www.benninghoven.ru/products/transportabelnye_statsionarnye_zavody*

Отпечатано в авторской редакции

Подп. в печать 3.12. 2014. Формат 60*84 1/16. Уч.-изд. л. 14,1. Усл.-печ. л. 15,0.
Бумага писчая. Тираж 300 экз. Заказ № 480.

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства учебной литературы
и учебно-методических пособий Воронежского ГАСУ
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84