

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

**А. Ф. Зубков, К. А. Андрианов,
А. И. Антонов, В. Г. Однолько**

**ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И
РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ
НЕЖЕСТКОГО ТИПА С УЧЕТОМ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

*Рекомендовано Научно-техническим советом университета
в качестве монографии для преподавателей, аспирантов, магистрантов и
студентов дорожно-строительных специальностей,
а также для работников дорожных и проектных организаций*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2017

УДК 625.7/8
ББК 0311-044
З-91

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Строительство и эксплуатация автомобильных дорог»
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
В. П. Подольский

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
В. В. Леденев

З-91 Технология строительства и ремонта дорожных покрытий
нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобе-
тонных смесей : монография / А. Ф. Зубков, К. А. Андрианов,
А. И. Антонов, В. Г. Однолько. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО
«ТГТУ», 2017. – 316 с. – 300 экз. – ISBN 978-5-8265-1832-8.

Рассмотрены вопросы, связанные с технологией строительства ас-
фальтобетонных дорожных покрытий. Дан анализ современных мето-
дов укладки асфальтобетонных смесей при строительстве многополос-
ных покрытий нежесткого типа. Освещены вопросы технологии уст-
ройства стыков сопряженных полос покрытия с учетом обеспечения
температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси при разных
способах укладки. Представлены температурные режимы горячей ас-
фальтобетонной смеси при ремонте покрытий нежесткого типа.

Предназначена для преподавателей, аспирантов, магистрантов и
студентов дорожно-строительных специальностей, а также для работ-
ников дорожных и проектных организаций.

УДК 625.7/8
ББК 0311-044

ISBN 978-5-8265-1832-8

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тамбовский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2017

ВВЕДЕНИЕ

Экономическое развитие регионов и страны в целом зависит от наличия и состояния транспортной системы, значительную долю которой составляют автомобильные дороги. Повышение качества строительства автомобильных дорог и обеспечение их содержания в процессе эксплуатации способствует повышению безопасности дорожного движения и увеличению скоростных режимов транспортных средств при одновременном увеличении срока службы дороги.

Формирование транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог осуществляется в процессе строительства, реконструкции и ремонта дорожных покрытий и зависит от качества применяемого материала, выполнения технологических процессов строительства и условий эксплуатации дорог.

Статистический анализ выпуска транспортных средств показал, что ежегодно количество автомобилей в стране возрастает на 5...7%, что опережающий рост численности парка автомобильного транспорта по отношению к протяженности автомобильных дорог и приводит к увеличению интенсивности движения на дорогах.

Анализ транспортных потоков на автомобильных дорогах показал, что значительно увеличивается количество большегрузных автомобилей, что приводит к снижению работоспособности дорожных покрытий, увеличению износа покрытий и ухудшению состояния автомобильных дорог. Несоответствие параметров автомобильных дорог интенсивности движения и составу транспортного потока приводит к снижению средней скорости движения и безопасности движения, а также повышению транспортных расходов.

Использование в качестве вяжущего материала битума, свойства которого зависят от температуры, накладывает ограничения во времени на температурные режимы технологических процессов укладки и уплотнения горячих смесей, в пределах которых можно достичь заданных параметров дорожного покрытия. В зависимости от конкретных условий строительства (конструкции дорожного покрытия, погодноклиматических условий, применяемого оборудования, свойств смеси) температура слоя из горячих асфальтобетонных смесей меняется в значительных интервалах, что влияет на возможную продолжительность строительства и технологию производства работ. Для повышения качества строительства покрытий необходимо знать влияние этих факторов на изменение температуры смеси во времени, что дает возможность обосновать параметры применяемых машин и разработать рекомендации по технологии строительства покрытий. Все это доказывает актуальность рассматриваемой проблемы.

Повышение интенсивности движения транспортных средств, при постоянных конструктивных параметрах покрытия, приводит к снижению пропускной способности автомобильной дороги. Одним из путей решения данной задачи является устройство многополосных дорожных покрытий, что позволяет увеличить как пропускную способность дороги, так и обеспечить высокую безопасность движения транспортных средств.

Строительство многополосных покрытий нежесткого типа в зависимости от условий производства работ характеризуется укладкой горячей асфальтобетонной смеси в сопряженные полосы дорожного покрытия с использованием разных методов ее укладки.

В процессе эксплуатации таких покрытий, в зоне стыка сопряженных полос часто происходит разрушение. Образование таких дефектов, как правило, связано с нарушением технологии укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей в зоне стыка полос покрытия. Основной причиной разрушения стыка является нарушение температурных режимов в момент укладки и уплотнения горячей асфальтобетонной смеси.

В процессе эксплуатации дорожных покрытий нежесткого типа под действием нагрузок от транспортных средств и влияния погодных условий на поверхности дорожных покрытий возникают деформации и разрушения, что проявляется в виде различных выбоин, просадок, трещин и волн, что приводит к ухудшению транспортно-эксплуатационных показателей и снижению срока эксплуатации автомобильной дороги. Образование дефектов на поверхности дорожного покрытия возможно также за счет нарушения технологий при устройстве и дорожных одежд. Для устранения таких дефектов проводят ямочный ремонт, который позволяет устранять образовавшиеся дефекты на дорожном покрытии и, при своевременном качественном ремонте, позволяет увеличить продолжительность эксплуатации автомобильной дороги с обеспечением требуемых транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги в течение нескольких лет. Такой вид работ производится при условии нецелесообразности устройства поверхностного слоя дорожного покрытия.

Наиболее распространенным методом ремонта дорожных покрытий нежесткого типа является ремонт с использованием горячих асфальтобетонных смесей, который позволяет обеспечить заданный срок службы ремонтируемого участка покрытия и, при условии соблюдения технологии, характеризуется высоким качеством работ.

Практика производства ремонтных работ по устранению выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа показала, что нарушение технологии ремонтных работ способствует снижению срока службы отремонтированной поверхности дорожного покрытия, что приводит к дополнительным затратам для обеспечения безопасности движения транспортных средств.

1. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ К ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Автомобильные дороги являются составляющей транспортной системы страны и оказывают решающее влияние на ее экономическое развитие, повышение жизненного уровня и благосостояние населения, эффективное использование природных, трудовых, производственных и инвестиционных ресурсов области. В связи с ростом интенсивности движения и увеличение осевой нагрузки от транспортных средств на дорожные одежды к транспортно-эксплуатационным показателям асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог предъявляют повышенные требования, которые можно обеспечить только в процессе строительства.

К основным параметрам, характеризующим эксплуатационные показатели асфальтобетона, относятся теплоустойчивость, прочность, водонасыщение, сдвигоустойчивость и трещиностойкость. Обеспечение требуемых характеристик асфальтобетона в процессе устройства покрытия зависит как от качества применяемого материала, так и принятой технологии строительства. Нарушение технологии при выполнении процессов приготовления горячей смеси, транспортирования, укладки и уплотнения, а также выбор режимов работы механизированного звена машин без учета конкретных условий производства работ приводит к снижению эксплуатационных показателей асфальтобетонного покрытия.

В процессе эксплуатации дорожного покрытия транспортно-эксплуатационные показатели зависят от температуры окружающего воздуха. В летний период, за счет солнечной радиации, температура асфальтобетонного покрытия может достигать температуры 50...60 °С, что приводит к снижению прочностных и деформативных характеристик асфальтобетона. Под действием нагрузок от транспортных средств в дорожных покрытиях возникают пластические деформации, способствующие образованию волн и колеи на поверхности покрытия. Поэтому применяемые смеси должны обладать определенной теплоустойчивостью к температуре, характерной для района строительства дорожного покрытия. В зимний период эксплуатации автомобильной дороги, при низких температурах окружающего воздуха, в асфальтобетоне возникают температурные деформации, что способствует образованию трещин на поверхности покрытия.

В зависимости от конкретных условий строительства предусматривается применение разных материалов и конструктивных параметров дорожного покрытия с учетом требований к транспортно-эксплуатационным показателям автомобильной дороги [7, 41]. С учетом дорожно-климатической зоны строительства автомобильной дороги определены конкретные марки битума, которые рекомендуется использовать при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей [40, 46]. По вязкости применяемого битума и температуры смеси различают:

- горячие,готавливаемые с использованием вязких (БНД 40/60, 60/90, 90/190, 130/200, 200/300) и жидких (СГ 130/200) нефтяных дорожных битумов, у которых температура при укладке должна быть не менее 120 °С;

- холодные,готавливаемые с использованием жидких нефтяных дорожных битумов (СГ70/130, 130/200) и температуре при укладке не менее 5 °С.

В зависимости от размера минеральных зерен асфальтобетонные смеси делят на:

- крупнозернистые с размером зерен до 40 мм;
- мелкозернистые с размером зерен до 20 мм;
- песчаные с размером зерен до 5 мм.

С учетом остаточной пористости асфальтобетонные смеси делят на:

- высокоплотные с остаточной пористостью от 1,0 до 2,5%;
- плотные с остаточной пористостью свыше 2,5 до 5,0%;
- пористые с остаточной пористостью свыше 5,0 до 10,0%;
- высокопористые с остаточной пористостью свыше 10,0 до 18,0%.

В зависимости от содержания щебня горячие смеси подразделяются на типы:

А – с содержанием щебня свыше 50 до 60%;

Б – с содержанием щебня свыше 40 до 50%;

В – с содержанием щебня свыше 30 до 40%;

Г – на песках из отсевов дробления, а также на их смесях с природным песком при содержании последнего не более 30% по массе;

Д – на природных песках или смесях природных песков с отсевами дробления при содержании последних не менее 70% по массе.

Существующими технологиями строительства дорожных покрытий нежесткого типа для обеспечения высоких прочностных показателей асфальтобетона, обладающими устойчивостью к воздействию погодно-климатических факторов в процессе эксплуатации, применяют высокоплотные и плотные марки 1. При устройстве покрытия в два слоя применяется раздельная укладка горячей смеси. В этом случае материал слоя покрытия регламентирован нормативным документом и зависит от категории дороги (табл. 1.1) [7, 41].

1.1. Материал слоя покрытия при его раздельной укладке

Категория дороги	Материал слоя покрытия	
	Верхнего	Нижнего
I, II	Горячие смеси для плотного асфальтобетона типов А, Б, В и Г, марки I	Горячие смеси для пористого асфальтобетона марки I
II	Горячие смеси для плотного дегтебетона типа Б, марки I	Горячие смеси для пористого дегтебетона марки I
III	Горячие смеси для плотного асфальтобетона типов А, Б, В, Г и Д, марки II. Горячие смеси для плотного дегтебетона типов Б и В марок I и II, а также песчаные смеси марки I	Горячие смеси для пористого асфальтобетона марки II. Горячие смеси для высокопористого асфальтобетона марки I. Горячие смеси для пористого дегтебетона марок I и II
IV	Горячие смеси для плотного асфальтобетона типов Б, В, Г и Д марки III. Горячие смеси для плотного дегтебетона типов Б и В и песчаные смеси марки II	Горячие смеси для пористых асфальтобетона и дегтебетона марки II. Горячие и теплые смеси для высокопористого асфальтобетона марки I

Верхние слои асфальтобетонных покрытий устраивают из высокоплотных и плотных смесей и применяют мелкозернистые или песчаные смеси. С целью обеспечения безопасности движения в верхние слои покрытия укладывают смеси с большим содержанием щебня (тип А) или отсевов дробления (тип Б, Г). В нижние слои укладывают крупнозернистые смеси. Применение пористых и высокопористых асфальтобетонов на основаниях, представляющих собой водоупорный слой, не допускается.

Толщина дорожной одежды определяется расчетом. Установлено, что минимальная толщина дорожной одежды в плотном состоянии, в зависимости от категории дороги и размера минеральных зерен, должна быть не менее данных, представленных в табл. 1.2 [45].

1.2. Минимальная толщина асфальтобетонных слоев

Асфальтобетон	Минимальная толщина слоя в зависимости от категории дороги, см	
	Скоростные и магистральные I, II	III, IV
Крупнозернистый	7	6
Мелкозернистый	5	3
Песчаный	4	3

В настоящее время с учетом роста осевой нагрузки на дорожные одежды и повышенной интенсивности движения транспортных средств применяются асфальтобетоны с разными модификаторами, которые влияют на свойства вяжущего и способствуют повышению работоспособности дорожных покрытий по отношению к покрытиям с горячим асфальтобетоном на основе вязких битумов.

Установлено, что в зависимости от применяемой марки битума и типа модификатора, температурные режимы горячих смесей при укладке и уплотнении в покрытия имеют разные значения [6, 11, 15]. Однако независимо от марки вяжущего, состава асфальтобетона и применяемых модификаторов достижение требуемых его характеристик зависит от соблюдения температурных режимов при устройстве покрытия.

Для обеспечения качественного ремонта дорожных покрытий нежесткого типа необходимо, чтобы применяемый материал для ремонтных работ соответствовал основному материалу, применяемому при строительстве дорожного покрытия. В зависимости от дорожно-климатической зоны расположения дорожного покрытия, категории дороги и нормативной нагрузки от транспортных средств рекомендуются горячие асфальтобетонные смеси типа А, Б, В, Г.

Технологические режимы производства работ с использованием горячих смесей различаются режимами укладки и уплотнения для одного и того же типа смеси. Установлено, что для I дорожно-климатической зоны необходимо применять плотные и высокоплотные горячие асфальтобетонные смеси типов А, Б, В и Г. В качестве вяжущего материала рекомендуется применять битум марок БНД 90/130, БНД 130/200 и БНД 200/300.

Для II и III дорожно-климатических зон рекомендуются плотные и высокоплотные асфальтобетоны типов А, Б, В, Г и Д, приготовленные на битумах марок БНД 60/90, БНД 90/130 и БНД 130/200.

Для IV и V дорожно-климатических зон рекомендуются высокоплотные асфальтобетоны типов А, Б, В, Г и Д, приготовленные на битумах марок БНД 40/60, БНД 60/90.

1.1. ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОМУ СОСТОЯНИЮ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПОКРЫТИЯМИ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Статистический анализ дорожно-транспортных происшествий, проведенный ГИБДД показал, что неблагоприятные дорожные условия, способствующие их возникновению, до 2000-х гг. не превышали 12% от общего количества ДТП. Однако с 2000 г. наметилась тенденция к росту ДТП, связанным с несоответствием параметров дорог нормам на проектирование. По данным Центра стратегических исследований (ЦСИ) «Росгосстраха» свыше 20% автомобильных аварий в России происходит из-за плохого качества дорожного полотна.

Согласно ГОСТ Р 50597 по транспортно-эксплуатационным характеристикам автомобильные дороги разделены на три группы:

1) группа А – автомобильные дороги с интенсивностью движения более 3000 авт./сут., которые расположены в городах и населенных пунктах. К ним относятся магистральные дороги скоростного движения и магистральные улицы общегородского значения непрерывного движения;

2) группа Б – автомобильные дороги с интенсивностью движения от 1000 до 3000 авт./сут. Они расположены в городах и населенных пунктах и к ним отнесены магистральные дороги регулируемого движения, магистральные улицы общегородского значения регулируемого движения и дороги районного значения;

3) группа В – автомобильные дороги с интенсивностью движения менее 1000 авт./сут., расположенные в городах и населенных пунктах и к ним относятся улицы и дороги местного значения.

Параметры автомобильных дорог и улиц в городах и населенных пунктах определены требованиями СП 42.13330.2016, эксплуатационное состояние автомобильных дорог определено требованиями ГОСТ Р 50597–93. Предельно допустимые повреждения покрытия, а также сроки их ликвидации приведены в табл. 1.3.

На покрытии проезжей части не допускается наличие выбоин, проломов и просадок с размерами по длине, ширине и глубине более чем 15×60×5 см, а количество более мелких повреждений и дефектов в весенне-летне-осенний периоды менее значений, приведенных в табл. 1.4.

1.3. Требованиями к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения

Группа дорог и улиц по их транспортно-эксплуатационным характеристикам	Повреждения на 1000 м ² покрытия, м ² , не более	Сроки ликвидации повреждений, сут., не более
А	0,3(1,5)	5
Б	1,5(3,5)	7
В	2,5(7,0)	10

Примечание. 1. В скобках приведены значения повреждений для весеннего периода. 2. Сроки ликвидации повреждений по конкретным видам работ указаны для строительного сезона, определяемого погодноклиматическими условиями, приведенными в СП 78.13330.2012.

1.4. Допустимые значения дефектов в конструкции автомобильной дороги

Показатели состояния конструктивных элементов дорог	Допустимые значения для дорог с интенсивностью движения, авт./сут., приведенных к легковому автомобилю				
	более 6000	2000... 6000	1000... 2000	200... 1000	менее 200

Проезжая часть (включая используемые съезды)

Повреждения (выбоины) размером не более 15×60×5 см, площадью м ² на 1000 м ² покрытия:					
летом	0,3	1,0	1,5	2,0	2,5
весной	1,5	3,0	4,5	6,0	7,0
зимой	1,5	3,0	4,5	6,0	7,0
Отдельные раскрытые необработанные трещины на покрытии шириной более 5 мм. п.м. на 1000 м ²	10	20	30	40	40

Показатели состояния конструктивных элементов дорог	Допустимые значения для дорог с интенсивностью движения, авт./сут., приведенных к легковому автомобилю				
	более 6000	2000... 6000	1000... 2000	200... 1000	менее 200
Наличие необработанных мест выпотевания битума, м ² на 1000 м ² покрытия	7	10	15	20	25
Наличие полос загрязнения у кромок покрытия шириной до 0,5 м, площадью, в % от общей площади покрытия, не более	Нет	3	5	8	10

1.2. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВЫБОР МАШИН ДЛЯ УКЛАДКИ И УПЛОТНЕНИЯ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Заключительной стадией строительства автомобильных дорог является укладка горячих асфальтобетонных смесей и уплотнение слоя покрытия. Изменение свойств материала во времени и ограниченная толщина укладываемого слоя предъявляют повышенные требования к технологическим процессам, связанным с укладкой и уплотнением горячих асфальтобетонных смесей. Под действием усилий, действующих на материал со стороны рабочего органа машины, минеральные частицы сближаются между собою. При этом происходит частичное вытеснение заземленного воздуха и некоторое перераспределение свободного битума, заполняющего поры уплотняемой смеси. В результате этого значительно повышаются объемная масса уплотняемого материала, прочность и водостойчивость покрытия.

В практике строительства автомобильных дорог уплотнение асфальтобетонных покрытий осуществляется самоходными гладковальцовыми катками статического, вибрационного действия и катками на пневматических шинах. Традиционным методом уплотнения дорожных покрытий является применение катков статического действия,

которые воздействуют на уплотняемый материал своей массой, обеспечивая тем самым необходимое для диффузии статическое контактирование минеральных частиц между собою, но в тоже время они не обеспечивают оптимального сближения зерен материала между собою. Эти машины, при соответствующем подборе их параметров, обеспечивают достижение требуемой плотности материала, но характеризуются сравнительно малой производительностью и высокой металлоемкостью. Анализ выпуска машин этой группы показывает, что в течение длительного времени эксплуатации серьезных конструктивных изменений не произошло. Наблюдается тенденция создания катков повышенной массы, оснащение их приборами и аппаратурой для оперативного контроля качества работ, что дает возможность повысить их эффективность [16].

Увеличение грузоподъемности транспортных средств и рост нагрузок на покрытие дорог является одной из причин образования на поверхности покрытия колеи вследствие дополнительного уплотнения слоев покрытия или проявления пластических деформаций уложенного материала под воздействием транспортных нагрузок. Открытые поры, макро и микротрещины на поверхности снижают долговечность покрытия в результате разрушительного действия погодных факторов (влаги, мороз). В связи с повышением требований к долговечности дорожных конструкций к уплотняющему оборудованию стали предъявлять новые, более широкие требования:

- укладка и уплотнение дорожных покрытий должна обеспечивать такую максимальную степень уплотнения одежды, при которой не происходит доуплотнения под действием нагрузки от транспортных средств;

- поверхность покрытия не должна иметь открытых пор и трещин, в результате чего прекращается доступ воды в покрытие, что способствует повышению его долговечности.

Этим требованиям отвечают самоходные катки на пневматических шинах, что и определило быстрое и широкое его распространение. Они имеют высокую производительность, прорабатывают слои сравнительно большой толщины, обеспечивают более равномерное распределение плотности по толщине слоя. При уплотнении этими катками на поверхности покрытия не образуется продольных и поперечных волосяных трещин, не происходит дробления каменных составляющих асфальтобетона, что значительно улучшает водонепроницаемость поверхности покрытия.

Проведенные в США опыты показали, что после укатки покрытия (толщина слоя 0,05 м, размер заполнителя 0...18 мм, расход битума по весу 6,2%) катками на пневматических шинах расход воздуха через

единицу площади покрытия за 1 мин (характеризующей водонепроницаемость) в 20 раз меньше, чем после укатки гладковальцовыми катками статического действия. Однако толщина верхнего слоя покрытия с замкнутой поровой структурой после уплотнения этими катками незначительная и она разрушается при движении транспорта большой грузоподъемности [30]. Некоторые фирмы идут на увеличение содержания битума в смеси на 0,5...1,0% по сравнению с обычным расходом и доводят его до 7...7,5% битума. При таком содержании битума в слое толщиной не менее 0,1 м достигается замкнутая поровая структура и минимальная водопроницаемость.

К недостаткам технологии применения только катков на пневматических шинах следует отнести неудовлетворительную поперечную и продольную ровность покрытия после работы катков на пневматических шинах. Этот недостаток заложен в конструкции машин и объясняется колебаниями катка в вертикальной плоскости на упругих пневматических шинах в процессе его движения и наличием зазоров между шинами. Для обеспечения предъявляемых требований к ровности покрытия такие катки должны работать совместно с гладковальцовыми, которыми осуществляют предварительную подкатку уложенного слоя асфальтобетонной смеси (легкий тип) при низкой ее деформативной способности и окончательную отделку поверхности для создания требуемой ровности (тяжелый тип).

Вибрационные катки для уплотнения дорожных одежд применяются сравнительно недавно. При динамическом воздействии на уплотняемый материал интенсивнее пробуждаются вяжущие свойства у активных минеральных материалов, чем при статическом уплотнении, что дает возможность получать более высокую плотность и меньшую водопроницаемость [5].

Характерная при их работе некоторая миграция вяжущего к поверхности укатываемого покрытия и предположения возможного расслоения смеси вызвали осторожное, а иногда и отрицательное отношение к ним. В связи с новыми требованиями к уплотняемому оборудованию, в частности, необходимостью создания покрытия с замкнутой поровой структурой, эти особенности вибрационных катков стали расцениваться как положительные. Проведенные в разных странах исследования и опыт применения вибрационных катков при уплотнении дорожных одежд показывает, что существенного расслоения смеси не наблюдается. Опыты в Германии по определению водопроницаемости асфальтобетонных покрытий после уплотнения катками статического действия, вибрационными и на пневматических шинах показали, что через 100 см² покрытия за 1 ч проходит соответственно 644, 66 и 10 см³ воды. Водонасыщение в вакууме оказалось наимень-

шим (4,5%) после катка на пневматических шинах, а самым большим (6,9%) – после гладковальцового катка статического действия [50].

Значительное влияние на уплотняемость асфальтобетонных смесей оказывает гранулометрический состав. Известно, что чем больше содержания крупных каменных составляющих, тем больше должна быть уплотняющая нагрузка. Установлено, что в результате уплотнения смесей с содержанием щебня 65 и 70% щебня отрядом машин, состоящих из гладковальцовых катков массой 6 и 10 т и катком на пневматических шинах массой 15 т, не были достигнуты требуемые плотности смесей [16]. При уплотнении таких смесей целесообразно применять вибрационные катки.

Вибрационные катки имеют высокую производительность, для них требуется более низкое тяговое усилие, они имеют меньшую массу и способны при выключенном вибраторе работать как гладковальцовые катки статического действия. Все это привело к значительному увеличению выпуска вибрационных катков практически во всех странах мира. Этому способствовала и их эффективность при уплотнении других конструктивных слоев дорожных одежд и некоторых видов грунтов. Например (США) из 196 моделей различных катков на долю пневматических приходится 18%, статических – 30 и вибрационных – 52, из них самоходных – 33 и прицепных – 19. Широкое применение вибрационные катки получили в Германии, где около 15 фирм изготавливают более 80 моделей массой от 0,5 до 100 т [16].

Технологический процесс строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей зависит от требуемого темпа, с учетом которого выбираются машины для укладки смесей и назначаются технологические режимы их работы.

Существующими нормативными материалами в зависимости от конструкции дороги, предусматривается укладка дорожных покрытий в один или два слоя. Верхний слой допускается укладывать при температуре нижнего слоя не ниже 10 °С.

В настоящее время используются три технологии укладки асфальтобетонных смесей [5]:

- американская технология (фирмы Barber Green) с производительностью до 1800 т/ч и темпом укладки 5 км/смену на нижнем слое и 10 км/смену на верхнем слое при ширине укладки 8...9 м;

- американская технология (фирмы Roodtec) с производительностью до 600 т/ч и темпом укладки 1,75 км/смену на нижнем слое и 3,5 км/ч на верхнем слое при ширине укладки 8...9 м;

- европейская технология с производительностью до 240 т/ч и темпом укладки до 0,6 км/смену на нижнем слое и 1,2 км/смену на верхнем слое при ширине укладки 8...9 м.

Эффективность уплотнения дорожных покрытий в значительной степени зависит от толщины укладываемого слоя материала. Принято считать, что при значительной толщине слоя нижняя часть покрытия недоуплотняется и поэтому ограничивают наибольшую толщину уплотняемого слоя. Однако, как показали результаты измерений плотности в разных точках толщины покрытия, достигаемая плотность при уплотнении слоя толщиной 0,15 м выше, чем при уплотнении такой же толщины слоя в два приема [15].

В связи с увеличением грузоподъемности и интенсивности движения транспортных средств используют смеси с высоким содержанием щебня, процентное содержание которого может достигать 80%. Такие смеси обладают большей жесткостью и уплотнять их катками статического действия неэффективно. Наиболее эффективно такие смеси можно уплотнять вибрационными катками или звеном катков, состоящих из вибрационных и катков на пневматических шинах. Применение вибрационного метода способствует нарушению связей между частицами материала и изменяет вязкость вяжущего материала, что сказывается на получаемом результате уплотнения материала.

При выполнении процессов, связанных с уплотнением покрытий, можно отметить различные технологические схемы, сочетающие применение статических, вибрационных и катков на пневматических шинах [14, 16, 29, 36]. С этой целью выпускается большой парк уплотняющих машин, которые имеют различные технические характеристики и области применения.

Анализ конструкций существующего парка уплотняющих машин показал, что каждая машина является итогом использования опыта конструирования, отвечает технологическим требованиям и техническим возможностям периода проектирования и выпуска и в тоже время представляет собой базис для принятия конструктивных решений в будущем.

Анализ выпуска уплотняющих машин в разных странах мира показал, что имеется тенденция к изменению структуры парка уплотняющих машин. Так, если в 1980-х гг. выпуск катков статического действия составлял 50...60%, вибрационного и катков на пневматических шинах 20...25% от общего количества катков, то в настоящее время основная доля приходится на катки с пневматическими шинами, вибрационного и комбинированного действия. Доля выпуска катков статического действия составляет незначительную величину. В подтверждение отмеченной тенденции выпуска уплотняющей техники можно привести данные по выпуску катков ЗАО «Раскат» (г. Рыбинск), специализирующейся на их выпуске. Для уплотнения асфальтобетонных покрытий все выпускаемые модели (ДУ-47Б, ДУ-82,

ДУ-96, ДУ-98) вибрационного действия, имеют эксплуатационную массу от 3,5 до 11,5 т. Из пяти моделей для уплотнения дорожных одежд три модели комбинированного действия (ДУ-84, ДУ-97, ДУ-99), две модели катков на пневматических шинах (ДУ-100, ДУ-101), массой от 7,6 до 16 т. Все выпускаемые модели для уплотнения грунтов вибрационного действия (ДУ-74, ДУ-85, ДУ-11, ДУ-94). Некоторые зарубежные фирмы стали выпускать вибрационные катки с дистанционным управлением, что позволяет увеличить относительную возмущающую силу вальца и тем самым повысить эффективность этих катков. Однако, как правило, масса таких катков незначительна и выпускаются они в небольших количествах. Наблюдается увеличение ширины вальцов (1800...2000 мм), что позволяет уменьшить число полос укатки катком. Увеличение диаметра вальца (1000...1600 мм) способствует уменьшению касательных напряжений, что приводит к уменьшению сдвигающих усилий в уплотняемом материале покрытия и улучшению ровности покрытия.

Выбор технологических схем применяемых машин зависит от ряда факторов, к которым можно отнести свойства уплотняемого материала, климатические условия строительства, наличия парка машин и так далее. Проведенный анализ технологических схем применения уплотняющих машин в различных странах показал, что вибрационные катки являются основным видом уплотняющих машин и применяются как самостоятельно, так в сочетании с другими типами машин. При работе в динамическом режиме по уплотняющему эффекту они заменяют более тяжелые катки статического действия [5, 16, 28].

Известно, что применение вибрации в самоходных катках приводит к уменьшению коэффициента трения на контакте вальца с поверхностью покрытия при управляемом вибрационном вальце и уменьшению коэффициента сцепления при ведущем вальце, что влияет на их ходовые качества. Для устранения этого недостатка ряд зарубежных фирм выпускают катки с обеими ведущими вибрационными вальцами, что позволяет улучшить ходовые качества и способствуют получению ровной поверхности покрытия. Эффективность работы вибрационных катков зависит от относительной возмущающей силы (отношение центробежной силы к силе тяжести вибрирующей массы катка) и частоты колебаний вальца, которые меняются в зависимости от свойств уплотняемого материала. Анализ конструкций вибрационных катков показал, что в большинстве случаев катки имеют фиксированные частоты колебаний и величины возмущающих сил, что снижает эффективность применения. Применение гидравлического привода в конструкциях катков позволило использовать гидравлические моторы для привода ведущих вальцов и возбуждателей колебаний. Такие машины позволяют

бесступенчато менять рабочие скорости в широких пределах в процессе укатки, а также изменять частоту колебаний и величину возмущающей силы в зависимости от свойств уплотняемого материала. Применение вибровозбудителей с изменяющимися параметрами вибрации позволяет повысить эффективность вибрационных катков, расширить область применения в технологических схемах укатки дорожных одежд. Широкое применение получили катки с шарнирно-сочлененной рамой.

Из проведенного анализа технологических схем уплотнения покрытий из горячих асфальтобетонных смесей следует, что в зависимости от конкретных условий строительства выбор уплотняющих машин может быть разным. Для каждого типа и массы катка существуют определенные области применения, зависящие от температурных границ типа смеси и применяемой марки битума, в которых достигается наибольший эффект уплотнения. При укладке крупнозернистых смесей типа А и Б асфальтоукладчиком с активным уплотняющим рабочим органом звено уплотняющих машин может назначаться из среднего и тяжелого катков, а также катка на пневматических шинах с совместной работой вибрационного катка (при соответствующих силовых параметрах). При строительстве покрытий из смесей типа В, Г и Д в звено уплотняющих машин необходимо вводить легкий каток. Применение в технологических звеньях уплотняющих машин вибрационных катков, в зависимости от технических параметров, позволяет осуществлять замену легких и средних катков по одинаковому уплотняющему эффекту.

С увеличением интенсивности движения и ростом осевой нагрузки от транспортных средств на дорожные одежды к транспортно-эксплуатационным показателям асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог предъявляют повышенные требования, которые можно обеспечить только в процессе строительства, реконструкции и ремонта. Обеспечение требуемых характеристик асфальтобетона в процессе устройства покрытия зависит как от качества применяемого материала, так и принятой технологии строительства. Нарушение технологии при выполнении процессов приготовления горячей смеси, транспортирования, укладки и уплотнения, а также выбор режимов работы механизированного звена машин, без учета конкретных условий производства работ, приводит к снижению эксплуатационных показателей асфальтобетонного покрытия.

Основными параметрами, характеризующими эксплуатационные показатели асфальтобетона, являются:

- прочность при разных температурах окружающего воздуха, характеризующая сопротивление асфальтобетона силовым воздействиям от движущегося транспорта;

- водостойкость, характеризующая потерю прочности асфальтобетона при его водонасыщении;
- водонасыщение, характеризующее остаточную пористость материала;
- сдвигоустойчивость, характеризующая способность материала сопротивляться действию касательных напряжений;
- трещиностойкость, характеризующая сопротивление материала покрытия растягивающим силовым воздействиям при низких температурах.

Значительное влияние на достижение требуемых характеристик асфальтобетона в процессе эксплуатации оказывает температура горячей смеси на всех этапах устройства покрытия. В процессе эксплуатации дорожного покрытия его транспортно-эксплуатационные показатели также зависят от температуры окружающего воздуха. В летний период за счет солнечной радиации температура асфальтобетонного покрытия превышает температуру окружающего воздуха, что приводит к снижению прочностных и деформативных характеристик асфальтобетона и, как следствие, под действием нагрузок от транспортных средств возникают пластические деформации, способствующие образованию волн и колеи на поверхности покрытия. При низких температурах окружающего воздуха объем асфальтобетона уменьшается, в покрытие возникают растягивающие напряжения, что способствует образованию трещин на поверхности покрытия.

Установлено, что обеспечить требуемые эксплуатационные параметры асфальтобетонного покрытия можно только в процессе его устройства при соответствующем выборе силовых параметров уплотняющих машин свойствам применяемых горячих смесей.

На рисунке 1.1 представлены зависимости, характеризующие влияние уплотняющей нагрузки на параметры, определяющие эксплуатационные характеристики асфальтобетона. Данные зависимости получены по результатам обработки экспериментальных исследований, представленных в работе [11].

Из представленных данных видно, что значения параметров покрытия, достигаемые в процессе уплотнения горячей смеси и характеризующие свойства асфальтобетона, зависят от напряжений в зоне контакта рабочего органа машины с уплотняемым материалом.

Установлено, что величина контактных напряжений влияет на получаемую пористость асфальтобетона и зависимость носит линейный характер. Плотность асфальтобетона характеризуется величиной остаточной пористости. Выявлена связь между этими параметрами, которая представлена на рис. 1.2.

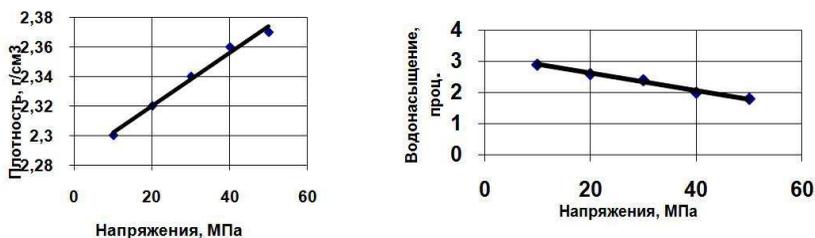


Рис. 1.1. Влияние контактных напряжений на эксплуатационные показатели асфальтобетона

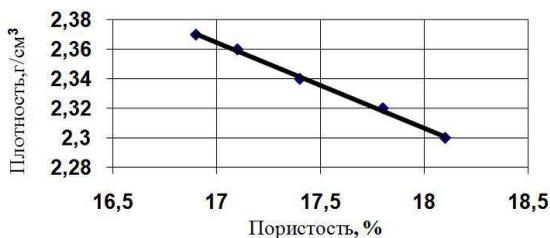


Рис. 1.2. Влияние пористости асфальтобетона на его плотность

Прочностные характеристики и водонасыщение зависят от плотности асфальтобетона при условии отсутствия разрушения минерального материала в процессе уплотнения (рис. 1.3).

Установлено также, что с повышением прочностных характеристик асфальтобетона повышается его устойчивость к образованию трещин на покрытии и возникновению сдвигающих деформаций от действия касательных нагрузок, возникающих при движении транспортных средств.

При строительстве автомобильных дорог для контроля качества процесса уплотнения принят коэффициент уплотнения. Установлено, что обеспечить требуемый коэффициент уплотнения можно только при условии соответствия контактных напряжений под рабочим органом катка прочностным характеристикам горячего асфальтобетона [16, 28, 34].

Следовательно, в зависимости от уплотняющей нагрузки при уплотнении горячей смеси дорожного покрытия достигаются определенные характеристики асфальтобетона, характеризующие его транспортно-эксплуатационные параметры. Поэтому для обеспечения заданных эксплуатационных параметров асфальтобетонного покрытия необходимо осуществлять выбор параметров уплотняющих машин с учетом свойств горячей смеси и условий производства работ.

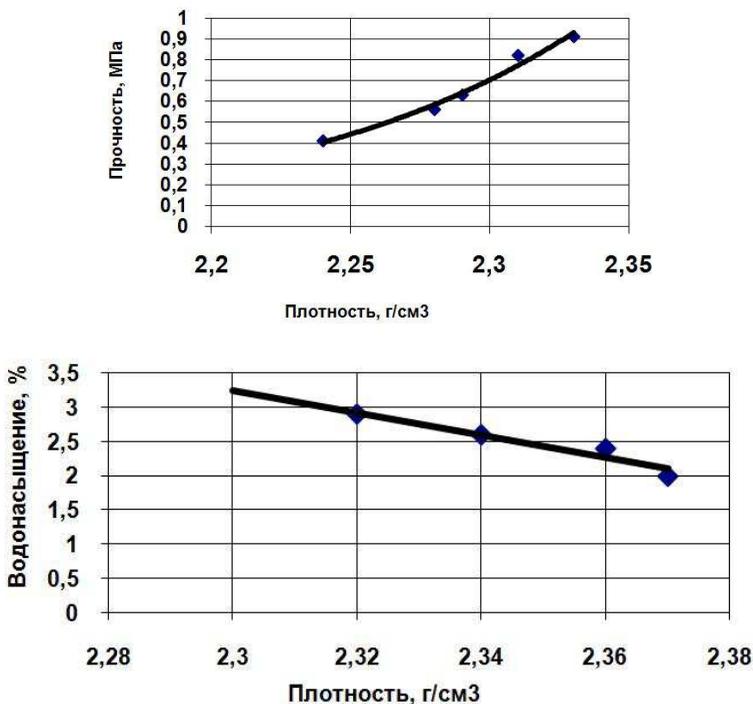


Рис. 1.3. Влияние плотности асфальтобетона на прочность при сжатии и водонасыщение

1.3. ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТА ВАЛЬЦА КАТКА С УПЛОТНЯЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

При движении гладковальцового катка по уплотняемой поверхности, за счет передаваемого усилия от вальца, происходит сближение частиц материала относительно друг друга, и материал приобретает требуемые свойства для восприятия внешней нагрузки. С учетом изменения прочностных характеристик материала в процессе уплотнения технологиями предусматривается применение разных типов машин, отличающихся силовыми параметрами.

Установлено, что между плотностью материала и дугой контакта вальца существует линейная зависимость [16]. На основании этих исследований сделан вывод, что при постоянном силовом воздействии вальца площадь контакта жесткого вальца катка зависит от плотности материала. Площадь контакта вальца зависит также от ширины и дли-

ны дуги контакта вальца и физико-механических свойств уплотняемого материала.

Анализ взаимодействия вальца катка с уплотняемым материалом показал, что длина дуги контакта вальца катка с уплотняемым материалом является величиной, характеризующей интенсивность воздействия вальца на уплотняемый материал, и зависит как от параметров катка, так и свойств материала. По результатам экспериментальных данных установлена зависимость длины дуги контакта вальца с материалом от параметров вальца катка и свойств уплотняемого материала, которая имеет вид:

$$l = 0,16q^{0,1} / E^{0,32} R^{1,1}, \text{ м}, \quad (1.1)$$

где E – модуль деформации материала, МПа; R – радиус вальца, м; q – линейное давление вальца, кН/м.

Анализ технических характеристик катков статического и вибрационного действия показал, что в зависимости от области применения катков диаметры валцов находятся в широких пределах. Поэтому величиной, характеризующей процесс взаимодействия гладкого вальца катка с уплотняемым материалом и не зависящей от радиуса вальца, является угол контакта вальца с материалом (β), величина которого определяется выражением

$$\beta = 9,17q^{0,1} / E^{0,32} R^{1,1}, \text{ град}. \quad (1.2)$$

Экспериментально установлено, что между углом контакта вальца и получаемой плотностью грунта существует линейная зависимость, которая имеет вид

$$\beta = 40,84 - 14,9\delta, \text{ град}, \quad (1.3)$$

где δ – плотность грунта, т/м³.

Анализ работ, связанных с исследованием взаимодействия жесткого вальца катка с уплотняемым материалом показал, что при моделировании системы «вальец – уплотняемый материал» условно принимают, что каток совершает проходы на заключительной стадии уплотнения и упругая деформация материала в зоне контакта вальца не влияет на напряженное состояние материала.

Исследованиями Н. Я. Хархута установлено, что относительная деформация уплотняемого материала зависит от скорости изменения напряженного состояния материала и с ее увеличением величина необратимой деформации снижается. С повышением скорости изменения напряженного состояния полная деформация и ее необратимая часть убывают. Скорость изменения напряженного состояния материала незначительно влияет на величину обратимой деформации, которая протекает с высокими скоростями [38].

Анализ работы катка показал, что в зоне контакта возникают одновременно остаточная (необратимая) и обратимая (упругая) деформации. Поэтому при рассмотрении процесса взаимодействия вальца с уплотняемым материалом в процессе его укатки необходимо учитывать все деформации материала, так как в противном случае нарушается физика процесса контакта вальца с материалом, что приводит к значительным погрешностям получаемых результатов.

Взаимодействие жесткого вальца катка с материалом представлено на рис. 1.4.

Из представленной схемы видно, что полная деформация уплотняемого материала может быть определена как сумма необратимой и обратимой деформаций:

$$h_n = h_n + h_o, \text{ м}, \quad (1.4)$$

где h_n, h_n, h_o – полная, необратимая и остаточная деформации.

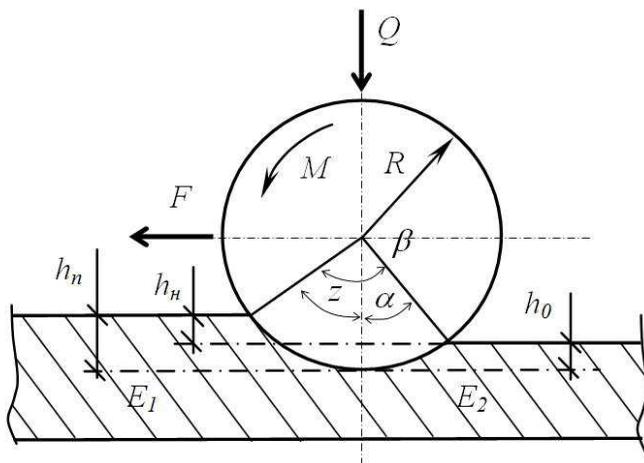


Рис. 1.4. Схема взаимодействия ведущего вальца катка с материалом:

Q – сила тяжести катка, приходящаяся на валец, кН;

M – крутящий момент, приложенный к ведущему вальцу катка, кН·м;

R – радиус вальца, м; E_1 и E_2 – модули деформации уплотняемого материала до прохода вальца и после него, МПа; F – сила, передаваемая от ведущего

вальца на раму катка, кН; h_n, h_n, h_o – полная, необратимая и упругая деформации материала, м; β – угол контакта вальца катка с материалом, характеризующий необратимую деформацию, град; α – угол между осью движения вальца и точкой, характеризующий конец контакта вальца с материалом, характеризующий упругую деформацию, град;

z – угол между точкой начала контакта вальца с уплотняемым материалом и осью движения вальца, характеризующий полную деформацию материала, м

Установлено, что величина необратимой деформации при уплотнении катками статического действия может быть определена по формуле:

$$h_n = 20q / R^{0.5}, \text{ м}, \quad (1.5)$$

где E – модуль деформации уплотняемого материала, МПа; q – линейное давление вальца катка, кН/м; R – радиус вальца, м.

Из представленной схемы взаимодействия вальца катка с уплотняемым материалом получены выражения для определения деформаций уплотняемого материала, которые имеют вид:

$$h_n = R(1 - \cos z), h_n = R(\cos \alpha - \cos z), h_o = R(1 - \cos \alpha), \text{ м}. \quad (1.6)$$

Для начальной стадии уплотнения, когда упругие свойства материала проявляются незначительно, можно предположить, что угол α равен нулю. В этом случае угол контакта вальца с материалом определяется выражением

$$\cos \beta = 1 - 20q / ER\sqrt{R}. \quad (1.7)$$

Из данной зависимости видно, что угол контакта β зависит от параметров уплотняющей машины (q , R) и свойств материала, характеризующих деформативные свойства грунта (E). В процессе укатки величина модуля деформации материала изменяется практически на порядок. Из данного выражения видно, при возрастании модуля деформации материала до бесконечно большой величины, часть уравнения превращается в ноль, что характеризует контакт вальца катка с материалом в точке. Для заключительной стадии работы катка можно считать, что модуль деформации материала не меняется от числа проходов катка и $E_1 = E_2$. Тогда угол контакта вальца катка с уплотняемым материалом равен $\beta = 2\alpha$. При перемещении вальцов по уплотняемой поверхности деформативные свойства материала изменяются. Если на начальной стадии работы катка наблюдается интенсивный рост модуля деформации уплотняемого материала и необратимой деформации, то на последующих проходах рост замедляется и затем, при проходах одной и той же машины, практически прекращается. Это обстоятельство вызывает необходимость использовать для получения высокой плотности материала более тяжелые уплотняющие машины.

Изменение модуля деформации уплотняемого материала от числа проходов катка при разных силовых параметрах представлено на рис. 1.5.

Из представленных данных видно, что модуль деформации материала увеличивается до определенного значения при проходах катка по одному следу. Затем значение стабилизируется и для получения более высокого значения модуля деформации необходимо увеличивать

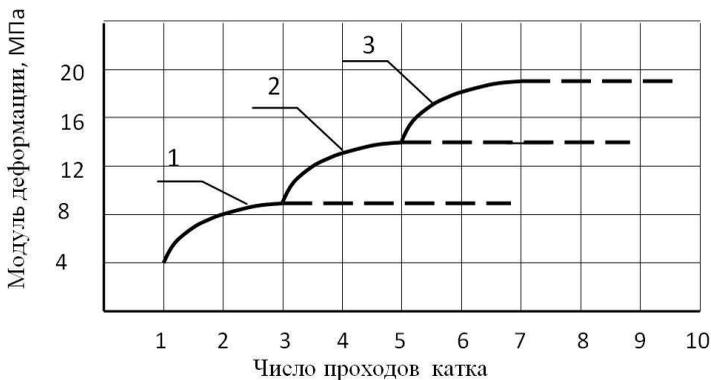


Рис. 1.5. Изменение модуля деформации уплотняемого материала от числа проходов катка:
1, 2, 3 – катки с разными силовыми параметрами

силовое воздействие вальца катка на уплотняемый материал. Угол контакта вальца с материалом зависит от его линейного давления и радиуса вальца. При одной и той же деформативной способности материала с увеличением радиуса вальца угол контакта уменьшается.

Анализ параметров дорожных катков показал, что диаметр вальца колеблется в пределах от 0,4 до 1,8 м, а линейное давление вальцов меняется от 10 до 90 кН/м. Влияние параметров вальца катка, модуля деформации уплотняемого материала и толщины слоя на угол контакта вальца представлено на рис. 1.6, 1.7.

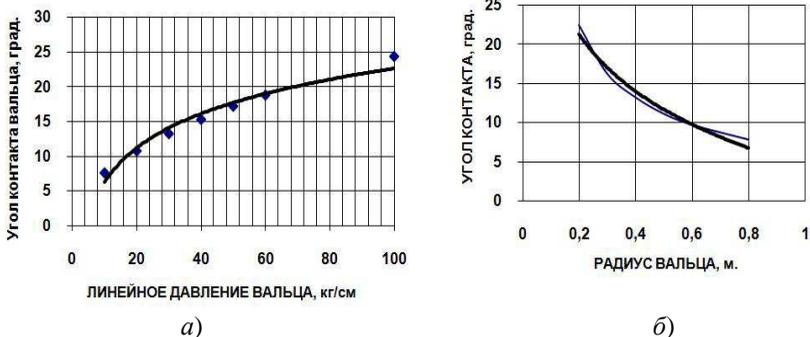
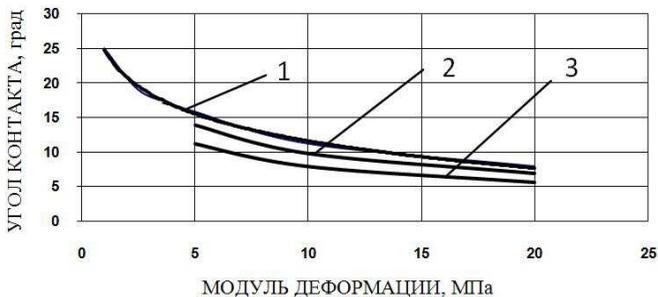


Рис. 1.6. Влияние параметров катка на угол контакта вальца с уплотняемым материалом:
а – от линейного давления; б – от радиуса вальца



а)



б)

Рис. 1.7. Зависимости угла контакта вальца от модуля деформации (а) и толщины уплотняемого слоя (б):

1 – грунт глина, каток ДУ-47Б; 2 – асфальтобетон мелкозернистый, толщина слоя 0,07 м, каток ДУ-10А; 3 – асфальтобетон крупнозернистый, каток ДУ-47Б, толщина слоя 0,07 м

Установлено, что угол контакта вальца, при постоянных параметрах силового воздействия на уплотняемый материал, в зависимости от модуля деформации уплотняемого материала, определяется по формулам:

- для грунта $\beta_0 = 24,75 - 5,69 \ln E$;
- для мелкозернистой смеси $\beta_0 = 24,53 - 5,02 \ln E$;
- для крупнозернистой смеси $\beta_0 = 17,53 - 4,04 \ln E$,

(1.8)

где β_0 – угол контакта вальца, град; E – модуль деформации материала, МПа. Коэффициент корреляции уравнений 0,97...0,99.

В процессе уплотнения каток совершает заданное количество проходов по одному следу за отведенное время на операцию. За счет передачи усилия на поверхность материала повышается его деформа-

тивная способность, увеличивается плотность материала, что влияет на контактную поверхность вальца. Характер изменения угла контакта вальца от числа проходов катка подчиняется логарифмической зависимости и определяется по следующим формулам

- для грунта $\beta = \beta_0 - 3,8\ln(N)$;
 - для мелкозернистой смеси $\beta = \beta_0 - 3,74\ln(N)$;
 - для крупнозернистой смеси $\beta = \beta_0 - 4,09\ln(N)$,
- (1.9)

где β_0 – угол контакта при первом проходе; N – число проходов по одному следу. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,94...0,98.

Отмечалось, что при взаимодействии вальца катка с уплотняемым материалом развивается как необратимая деформация, характеризующаяся углом β , так и обратимая, которая определяется углом α .

На рисунке 1.8 представлены зависимости углов контакта вальца β и α катка при разных режимах уплотнения в зависимости от числа проходов катка.

Из представленных данных видно, что между углом контакта вальца с материалом (β) и углом, характеризующим упругую деформацию материала (α), существует зависимость, независящая от вида материала и способа воздействия на уплотняемый материал, которая представлена на рис. 1.9.

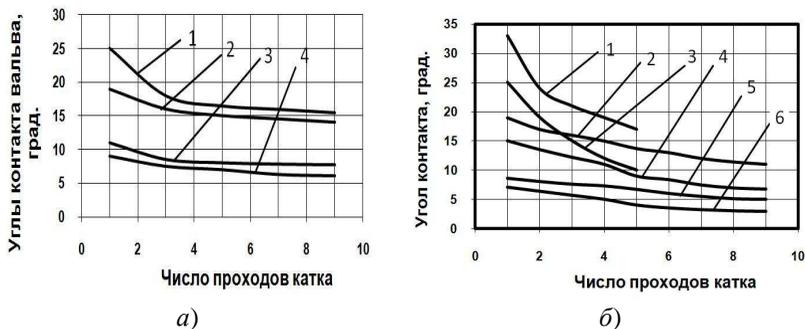


Рис. 1.8. Зависимость угла контакта вальца при уплотнении дорожных одежд от числа проходов:

- а* – грунт (вибрационный валец: 1 – угол β ; 3 – угол α , валец статического действия: 2 – угол β , 4 – угол α); *б* – асфальтобетон (1 – угол β , мелкозернистый, валец ведомый; 2 – угол β , валец ведущий, мелкозернистый; 3 – угол β , валец ведущий, крупнозернистый; 4 – угол α , валец ведомый, крупнозернистый; 5 – угол α , ведомый, крупнозернистый; 6 – угол α , валец ведущий, крупнозернистый)

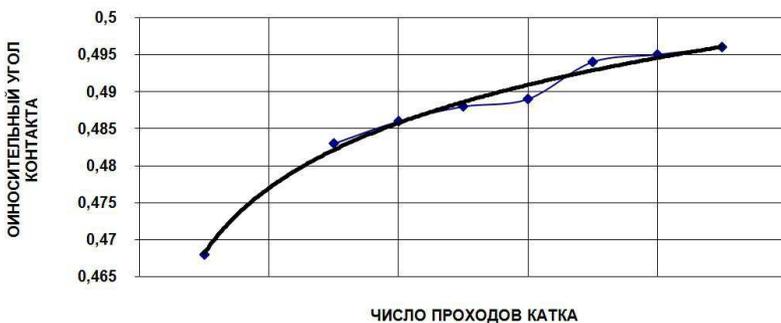


Рис. 1.9. Зависимость относительного угла контакта вальца от числа проходов катка

В зависимости от числа проходов катка величина относительного угла контакта вальца с уплотняемым материалом определяется по формуле

$$\alpha / \beta = 0,0126 \ln N + 0,47, \quad (1.10)$$

где \ln – основание натурального логарифма; N – число проходов катка. Коэффициент корреляции равен 0,98.

Исследованиями установлено, что величина α / β находится в пределах от 0,2 до 0,5 и зависит от деформативной способности материала, линейного давления и радиуса вальца, а также толщины укладываемого слоя.

2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА КАЧЕСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРИ ИХ УКЛАДКЕ И УПЛОТНЕНИИ В ДОРОЖНОЕ ПОКРЫТИЕ

2.1. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕХНОЛОГИЮ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Анализ применяемых технологий устройства дорожных покрытий нежесткого типа показал, что в зависимости от условий производства работ и свойств применяемого материала применяются разные технологические схемы укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей. Строительство асфальтобетонных покрытий зависит от разных факторов, каждый из которых влияет на выбор технологических режимов механизированного звена машин.

Обеспечение требуемых качеств покрытия возможно при соответствии параметров применяемых машин свойствам асфальтобетонных смесей, соблюдения температурных режимов при укладке и уплотнении смесей и обеспечения заданного числа проходов катков по одному следу при соответствующих скоростных режимах укатки.

Основным фактором, оказывающим влияние на качество строительства покрытия из горячих асфальтобетонных смесей, является температура. Температура горячей асфальтобетонной смеси влияет на достижение характеристик асфальтобетона на всем этапе строительства покрытий, начиная от процесса укладки до окончания уплотнения покрытия.

Установлено, что достигаемая плотность асфальтобетона при уплотнении, независимо от типа смеси, зависит от температуры начала уплотнения. Температура начала уплотнения смеси влияет также на другие показатели качества уплотнения (коэффициент уплотнения, плотность, водонепроницаемость).

В качестве примера на рис. 2.1 представлена зависимость коэффициента уплотнения асфальтобетона от температуры начала уплотнения горячей смеси при использовании разных методов уплотнения (катками статического и вибрационного действия) [28]. Из представленных данных видно, что достигаемый коэффициент уплотнения асфальтобетона зависит от температуры начала уплотнения горячей смеси, независимо от применяемого метода. В то же время конечный результат уплотнения зависит от применяемого метода. При динамическом режиме уплотнения максимальная величина коэффициента

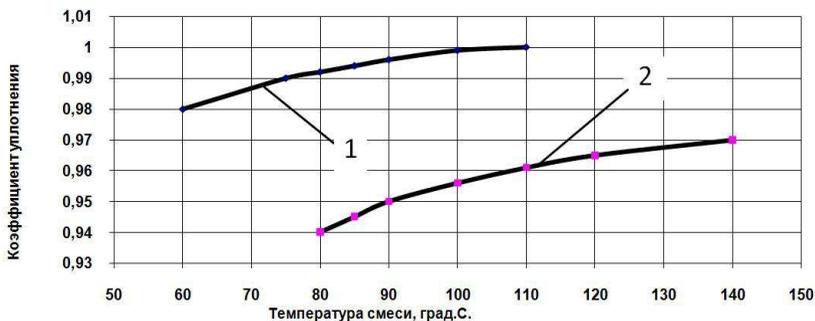
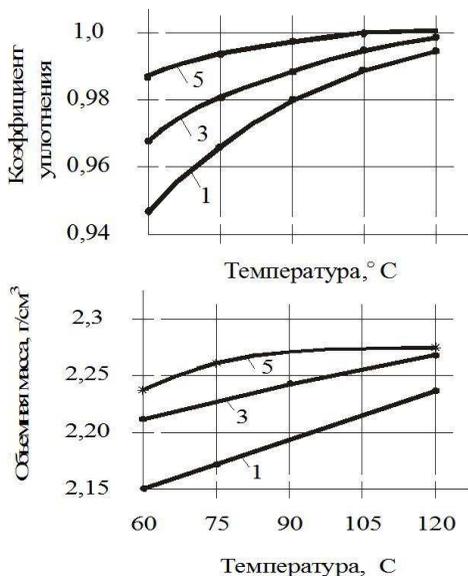


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента уплотнения от температуры начала уплотнения асфальтобетонной смеси при одинаковой массе катков:
 1 – вибрационный каток; 2 – каток статического действия

уплотнения достигается при более низких температурах смеси начала уплотнения, что подтверждается результатами исследований других авторов [5, 16]. Следует заметить, что температура смеси начала уплотнения влияет не только на достигаемую плотность асфальтобетона, но и на его прочность [34].

Влияние температуры на качество уплотнения асфальтобетонных смесей при уплотнении вибрационными катками исследовалось М. П. Зубановым [16]. На основании проведенных лабораторных исследований установлено, что наиболее высокие показатели уплотнения при действии динамической нагрузки, при одинаковом составе смеси, достигаются при температуре начала уплотнения 80...90 °С. Определяющим параметром катка, влияющим на достижение максимальной плотности асфальтобетона, является статическое давление под рабочим органом машины. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что вибрационные катки способны уплотнять асфальтобетонные смеси при более низких температурах.

С целью уточнения влияния температуры смеси на процесс уплотнения вибрационными катками С. А. Варгановым проведены исследования в производственных условиях, в результате которых установлена связь между качеством уплотнения и температурой смеси [5]. Результаты представлены на рис. 2.2. Из представленных результатов видно, что вибрационные катки позволяют получить коэффициент уплотнения 0,98...0,99 при температуре смесей 60 °С, что практически невозможно достичь катками статического действия. Такой эффект объясняют тем, что под действием циклической нагрузки происходит миграция битума внутри слоя покрытия, что и позволяет получить низкое водонасыщение и более высокую плотность асфальтобетонной смеси.



**Рис. 2.2. Зависимость качества уплотнения песчаной асфальтобетонной смеси (коэффициента уплотнения и объемной массы) от температуры смеси начала уплотнения:
1, 3, 5 – проходы катка**

Исследованиями установлено, что эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей зависит от относительной вынуждающей силы катка (отношение нагрузки от вальца катка к величине вынуждающей силы). Максимальная эффективность воздействия вибрационного вальца на материал достигается при относительной вынуждающей силе равной шести [5]. Однако при такой величине относительной вынуждающей силы валец катка взаимодействует с поверхностью уплотняемого материала в ударном режиме, что способствует развитию контактных напряжений, превышающих предел прочности уплотняемого материала. Статистический анализ параметров вибрационных катков показал, что величина относительной вынуждающей силы самоходных вибрационных катков для строительства дорожных одежд находится в пределах 1,8...2,5. Причем с повышением массы катка величина относительной вынуждающей силы снижается [16]. Такие катки могут работать как в статическом режиме, так и в динамическом.

Следовательно, вибрационные катки обладают большими техническими возможностями уплотнять асфальтобетонные смеси при более низких температурах, чем другие типы катков. Наибольшая эффектив-

ность применения вибрационных катков достигается при уплотнении смесей с большим содержанием щебня [28, 34].

При устройстве дорожных покрытий, в некоторых случаях, горячие асфальтобетонные смеси уплотняют при пониженных температурах смеси тяжелыми катками, достигая при этом сравнительно высокий коэффициент уплотнения асфальтобетона (0,995...0,0996). Однако это приводит к низкому качеству строительства покрытия. Результаты испытания образцов на сжатие при температуре 50 °С (R50) показали, что прочность образцов зависит от температуры смеси начала уплотнения. Наиболее существенное снижение прочности образцов наблюдается для смесей типа А и составляет 31,1%, для смесей типа Б снижение прочности составляет 17,3% [34].

Установлено, что предел прочности асфальтобетонной смеси и ее деформативная способность при одном и том же составе смеси зависит от температуры [16, 28]. Изменение температуры смеси от 150 до 50 °С приводит к увеличению предела прочности в 2,0 – 2,5 раза, а деформативная способность материала увеличивается в 4 раза [15].

Следовательно, максимальный эффект уплотнения достигается при высокой температуре асфальтобетонной смеси, когда битум и, соответственно, смесь, имеют наименьшую вязкость.

Согласно нормативным документам [40, 48] температура смеси при отгрузке потребителю и температура смеси при доставке к месту производства работ зависит от типа смеси и при начале уплотнения должна быть не менее 120 °С. Установлено, что температура смеси при укладке и начало уплотнения зависит также от марки применяемого битума [46, 48].

Доказано, что выбор звена уплотняющих машин зависит не только от свойств применяемой горячей смеси, но и от технической характеристики применяемого асфальтоукладчика и режимов укладки смеси [28, 29, 32]. При укладке смеси в полосу покрытия асфальтоукладчиком происходит не только распределение горячей смеси по ширине полосы покрытия, но и предварительное уплотнение укладываемой смеси. С этой целью в конструкции современных асфальтоукладчиков имеется не трамбуемый брус, а вибрационная выглаживающая плита, что позволяет повысить коэффициент предварительного уплотнения асфальтобетонной смеси. При укладке горячей смеси с малыми скоростями и высоким содержании щебня, при работающих трамбуемом брусом и вибрационной плите, коэффициент уплотнения может достигать величины порядка 0,98...1,0 [32], что позволяет уплотнять асфальтобетонную смесь рабочими органами асфальтоукладчиков. Данное обстоятельство позволило бы отказаться от применения дорожных катков или свести их работу к минимуму.

Анализ параметров машин для укладки асфальтобетонных смесей показал, что за последние годы в конструкцию машин внесены существенные изменения:

- внедрены системы автоматического регулирования толщины укладываемого слоя смеси и поперечного уклона покрытия;
- использование устройств для изменения ширины полосы укладки позволяет повысить эффективность их применения;
- применение вибрационной выглаживающей плиты, а также использование двойного трамбующего бруса обеспечивает получение коэффициента предварительного уплотнения смеси асфальтоукладчиком порядка 0,92...0,96, что позволяет уменьшить количество уплотняющих машин при строительстве покрытий. Результаты исследований по данному вопросу и практика строительства показали, что в зависимости от скорости перемещения асфальтоукладчика при укладке горячей смеси они не всегда обеспечивают высокие коэффициенты уплотнения, что требует в дальнейшем применения звена уплотняющих машин [14, 32].

Следовательно, потенциальные возможности повышения уплотняющей способности асфальтоукладчиков в настоящий момент времени не настолько велики, чтобы было возможно отказаться от уплотняющих машин.

Процесс уплотнения асфальтобетонной смеси при высоких температурах характеризуется малыми прочностными характеристиками смеси и для уплотнения требуются незначительные нагрузки напряжения на контакте рабочего органа машины с материалом, что возможно только при использовании сверхлегких катков.

Процесс охлаждения горячей смеси после ее распределения на основание покрытия характеризуется интенсивным охлаждением горячей смеси. Время, в течение которого смесь имеет высокую температуру после укладки, незначительно и составляет около 5...10% от продолжительности работ по уплотнению слоя в заданном температурном интервале. Ввиду непродолжительности их использования при уплотнении горячих асфальтобетонных смесей выпуск таких катков считается нецелесообразным. По мере понижения температуры смеси вязкость битума увеличивается, образовавшиеся прочные связи между частицами материала усиливаются, что приводит к повышению предела прочности смеси и для обеспечения эффективности уплотнения необходимо увеличивать прикладываемую нагрузку. Поэтому технологическими схемами уплотнения дорожных одежд предусматривается применение нескольких катков с разными характеристиками.

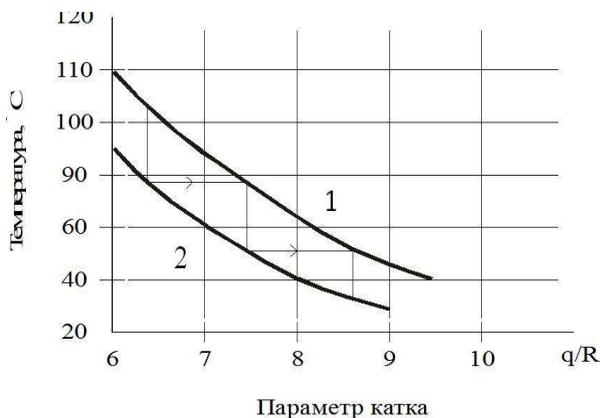


Рис. 2.3. Зависимость температуры начала (1) и конца (2) укатки горячих асфальтобетонных смесей от их параметров:
 q – линейное давление, кН/м; R – радиус вальца катка, м

Эффективность применения машин при уплотнении покрытий из горячих асфальтобетонных смесей зависит от прочностных характеристик смеси и силовых параметров катков. Учитывая, что предел прочности горячей асфальтобетонной смеси зависит температуры, предложена зависимость выбора параметров катков от температуры уплотняемой смеси, которая представлена на рис. 2.3 [38].

Укатка смесей при температурах, расположенных выше кривой 1, приводит к значительным неровностям на поверхности, которые не исчезают при дальнейшей работе тяжелых катков. Продолжение укатки после достижения температуры ниже кривой 2 эффекта не дает и может привести к появлению поверхностных трещин.

Вопрос влияния температуры на качество строительства покрытия из горячих асфальтобетонных смесей с использованием разных марок битумов исследовался Н. В. Горельшевым [11] табл. 2.1.

Из представленных данных видно, что понижение температуры начала уплотнения смеси приводит к уменьшению плотности асфальтобетона независимо от марки битума. В зависимости от вязкости битума температура начала уплотнения смеси влияет на получаемую плотность покрытия. Чем больше вязкость битума, тем значительнее влияние температуры начала уплотнения смеси. Установлено также, что максимальная плотность асфальтобетонных смесей может быть достигнута в определенных температурных интервалах, зависящих от марки битума. Увеличение температуры смеси выше определенной максимальной величины не дает положительного эффекта, так как

2.1. Влияние температуры смеси на качество уплотнения

Марка битума	Температура смеси, °С	Средняя плотность, г/см ³	Стандартная плотность, г/см ³	Коэффициент уплотнения	Водонасыщение, %	Предел прочности R_{50} , МПа
БНД 60/90	100	2,30	2,34	0,983	1,3	1,3
	60	2,27	2,31	0,983	1,5	
	40	2,17	2,27	0,956	3,4	
БНД 130/200	100	2,30	2,33	0,987	2,9	1,2
	60	2,29	2,31	0,991	3,3	
	40	2,25	2,30	0,978	3,9	
БНД 200/300	100	2,28	2,32	0,983	1,8	0,8
	60	2,29	2,32	0,987	1,8	
	40	2,24	2,31	0,970	2,9	

происходит снижение получаемой плотности. Это связано с разрушением структуры битума. При высокой температуре частицы смеси сжимаются под нагрузкой и вытесняют битум из зон контакта. Однако при снятии нагрузки пленка вяжущего, за счет расклинивающего давления, восстанавливает начальную толщину, уменьшая тем самым получаемую плотность смеси. Чем меньше вязкость битума, тем быстрее протекает этот процесс. С понижением температуры смеси увеличивается вязкость битума, что приводит к увеличению сопротивления при сжатию частиц материала и ухудшению уплотняемости смеси.

Экспериментальными исследованиями установлено, что эффективность уплотнения асфальтобетонной смеси зависит от применяемой марки битума, влияющей на вязкостные свойства горячей смеси. Наиболее эффективно уплотнение горячей смеси происходит в диапазоне вязкостей битумов от 10 до 25 Па·с, что позволяет определить температурные границы эффективного уплотнения смесей с разными марками битумов [11].

Продолжительность выполнения работ по строительству покрытий из горячих асфальтобетонных смесей определяется темпом охлаждения смеси, который зависит от состава, производственных и технологических факторов.

Установлено, что охлаждение горячей асфальтобетонной смеси в слое дорожного покрытия, независимо от ее состава и условий производства работ, подчиняется экспоненциальному закону [13], согласно которому

$$\ln(t_{\text{вых}} - t_{\text{в}}) / (t_{\text{р}} - t_{\text{в}}) = m\tau, \quad (2.1)$$

где τ – время, ч; $t_{\text{вых}}$ – температура смеси в начальный момент времени, °С; $t_{\text{р}}$ – температура в расчетный момент времени, °С; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; \ln – основание натурального логарифма; m – скорость охлаждения, которая определяется по формуле

$$m = 2\alpha / \gamma ch, \text{ 1/ч}, \quad (2.2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи смеси, Вт/м·град; c – теплоемкость смеси, Дж/кг·град; γ – объемная масса смеси, кг/м³; h – толщина слоя смеси, м.

Предложенная зависимость описывает характер охлаждения поверхности слоя смеси, однако при температуре окружающего воздуха свыше 20 °С данная зависимость дает расхождения с экспериментальными результатами измерения температуры слоя. Такое расхождение между расчетными значениями поверхности слоя и экспериментальными данными можно объяснить тем, что данная зависимость не учитывает влияния нагрева основания при высоких температурах воздуха, которая влияет на характер остывания смеси.

Для достижения требуемых характеристик асфальтобетона в процессе уплотнения необходимо обеспечить заданное количество проходов катка по одному следу, с учетом скоростных режимов, за время нахождения смеси в температурном интервале с учетом марки битума. Следовательно, для обоснования технологических режимов работы катков эти зависимости имеют практическое приложение.

Строительство покрытий из горячих асфальтобетонных смесей ведется комплектом машин, обеспечивающих непрерывность технологического процесса на заключительном этапе строительства дороги. Обязательным условием обеспечения непрерывности строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей является соблюдение равных по длине захваток по укладке и уплотнению катком определенного типа. Для выполнения этого условия необходимо знать время работы асфальтоукладчика и катков разного типа, так как от этого зависят их технологические режимы при заданной длине полосы укладки. Продолжительность строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей и продолжительность уплотнения в зависимости от температуры окружающего воздуха при разной толщине уплотняемых слоев представлена в работе [14, 29]. Численные значения продолжительности строительства покрытий представлены в табл. 2.2.

2.2. Влияние температуры воздуха и толщины укладываемого слоя на процесс остывания смеси

Толщина слоя асфальтобетона, см	Максимальное время укладки и уплотнения при скорости ветра не более 3...4 м/с и температуре воздуха °С, мин					
	0...2	4...5	8...10	13...15	18...20	23...25
3...4	13...15	16...18	19...21	22...24	25...27	30...32
5...6	18...22	24...27	28...30	32...35	37...40	42...45
8...10	43...46	52...58	63...68	71...77	80...90	95...110

Представленные в табл. 2.2 значения продолжительности строительства получены при фиксированных значениях температуры воздуха, скорости ветра и толщине слоя укладки смеси при температуре окончания уплотнения смеси 55...70 °С. Практика строительства дорожных покрытий нежесткого типа показала, что продолжительность работ зависит от типа смеси и марки битума, температуры основания, температуры окончания уплотнения других факторов, которые являются переменными величинами и могут колебаться в определенных пределах. Поэтому для организации производства работ по укладке и уплотнению горячих смесей в дорожное покрытие необходимо получить аналитическую зависимость, позволяющую конкретизировать продолжительность процессов с учетом влияния разных факторов. Таким образом, для повышения эффективности строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей необходимо решить следующие вопросы:

- уточнить влияние климатических, конструктивных, технологических факторов и свойств смесей на допустимую продолжительность работ по строительству дорожных покрытий;
- получить зависимости по определению допустимого времени выполнения процессов укладки и уплотнения дорожных покрытий с учетом влияния разных факторов;
- разработать рекомендации по составлению технологических схем строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей.

2.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Ежегодное увеличение транспортных средств в стране приводит к повышению интенсивности движения и способствует снижению пропускной способности дороги. Повышение интенсивности движения с ростом грузоподъемности транспортных средств влияет на конструкцию дорожной одежды и повышают требования к транспортно-эксплуатационному состоянию автомобильных дорог, что характеризуется деформационно-прочностными свойствами материала.

Обеспечение прочности и долговечности автомобильных дорог зависит в значительной степени от состояния покрытия, которое должно иметь необходимые деформационно-прочностные свойства для восприятия нагрузок от транспорта и перераспределять их на нижележащие слои дорожной одежды. Процесс уплотнения является завершающей стадией строительства дорожного покрытия, в результате которого происходит активное структурообразование асфальтобетона, от эффективности которого зависят его эксплуатационные свойства. Недоуплотненные покрытия в процессе эксплуатации продолжают уплотняться за счет действия нагрузки от движущегося транспорта. Однако ввиду недостаточного обеспечения прочности асфальтобетона в процессе строительства такие покрытия подвержены смещению частиц материала в слое покрытия при движении транспортных средств, что способствует образованию волн и наплывов на поверхности покрытия. В то же время увеличение числа проходов катков в процессе уплотнения покрытий может привести к процессу разуплотнения. Поэтому выбор правильной технологии уплотнения асфальтобетонных смесей дает возможность регулировать процесс формирования макроструктуры дорожного покрытия.

Обеспечение требуемого качества уплотнения дорожного покрытия возможно при соблюдении определенного соотношения между развивающимися контактными напряжениями под рабочим органом катка и прочностными характеристиками уплотняемого материала, которые имеют вид [38]:

$$\sigma_k = (0,9 - 1,0)[\sigma], \quad (2.3)$$

где σ_k – контактные напряжения под вальцом катка, МПа; $[\sigma]$ – предел прочности уплотняемого материала, МПа.

Если предел прочности материала выше или равен величине контактных напряжений под вальцом катка, то необратимая деформация

материала происходит за счет сближения частиц между собой, что приводит к снижению пористости уплотняемого материала и повышению его плотности. При малых значениях контактных напряжений по отношению к пределу прочности материала невозможно получить требуемую плотность материала даже при большом числе проходов машины по поверхности слоя покрытия.

В случае, если величина контактных напряжений превышает предел прочности материала, то происходит перемещение частиц материала относительно друг друга без изменения объема и в результате наблюдается течение материала из-под рабочего органа машины. Такая деформация приводит к неравномерности уплотнения материала и получению неровной поверхности, а также к образованию микро- и макротрещин, что приводит к снижению качества уплотнения дорожных покрытий.

Следовательно, качественное уплотнение дорожных покрытий обеспечивается при условии соответствия силовых параметров уплотняющих машин деформативным и прочностным показателям уплотняемого материала, которые меняются по мере уплотнения смеси в покрытии и зависят от температуры. Зависимости предела прочности уплотняемой смеси от ее температуры представлены на рис. 2.4 [34].

Из представленных результатов видно, что в интервале температур от 150 до 80 °С зависимость предела прочности от температуры смеси носит линейный характер и с понижением температуры ниже 80 °С характер зависимости меняется на нелинейный. С увеличением содержания щебня в асфальтобетонной смеси предел прочности повышается в среднем на начальном этапе уплотнения на 17% и в конце уплотнения на 14%.

В процессе укатки покрытия, одновременно с изменением температуры смеси, меняется и прочность материала. На рисунке 2.5 представлена зависимость предела прочности асфальтобетонной смеси от температуры в процессе уплотнения, полученная на основании данных рис. 2.4.

Из представленных данных видно, что предел прочности асфальтобетонной смеси зависит от типа смеси и ее температуры на протяжении всего процесса уплотнения. Независимо от типа смеси зависимость между пределом прочности и температурой носит нелинейный характер. Если на начальной стадии укатки численные значения пределов прочности независимо от типа смеси отличаются незначительно, то в конце уплотнения различия в значениях уже существенно. Установлено, что предел прочности смеси зависит не только от процентного содержания битума и щебня, но и марки битума.

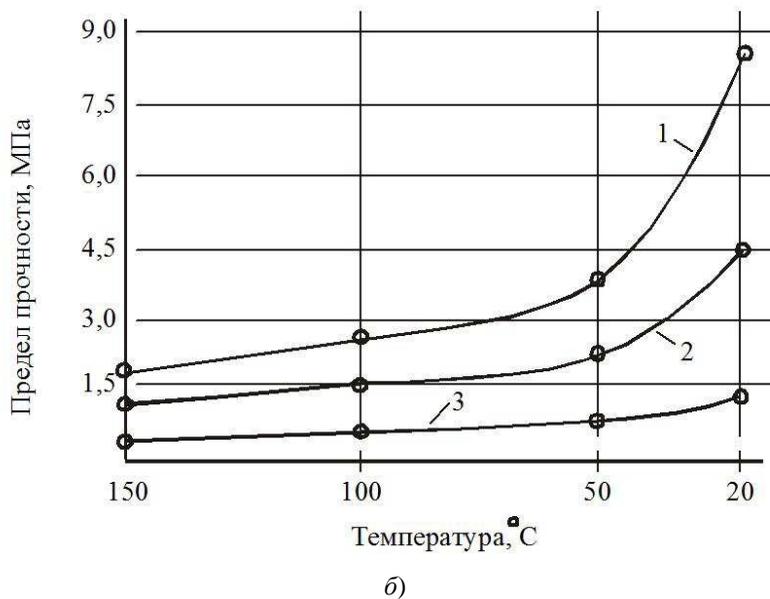
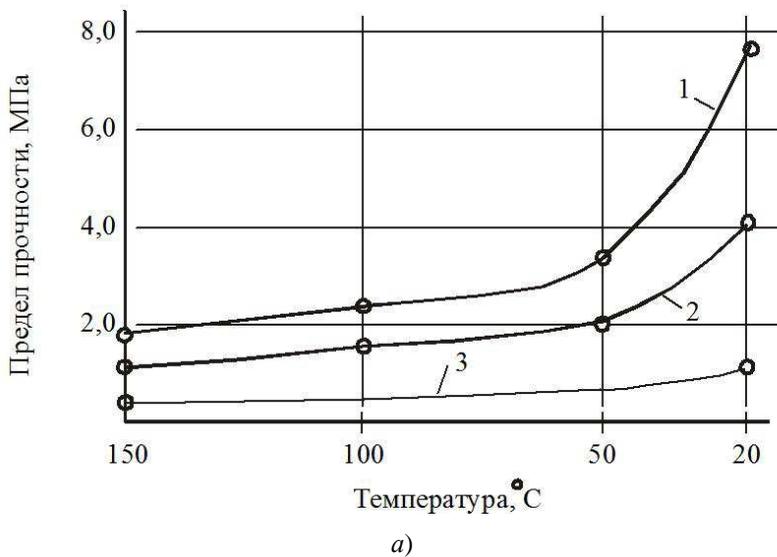


Рис. 2.4. Зависимость предела прочности образцов от температуры смеси при различных коэффициентах уплотнения:

а – смеси типа А – 56% щебня; б – смеси типа В – 25% щебня
 (1 – $K_y = 0,85$; 2 – $K_y = 0,9$; 3 – $K_y = 1$)



Рис. 2.5. Влияние температуры смеси на предел прочности при сжатии:
 1 – смеси типа А – 56% щебня; 2 – смеси типа В – 25% щебня;
 3 – по данным [28]

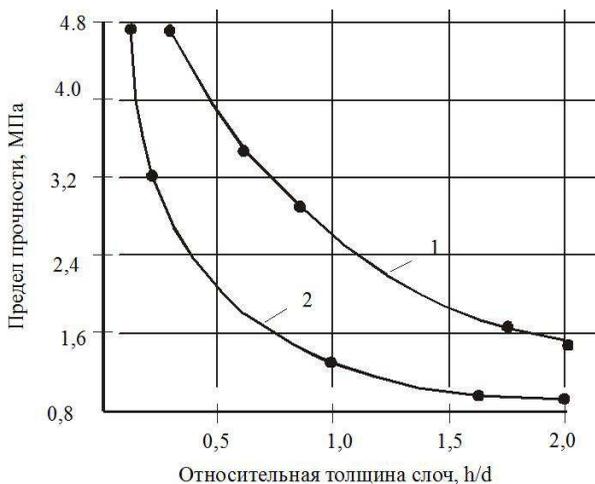


Рис. 2.6. Влияние толщины асфальтобетонного слоя при температуре 100 °C на предел прочности смеси:
 1 – коэффициент уплотнения 0,99; 2 – коэффициент уплотнения 0,95;
 h – толщина слоя, м; d – диаметр штампа, м

В зависимости от конструкции покрытия укладка и уплотнение асфальтобетонных смесей осуществляется слоями разной толщины, что влияет на предел прочности материала. Установлено, что предел прочности асфальтобетонной смеси увеличивается с уменьшением толщины слоя (рис. 2.6). Максимальная толщина слоя, при которой основание оказывает влияние на прочностные характеристики слоя

смеси, равно двум диаметрам штампа. С увеличением плотности материала наблюдается рост его предела прочности [15].

Характеристикой, влияющей на процесс уплотнения покрытий, является его деформативная способность, под которой понимается способность материала сопротивляться внешней нагрузке, величина которой оценивается модулем деформации. Модуль деформации смеси зависит от плотности, температуры, толщины слоя и состава смеси. Установлено, что модуль деформации значительно зависит от температуры и в интервале температур от 140 до 80...85 °С зависимость носит линейный характер. С понижением температуры смеси в пределах 80...40 °С зависимость приобретает нелинейный характер. Экспериментально доказано, что между температурой и модулем деформации смеси в интервале температуры 85...120 °С имеется линейная зависимость. Для смесей типов В и Г, из-за малой деформативной способности смеси, требуется применение легких катков.

В процессе уплотнения изменение деформативной способности смеси происходит под действием рабочего органа катка и температуры смеси. При укатке асфальтобетонной смеси модуль деформации зависит от действия обоих факторов. На рисунке 2.7 представлены данные по изменению модуля деформации смеси при укладке и уплотнении верхнего слоя покрытия, полученные в производственных условиях. Толщина слоя 0,06 м, смесь типа Г. Уплотнение производилось катком ДУ 10А [16]. Из представленных данных видно, что после укладки смеси с понижением температуры смеси увеличивается модуль деформации, что объясняется повышением вязкости битума. С началом процесса уплотнения, за счет силового воздействия вальца катка, происходит интенсивное приращение модуля деформации. При последующих проходах интенсивность приращения модуля деформации снижается и при достижении определенного количества проходов рост модуля деформации замедляется. Для получения более высокого модуля деформации смеси необходимо применение других типов катков.

Ранее отмечалось, что качество покрытий зависит от температуры начала уплотнения смеси. Температура начала уплотнения зависит не только от типа смеси и марки битума, но конструкции асфальтоукладчика. Известно, что укладка смеси асфальтоукладчиком при неработающем трамбуемом брусом или с помощью автогрейдера обеспечивает коэффициент уплотнения 0,75...0,80. Асфальтоукладчики с малоэффективным трамбуемым брусом и статической выглаживающей плитой обеспечивают коэффициент уплотнения 0,84...0,87. При таких коэффициентах уплотнения деформативная способность смеси незначительная и требуется укатка легкими катками или необходимо понижать температуру начала уплотнения, что снижает качество уплотнения. Применение асфальтоукладчиков с трамбуемыми брусками и вибраци-

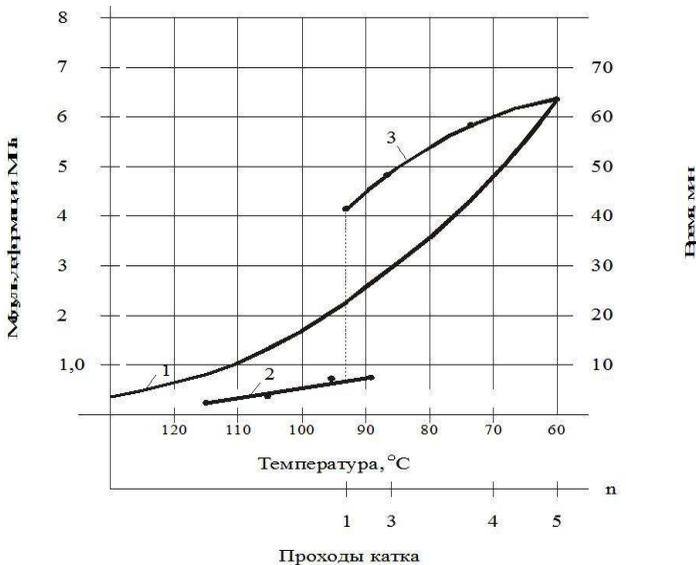


Рис. 2.7. Изменение модуля деформации в процессе укладки и уплотнения песчаной асфальтобетонной смеси (толщина слоя 0,05 м; температура воздуха 26 °С):

- 1 – изменение температуры поверхности слоя во времени;
 2 – зависимость модуля деформации от температуры при свободном охлаждении слоя смеси; 3 – изменение модуля деформации слоя в процессе уплотнения

онными выглаживающими плитами обеспечивают коэффициент уплотнения 0,9...0,96. Результаты замеров деформативной способности смеси после укладки асфальтоукладчиками с пассивными и активными рабочими уплотняющими органами показали, что разница в численных значениях модулей деформации смеси составляет 2 – 3 раза.

Анализ зависимостей предела прочности и модуля деформации асфальтобетонных смесей от температуры показывает, что модуль деформации возрастает более интенсивно со снижением температуры, чем предел прочности смеси. Это обстоятельство говорит о том, что при уплотнении асфальтобетонных покрытий попытки увеличения плотности смеси за счет повышения давления на контакте рабочего органа катка приведут к появлению пластических деформаций и, следовательно, к снижению качества покрытия. Поэтому для обеспечения требуемых показателей при строительстве покрытий необходим контроль за соответствием деформационно-прочностных характеристик смеси и параметрами машин в процессе укладки и уплотнения.

3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

3.1. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Для обеспечения требуемого качества покрытия из горячих асфальтобетонных смесей в процессе строительства требуется время, в течение которого уплотняющие машины обеспечивают получение заданных качеств укладываемого материала. Температура смеси при отгрузке потребителю, в зависимости от марки битума, находится в пределах 160...110 °С.

Продолжительность устройства асфальтобетонных покрытий зависит от теплофизических свойств смеси, влияния погодных условий строительства, конструктивных параметров покрытия и применяемого оборудования. Установлено, что требуемые показатели качества уплотнения (плотность, водонепроницаемость, коэффициент уплотнения) могут быть получены при температурах смеси, зависящих от марки вяжущего материала, когда битум имеет наименьшую вязкость. Однако начинать укатку при высокой температуре смеси катками с существующими параметрами практически невозможно из-за низкой деформативной способности слоя. Применение катков с малыми линейными давлениями является нерациональным ввиду незначительного времени их использования. Существующие конструкции асфальтоукладчиков позволяют распределять асфальтобетонные смеси при высоких температурах с предварительным уплотнением в процессе укладки, что позволяет повысить деформативную способность слоя смеси и влиять на выбор силовых параметров катков. Нормативным документом регламентирована температура смеси на месте укладки в зависимости от марки битума и должна иметь значения, приведенные в табл. 3.1 [40].

Начало укатки покрытия при температурах смеси выше указанных приводит к снижению плотности уплотняемой смеси. Это связано с тем, что при высоких температурах битум обладает свойствами жидкости и имеет малую клеящую способность. Под действием нагрузки от рабочего органа машины частицы смеси сжимаются и вытесняют битум в зонах контакта. Однако при снятии нагрузки пленки вяжущего восстанавливают первоначальную толщину, что приводит к уменьшению получаемой плотности смеси.

3.1. Температура укладки смеси с учетом марки битума

Смеси	Температура смеси на месте укладки, °С, на битумах марок					
	БНД, БН					СГ, МГ, МГО
	200/300	130/200	90/130	60/90	40/60	130/200
Горячая	120...130	130...140	140...150	145...155	150...160	110...120
Горячая с ПАВ и активированная минеральными порошками	100...110	110...120	120...130	125...135	130...140	90...100
Горячая на ПБВ	140...150	150...160	160...170	165...175	170...180	130...140

Возможная продолжительность строительства будет определяться температурами укладки и окончания уплотнения смеси, ниже которой достичь требуемых показателей уплотнения практически невозможно.

Нормативными документами температура окончания уплотнения не регламентирована. Существующие рекомендации по температуре окончания уплотнения покрытия ориентированы на тип смеси без учета марки вяжущего [40, 46, 48]. Согласно [48] классификация смесей по типам предусматривает применение разных марок битума. Поэтому температура окончания уплотнения, как и при укладке, должна определяться не только типом смеси, но и маркой битума. Отмечалось, что асфальтобетонные смеси, в зависимости от марки битума, имеют температурные границы эффективного уплотнения и понижение температуры уплотнения за пределы этих границ снижают эффективность процесса уплотнения. Поэтому при определении возможной продолжительности строительства необходимо учитывать не только температуру укладки и окончания уплотнения с учетом типа смеси, но и марки битума. Возможная продолжительность строительства покрытия определяется темпом охлаждения смеси и зависит от ряда факторов, к которым можно отнести толщину слоя, температуру смеси при укладке и погоднo-климатические условия, теплофизические свойства и применяемое оборудование [15].

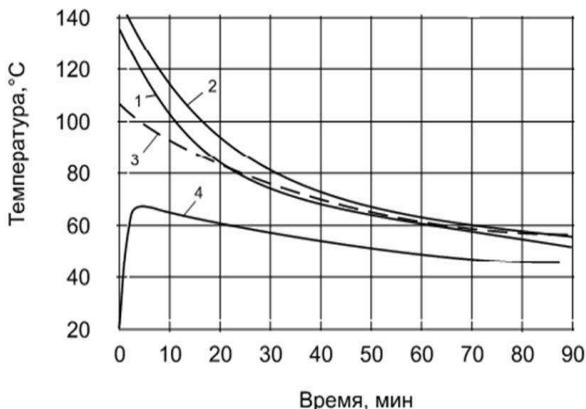


Рис. 3.1. Зависимость остывания асфальтобетонного покрытия во времени на глубине:

1 – 0,015 м; 2 – 0,055 м; 3– 0,065 м; 4 – 0,10 м (основание)

На рисунке 3.1 представлены экспериментальные зависимости процесса охлаждения смеси во времени при различной толщине покрытия.

Из рисунка видно, что температура смеси по толщине укладываемого слоя распределяется неравномерно и в процессе охлаждения слоя происходит перераспределение тепла из средней части к поверхности и основанию. После укладки смеси на полотно дороги происходит интенсивная передача тепла от уложенного слоя основанию, что способствует повышению его температуры. Анализ распределения температуры покрытия во времени и по толщине слоя показал, что процессы охлаждения смеси в дорожных покрытиях относятся к нестационарным тепловым процессам [20].

3.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

В зависимости от конструктивных параметров дороги дорожное покрытие устраивается в один или два слоя, что влияет на возможную продолжительность работы по их устройству. Минимальная толщина дорожной одежды из горячих асфальтобетонных смесей регламентирована нормативным документом [45].

С целью исследования влияния разных факторов (конструктивных, климатических технологических и свойств материалов) на продолжительность устройства дорожных покрытий с применением горя-

чих асфальтобетонных смесей рассмотрены расчетные модели конструкций дорог, которые представлены на рис. 3.2.

Расчетные модели приняты с учетом следующих предпосылок:

- процесс строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей ограничен во времени температурным интервалом 160...500 °С;
- в начальный момент времени укладки смеси в покрытия дороги температура по толщине слоя имеет одинаковую величину;
- материал в укладываемом слое однородный;
- потери тепла через боковые грани слоя незначительны и ими можно пренебречь;
- потери тепла происходят через верхнюю поверхность слоя за счет теплового излучения и конвективного обмена в атмосферу;
- дополнительная тепловая энергия сообщается через верхнюю поверхность слоя путем поглощения энергии солнечного излучения;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярным к поверхности слоя;
- потери тепла в нижележащие слои происходят через нижнюю поверхность слоя за счет теплопроводности материала;
- сцепление слоев обеспечивает достаточный термодостаток;
- процесс уплотнения осуществляется самоходными катками с жесткими металлическими вальцами с обеспечением контроля за расходом жидкости для смачивания поверхности вальца;
- температура окружающей среды и скорости воздушных масс с момента укладки слоя смеси и до окончания процесса уплотнения остаются постоянными.

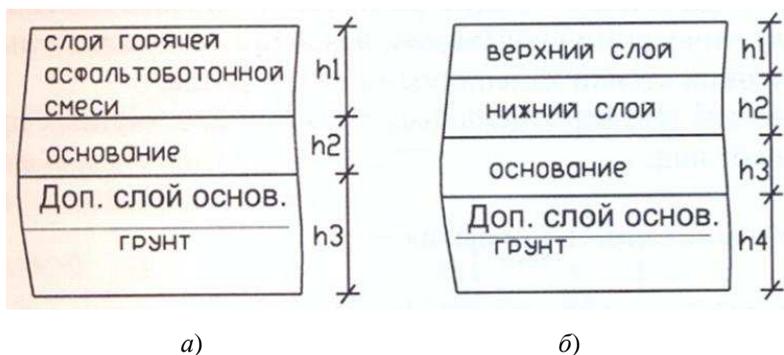


Рис. 3.2. Расчетные схемы дороги «покрытие – основание»:

a – однослойное покрытие; *б* – двухслойное покрытие; *h* – толщина слоя, м

Данные расчетные модели можно описать системой дифференциальных уравнений, отражающих процесс нестационарной теплопроводимости в слоях с различными физико-механическими и теплофизическими свойствами, лежащими на бесконечной полугораниченной стенке из однородного материала.

Системы дифференциальных уравнений в частных производных имеют следующий вид:

– для однослойного покрытия:

$$\begin{aligned} \partial t_1 / \partial \tau &= (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) \cdot (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2) - \text{верхний слой;} \\ \partial t_2 / \partial \tau &= (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) \cdot (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2) - \text{основание;} \\ \partial t_3 / \partial \tau &= (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) \cdot (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2) - \text{дополнительный слой} \\ &\text{основания;} \\ \partial t_4 / \partial \tau &= (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) \cdot (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2) - \text{грунт;} \end{aligned} \quad (3.1)$$

– для двухслойного покрытия:

$$\begin{aligned} \partial t_1 / \partial \tau &= (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) \cdot (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2) - \text{верхний слой;} \\ \partial t_2 / \partial \tau &= (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) \cdot (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2) - \text{нижний слой;} \\ \partial t_3 / \partial \tau &= (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) \cdot (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2) - \text{основание;} \\ \partial t_4 / \partial \tau &= (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) \cdot (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2) - \text{дополнительный слой} \\ &\text{основания;} \\ \partial t_5 / \partial \tau &= (\lambda_5 / c_5 \gamma_5) \cdot (\partial^2 t_5 / \partial x^2 + \partial^2 t_5 / \partial y^2 + \partial^2 t_5 / \partial z^2) - \text{грунт,} \end{aligned} \quad (3.2)$$

где x, y, z – координатные оси; $\lambda_{1...5}$ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/кг·град; $c_{1...5}$ – удельная теплоемкость материала, Дж/кг·град; $\gamma_{1...5}$ – объемная плотность, кг/м³; τ – время, с.

С учетом допущений и экспериментальных данных принято, что температура укладываемого слоя смеси и ее распределение в нижерасположенных слоях имеет одинаковое значение в двух плоскостях (x, z) и меняется во времени в зависимости от различных факторов практически в одной плоскости (y). Поэтому решение данной задачи сводится к определению распределения температуры в одной плоскости, т.е. к решению плоской задачи. С учетом этого выражения (3.1) и (3.2) можно представить в виде:

$$\partial t_i / \partial \tau = (\lambda_i / c_i \gamma_i) \cdot (\partial^2 t_i / \partial y_i^2), \tau > 0, 0 < y_i < h_i, i = 1 \dots 5. \quad (3.3)$$

Начальные условия имеют следующий вид:

– для однослойного покрытия:

$$\begin{aligned}
 t_1|_{\tau=0}^{y=h_1=0} &= t_1; & t_1|_{\tau=0}^{y=h_1} &= t'_1; \\
 t'_1|_{\tau=0}^{y=h_1} &= t_2|_{\tau=0}^{y=h_2=0}; & t'_2|_{\tau=0}^{y=h_2} &= t_2 + \Delta t_2 e^{-\mu_2 y}; \\
 t'_2|_{\tau=0}^{y=h_2} &= t_3|_{\tau=0}^{y=h_3=0}; & t'_3|_{\tau=0}^{y=h_3} &= t_3 + \Delta t_3 e^{-\mu_3 y}; \\
 t'_3|_{\tau=0}^{y=h_3} &= t_4|_{\tau=0}^{y=h_4=0}; & t'_4|_{\tau=0}^{y=h_4} &= t_4 + \Delta t_4 e^{-\mu_4 y};
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

– для двухслойного покрытия:

$$\begin{aligned}
 t_1|_{\tau=0}^{y=h_1=0} &= t_1; & t_1|_{\tau=0}^{y=h_1} &= t'_1; \\
 t'_1|_{\tau=0}^{y=h_1} &= t_2|_{\tau=0}^{y=h_2=0}; & t'_2|_{\tau=0}^{y=h_2} &= t_2 + \Delta t_2 e^{-\mu_2 y}; \\
 t'_2|_{\tau=0}^{y=h_2} &= t_3|_{\tau=0}^{y=h_3=0}; & t'_3|_{\tau=0}^{y=h_3} &= t_3 + \Delta t_3 e^{-\mu_3 y}; \\
 t'_3|_{\tau=0}^{y=h_3} &= t_4|_{\tau=0}^{y=h_4=0}; & t'_4|_{\tau=0}^{y=h_4} &= t_4 + \Delta t_4 e^{-\mu_4 y}; \\
 t'_4|_{\tau=0}^{y=h_4} &= t_5|_{\tau=0}^{y=h_5=0}; & t'_5|_{\tau=0}^{y=h_5} &= t_5 + \Delta t_5 e^{-\mu_5 y};
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

где $t_1, t'_1, t_2, t'_2, t_3, t'_3, t_4, t'_4, t_5, t'_5$ – температуры вначале и на глубине слоя дорожной конструкции, °С; e – основание натурального логарифма; μ_i – коэффициент, характеризующий свойства материала; $\Delta t_i e^{-\mu_i y}$ – перепад температуры между поверхностью слоя и рассматриваемой точкой на глубине y .

Граничные условия приняты на основании следующих допущений:

– соблюдается условие конвективного теплообмена на границе верхнего слоя с окружающей средой:

$$\lambda_1 \partial t / \partial y|_{y=0} = \alpha [t(0, \tau) - t_B]; \tag{3.6}$$

– условие равенства тепловых потоков на границах слоев имеет вид:

$$\lambda_i \partial t_i / \partial y_i|_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \partial t_{i+1} / \partial y_{i+1}|_{y_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \tag{3.7}$$

– условие на бесконечность, ограничивающие температуру в полупространстве имеет вид:

$$t'_i|_{\tau=0}^{y=h_i=\infty} < \infty (t_{\text{осн}}), \tag{3.8}$$

где h_i – толщины слоев дорожной конструкции, м; τ – время, с; t_B – температура воздуха, °С; $t_{\text{осн}}$ – температура грунта на заданной глуби-

не, °С; $t(0, \tau)$ – температура смеси в момент укладки, °С; α – суммарный коэффициент теплоотдачи, величина которого определяется:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{изл}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}, \quad (3.9)$$

где $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи смеси за счет теплового излучения, величина которого зависит от температуры воздуха и смеси, может быть определено по формуле:

$$\alpha_{\text{изл}} = \{ \xi c_0 [(t/100)^4 - (t_{\text{в}}/100)^4] \} / (t - t_{\text{в}}), \quad (3.10)$$

где c_0 – постоянная Стефана-Больцмана ($c_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$, Дж/м²·с·К⁴·°С); ξ – коэффициент эмиссии, принимается равным 0,9.

Численное значение коэффициента теплоотдачи смеси за счет теплового излучения можно принять на основании данных, представленных в работе [2], которые представлены на рис. 3.3.

Из представленного графика видно, что численное значение коэффициента теплоотдачи смеси, за счет теплового излучения, имеет линейную зависимость от температуры смеси.

Влияния разных факторов (плотности материала, температуры основания, толщины слоя, состава смеси) на процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси рассматривалось А. А. Иноземцевым [13]. Суммарный коэффициент теплоотдачи асфальтобетонной смеси практически не зависит от толщины слоя смеси, состава, плотности и температуры воздуха, его численное значение по данным экспериментальных исследований составляет от 15,6 до 20,4 Вт/м²·°С. Также уста-

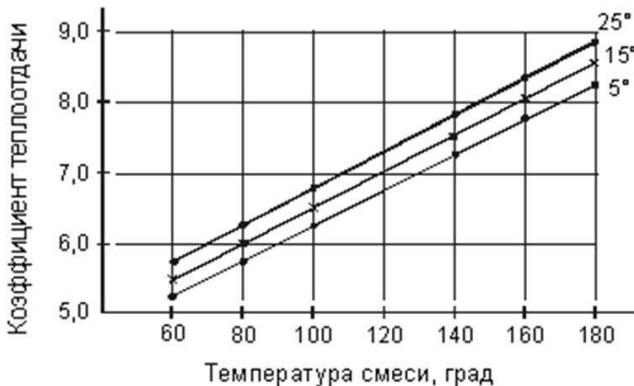


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента теплоотдачи теплового излучения слоя асфальтобетонной смеси от температуры смеси:

1 – температура воздуха +5 °С; 2 – температура воздуха +15 °С;
3 – температура воздуха +25 °С

новлено влияние скорости перемещения воздушных масс на охлаждение слоя смеси, а именно, увеличение скорости ветра на 1 м/с повышает коэффициент теплоотдачи горячей асфальтобетонной смеси на 2,236 Вт/м·°С.

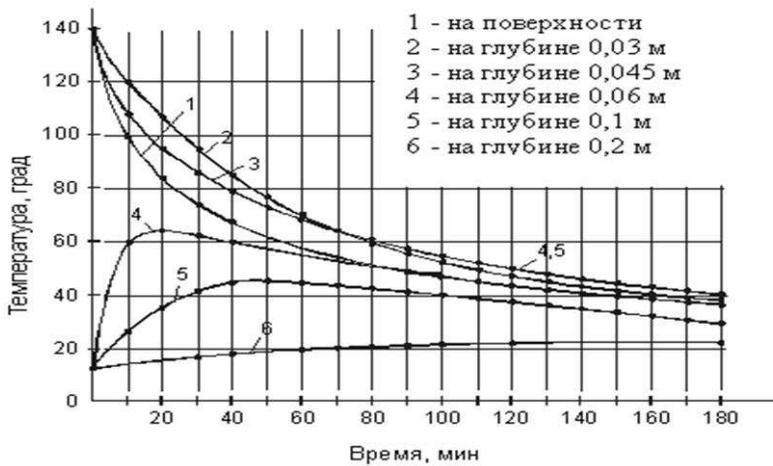
Для определения теплофизических характеристик горячих асфальтобетонных смесей при устройстве покрытий процесс охлаждения моделировался с помощью пакета программ Elcut, разработанных для решения одно и двумерных задач теплопроводности. Используя программы и экспериментальные данные, полученные при строительстве покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, определены теплофизические характеристики, влияющие на процесс охлаждения покрытия (удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоотдачи). Установлено, что суммарный коэффициент теплоотдачи смеси в рассматриваемом температурном интервале, при нулевой скорости ветра, равняется 20,0...20,5 Вт/м·°С [13].

Однако применение данной программы не полностью позволяло решать поставленные задачи по моделированию тепловых процессов в дорожных одеждах с учетом влияния разных факторов. Поэтому была разработана программа для расчета численных значений температуры смеси по толщине слоя с учетом изменения ее во времени [17]. Результаты расчетов распределения температуры во времени при толщине слоя горячей асфальтобетонной смеси 0,05 м и изменение ее во времени представлено на рис. 3.4.

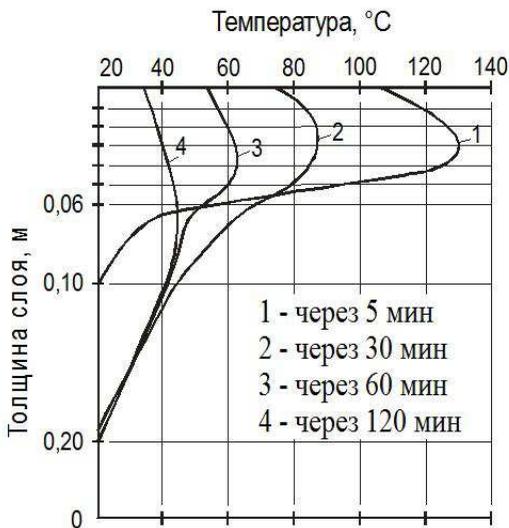
Из представленных результатов видно, что температура асфальтобетонной смеси по толщине слоя полосы покрытия распределяется неравномерно. Максимальный перепад температуры по толщине слоя наблюдается после укладки смеси на нижерасположенный слой дорожной одежды. С течением времени перепад температуры уменьшается и охлаждение по толщине слоя происходит равномерно.

3.3. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ К ПРОЦЕССУ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Известно, что время охлаждения слоя горячей асфальтобетонной смеси после распределения на основание зависит от многих факторов, к которым относятся: толщина слоя, температура смеси при укладке, температура воздуха и основания, теплофизические свойства смесей, теплообмен на поверхности слоя, перенос тепла по толщине слоя.



а)



б)

Рис. 3.4. Распределение температуры в конструктивных слоях дорожной одежды при укладке верхнего слоя из горячей асфальтобетонной смеси:

а – во времени; *б* – по толщине слоя

(толщина слоя – 0,05 м; температура смеси при укладке – 140 °С; температура воздуха – 15 °С, скорость ветра – 0 м/с)

Неравномерность распределения температуры по толщине слоя определяется теми же факторами, что и распределение температуры во времени. Экспериментально установлено, что разница температуры по толщине уложенного слоя на поверхности и нижней части по отношению к средней части слоя, через незначительный промежуток времени после укладки, зависит от погодных условий производства работ [15, 39].

Скорость охлаждения слоя горячей смеси зависит от теплофизических свойств горячей асфальтобетонной смеси и определяется по формуле [4]:

$$m = 2\alpha / (\gamma ch), 1/ч \quad (3.11)$$

где α – коэффициент теплоотдачи смеси, Вт/м·град; γ – объемная масса смеси, кг/м³; h – толщина слоя смеси, м; c – удельная теплоемкость смеси, которая зависит от состава смеси, кДж/кг·град.

Удельная теплоемкость асфальтобетонной смеси зависит от теплоемкости минерального материала (щебень) и битума. Значения удельной теплоемкости приведено в табл. 3.2 [11]:

Данные табл. 3.2 можно представить в виде уравнения:

$$c_6 = 1,1386e^{0,3553(t/100)}, \text{ кДж/кг·град}, \quad (3.12)$$

где t – температура битума, °С.

Исследованиями Л. Б. Гезенцева, Н. В. Горельшова, А. М. Богуславского и И. В. Королева установлено, что удельная теплоемкость каменных материалов в два раза ниже удельной теплоемкости битума [11].

Согласно ГОСТ 9128 смеси в зависимости от процентного содержания щебня(гравия) делятся на типы А, Б, В, Г, Д. С учетом этого в зависимости от типа смеси процентное содержание каменного материала будет разным, что влияет на удельную теплоемкость смесей. Следовательно, продолжительность охлаждения слоя смеси при прочих равных условиях зависит и от типа смеси.

3.2. Значение удельной теплоемкости битума в зависимости от температуры

Температура битума, °С	1 ...20	30 ...60	60...100	100...150	150...180
Удельная теплоемкость битума, кДж/кг·град	1,1...1,25	1,25...1,45	1,45...1,65	1,65...1,85	1,85...2,2

3.3. Значения удельной теплоемкости смеси в зависимости от процентного содержания агрегатов (щебень из гранита) при разных температурах

Температура смеси, °С		40	60	80	100	120	140	160
Содержание щебня, %	20	1,22	1,3	1,38	1,47	1,56	1,67	1,78
	30	1,17	1,24	1,31	1,39	1,47	1,56	1,66
	40	1,13	1,19	1,25	1,31	1,38	1,46	1,55
	50	1,08	1,13	1,18	1,23	1,30	1,36	1,43
	60	1,03	1,07	1,11	1,016	1,21	1,26	1,31
	70	0,99	1,02	1,05	1,08	1,12	1,16	1,2
	80	0,94	0,96	0,98	1,00	1,03	1,05	1,08

Численное значение удельной теплоемкости смеси можно определить по формуле [29]:

$$c = 0,01[(100 - z)c_6 + zc_{\text{арр}}], \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}, \quad (3.13)$$

где z – процент массы агрегатов от общей массы смеси; $c_{\text{арр}}$ – удельная теплоемкость агрегатов смеси, кДж/кг·град; c_6 – удельная теплоемкость битума, которая зависит от ее температуры.

Значение удельной теплоемкости при разном содержании минерального материала и температуре асфальтобетонной смеси представлено в табл. 3.3.

Из представленных данных видно, что с повышением температуры, независимо от процентного содержания щебня, удельная теплоемкость смеси увеличивается. В то же время с увеличением процентного содержания минеральных агрегатов удельная теплоемкость смеси снижается.

На рисунке 3.5 представлены зависимости удельной теплоемкости смеси от ее температуры при разном содержании щебня, которые подчиняются уравнениям:

- при 20% щебня $C_{\text{уд}} = 0,895e^{0,0012t_{\text{см}}}$, кДж/кг·град;
- при 50% щебня $C_{\text{уд}} = 0,9805e^{0,0023t_{\text{см}}}$, кДж/кг·град;
- при 80% щебня $C_{\text{уд}} = 1,075e^{0,0031t_{\text{см}}}$, кДж/кг·град. (3.14)

Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

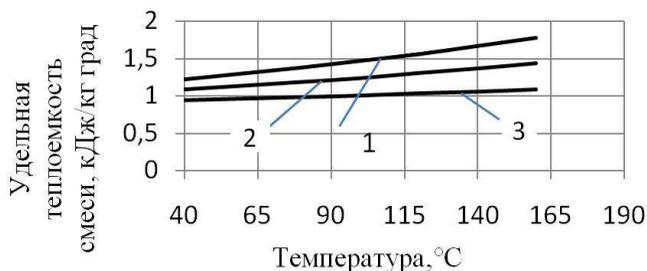


Рис. 3.5. Зависимость удельной теплоемкости смеси от температуры при разном содержании щебня:
1 – содержание щебня 80%; *2* – 50%; *3* – 20%

Анализ представленных зависимостей показал, что имеется общая закономерность изменения удельной теплоемкости смеси от температуры при разном содержании щебня.

С целью установления общей зависимости удельной теплоемкости горячей смеси от температуры представим данные табл. 3.3 в относительных значениях. Условно принимаем удельную теплоемкость горячей смеси при температуре 100 °С за единицу (табл. 3.4).

3.4. Удельная теплоемкость асфальтобетонной смеси при разном содержании минерального материала и температуре смеси (в относительных величинах)

Температура смеси, °С		40	60	80	100	120	140	160
Содержание минерального материала, %	20	0,83	0,88	0,94	1,0	1,06	1,14	1,21
	30	0,84	0,89	0,94	1,0	1,06	1,22	1,19
	40	0,86	0,91	0,95	1,0	1,05	1,11	1,18
	50	0,87	0,91	0,95	1,0	1,06	1,11	1,16
	60	0,88	0,92	0,96	1,0	1,04	1,08	1,13
	70	0,91	0,94	0,97	1,0	1,04	1,07	1,11
	80	0,94	0,96	0,98	1,0	1,03	1,05	1,08
	$\Sigma n/n$	0,878	0,917	0,957	1,0	1,049	1,106	1,157

Из данных табл. 3.4 видно, что в относительных значениях удельная теплоемкость зависит от температуры смеси и для практических расчетов ее численное значение определяется из выражения:

$$C_{уд} = 0,7975e^{0,0023t_{см}}, \quad (3.15)$$

где $t_{см}$ – температура асфальтобетона, °С. Коэффициент корреляции равен 0,99.

В общем виде зависимость удельной теплоемкости асфальтобетона от температуры и содержания минерального материала можно представить в виде функции:

$$C_{уд} = f(t_{см}; \Pi), \text{ кДж/кг·град}, \quad (3.16)$$

где $t_{см}$ – температура горячего асфальтобетона, °С; Π – содержание минерального материала (щебня) в асфальтобетоне, %.

Представим данные табл. 3.3 в относительных величинах, принимая за единицу значения удельной теплоемкости асфальтобетона при содержании щебня 50% (табл. 3.5).

Из представленных данных табл. 3.5 видно, что с увеличением процентного содержания щебня в смеси удельная теплоемкость снижается. Обозначим принятую величину коэффициентом влияния содержания каменного материала на удельную теплоемкость асфальтобетона $K_{щ}$.

3.5. Влияние содержания щебня на удельную теплоемкость асфальтобетонной смеси (в относительных величинах)

Температура смеси, °С		40	60	80	100	120	140	160	$\Sigma n/n$
Содержание минерального материала, %	20	1,12	1,15	1,16	1,19	1,20	1,22	1,22	1,21
	30	1,08	1,09	1,11	1,13	1,13	1,14	1,16	1,14
	40	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,08
	50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	60	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,96	0,93
	70	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85	0,83	0,87
	80	0,87	0,84	0,83	0,81	0,79	0,77	0,75	0,81

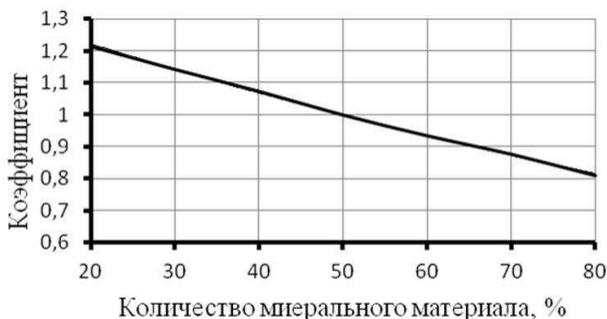


Рис. 3.6. Зависимость коэффициента $K_{щ}$ от процентного содержания щебня

Зависимость коэффициента $K_{щ}$ от содержания щебня представлена на рис. 3.6.

Численное значение коэффициента $K_{щ}$ определяется из уравнения:

$$K_{щ} = 1,3983e^{-0,007щ}, \quad (3.17)$$

где щ – процент содержания каменного материала в смеси. Коэффициент корреляции 0,99.

С учетом зависимости (3.16) и полученных значений коэффициентов влияния температуры горячей смеси и процентного содержания минерального материала удельную теплоемкость асфальтобетонной смеси в общем виде можно определить из выражения:

$$C_{уд} = 1,371e^{0,0023t_{см} - 0,007щ}. \quad (3.18)$$

Продолжительность охлаждения горячей смеси в слое покрытия зависит многих факторов, в том числе и от удельной теплоемкости смеси. Для выяснения влияния разных факторов на процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси разработана программа, позволяющая рассчитать продолжительность охлаждения смеси от разных факторов [17].

В таблице 3.6 представлено расчетное время охлаждения слоя в зависимости от теплоемкости смеси при разных температурах укладки в покрытие при толщине слоя покрытия 0,05 м, скорости ветра равной нулю.

Из представленных данных видно, что увеличение удельной теплоемкости смеси способствует увеличению продолжительности смеси в заданном температурном интервале независимо от температуры смеси при укладке.

3.6. Продолжительность охлаждения слоя в зависимости от удельной теплоемкости смеси при разных температурах укладки

Температура смеси, °С	Удельная теплоемкость смеси, кДж/кг °С							
	1,2	1,4	1,6	1,65	1,8	2,0	2,2	2,5
160	41	50	59	62	68	77	87	102
140	35	42	49	51	56	64	72	84
120	28	33	39	41	45	51	57	66
100	21	24	28	30	32	37	42	48
80	12	15	17	18	20	22	25	30

Для установления общей закономерности представим данные табл. 3.6 в относительных значениях, принимая условно за единицу продолжительность охлаждения смеси при удельной теплоемкости, равной 1,65 кДж/кг град, обозначив ее коэффициентом $K_{см}$.

На рисунке 3.7 представлена зависимость времени охлаждения слоя горячей смеси от ее удельной теплоемкости.

Из представленной на рис. 3.7 зависимости видно, что продолжительность охлаждения слоя смеси зависит от удельной теплоемкости смеси при укладке. В интервале температур 160...80 °С эта закономерность носит общий характер и может быть определена зависимостью:

$$K_{см} = 0,738C_{см} - 0,226, \quad (3.19)$$

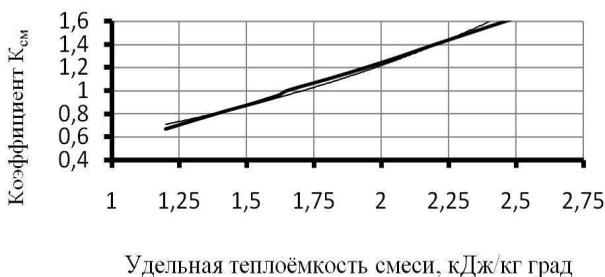


Рис. 3.7. Зависимость коэффициента $K_{см}$ от удельной теплоемкости смеси

где $K_{см}$ – коэффициент, учитывающий влияние удельной теплоемкости смеси на продолжительность охлаждения, безразмерная величина; $C_{см}$ – удельная теплоемкость смеси, кДж/кг град. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Анализ тепловых процессов, протекающих при укладке горячих асфальтобетонных смесей на основание, показал, что потери тепла из слоя смеси происходят как на поверхности слоя покрытия, так и в зоне контакта слоя с основанием.

Это приводит к снижению температуры в граничных слоях уложенного слоя горячей смеси, что способствует неравномерности распределения температуры по толщине слоя. Потери тепла на границах слоя покрытия восполняются за счет теплового потока из средней части уложенного слоя. Величиной, характеризующей передачу тепла из средней части слоя смеси к поверхности контакта слоя с основанием, является коэффициент теплопроводности смеси (λ), который зависит от температуры смеси и плотности материала. Следовательно, в общем виде зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и плотности материала можно представить в виде функции:

$$\lambda = f(t; \gamma), \quad (3.20)$$

где t – температура асфальтобетонной смеси, °С; γ – плотность материала при укладке, т/м³.

На рисунке 3.8 представлена зависимость коэффициента теплопроводности асфальтобетона от плотности материала при разных температурах, представленная в работе [2].

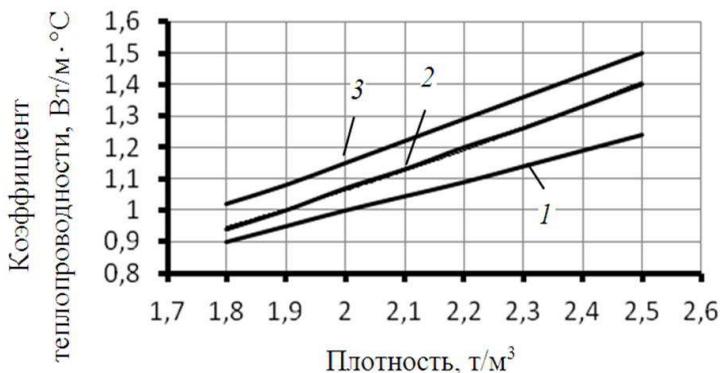


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента теплопроводности (λ) асфальтобетонных смесей от плотности материала при разных температурах:
 1 – 20 °С; 2 – 120 °С; 3 – 170 °С

Из представленных данных видно, что между коэффициентом теплопроводности (λ) и плотностью при постоянной температуре смеси существует зависимость, которая при температуре 120 °С может быть выражена уравнением:

$$\lambda = 0,334e^{0,578\gamma}, \text{ Вт/м}\cdot\text{град}, \quad (3.21)$$

где γ – плотность смеси, т/м³. Коэффициент корреляции 0,99.

Влияние температуры горячей смеси на величину коэффициента теплопроводности при разной плотности материала представлено в табл. 3.7.

Для установления общей закономерности влияния температуры смеси на коэффициент теплопроводности принимаем значение коэффициента при температуре 120 °С за единицу ($K_{\lambda T}$) и представим данные табл. 3.7 в относительных величинах.

Анализ полученных значений влияния температуры смеси на коэффициент теплопроводности в относительных величинах показал, что независимо от плотности материала, между коэффициентом теплопроводности и температурой смеси существует зависимость, которая может быть определена по формуле

$$K_T = 0,895e^{0,0898(t/100)}, \quad (3.22)$$

где K_T – коэффициент, зависящий от температуры смеси, безразмерная величина; t – температура смеси, °С. Коэффициент корреляции равен 0,99.

В общем виде зависимость коэффициента теплопроводности от плотности и температуры смеси можно определить по формуле:

$$\lambda = 0,298e^{0,578\gamma + 0,0898(t/100)}, \text{ Вт/м}\cdot\text{град}. \quad (3.23)$$

3.7. Влияние температуры смеси на величину коэффициента теплопроводности

Плотность, т/м ³ Температура, °С	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
	20	0,94	1,0	1,05	1,10	1,175
120	1,02	1,075	1,15	1,21	1,275	1,35
170	1,06	1,125	1,2	1,25	1,325	1,42

Распределение температуры смеси по толщине слоя покрытия и изменение ее по времени показало, что тепловые процессы при устройстве асфальтобетонного покрытия, с точки зрения тепловых процессов, можно разделить на два этапа.

На первом этапе тепловой режим подчиняется сложным закономерностям, при которых происходит перераспределение температуры внутри слоя, что способствует интенсивному снижению температуры в граничных слоях уложенного покрытия. Установлено, что в зависимости от условий строительства, принятой технологии и температуры смеси при укладке происходит нагрев основания за счет передачи тепла от уложенного слоя. Это способствует увеличению времени на уплотнение слоя покрытия, а также улучшает сцепление слоев покрытия между собой. Согласно законам нестационарных теплопередач такой процесс относится к этой группе при условии, если продолжительность этапа интенсивного прогрева нижележащего слоя, при погрешности расчета 5%, принимается в пределах $F_0 = 0,12$, где F_0 – критерий Фурье [64, 68]. Численное значение критерия подобия Фурье определяется из выражения:

$$F_0 = \tau \lambda / \gamma \tilde{\eta} h^2, \quad (3.24)$$

где h – толщина слоя, м; c – удельная теплоемкость смеси, кДж/кг·град; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·град; γ – объемная масса смеси, кг/м³; τ – расчетное время, ч.

Установлено, что продолжительность этого периода зависит от толщины укладываемого слоя. При принятой толщине укладываемого слоя расчетная продолжительность интенсивного прогрева основания составляет:

$$h_{\text{сд}} = 0,05 \text{ м}, \quad \tau = 0,075 \text{ ч};$$

$$h_{\text{сд}} = 0,10 \text{ м}, \quad \tau = 0,29 \text{ ч};$$

$$h_{\text{сд}} = 0,15 \text{ м}, \quad \tau = 0,65 \text{ ч};$$

$$h_{\text{сд}} = 0,20 \text{ м}, \quad \tau = 1,15 \text{ ч}.$$

На втором этапе тепловой процесс протекает по законам регулярного режима, при котором слой смеси охлаждается вместе с подогретым основанием. Закономерность принято считать действительной, если темп охлаждения смеси соответствует условию

$$H/2 \cdot (a \cdot \tau)^{1/2} > 0,6, \quad (3.25)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, определяемый выражением:

$$a = \lambda / c \gamma, \text{ м}^2/\text{ч}. \quad (3.26)$$

Результаты расчетов по данному условию представлены в табл. 3.8.

3.8. Влияние толщины слоя на продолжительность охлаждения

Толщина слоя, м	0,03	0,05	0,10	0,15	0,20
Время, ч	1,45	2,41	4,83	7,25	9,9

Результаты исследований показали, что продолжительность строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей меньше, чем рассчитанные критические значения. Следовательно, процесс охлаждения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей соответствует законам нестационарных теплопередач. При установлении температурных режимов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, а также определения продолжительности устройства покрытия, необходимо учитывать характер распределения температуры по толщине слоя и в расчетах принимать среднее значение температуры по толщине слоя покрытия. Установлено, что среднему значению температуры слоя соответствует температура, расположенная на расстоянии одной трети толщины от поверхности укладываемого слоя.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Анализ работ, посвященных исследованию процесса охлаждения горячих асфальтобетонных смесей при устройстве дорожных покрытий, показал, что продолжительность строительства зависит от разных факторов, каждый из которых влияет на время нахождения горячей смеси в установленном интервале температуры. В общем виде время в заданном интервале температуры можно представить в виде функции, зависящей от переменных факторов:

$$\tau_{\text{стр}} = f(t_{\text{см}}, h_{\text{сл}}, t_{\text{в}}, t_{\text{осн}}, V_{\text{в}}, M_c), \quad (4.1)$$

где $\tau_{\text{стр}}$ – продолжительность строительства, мин; $t_{\text{см}}$ – температура укладываемой смеси, °C; $h_{\text{сл}}$ – толщина слоя, см; $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, °C; $t_{\text{осн}}$ – температура основания, °C; $V_{\text{в}}$ – скорость ветра, м/с; M_c – коэффициент, учитывающий теплофизические свойства горячей асфальтобетонной смеси.

При выводе аналитической зависимости продолжительности охлаждения горячей смеси в заданном интервале температур использована методика рационального планирования экспериментов [35].

Температура горячей смеси при загрузке в транспортные средства зависит от типа смеси и марки битума и установлена нормативными документами [40, 46, 48]. При устройстве дорожного покрытия горячую асфальтобетонную смесь доставляют транспортными средствами к месту укладки в покрытие. Время доставки к месту распределения зависит от конкретных производственных условий и на практике температура смеси может быть разной, что влияет на температуру смеси при укладке в полосу покрытия. Температуру смеси при доставке к месту производства работ можно определить по формуле [13]:

$$t_{\text{ук}} = t_{\text{вых}} - t_{\text{в}}/e^{m\tau} + t_{\text{в}}, \quad (4.2)$$

где $t_{\text{вых}}$ – температура смеси при выпуске, °C; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °C; e – основание натурального логарифма; τ – время доставки, которое определяется в зависимости от дальности транспортировки смеси с завода до места ее потребления, ч; m – темп охлаждения смеси в процессе транспортировки, 1/ч.

Следует отметить, что дальность транспортировки смеси определяется температурой смеси при укладке. Моделирование тепловых

процессов при устройстве дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей осуществлялось с применением программы, позволяющей учесть влияние разных факторов на изменение температуры смеси во времени [17].

В таблице 4.1 представлены результаты расчета продолжительности охлаждения горячей смеси с момента укладки до окончания уплотнения при разной толщине слоя.

Из представленных данных видно, что продолжительность охлаждения зависит от толщины укладываемого слоя покрытия. Однако следует заметить, что независимо от толщины слоя укладки продолжительность охлаждения слоя смеси от температуры при укладке подчиняется линейной зависимости (табл. 4.2).

Для установления общей закономерности влияния температуры смеси при укладке на продолжительность охлаждения смеси в заданном интервале температуры принимаем время охлаждения для каждого слоя, с момента укладки смеси и достижения им температуры, ниже которой уплотнение покрытия не дает эффекта, за единицу. Для смесей с маркой битумов БН, БНД 40/60, 60/90, 90/130 принята температура укладки 160 °С и температура окончания уплотнения – 60 °С. Для

4.1. Продолжительность охлаждения горячей смеси в дорожном покрытии (мин) в зависимости от температуры смеси при укладке (температура воздуха +20 °С, скорость ветра 0 м/с)

Температура смеси при укладке, °С \ Толщина слоя, м	160	140	120	100	80	60
0,03	$\frac{31}{-}$	$\frac{21,5}{32}$	$\frac{16,5}{24}$	$\frac{11,5}{19}$	$\frac{7,0}{8,5}$	$\frac{=}{5}$
0,05	$\frac{68}{-}$	$\frac{56}{79}$	$\frac{43}{63}$	$\frac{31}{47}$	$\frac{17}{32}$	$\frac{=}{15}$
0,08	$\frac{150}{-}$	$\frac{130}{175}$	$\frac{100}{142}$	$\frac{72}{109}$	$\frac{42}{52}$	$\frac{=}{31}$
0,10	$\frac{201}{-}$	$\frac{175}{236}$	$\frac{136}{193}$	$\frac{98}{148}$	$\frac{56}{71}$	$\frac{=}{45}$

В числителе для смесей на битуме марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 и в знаменателе – на битуме марок БНД 130/200,200/300.

**4.2. Допустимая продолжительность строительства покрытий
в зависимости от температуры смеси при укладке, мин
(температура воздуха 20 °С, скорость ветра 0 м/с)**

Толщина слоя, м	Марка битума БН, БНД 40/60, 60/90, 90/130	Марка битума БН, БНД 130/200, 200/300
0,03	$\tau = 0,29t_{\text{см}} - 17,4$	$\tau = 0,35t_{\text{см}} - 17,05$
0,05	$\tau = 0,67t_{\text{см}} - 37,88$	$\tau = 0,80t_{\text{см}} - 32,3$
0,08	$\tau = 1,42t_{\text{см}} - 72,19$	$\tau = 1,89t_{\text{см}} - 87,2$
0,10	$\tau = 1,94t_{\text{см}} - 103$	$\tau = 2,52t_{\text{см}} - 113,4$

Обозначения: $t_{\text{см}}$ – температура смеси при укладке, °С. Коэффициент корреляции для данных уравнений составляет 0,99.

смесей с битумом марок БН, БНД 130/200 и 200/300 соответственно 140 и 50 °С. Тогда в относительных величинах данные табл. 4.2 будут иметь значения, представленные в табл. 4.3. Обозначим влияние температуры горячей смеси при укладке на продолжительность охлаждения в относительных величинах через коэффициент $K_{\text{тс}}$.

**4.3. Численные значения коэффициента $K_{\text{тс}}$ в зависимости
от температуры смеси при укладке с учетом толщины
укладываемого слоя**

Толщина слоя, м \ Температура смеси, °С	160	140	120	100	80	60
	0,03	$\frac{1,0}{-}$	$\frac{0,69}{1,0}$	$\frac{0,53}{0,75}$	$\frac{0,37}{0,59}$	$\frac{0,22}{0,36}$
0,05	$\frac{1,0}{-}$	$\frac{0,82}{1,0}$	$\frac{0,63}{0,82}$	$\frac{0,45}{0,61}$	$\frac{0,25}{0,40}$	$\frac{=}{0,18}$
0,08	$\frac{1,0}{-}$	$\frac{0,86}{1,0}$	$\frac{0,66}{0,81}$	$\frac{0,48}{0,62}$	$\frac{0,28}{0,41}$	$\frac{=}{0,18}$
0,10	$\frac{1,0}{-}$	$\frac{0,85}{1,0}$	$\frac{0,66}{0,82}$	$\frac{0,48}{0,62}$	$\frac{0,27}{0,41}$	$\frac{=}{0,18}$
Средняя величина	1,0	$\frac{0,84}{1,0}$	$\frac{0,65}{0,82}$	$\frac{0,47}{0,62}$	$\frac{0,27}{0,41}$	$\frac{=}{0,18}$

Из представленных в табл. 4.3 данных видно, что численные значения коэффициента $K_{тс}$ не зависят от толщины слоя покрытия за исключением слоя толщиной 0,03 м.

Численное значение коэффициента влияния температуры смеси при укладке на продолжительность строительства характеризуется линейной зависимостью и с учетом марки битума определяется по зависимостям, приведенным в табл. 4.4.

Продолжительность строительства покрытий зависит от температуры окружающего воздуха. Укладка и уплотнение горячих асфальтобетонных смесей ограничена температурой окружающего воздуха, т.к. она влияет на скорость охлаждения смеси.

На рисунке 4.1 представлены результаты моделирования изменения температуры горячей асфальтобетонной смеси во времени при разных температурах окружающего воздуха.

4.4. Зависимости влияние коэффициента температуры смеси от толщины укладываемого слоя и марки битума

Толщина слоя смеси, м	Битум марок БНД 40/60,60/90,90/130	Битум марок БНД130/200, 200/300
0,03	$K_{тс} = 0,0094t_{см} - 0,566$	$K_{тс} = 0,0105t_{см} - 0,475$
0,05...0,10	$K_{тс} = 0,0092t_{см} - 0,452$	$K_{тс} = 0,0103t_{см} - 0,419$

Обозначения: $t_{см}$ – температура смеси при укладке. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,98-0,99.

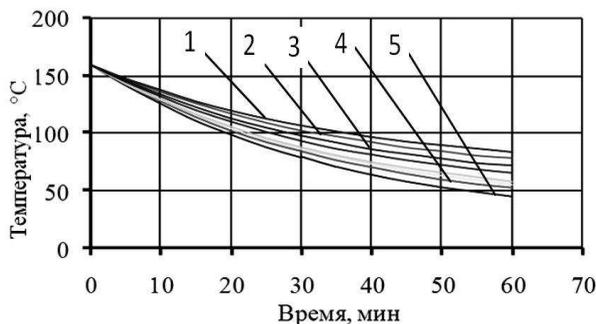


Рис. 4.1. Изменение температуры горячей асфальтобетонной смеси во времени:

1 – 5 °С; 2 – 10 °С; 3 – 20 °С; 4 – 30 °С; 5 – 40 °С (тип смеси Б, марка битума БНД 60/90; толщина слоя 5 см; температура окружающего воздуха)

Из представленных данных видно, что распределение температуры по времени подчиняется общей закономерности и характеризуется экспоненциальной зависимостью.

В таблице 4.5 представлено изменение температуры смеси по времени с момента укладки на основание при разных температурах воздуха. Коэффициент корреляции для всех представленных уравнений находится в пределах 0,98...0,99.

Темп охлаждения асфальтобетонной смеси зависит от толщины укладываемого слоя покрытия. В некоторых случаях техническими регламентами на производство работ допускается строительство асфальтобетонных покрытий при пониженных температурах окружающего воздуха [48]. В таких случаях, для обеспечения температурных режимов горячей смеси при уплотнении, рекомендуется укладку выполнять толстыми слоями [7].

Установлено, что с повышением толщины слоя смеси в два раза время на выполнение операции на уплотнение возрастает в три раза [15].

4.5. Распределение температуры при охлаждении горячей смеси во времени при разной температуре воздуха

Время, мин	0	5	10	20	30	40	50	60	Зависимость	
Температура воздуха, °С	5	160	143	129	104	86	73	63	55	$t = 160e^{-0,019\tau}$
	10	160	144	130	106	88	75	66	58	$t = 160e^{-0,018\tau}$
	20	160	145	132	110	93	81	72	65	$t = 160e^{-0,016\tau}$
	30	160	146	134	113	98	86	78	72	$t = 160e^{-0,0147\tau}$
	40	160	147	136	117	102	92	84	78	$t = 160e^{-0,0133\tau}$
	50	160	148	138	120	107	97	90	84	$t = 160e^{-0,0119\tau}$

Обозначения: t – температура смеси, °С; τ – время с момента укладки горячей смеси на основание дорожной одежды до начала выполнения работы, мин. Коэффициент корреляции для всех представленных уравнений находится в пределах 0,98...0,99.

В таблице 4.6 и на рис. 4.2 представлены результаты моделирования влияния температуры окружающего воздуха на продолжительность охлаждения покрытия при разной толщине слоя (температура смеси при укладке 160 °С, температура воздуха 20 °С).

Из представленных данных видно, что с повышением температуры воздуха, не зависимо от толщины укладываемого слоя смеси, время в заданном температурном интервале увеличивается. Характер зависимостей носит нелинейный характер и с учетом толщины укладываемого слоя продолжительность охлаждения определяется зависимостями, представленными в табл. 4.7.

4.6. Продолжительность охлаждения слоя смеси от температуры воздуха в интервале температуры от 160 до 80 °С при разной толщине слоя укладки

Температура воздуха, °С		5	10	20	30	40
Толщина слоя, м	0,03	17	18	25	35	53
	0,05	43	47	56	79	114
	0,08	108	117	139	170	258
	0,10	149	161	189	250	342

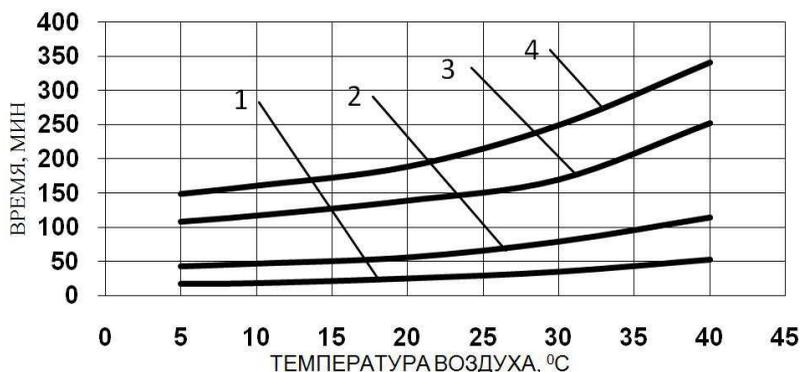


Рис. 4.2. Влияние температуры воздуха на продолжительность охлаждения слоя покрытия:

1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,1 м
(температура смеси при укладке – 160 °С, скорость ветра – 0 м/с)

4.7. Зависимость времени смеси в заданном интервале температуры при разной толщине слоя от температуры воздуха

Толщина слоя, м	Битум марок БН, БНД 40/60, 60/90, 90/130	Битум марок БН, БНД 130/200, 200/300
0,03	$\tau = 19,12e^{0,0246t_{\text{в}}}$	$\tau = 14,29e^{0,031t_{\text{в}}}$
0,05	$\tau = 36,97e^{0,0314t_{\text{в}}}$	$\tau = 37,26e^{0,026t_{\text{в}}}$
0,08	$\tau = 103,1e^{0,012t_{\text{в}}}$	$\tau = 95,61e^{0,022t_{\text{в}}}$
0,10	$\tau = 137,2e^{0,018t_{\text{в}}}$	$\tau = 131,32e^{0,022t_{\text{в}}}$

Обозначения: τ – продолжительность процесса строительства покрытия в зависимости от температуры окружающего воздуха; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; e – основание натурального логарифма. Коэффициент корреляции данных уравнений составляет 0,97...0,98.

Для установления общей закономерности влияния температуры воздуха и толщины слоя покрытия на время соответствия горячей смеси заданному температурному интервалу асфальтобетонной смеси представим данные табл. 4.7 в относительных значениях, принимая продолжительность при температуре воздуха 20 °С и толщине слоя 0,05 м за единицу. Обозначим полученные относительные величины через коэффициенты влияния температуры воздуха ($K_{\text{в}}$) и толщины слоя смеси (K_{h}).

На рисунке 4.3 представлена зависимость коэффициента $K_{\text{в}}$ от температуры воздуха.

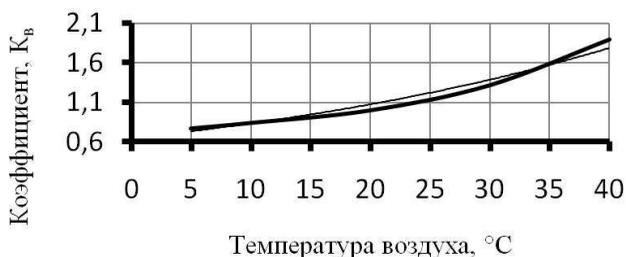


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента $K_{\text{в}}$ от температуры воздуха

Численное значение коэффициента определяется зависимостью:

$$K_b = 0,6468e^{0,0254t_b}, \quad (4.3)$$

где t_b – температура воздуха, °С. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,97.

Анализ полученной зависимости показал, что если для слоя асфальтобетонной смеси толщиной 0,03 м при температуре воздуха 5 °С относительная погрешность в расчетах составляет 10...11%, то для слоев толщиной от 0,05 м и выше погрешность составляет 2%. Аналогичная закономерность проявляется и при температурах воздуха выше 20 °С. Повышенная погрешность для слоя 0,03 м можно объяснить влиянием температуры основания, которая зависит от температуры воздуха.

На рисунке 4.4 представлена зависимость коэффициента K_h от толщины слоя горячей смеси с вязкими битумами марок БНД 40/60, БНД60/90, БНД90/130.

Численное значение коэффициента определяется зависимостью:

$$K_h = 184,7h^{1,7364}, \quad (4.4)$$

где h – толщина слоя смеси, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Для смесей с битумами марок БНД 130/200, 200/300

$$\begin{aligned} K_h &= -95810h^3 + 22393h^2 + 92,538h - 6,0529, \\ \alpha &= 238,1h^3 - 47,429h^2 + 2,7276h - 0,0146, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции для K_h равен 0,99; для α – 0,8.

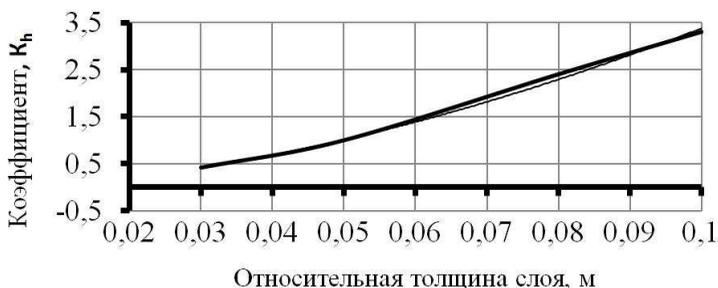


Рис. 4.4. Зависимость коэффициента влияния толщины слоя покрытия на время соответствия горячей смеси заданному температурному интервалу температур

Из приведенных данных видно, что с повышением температуры воздуха увеличивается возможное время строительства покрытия из горячих асфальтобетонных смесей. Интенсивный рост допустимого времени строительства покрытий наблюдается при достижении температуры воздуха выше 20 °С.

Темп охлаждения слоя смеси зависит от скорости перемещения воздушных масс, поскольку от этого зависит конвективный теплообмен между средой и поверхностью уложенного слоя смеси. На рисунке 4.5 показано изменение температуры асфальтобетонной смеси по толщине слоя в зависимости от скорости ветра.

Увеличение скорости ветра приводит к более интенсивной отдаче тепла в окружающую среду за счет повышения коэффициента теплоотдачи, что способствует уменьшению времени на выполнение работ по укладке и уплотнению покрытий.

На рисунке 4.6 представлены результаты расчетов продолжительности охлаждения смеси в зависимости от скорости ветра при разной толщине слоя покрытия.

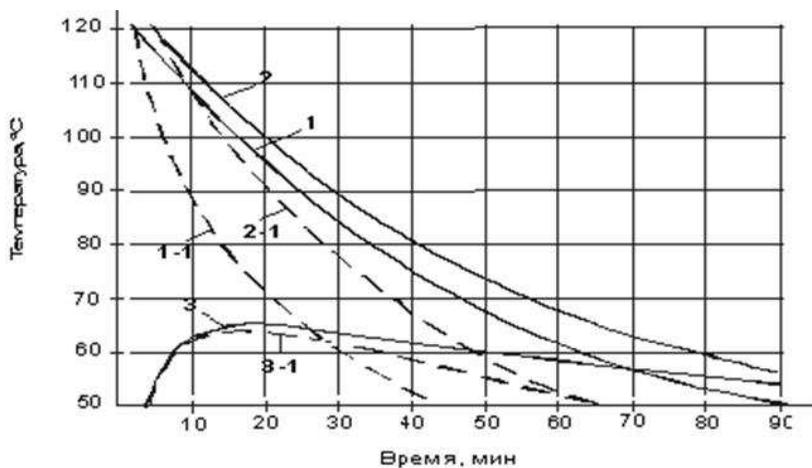


Рис. 4.5. Распределение температуры по толщине слоя асфальтобетонной смеси во времени при температуре окружающего воздуха +10 °С, толщине слоя – 0,05 м и температуре смеси при укладке +135 °С:

1, 2, 3 – температура смеси при скорости ветра $v = 0$ м/с на поверхности, средней части слоя и на контакте с основанием; 1-1; 2-1; 3-1 – температура смеси в соответствующих точках при скорости $v = 10$ м/с

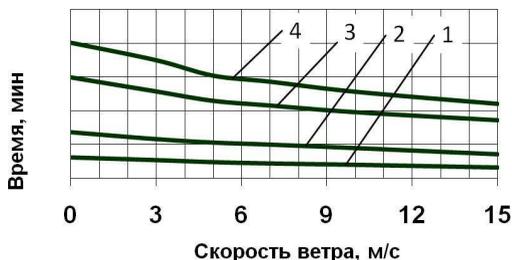


Рис. 4.6. Влияние скорости ветра на продолжительность процесса охлаждения асфальтобетонного слоя в зависимости от его толщины с момента укладки смеси до нижней границы температурного интервала уплотнения:
 1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Из представленных на рис. 4.6 данных видно, что характер охлаждения слоя смеси при разной толщине покрытия не зависит от скорости ветра. В то же время скорость ветра влияет на темп охлаждения слоя, а, следовательно, и на продолжительность строительства. За счет увеличения теплообмена поверхности слоя с окружающей средой происходит перераспределение теплового потока по толщине слоя покрытия. Как видно из представленных данных, перепад температур по толщине слоя при отсутствии ветра или при незначительной его величине составляет 5...6 °С.

С увеличением скорости ветра неравномерность распределения температуры по толщине слоя возрастает и перепад по толщине слоя достигает величины 18...20 °С. Неравномерное распределение температуры смеси по толщине слоя приводит к тому, что в процессе движения уплотняющих машин за счет различия свойств смеси по толщине слоя, возникают пластические деформации материала, что способствует процессу волнообразования и появлению микротрещин на поверхности слоя.

Представленные зависимости могут быть аппроксимированы уравнениями в зависимости от толщины слоя (коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98...0,99):

$$\begin{aligned}
 0,03 \text{ м: } \tau &= 31e^{-0,0435v}, \text{ мин;} \\
 0,05 \text{ м: } \tau &= 68e^{-0,0409v}, \text{ мин;} \\
 0,08 \text{ м: } \tau &= 150e^{-0,0363v}, \text{ мин;} \\
 0,10 \text{ м: } \tau &= 201e^{-0,0394v}, \text{ мин,}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

где v – скорость ветра, м/с.

С целью установления общей закономерности влияния скорости ветра на продолжительность охлаждения смеси принимаем продолжительность работ при температуре укладываемой смеси 160 °С и отсутствии ветра за единицу. В относительных единицах данные, приведенные на рис. 4.6, будут иметь значения, представленные в табл. 4.8.

Из представленных данных видно, что характер влияния скорости ветра на продолжительность работ по строительству покрытий не зависит от толщины укладываемого слоя. Увеличение скорости ветра приводит к снижению продолжительности процесса строительства. Обозначим влияние скорости ветра на возможную продолжительность строительства через коэффициент K_v . Зависимость коэффициента влияния скорости ветра на продолжительность работ представлена на рис. 4.7.

Численное значение K_v может быть определено по зависимости (коэффициент корреляции 0,98):

$$K_v = 0,98e^{-0,039v}, \quad (4.7)$$

где v – скорость ветра, м/с.

Экспериментальными исследованиями установлено, что охлаждение горячей асфальтобетонной смеси в слое покрытия, независимо от состава, температуры воздуха и скорости ветра, подчиняется экспоненциальному закону [13].

4.8. Влияние скорости ветра на продолжительность работ в относительных величинах

Скорость ветра, м/с	0	3	5	7	10	15
Толщина слоя, м						
0,03	1,00	0,87	0,77	0,71	0,64	0,52
0,05	1,00	0,85	0,78	0,73	0,66	0,53
0,08	1,00	0,86	0,81	0,76	0,67	0,57
0,10	1,00	0,87	0,76	0,71	0,66	0,54
0,15	1,00	0,86	0,80	0,72	0,65	0,58
Средняя величина	1,00	0,86	0,78	0,72	0,65	0,55

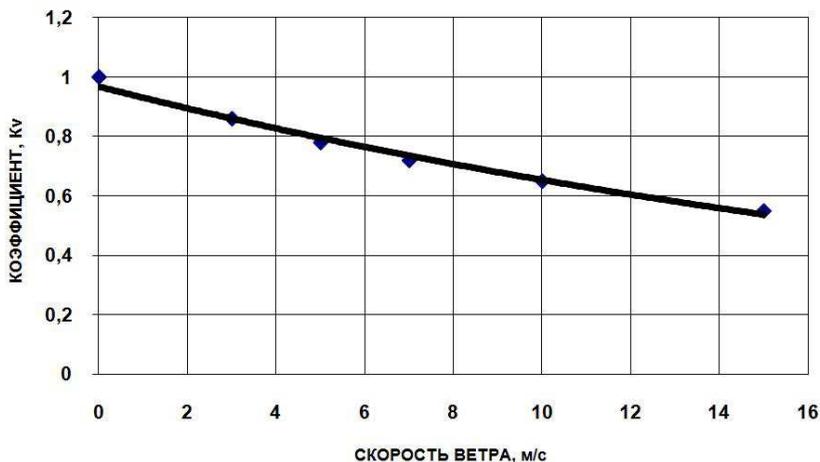


Рис. 4.7. Зависимость K_v от скорости ветра

Известно, что за счет солнечной радиации происходит нагрев дорожного покрытия и ее температура может быть определена по формуле [33]:

$$t_{\text{п}} = 1,3t_{\text{в}} + 7, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.8)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

Данная зависимость позволяет определить температуру поверхности покрытия в процессе эксплуатации дороги. В работах Б. И. Ладыгина и Н. В. Горельшева при укладке горячей асфальтобетонной смеси это учитывается за счет введения коэффициента (1,2...1,25), учитывающего влияние температуры основания при температуре воздуха выше $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ [8, 33].

Установлено, что продолжительность процесса уплотнения дорожного покрытия увеличивается пропорционально росту температуры окружающего воздуха до $15...20 \text{ } ^\circ\text{C}$, причем, если при изменении температуры воздуха от -10 до $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ увеличение продолжительности работ составляет $0,5$ мин на $1 \text{ } ^\circ\text{C}$, то с 0 до $15 \text{ } ^\circ\text{C}$ эта величина составляет 1 мин на $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ [15]. При дальнейшем увеличении температуры воздуха рост продолжительности работ происходит более интенсивно, что характерно для солнечных дней и температуры окружающей среды выше $20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Экспериментально установлено, что температура поверхности основания дорожного покрытия за счет солнечной радиации может превышать температуру окружающего воздуха на $10...30 \text{ } ^\circ\text{C}$, особенно

при отсутствии ветра, что подтверждается работами других авторов [1, 28]. Увеличение температуры основания за счет этого фактора приводит к уменьшению темпа охлаждения смеси и, следовательно, способствует увеличению продолжительности работ по устройству покрытия.

С целью уточнения влияния температуры основания на возможное время строительства покрытий были проведены расчеты, результаты которых представлены в табл. 4.9 (толщина слоя 0,05 м, скорость ветра 0 м/с, температура смеси при укладке 140 °С).

Из данных таблицы видно, что повышение температуры основания дороги на 1 °С при температуре воздуха от 20 до 30 °С приводит к увеличению продолжительности работ на 0,5 мин, при температуре воздуха от +30 до 40 °С это увеличение в среднем составляет 0,7 мин на 1 °С, а при дальнейшем увеличении температуры воздуха рост времени достигает более одной минуты на 1 °С.

Этим обстоятельством можно объяснить тот факт, что с повышением температуры воздуха свыше 20 °С интенсивность охлаждения смеси уменьшается, что влияет на продолжительность работ по уплотнению покрытия. На основании этого можно сделать вывод, что температура основания влияет на продолжительность работ по уплотнению покрытий и зависимость носит нелинейный характер.

Для получения общей закономерности влияния температуры основания на возможную продолжительность процесса уплотнения покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, представим данные табл. 4.9 в относительных величинах.

Совместим численные значения коэффициентов $K_{осн}$ при различных температурах воздуха и основания, принимая за начало отсчета равенство температур основания и окружающего воздуха. По оси X отложим разницу температур основания и окружающего воздуха с

4.9. Влияние температуры основания на допустимую продолжительность работ по уплотнению покрытия

Температура окружающего воздуха, °С	20				30				40			
	Температура основания, °С	20	25	30	35	30	35	40	45	40	45	50
Продолжительность работ, мин	51	53	56	60	64	67	71	76	89	95	100	107

интервалом 5 °С. По оси Y отложим относительное время уплотнения покрытия, представляющее отношение времени при превышении температуры основания к температуре воздуха ко времени при равенстве температуры основания и воздуха в связи с увеличением температуры основания. Численные значения коэффициента влияния температуры основания в зависимости от разницы температур основания и окружающего воздуха представлены на рис. 4.8.

Из представленных данных видно, что независимо от температуры окружающего воздуха закономерность влияния температуры основания на продолжительность работ носит общий характер и может быть представлена в виде (коэффициент корреляции равен 0,97):

$$K_{\text{осн}} = 0,987e^{0,013\Delta t}, \quad (4.9)$$

где Δt – разность температур основания и окружающего воздуха, °С; $K_{\text{осн}}$ – коэффициент влияния температуры основания.

Анализ представленных данных показывает, что чем выше температура основания по отношению к окружающему воздуху, тем в большей степени температура основания влияет на интенсивность охлаждения смеси и на продолжительность работ по уплотнению дорожного покрытия.

Таким образом, продолжительность строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей может быть определена по зависимости:

$$\tau_{\text{стр}} = K_c K_{\text{тс}} K_h K_M K_v K_{\text{осн}} e^{\alpha t_b}, \quad (4.10)$$

где K_c , $K_{\text{тс}}$, K_h , K_M , K_v , $K_{\text{осн}}$, α – безразмерные коэффициенты, значения которых предлагаются в данной работе, t_b – температура воздуха, °С.

Зависимость (4.10) позволяет определить возможную продолжительность строительства покрытий, состоящую из процессов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей.

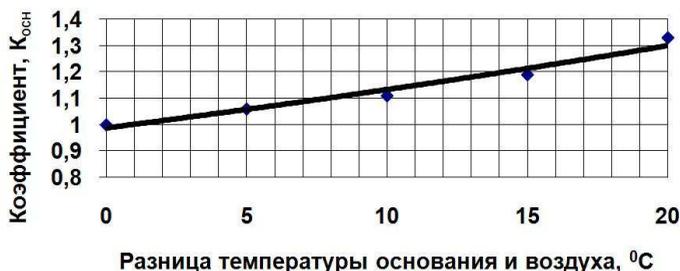


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента $K_{\text{осн}}$ от разницы температур основания и окружающего воздуха

Экспериментально установлено, что применение катков с металлическим вальцом для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей влияет на темп охлаждения слоя смеси. При взаимодействии металлического вальца с поверхностью слоя горячей смеси, охлаждение в верхней части слоя покрытия происходит более интенсивно, чем при свободном остывании. В начальный момент уплотнения, при температуре смеси 120...115 °С, снижение температуры поверхности покрытия после прохода катка может достигать 10...15 °С. Если проходы катка совершаются с небольшими интервалами (4...5 мин), то температура поверхности слоя снова повышается (рис. 4.9) [3].

Падение температуры на поверхности слоя объясняется тем, что температура поверхности вальца сравнительно низкая (20...25 °С), а также охлаждением слоя из-за наличия на поверхности жидкости, остающейся от обильного смачивания вальцов. Отсутствие контроля за расходом воды приводит к более интенсивному остыванию поверхности покрытия и снижению качества работы. В случае частых проходов катка по следу наблюдается интенсивное снижение температуры покрытия. При уплотнении катками на пневматических шинах резкого падения температуры поверхностного слоя не наблюдается, а через 1,0...1,5 ч работы катка на пневматических шинах их температура достигает 50...55 °С.



Рис. 4.9. Изменение температуры поверхности покрытия при уплотнении гладковальцовыми катками:

1 – 7 – проходы катка

В результате неравномерного распределения температуры по толщине слоя температура на поверхности оказывается значительно ниже, чем в средней части уложенного слоя и на поверхности образуется тонкий слой с более высокими деформативными свойствами, чем в средней части слоя. В результате этого смесь в средней части слоя более подвижная, обладает меньшей деформативной способностью и под действием нагрузки от вальца катка способна к проявлению пластических деформаций. Это способствует образованию трещин и неровностей на поверхности уплотняемого слоя.

В связи с этим необходим контроль за подачей жидкости на вальцы катка, обеспечивающий минимальный расход при укатке, а также прекращение ее подачи при кратковременных остановках.

5. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПОСЛЕ УКЛАДКИ НА ОСНОВАНИЕ ДОРОГИ

Качество строительства дорожных покрытий нежесткого типа зависит от температуры смеси, доставляемой к месту производства работ. Ранее отмечалось, что минимальная температура смеси при ее распределении зависит от марки битума, толщины укладываемого слоя и температуры воздуха.

При укладке слоя асфальтобетонной смеси на основание дорожной одежды происходит ее охлаждение за счет отдачи тепла в окружающую среду и нижележащий слой одежды.

Принято считать, что температура горячей смеси при укладке на нижележащий слой дорожной конструкции равномерно распределяется по всей поверхности уложенного слоя покрытия. При таком условии достигаемые характеристики асфальтобетона дорожного покрытия должны иметь одинаковые характеристики (коэффициент уплотнения, плотность, прочность, водонасыщение и т.д.).

В действительности имеет место неравномерность распределения температуры горячей асфальтобетонной смеси по полосе покрытия. Это обстоятельство является причиной неравномерности распределения характеристик асфальтобетона по поверхности дорожного покрытия за счет температурной и гранулометрической сегрегации, что и является причиной образования дефектов в виде выбоин на поверхности покрытия. Наиболее часто такие дефекты возникают в зоне сопряжения полос из-за нарушения температурных режимов при укладке и уплотнении горячих смесей (рис. 5.1).

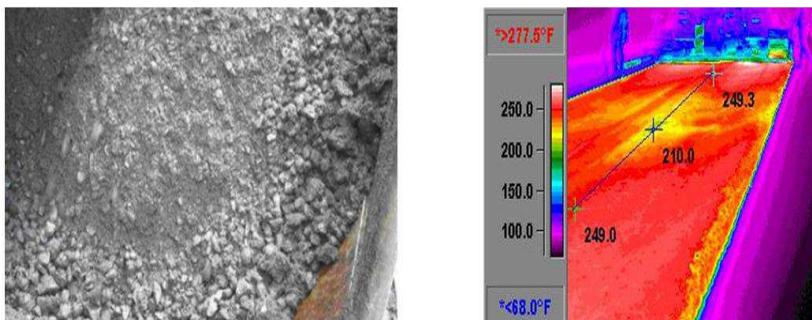


Рис. 5.1. Гранулометрическая и температурная сегрегация смеси при укладке и выгрузке из самосвала

Такое распределение температуры по ширине полосы покрытия объясняется тем, что при транспортировке горячей смеси, особенно при пониженных температурах воздуха, происходит неравномерное охлаждение смеси за счет отдачи тепла стенкам кузова транспортных машин и в окружающую среду. Разница в температурах смеси на таких участках может достигать до 25...35 °С, что снижает качество укладки и последующего уплотнения смеси.

Помимо этого, при загрузке транспортного средства горячей смесью, при расстоянии от заслонки горячего бункера и днища кузова автосамосвала свыше 2,0 м, наблюдается гранулометрическая неоднородность асфальтобетонной смеси. Аналогичное явление наблюдается при загрузке транспорта с одной стоянки и при транспортировке на значительные расстояния. Это способствует образованию участков с разными физико-механическими свойствами покрытия. При разгрузке горячей смеси транспортным средством в бункер асфальтоукладчика, материал с более низкой температурой захватывается шнеком и распределяется в слой покрытия. Помимо этого при транспортировке на значительные расстояния наблюдается гранулометрическая неоднородность асфальтобетонной смеси, способствующая образованию участков с разными физико-механическими свойствами покрытия. Наличие таких участков способствует неравномерности достигаемой плотности, прочности и низкой деформативной способности готового покрытия, что при эксплуатации дороги приводит к снижению его работоспособности.

Для устранения отмеченных недостатков ряд зарубежных фирм применяют перегрузчики смеси из транспортных машин в бункер перегрузчика. Впервые такую машину применила фирма Roadtec (США), впоследствии их стали выпускать ведущие фирмы Германии и Швеции и в настоящее время применяют в Российской Федерации (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Применение перегрузчика горячей асфальтобетонной смеси Shuttle Buggy для устройства дорожного покрытия

Применение перегрузчика горячей смеси позволяет устранить эффект расслоения смеси при ее транспортировке и обеспечивает равномерное распределение температуры по всему объему за счет перемешивания ее в бункере шнеком. Использование такой машины позволяет также устранить контакт асфальтоукладчика с транспортными машинами при разгрузке смеси, что предотвращает удары и толчки при разгрузке смеси, способствующие неравномерности укладки смеси в покрытия.

Качество строительства дорожного покрытия нежесткого типа зависит от режимов работы асфальтоукладчика, который является ведущим механизированного звена машин при устройстве покрытия. Асфальтоукладчик не только распределяет горячую смесь по ширине полосы укладки, но и осуществляет предварительное уплотнение горячей смеси. В зависимости от режимов работы трамбующего бруса и вибрационной выглаживающей плиты коэффициент предварительного уплотнения смеси имеет разные значения. Значительное влияние на обеспечение коэффициента предварительного уплотнения оказывает температура горячей смеси.

Влияние температуры укладываемой смеси на качество предварительного уплотнения асфальтоукладчиками исследовалось А. Г. Масловым [32]. На основании проведенных исследований сделан вывод, что увеличение температуры смеси при укладке от 100 до 150 °С способствует повышению K_y и уменьшению водонасыщения. Дальнейшее повышение температуры смеси при укладке не оказывает существенного влияния на качество предварительного уплотнения. Установлено, что коэффициент предварительного уплотнения асфальтобетонной смеси зависит от режимов работы асфальтоукладчика.

Влияние режимов работы асфальтоукладчика на коэффициент предварительного уплотнения смеси представлено на рис. 5.3 [32].

Из представленных данных на рис. 5.3 видно, что степень предварительного уплотнения смеси зависит от типа смеси и скорости перемещения асфальтоукладчика [14, 32].

Анализ представленных данных на рис. 5.3 позволяет сделать вывод, что $K_{ук}$ в значительной степени зависит от типа смеси и скорости перемещения асфальтоукладчика при распределении горячей смеси с учетом работы трамбующего бруса и вибрационной плиты (табл. 5.1).

Из представленных данных видно, что при укладке смесей типа А для обеспечения высокого коэффициента уплотнения рабочая скорость асфальтоукладчика должна быть в пределах 1...2 м/мин. При укладке остальных типов смесей скорость асфальтоукладчика может быть увеличена, так как достигаемая максимальная величина $K_{ук}$ равняется 0,92...0,82 и для обеспечения требуемых показателей качества покры-

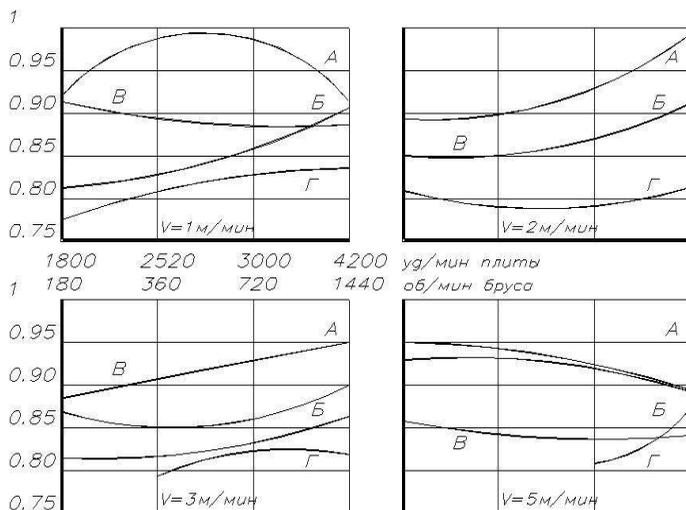


Рис. 5.3. Зависимость степени уплотнения асфальтобетонных смесей от режима работы уплотняющих органов при совместной работе трамбующего бруса и вибрационной плиты (А, Б, В, Г – тип смеси)

5.1. Зависимость степени предварительного уплотнения смеси K_y от режима работы уплотняющих органов асфальтоукладчика и типа смеси

Тип смеси	Зависимость степени предварительного уплотнения смеси K_y от рабочей скорости асфальтоукладчика, м/мин			
	1	2	3	5
А	0,98	0,94	0,93	0,92
Б	0,87	0,87	0,83	0,92
В	0,88	0,87	0,87	0,84
Г	0,83	0,88	0,82	0,82

тия требуется применение всех типов уплотняющих катков (легкий, средний, тяжелый).

В зависимости от качества укладки горячей смеси производится выбор механизированного звена уплотняющих машин, что влияет на технологию производства работ.

5.1. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ И СВОЙСТВ ГОРЯЧИХ СМЕСЕЙ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАБОТ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ СЛОЯ ПОКРЫТИЯ

Практика строительства автомобильных дорог показывает, что качество устройства дорожных покрытий нежесткого типа зависит от свойств применяемого материала, конкретных условий производства работ и погодных условий, которые влияют на темп охлаждения слоя смеси при укладке дорожного покрытия. Существующие рекомендации по определению температуры горячей смеси в зависимости от погодных условий и конструктивных параметров дорожного покрытия основаны на экспериментальных данных и не позволяют учитывать влияние температуры смеси в конкретный момент времени производства работ с учетом погодных и производственных факторов. В действительности на понижение температуры уложенной горячей смеси могут одновременно влиять несколько факторов, что способствует интенсивному охлаждению слоя покрытия.

При организации производственных процессов устройства дорожных покрытий необходимо знать продолжительность выполнения операций по укладке и уплотнению асфальтобетонных смесей, которые зависят от температурных режимов применяемых материалов. Следовательно, необходимо установить влияние каждого фактора и их общего действия на температуру смеси и на продолжительность нахождения смеси в заданном температурном интервале с учетом нестационарности тепловых процессов в горячей асфальтобетонной смеси.

В зависимости от условий производства работ по устройству асфальтобетонных покрытий применяются разные технологические схемы укладки горячих смесей. При строительстве автомобильных дорог с увеличенной шириной дорожного покрытия, а также при реконструкции и ремонте дорожных покрытий возникает потребность в укладке асфальтобетонных смесей смежными полосами. Эксплуатация таких покрытий показала, что в зоне стыка сопряженных полос часто возникают дефекты в виде разрушения на стыке сопряженных полос. Образование дефектов в зоне стыка сопряженных полос покрытия связано с нарушением технологии при устройстве сопряженных полос в зоне стыка, и как правило, с нарушением температурных режимов асфальтобетонной смеси при укладке и уплотнении полос покрытия.

Температурные режимы горячей смеси зависят от применяемого материала, типа смеси и марки вяжущего. В зависимости от материала и условий производства работ температура смеси при укладке и уплотнении может иметь разные значения, что необходимо учитывать при устройстве дорожного покрытия. С учетом принятой технологии

устройства покрытия применяются разные схемы укладки асфальтобетонной смеси, что влияет на длину захватки при укладке и уплотнении смеси. Существующими рекомендациями, в зависимости от температуры воздуха, установлена длина захваток при укладке горячей смеси. Однако при определении длины захватки при укладке и уплотнении асфальтобетонных горячих смесей необходимо учитывать условия производства работ, влияющих на время нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале.

5.2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ УКЛАДКИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Устройство дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей начинается с момента распределения асфальтобетонной смеси на подготовленное основание и ведется непрерывным потоком с использованием машин, обеспечивающих укладку и предварительное уплотнение смеси в слое покрытия. В процессе работы асфальтоукладчик обеспечивает заданные параметры слоя дорожной одежды и укладывает смесь при температуре смеси, доставляемой к месту производства работ. Существующими рекомендациями определена температура горячей смеси при укладке асфальтобетонных смесей в зависимости от типа смеси и марки битума [6, 42, 43]. Предложены рекомендации по времени укладки и уплотнения слоя покрытия в зависимости от температуры воздуха, скорости ветра и толщины укладываемого слоя смеси [14].

Анализ принятых рекомендаций по продолжительности работ с горячей асфальтобетонной смесью показал, что диапазоны изменения входящих величин довольно существенны и требуют уточнения.

В зависимости от ширины укладываемой полосы покрытия, а также конкретных условий производства работ, могут быть использованы разные методы организации работ по распределению асфальтобетонной смеси: одним или несколькими асфальтоукладчиками [6]:

- при ширине полосы от 1,0 до 12,0 м укладку ведут одним асфальтоукладчиком;
- при ширине укладки от 9 м и более принимают несколько асфальтоукладчиков.

Существующие конструкции асфальтоукладчиков, при наличии уширителей, позволяют увеличивать ширину укладываемой полосы асфальтобетонной смеси. В то же время стандартная ширина укладки асфальтоукладчика рассчитана на укладку смеси шириной 3,5...3,75 м. С учетом условий производства работ устройство многополосных покрытий можно осуществлять отдельными полосами, при незначитель-

ном (до 0,4 км/смену) темпе строительства, а также со смещением асфальтоукладчика с одной полосы на другую. При высоких темпах устройства покрытия, а также значительной ширине укладка горячей смеси может производиться несколькими асфальтоукладчиками. В этом случае они располагаются уступом относительно друг друга при соблюдении определенной дистанции между ними. Такая организация процесса укладки асфальтобетонной смеси обеспечивает высокий темп строительства при условии обеспечения материалом.

Известно, что требуемых характеристик асфальтобетона при устройстве покрытия можно достичь при условии соблюдения температурных режимов в процессе уплотнения, что и регламентируется нормативными документами [46, 49].

Независимо от принятой организации работ по устройству дорожного покрытия при укладке асфальтобетонной смеси происходит понижение температуры смеси по времени, что оказывает влияние на ее свойства. После распределения горячей смеси тепло от уложенного слоя смеси передается нижележащему слою дорожной одежды и в окружающую среду, что приводит к неравномерности распределения температуры по толщине уложенного слоя [15, 39]. Аналогичные потери тепла происходят и на боковой поверхности уложенного слоя покрытия, что способствует повышению интенсивности охлаждения горячей смеси в зоне стыка уложенной полосы покрытия. Поэтому при строительстве многополосных покрытий необходимо обеспечить температурные режимы асфальтобетонной смеси не только в слое покрытия, но и в зоне стыка укладываемых полос, зависящие от свойств применяемого материала и условий производства работ.

Существующими рекомендациями по устройству асфальтобетонных покрытий установлены оптимальные длины сопряженных полос при укладке горячей смеси, обеспечивающих качественный продольный шов сопряжения двух полос, зависящих от температуры окружающего воздуха [6, 14]. Установлено, что темп охлаждения смеси зависит не только от температуры воздуха, но и других параметров (толщина слоя, скорость ветра, теплофизические характеристики смеси и др.).

Анализ существующих рекомендаций по определению длины захватки при укладке горячей асфальтобетонной смеси показал, что они не полностью учитывают факторы, влияющие на охлаждение горячей смеси при укладке в дорожное покрытие. Длина захватки, при прочих равных условиях производства работ, зависит от рабочей скорости укладки и продолжительности нахождения смеси в заданном температурном интервале, зависящем от свойств смеси и условий производства работ, что не учитывается существующими рекомендациями.

Многочисленными экспериментальными исследованиями доказано, что качество устройства покрытия зависит от температуры укладываемой смеси. Поэтому понижение температуры горячей смеси в зоне сопряжения полос покрытия ниже предельной, за счет низкой температуры смеси при укладке или увеличенной длины захватки приводит к снижению характеристик асфальтобетона при уплотнении покрытия (прочности, плотности, водонепроницаемости), что приводит к разрушению дорожного покрытия в процессе эксплуатации (рис. 5.4).

Для недопущения образования дефекта в зоне стыка сопряженных полос предусматривается дополнительный прогрев слоя смеси первой полосы с помощью различных разогревателей.

На практике, для нагрева края уложенной ранее полосы смеси, накладывают край сопряженного слоя полосы с последующим устраниением горячей смеси на стыке [1].

Наложение горячей смеси на ранее уложенную полосу покрытия не всегда дает положительный эффект, поскольку неизвестно до какой температуры прогревается ранее уложенный слой покрытия. Следует заметить, что при укладке сопряженных полос наблюдается охлаждение одного и нагрев другого слоя покрытия, которые протекают в течение определенного времени. Это указывает на то обстоятельство, что в зависимости от принятой организации работ по укладке горячей смеси процесс уплотнения необходимо выполнять через определенный промежуток времени, а не сразу после укладки горячей смеси сопряженной полосы покрытия [10].

Экспериментально установлено, что наиболее интенсивно процесс охлаждения горячей смеси после ее укладки на нижележащий слой основания происходит в зависимости от конкретных условий производства работ, в пределах незначительного промежутка времени. За этот промежуток времени происходят значительные потери тепла горячей смесью, связанные с протеканием нестационарных тепловых



Рис 5.4. Дефект покрытия в зоне стыка сопряженных полос

процессов внутри уложенного слоя смеси, способствующие понижению температуры слоя смеси на 10...30 °С в зависимости от условий производства работ. Анализ распределения температуры в слое горячей смеси показал, что наиболее интенсивно температура горячей смеси изменяется в краевых точках слоя, характерных для боковой поверхности уложенного слоя горячей смеси полосы покрытия. В процессе эксплуатации дорожных покрытий нежесткого типа такие участки покрытия являются наиболее слабым местом покрытия и подвергаются интенсивному разрушению под влиянием погодных условий.

При устройстве дорожных покрытий применяются разные способы организации укладки асфальтобетонной смеси:

1. Распределение смеси осуществляется за один проход асфальтоукладчика на всю ширину проезжей части (рис. 5.5). При такой организации производства работ по укладке горячей смеси продольный шов отсутствует.

2. Распределение смеси укладкой одной полосы асфальтобетонной смеси асфальтоукладчиком в пределах сменной захватки. Следующие полосы укладываются через некоторый промежуток времени (рис. 5.6). Такой способ устройства покрытия находит применение в случае производства работ по уширению покрытия при ремонте, реконструкции, а также при недостаточной производственной мощности асфальтобетонных заводов. В этом случае возможно движение транспортного потока по параллельной полосе. В этом случае возникает продольный шов в зоне стыка сопряженных полос покрытия. Для обеспечения качества работ необходимо прогревать край асфальтобетона ранее уложенной полосы. Нарушение температурных режимов при производстве работ в зоне стыка сопряженных полос способствует образованию дефектов на поверхности покрытия, которые возникают в процессе эксплуатации автомобильной дороги.



Рис. 5.5. Укладка горячей асфальтобетонной смеси одним асфальтоукладчиком при строительстве автомобильной дороги с увеличенной шириной полосы движения



Рис. 5.6. Укладка части покрытия одним асфальтоукладчиком

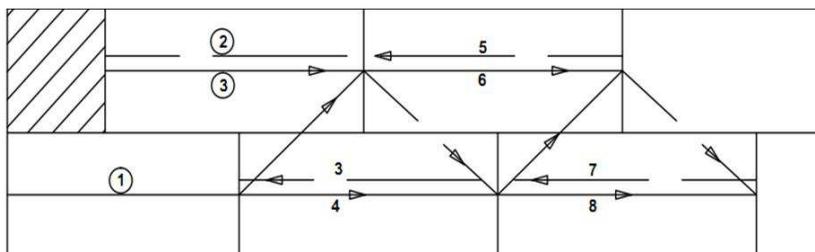


Рис. 5.7. Технологическая схема укладки асфальтобетонной смеси одним асфальтоукладчиком с перемещением его с одной полосы на другую

3. Распределение смеси одним асфальтоукладчиком при перемещении его в процессе устройства покрытия с одной полосы на другую (рис. 5.7). Асфальтобетонная смесь укладывается в пределах захватки, длина которой зависит от температуры воздуха. Принято считать, что рекомендуемая длина захватки обеспечивает температуру асфальтобетонной смеси в зоне стыка сопряженных полос в соответствии с температурными режимами применяемых смесей. Такая технология устройства покрытия применяется при укладке смеси на всю ширину покрытия при строительстве, реконструкции и ремонте дороги. Особенностью данной технологии является образование не только продольных швов, но и поперечных.

4. Распределение смеси двумя и более асфальтоукладчиками, смещенными в плане относительно друг друга на некоторое расстояние (рис. 5.8). Данный способ укладки применяется при устройстве многополосных дорожных покрытий на всю ширину проезжей части, когда ширина укладки одним асфальтоукладчиком недостаточна. При такой технологии образуется только продольный шов.

Каждая из рассмотренных технологий устройства покрытия имеет свои особенности, которые оказывают влияние на срок службы дорожного покрытия в процессе эксплуатации.



Рис. 5.8. Укладка асфальтобетонной смеси двумя асфальтоукладчиками

В случае, когда стыки расположены под сплошной полосой покрытия нагрузка на них минимальна, и дефект шва возникает значительно реже. Если же ширина полосы движения совпадает с шириной полосы укладки, то при перестроении транспортных средств из одной полосы в другую происходит взаимодействие колеса с покрытием в зоне стыка полос и покрытие в этом месте подвержено более интенсивному разрушению. Наиболее неблагоприятным вариантом является случай, когда продольный шов находится непосредственно на полосе движения транспортного потока. Это возникает в том случае, когда количество полос движения не совпадает с количеством полос укладки асфальтоукладчиком. Например, когда четыре полосы движения, а при устройстве дорожного покрытия уложено три полосы. В этом случае осевая нагрузка от транспортных средств передается на стык сопряженных полос покрытия, что значительно понижает их срок эксплуатации. При одновременной работе двух асфальтоукладчиков монолитность продольного шва обеспечивается при смещении одной машины относительно другой на расстояние 25...50 м (рис. 5.9). При такой технологии устройства покрытия в процессе укатки первой полосы вальцы катка не должны приближаться более чем на 0,1 м к кромке полосы сопряжения, вторая полоса укладки смеси дополнительно прогревает кромку первой и сохраняет температуру смеси на стыке более 100 °С. Уплотнение катками смеси сопределной полосы следует начинать по продольному шву сопряжения [1, 49].

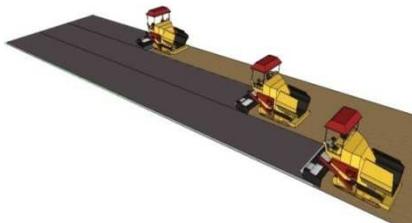


Рис. 5.9. Технология укладки асфальтобетонной смеси несколькими асфальтоукладчиками

Каждая из рассмотренных технологий укладки асфальтобетонной смеси при устройстве покрытия имеет свои особенности, которые влияют на работоспособность покрытия в процессе эксплуатации дороги. Наличие продольных швов на дорожном покрытии влияет на срок службы покрытия. В зависимости от расположения стыков сопряженных полос, при организации движения, они могут располагаться под сплошной полосой покрытия. В этом случае нагрузка на стык полос минимальна и дефект шва возникает значительно реже и в меньшей степени влияет на движение транспортных средств. Когда ширина полосы движения совпадает с шириной полосы укладки, то при перестроении транспортных средств происходит взаимодействие колеса с покрытием в зоне шва и под действием нагрузки происходит более интенсивное разрушение покрытия. Наиболее неблагоприятным вариантом является случай, когда продольный шов находится непосредственно на полосе движения транспортного потока. Это возникает в том случае, когда количество полос движения не совпадает с количеством полос укладки асфальтоукладчиком. Осевая нагрузка от транспортных средств передается на стык сопряженных полос покрытия, что значительно понижает срок эксплуатации таких покрытий.

Установлено [15], что после укладки горячей смеси происходит интенсивное охлаждение слоя покрытия, которое характеризуется сравнительно высоким темпом охлаждения. Как отмечалось ранее, характер охлаждения горячей смеси относится к нестационарным тепловым процессам и подчиняется экспоненциальной зависимости. После распределения горячей смеси по ширине полосы покрытия тепло передается нижележащему слою дорожной одежды и в окружающую среду, что приводит к неравномерности распределения температуры по толщине уложенного слоя. Аналогичные потери тепла происходят и на боковой поверхности уложенного слоя покрытия.

При одновременном устройстве покрытия с несколькими полосами движения, укладка горячей смеси осуществляется за счет смещения асфальтоукладчиков относительно друг друга на определенное расстояние, зависящее от скорости укладки и времени между распределением смеси в сопрягаемых полосах покрытия. При этом, в первой полосе покрытия охлаждение горячей асфальтобетонной смеси происходит не только на поверхности слоя, но и на боковых его поверхностях. Данное обстоятельство оказывает влияние на обеспечение температурных режимов при укладке смеси а, следовательно, и на качество работ по устройству стыков сопряженных полос покрытия. Интенсивность охлаждения смеси на боковой поверхности слоя зависит от продолжительности между укладками смежных полос покрытия. Следова-

тельно, понижение температуры горячей смеси в зоне стыка уже уложенных полос ниже предельной приводит к снижению качественных показателей асфальтобетона при его уплотнении в покрытии, что в дальнейшем приводит к разрушению дорожного покрытия в процессе эксплуатации.

Для устранения данного дефекта рассматриваемой технологией производства работ предусматривается перед укладкой второй полосы дорожного покрытия осуществлять прогрев сопряженного слоя смеси первой полосы с помощью различных разогревателей. Возможно также накладывать край слоя горячей смеси следующей полосы на предыдущий, что позволяет повысить температуру смеси на стыке при условии высокой температуры воздуха [1].

Следует заметить, что применение разогревателей асфальтобетона требует использования дополнительного оборудования и, соответственно, ведет к увеличению стоимости работ механизированного звена. Наложение горячей смеси на сопрягаемую полосу покрытия не всегда дает ожидаемый эффект, т.к. ранее уложенный слой покрытия не прогревается до оптимальных температур [9, 10].

Выбор способа укладки горячей смеси по ширине покрытия зависит не только от технических характеристик асфальтоукладчика, но и возможности приготовления и доставки заданных объемов асфальтобетонных смесей к месту производства работ. В соответствии с типоразмерами асфальтобетонных заводов производительность их находится в пределах от 25 до 400 т/ч. Согласно технологии устройства покрытия асфальтоукладчик должен непрерывно вести процесс распределения и укладки горячей смеси и при ее недостатке он вынужден прекращать работу. Современные асфальтоукладчики имеют достаточно высокую производительность и диапазон рабочих скоростей, находящийся в пределах 0,8...21,8 м/мин [6].

Однако на практике скорости укладки незначительны из-за невозможности обеспечения непрерывной доставки горячей асфальтобетонной смеси к месту производства работ. Кроме того, время укладки и уплотнения смеси определяется температурой слоя покрытия, которая зависит от темпа охлаждения горячей смеси. С учетом этого определяется длина захватки для уплотняющих машин, в пределах которой, учитывая прочностные характеристики асфальтобетона, принимается звено уплотняющих машин.

На основании этого можно сделать вывод, что при устройстве стыков сопряженных полос необходимо осуществлять постоянный контроль за обеспечением температурных режимов асфальтобетонной смеси.

В зависимости от конструктивных параметров дорожного покрытия и принятой схемы организации работ по устройству покрытия длина захватки, с учетом температурных режимов горячей смеси, может быть разной. Длина захватки при укладке горячей смеси с применением первой, второй и четвертой схем зависит от времени соответствия температуры принятым интервалам смеси и рабочей скорости асфальтоукладчика. Применение третьей схемы организации работ по устройству покрытия представляет определенные сложности, поскольку длина захватки зависит от многих факторов.

При одновременном устройстве покрытия с несколькими полосами движения, укладка горячей смеси осуществляется за счет смещения асфальтоукладчиков относительно друг друга на определенное расстояние, зависящее от скорости укладки и временем между распределением смеси в сопрягаемых полосах покрытия. При этом в первой полосе покрытия, охлаждение горячей асфальтобетонной смеси происходит не только на поверхности слоя, но и на боковых поверхностях слоя, что влияет на температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси, а следовательно и качество работ по устройству стыков сопряженных полос покрытия. Интенсивность охлаждения смеси на боковой поверхности слоя зависит от конкретных условий производства работ и продолжительности между укладками смежных полос покрытия.

Выбор организации работ по устройству покрытия зависит не только от возможностей механизированного звена машин, но и возможности доставки заданных объемов асфальтобетонных смесей [36, 37].

Современные асфальтоукладчики имеют высокую производительность, диапазон рабочих скоростей находится в пределах от 0,8 до 21,8 м/мин. Однако, на практике, скорости укладки асфальтобетонной смеси незначительны, что связано с возможностями непрерывной доставки горячей смеси.

При укладке асфальтобетонной смеси происходит не только распределение смеси по ширине укладываемой полосы покрытия, но и ее предварительное уплотнение. В зависимости от рабочих режимов асфальтоукладчика коэффициент предварительного уплотнения горячей смеси находится в пределах от 0,83 до 0,96 [14, 32]. При этом принято считать, что асфальтобетонная смесь равномерно уплотняется по всей ширине уложенного слоя. Однако измерения коэффициента предварительного уплотнения горячей смеси по ширине полосы укладки показали, что наблюдается неравномерное распределение коэффициента предварительного уплотнения смеси, что может служить причиной образования дефектов покрытия в зоне стыка сопряженных полос.



Рис. 5.10. Распределение коэффициента $K_{\text{пред}}$ горячей смеси по ширине укладки слоя горячей асфальтобетонной смеси:
 I – скорость укладки 1,4 м/мин; 2 – 2,0 м/мин
 (температура воздуха 15 и 22 °С, толщина слоя укладки 0,09 м)

На рисунке 5.10 представлены полученные результаты измерения коэффициента предварительного уплотнения при укладке горячей смеси дорожного покрытия шириной 7,5 м за один проход асфальтоукладчика Marini MF 805 при работе трамбующего бруса и вибрационной выглаживающей плите [12].

Из представленных данных на рис. 5.10 видно, что с увеличением расстояния от оси покрытия наблюдается понижение $K_{\text{пред}}$. Аналогичные результаты были ими получены и при укладке полосы покрытия шириной 3,5 м асфальтоукладчиком производства РФ. Причиной снижения коэффициента предварительного уплотнения смеси может быть пониженная температура смеси по ширине полосы слоя смеси.

Исследования, проведенные в США и Европе показывают, что основной причиной возникновения дефектов является недостаточная плотность и избыточная пористость асфальтобетона в зоне швов сопряжения. Так, в работах [50, 51] отмечается, что даже при проведении специальных мероприятий по повышению надежности швов сопряжения, плотность асфальтобетона в зоне швов практически всегда оказывается ниже, чем в основном покрытии [52].

В зависимости от принятой технологии устройства дорожных покрытий применяются разные схемы укладки горячей смеси: одним асфальтоукладчиком последовательно от одной полосы к другой или с переходом с полосы на полосу, при этом длина полосы ограничивается с учетом температурных режимов смеси, а также одновременно укладывать полосы горячей смеси несколькими укладчиками, смещенными относительно друг друга на определенное расстояние.

При последовательной укладке полос покрытия одним укладчиком температура горячей смеси слоя, в том числе край полосы, охлаж-

дается во времени за счет отдачи тепла в окружающую среду и ниже-расположенный слой дорожной одежды. При этом интенсивность охлаждения края полосы происходит более интенсивно за счет отдачи на захватке тепла через боковую поверхность полосы. Для обеспечения температурных режимов на стыке сопряжения смежных полос технологией работ предусматривается дополнительный прогрев слоя смеси перед укладкой параллельной полосы покрытия с использованием разогревателей асфальтобетона (КР-53А или КР-10), а также за счет температуры слоя горячей смеси смежной полосы покрытия. С этой целью при укладке смежной полосы край новой полосы накладывают на уложенный ранее слой полосы и за счет теплопередачи от слоя горячей смеси происходит нагрев асфальтобетонной смеси края ранее уложенного слоя смеси.

При использовании технологии распределения горячей смеси с полосы на полосу одним асфальтоукладчиком снижается производительность применяемого звена машин, поскольку асфальтоукладчик вынужден перемещаться с одной полосы на другую, теряя время на перемещение холостым ходом. При одновременном устройстве смежных полос покрытия несколькими асфальтоукладчиками они смещаются относительно друг друга на определенное расстояние. Такое смещение укладчиков смеси связано с условиями обеспечения безопасности работы уплотняющих. За счет разницы во времени укладки горячей смеси на смежных полосах происходит понижение температуры горячей смеси в месте сопряжения полос покрытия. В зависимости от условий производства работ разница в температуре асфальтобетонной смеси, уложенной в смежные полосы покрытия, может достигать значительных значений. Это способствует достижению низкого коэффициента уплотнения, снижения прочности асфальтобетона, повышенному водонасыщению в зоне сопряжения смежных полос покрытия и преждевременному разрушению дорожного покрытия в процессе эксплуатации автомобильной дороги.

Динамика развития разрушения покрытия в зоне стыка полос представлена на рис. 5.11. Для обеспечения требуемой плотности асфальтобетона в зоне стыка полос, их смещение относительно друг друга должно быть обосновано с учетом обеспечения температурных режимов асфальтобетонной смеси.

При уплотнении сопряженных полос вальцы катка не должны приближаться более чем на 0,1 м к кромке сопряжения. Уплотнение следующей полосы необходимо начинать по продольному сопряжению. Сопряжение должно быть ровным и плотным. Расстояние между асфальтоукладчиком и дорожными катками должно быть минимальным» [6, 44].



Рис. 5.11. Динамика развития разрушения покрытия в зоне стыка полос дорожного покрытия

Для обеспечения безопасности работы машин при строительстве асфальтобетонных покрытий принимают расстояние, в зависимости от базы катков и температуры воздуха, между асфальтоукладчиком и катками в пределах от 10 до 30 м [6].

Длина укладываемой полосы асфальтобетонной смеси зависит от температурных режимов горячей смеси и устанавливается с учетом рабочей скорости укладчика и времени охлаждения смеси в заданных температурных интервалах.

5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ

Для расчетов температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий нежесткого типа разра-

ботаны программы, которые позволяют рассчитать температуру асфальтобетона в покрытии с момента укладки горячей смеси. Принято считать, что температура горячей смеси после ее укладки на основе равномерно распределяется по ширине полосы покрытия. С учетом этого разработанные программы рассчитаны для определения температуры асфальтобетона в одной плоскости (основание – верхний слой покрытия). Анализ результатов исследований показал, что распределение плотности, а также коэффициента уплотнения асфальтобетона, по ширине полосы покрытия неравномерно [12].

В зависимости от принятой технологии устройства дорожного покрытия укладка горячей смеси может производиться разными способами.

При последовательной укладке полос покрытия одним укладчиком температура горячей смеси слоя, в том числе край полосы, охлаждается во времени за счет отдачи тепла в окружающую среду и нижерасположенный слой дорожной одежды. При этом охлаждение края полосы происходит более интенсивно за счет отдачи тепла через боковую поверхность полосы. Для обеспечения температурных режимов на стыке сопряжения смежных полос технологией работ предусматривается дополнительный прогрев слоя смеси перед укладкой параллельной полосы покрытия с использованием разогревателей асфальтобетона, а также за счет температуры слоя горячей смеси смежной полосы покрытия.

При одновременном устройстве смежных полос покрытия несколькими асфальтоукладчиками для обеспечения безопасности работы уплотняющих машин укладчики горячей смеси смещаются относительно друг друга на определенное расстояние. Такое смещение, относительно друг друга, укладчиков смеси связано с условиями обеспечения безопасности работы уплотняющих машин и возможности уплотнения горячей смеси на уложенной полосе покрытия для обеспечения требуемой плотности материала с учетом температурных режимов горячей смеси. За счет разницы во времени укладки горячей смеси смежных полос происходит понижение температуры горячей смеси в зоне стыка полос покрытия.

В зависимости от условий производства работ разница в температурах асфальтобетонной смеси, уложенной в смежные полосы покрытия, может достигать значительных значений. Это способствует достижению низкого коэффициента уплотнения, снижения прочности асфальтобетона, повышенному водонасыщению в зоне сопряжения смежных полос покрытия и преждевременному разрушению дорожного покрытия в процессе эксплуатации автомобильной дороги.

Отсутствие зависимости по расчету температуры горячей смеси, с учетом понижения температуры в зоне стыка сопряженных полос, не позволяет конкретизировать продолжительность технологических процессов строительства дорожных покрытий нежесткого типа. Для организации процессов укладки и уплотнения, соблюдая температурные интервалы смеси, необходимо определять ее температуру, учитывая производственные факторы.

С целью исследования влияния производственных факторов на процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси при устройстве многополосных покрытий рассмотрены математические модели, позволяющие исследовать влияние разных факторов на температурные режимы горячих смесей при устройстве многополосных дорожных покрытий с учетом принятой технологии. Полученные результаты позволяют обосновать технологические режимы при устройстве многополосных дорожных покрытий нежесткого типа с учетом погодных условий и принятой технологии работ.

5.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ

В зависимости от технологии устройства дорожного покрытия укладка горячей асфальтобетонной смеси производится разными способами: отдельными, со смещением асфальтоукладчика с одной полосы на другую или несколькими укладчиками одновременно.

Независимо от этого горячая смесь, уложенная в полосу дорожного покрытия с течением времени охлаждается. С целью исследования тепловых процессов на стыке сопряженных полос при укладке горячей смеси в дорожное покрытие, разработана математическая модель, позволяющая моделировать тепловые процессы в слое покрытия [31].

Охлаждение асфальтобетонной смеси описывается дифференциальным уравнением теплопроводности без внешнего источника тепла, которое позволяет установить зависимость между температурой, временем и координатами в объеме материала [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T, \quad (5.1)$$

где Δ – оператор Лапласа; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; $\partial T/\partial \tau$ – температурное поле покрытия.

При разработке математической модели приняты следующие допущения:

– температура асфальтобетонной смеси в начальный момент времени постоянна, т.е. $T(x, y, 0) = T_0 = \text{const}$;

- коэффициент температуропроводности асфальтобетонной смеси постоянен и не зависит от температуры смеси;
 - внутренние источники тепла в слое асфальтобетона отсутствуют.
- С учетом принятых допущений уравнение модели двумерного теплообмена имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (5.2)$$

начальные условия имеют вид:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y),$$

Краевые условия первого рода имеют вид:

$$T(0, y, \tau) = T(y),$$

$$T(L, y, \tau) = T(y),$$

(5.3)

$$T(x, 0, \tau) = T_{\text{воздуха}},$$

$$T(x, h, \tau) = T_{\text{грунта}}.$$

При решении уравнения используется метод сеток. Заменяя производные конечными разностями в соответствии с шаблоном, выражаем неизвестные значения температуры во времени:

$$T_{i,j,k+1} = T_{i,j,k} + \Delta \tau \left(\frac{T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} \right). \quad (5.4)$$

Устойчивость разностной схемы обеспечивается при значении:

$$\frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} a \leq \frac{1}{2}. \quad (5.5)$$

Так как функция зависит от двух переменных, то используем сетку прямоугольного типа (рис. 5.12). На оси абсцисс откладываем отрезок длиной L (ширина полосы укладки) и делим его на n равных частей. По оси ординат отложим значения времени τ через равные промежутки. Проводим через полученные узлы на осях ординат прямые, параллельные координатным осям, которые образуют прямоугольную сетку. Значения T в узлах, лежащих на осях координат и на прямой, параллельной оси ординат и расположенной от нее на расстоянии L , находится из начального и граничных условий.

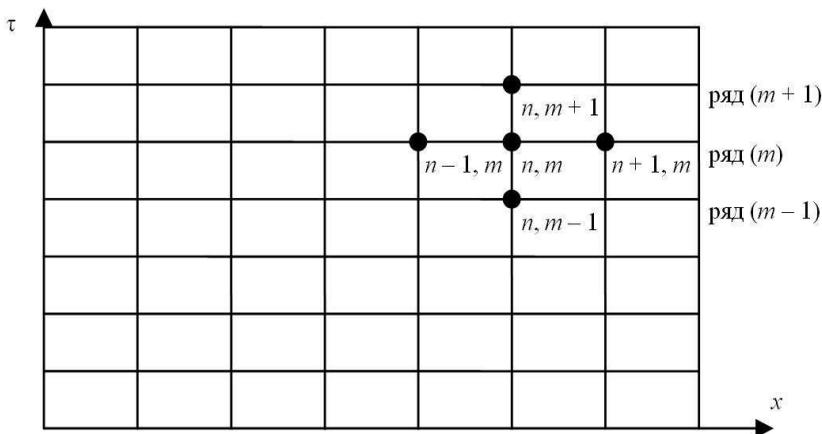


Рис. 5.12. Схема расчета по сетке прямоугольного типа

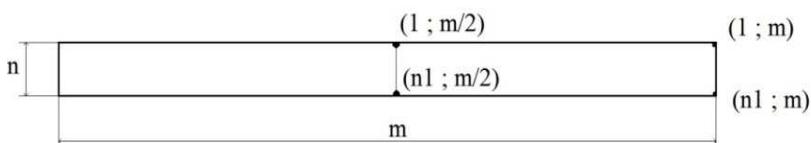


Рис. 5.13. Расчетная схема для определения температуры по ширине полосы покрытия

Задача приближенного численного интегрирования по методу секток состоит в нахождении приближенного значения функции T в каждом узле сетки. Данная программа позволяет определять температуру горячей смеси в любой точке полосы покрытия с учетом временного фактора. Расчетная схема представлена на рис. 5.13.

Результаты расчета температуры горячей смеси по ширине полосы, при начальной температуре смеси равной $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлены в табл. 5.2 и в виде графика на рис. 5.14.

Из графика видно, что температура смеси охлаждается неравномерно относительно оси и края полосы, причем с течением времени разница в температурах становится существенной.

Для установления общей закономерности изменения температуры в зоне стыка полосы покрытия представим данные табл. 5.2 в относительных величинах, принимая за единицу температуру оси полосы покрытия. Обозначим данную величину через коэффициент влияния ширины зоны стыка полосы $K_{\text{ш}}$.

5.2. Результаты расчета температуры в разных точках покрытия

Время, мин	Температура смеси, °С			
	Точка 1 (1; m)	Точка 2 (n1; m)	Точка 3 (1; m/2)	Точка 4 (n1; m/2)
0	160	160	160	160
5	138,47	139,57	148,87	150
10	121,7	124,25	139,45	142
15	108,44	112,51	131,42	136
20	97,8	103,34	124,52	131
25	89,15	96,03	118,55	128
30	82,03	90,11	113,34	125
35	76,1	85,24	108,77	122
40	71,12	81,18	104,74	120

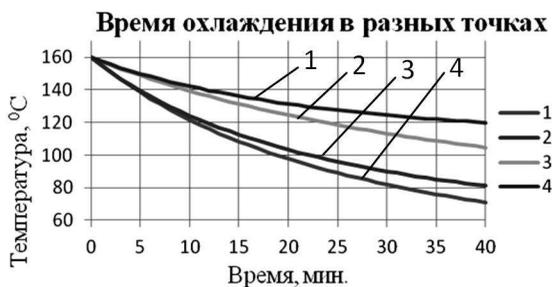


Рис. 5.14. Зависимость температуры смеси в зоне стыка полосы от времени:

- 1 – температура смеси по оси полосы в верхней части покрытия;
 2 – в нижней части слоя по центру полосы; 3 – в зоне сопряженных полос
 в верхней точке стыка слоев; 4 – в нижней части слоя

На рис. 5.14 представлено сравнение изменения температуры в зоне стыка полосы в верхней и нижней точках покрытия. Краевые участки полосы с пониженной температурой являются продольным швом покрытия.

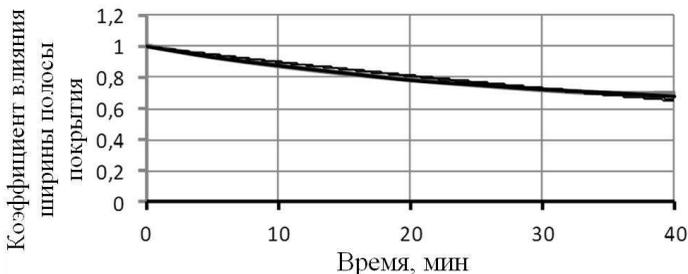


Рис. 5.15. Изменение температуры горячей смеси в зоне стыка полосы покрытия от времени

Из графика видно, что температура смеси охлаждается неравномерно относительно оси и края полосы, причем с течением времени разница в температурах становится существенной. Для установления общей закономерности изменения температуры в зоне стыка полосы покрытия представим данные табл. 5.2 в относительных величинах, принимая за единицу температуру оси полосы покрытия. Обозначим данную величину через коэффициент влияния ширины зоны стыка полосы $K_{ш}$.

На рисунке 5.15 представлено сравнение изменения температуры в зоне стыка полосы в верхней и нижней точках покрытия. Краевые участки полосы с пониженной температурой являются продольными швами покрытия.

Из представленных данных видно, что изменение температуры происходит по всей толщине слоя покрытия и общем виде закономерность имеет вид:

$$K_{ш} = e^{-0,03\tau}, \quad (5.6)$$

где τ – время, мин. Коэффициент корреляции 0,96.

5.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ

С целью уточнения полученных результатов моделирования распределения температуры горячей смеси по ширине покрытия в производственных условиях были проведены измерения температуры по ширине полосы покрытия.

С помощью тепловизионной камеры (testo 880) производилось измерение температуры асфальтобетонной смеси на разных участках укладываемого покрытия. На рисунке 5.16 представлено изображение



Рис. 5.16. Съемка тепловизионной камерой температуры асфальтобетона при устройстве покрытия

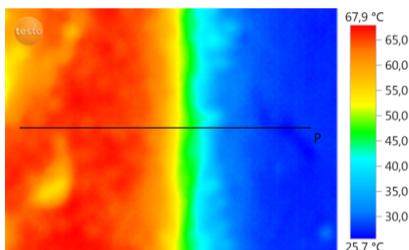


Рис. 5.17. Распределение температуры асфальтобетонной смеси по ширине полосы

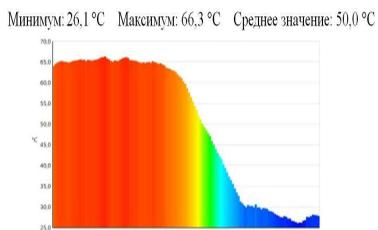


Рис. 5.18. Графический анализ результатов съемки

и результаты измерения температуры при укладке и уплотнению слоя горячего асфальтобетона. Съемка производилась при укладке верхнего слоя покрытия на автомобильной дороге Пенза – Тамбов.

Результаты измерения подтверждают данные, полученные при моделировании охлаждения температуры асфальтобетонной смеси по ширине полосы покрытия (рис. 5.17). Следовательно, при укладке горячей асфальтобетонной смеси температура по ширине полосы покрытия распределяется неравномерно. Крайняя часть покрытия охлаждается более интенсивно и при соответствующих условиях производства работ приводит к появлению зон с пониженной температурой асфальтобетона (рис. 5.18).

6. ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С УВЕЛИЧЕННОЙ ШИРИНОЙ ОДНИМ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОМ

Строительство дорожных покрытий нежесткого типа производится звеном машин, состоящим из асфальтоукладчика, осуществляющего распределение и предварительное уплотнение асфальтобетонной смеси и звеном катков, выполняющих операцию уплотнения горячей смеси в установленных температурных интервалах.

При строительстве новых, а также при реконструкции автомобильных дорог, в зависимости от условий производства работ и производственных возможностей асфальтобетонных заводов по производству горячей асфальтобетонной смеси, при ширине полосы от 1,0 до 12,0 м укладка горячей смеси может выполняться одним асфальтоукладчиком (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Технологический процесс строительства покрытия нежесткого типа

Установлено, что требуемые показатели качества уплотнения (плотность, водонепроницаемость, коэффициент уплотнения) могут быть получены при определенной температуре, зависящей от вяжущего материала. Повышение температуры смеси выше максимального значения приводит к снижению плотности уплотняемой смеси. Это связано с тем, что при высоких температурах битум обладает свойствами жидкости и имеет малую клеящую способность. Под действием нагрузки от рабочего органа машины частицы смеси сжимаются и вытесняют битум в зонах контакта. При снятии нагрузки пленка вяжущего восстанавливает первоначальную толщину, что приводит к уменьшению получаемой плотности смеси. Вести процесс уплотнения катками при такой температуре с существующими параметрами практически неэффективно из-за недостаточной деформативной способности асфальтобетонных смесей. Применение катков с малыми линейными давлениями является нерациональным ввиду незначительного времени их использования. Температура смеси оказывает значительное влияние на качество покрытия. Поэтому температура укладки и уплотнения регламентирована в зависимости от марки битума и должна иметь значения, приведенные в табл. 6.1 [46, 48, 49].

Известно, что для достижения требуемых показателей качества уплотнения асфальтобетона (плотность, коэффициент уплотнения, водонепроницаемость) необходимо иметь не только заданную температуру горячей смеси, но и время действия требуемой нагрузки на уплотняемый материал [11, 29, 48].

Продолжительность укладки и уплотнения горячей смеси зависит от теплофизических свойств смеси, влияния погодных условий строительства и конструктивных параметров дорожного покрытия и характеризуется температурой укладки горячей смеси и температурой окон-

6.1. Влияние марки битума на температуру укладки смеси

Асфальто-бетонные смеси	Температура смеси при укладке на марках битума, °С			
	40/60	60/90	90/130	130/200
Горячая смесь	150...160	145...150	140...150	120...130
Горячая смесь с ПАВ	130...140	125...135	120...130	100...110
Горячая смесь на ПБВ	170...180	165...175	160...170	140...150

чания уплотнения, ниже которой достичь требуемых показателей уплотнения практически невозможно.

Существующие рекомендации по температуре окончания уплотнения покрытия ориентированы на тип смеси без учета марки вяжущего [40, 48].

В то же время образование связей между минеральным материалом в асфальтобетоне осуществляется за счет вязкости битума, зависящей от температуры. Поэтому температура окончания уплотнения, как при укладке, должна определяться не только типом смеси, но и маркой битума. Исследованиями Н. В. Горельшева установлено, что асфальтобетонные смеси, в зависимости от марки битума, имеют границы эффективного уплотнения и снижение температуры уплотнения за пределы нижней температурной границы не дают эффекта при уплотнении.

Поэтому при определении продолжительности устройства покрытия нежесткого типа необходимо учитывать температуру при укладке горячей смеси и окончании уплотнения с учетом типа смеси и марки битума. Продолжительность строительства покрытия определяется темпом охлаждения слоя горячей смеси и зависит от толщины укладываемого слоя покрытия, температуры смеси при укладке, погодноклиматических условий, теплофизические свойства и применяемого звена машин. В зависимости от принятой конструкции дороги дорожное покрытие может устраиваться в один или два слоя, что влияет на продолжительность работ по их устройству.

6.1. РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УКЛАДКИ

Температура горячих асфальтобетонных смесей при отгрузке к месту укладки горячей смеси зависит от применяемого вяжущего и находится в пределах 160...110 °С [40]. С учетом потерь тепла в окружающую среду при транспортировке смеси температура понижается на определенную величину в зависимости от дальности и способа транспортировки.

Нормативными документами дальность перемещения горячих асфальтобетонных смесей не регламентирована и пригодность смеси к укладке осуществляется в виде контроля за температурой поставляемой смеси.

Согласно рекомендациям минимальная температура смеси при укладке в дорожное покрытие в зависимости от марки битума и типа смеси представлена в виде графиков (рис. 6.2) [6].

Анализ показал, что между температурой воздуха и рекомендованных допустимых значений минимальной температуры горячей сме-

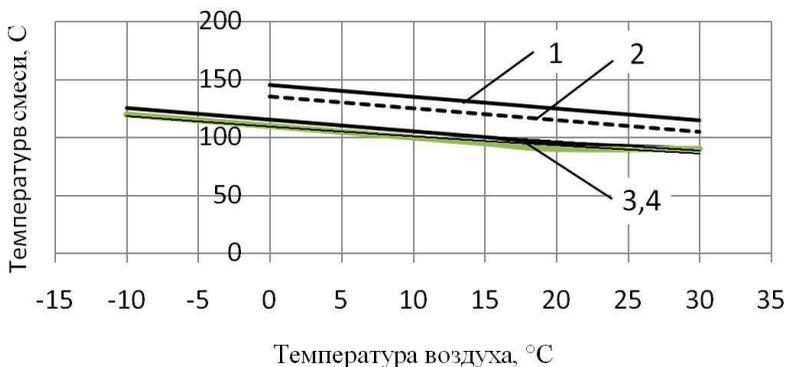


Рис. 6.2. Зависимость минимально допустимая температура смеси при укладке смеси от температуры воздуха:

— до 0,05 м; - - - - от 0,05 и выше, м;

1, 2 – БНД 40/60, 60/90, 90/130;

3, 4 – БНД 200/300, СГ130/200, МГ130/200 и МГО 130/200

си при укладке вязких битумов (БН, БНД 40/60, 60/90, 90/130) существует прямая зависимость, а для битумов БН, БНД 200/300, СГ130/200, МГ130/200 и МГО 130/200 закономерность подчиняется экспоненциальной зависимости.

Представленные на рис. 6.2 зависимости характеризуются уравнениями:

- для БНД 40/60, 60/90, 90/130 (коэффициент корреляции равен 1,0):

$$\text{до } 0,05 \text{ м: } t_{\text{см}} = -t_{\text{воз}} + 145, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\text{от } 0,05 \text{ м и выше: } t_{\text{см}} = -t_{\text{воз}} + 135, \text{ } ^\circ\text{C};$$

(6.1)

- для БНД 200/300, СГ130/200, МГ130/200 и МГО 130/200 (коэффициент корреляции равен 0,99):

$$\text{до } 0,05 \text{ м: } t_{\text{см}} = 114,6e^{-0,009t_{\text{воз}}};$$

$$\text{от } 0,05 \text{ м и выше: } t_{\text{см}} = 109,47e^{-0,008t_{\text{воз}}};$$

(6.2)

где $t_{\text{см}}$ – температура смеси при укладке, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{воз}}$ – температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

Продолжительность укладки горячей смеси в дорожное покрытие зависит от типа смеси и марки битума поставляемой смеси, климатических условий производства работ и конструктивных параметров покрытия. Минимальная температура окружающего воздуха при устрой-

стве дорожного покрытия нежесткого типа для битумов БНД 40/60, 60/90, 90/130 должна быть выше +5 °С [48].

Для установления закономерности влияния температуры воздуха на продолжительность укладки смеси, с учетом температурных режимов горячей смеси, были проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 6.3.

Из данных рис. 6.3 видно, что с повышением температуры окружающего воздуха время на укладку горячих асфальтобетонных смесей возрастает и, независимо от толщины слоя укладки покрытия, характеризуются экспоненциальной зависимостью. С учетом толщины укладываемого слоя смеси время укладки может быть определено по следующим уравнениям с учетом толщины слоя (коэффициент корреляции уравнений находится в пределах 0,98...0,99):

$$\begin{aligned} 0,03 \text{ м: } \tau_y &= 4,82e^{0,0071t_b}, \\ 0,05 \text{ м } \tau_y &= 12,46e^{0,0086t_b}, \\ 0,08 \text{ м } \tau_y &= 29,77e^{0,0089t_b}, \\ 0,10 \text{ м } \tau_y &= 47,12e^{0,0071t_b}, \end{aligned} \tag{6.3}$$

где τ_y – продолжительность укладки, мин; t_b – температура воздуха, °С.

Для установления общей закономерности влияния температуры воздуха на время укладки горячей смеси, в заданных температурных интервалах, представим данные на рис. 6.3 в относительных значениях, произвольно принимая время при температуре воздуха 20 °С за единицу (табл. 6.2). Обозначим данную величину коэффициентом влияния температуры воздуха на продолжительность охлаждения горячей смеси (K_B).

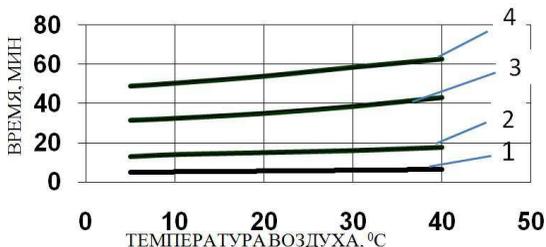


Рис. 6.3. Зависимость времени охлаждения слоя от температуры воздуха для смесей типа А и Б на битумах марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости от его толщины:

1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м
(температура смеси при укладке 160 °С, скорость ветра 0 м/с)

6.2. Влияние температуры воздуха на время укладки горячей смеси в заданных интервалах температуры (в относительных величинах)

Толщина слоя, м	Температура воздуха, °С				
	5	10	20	30	40
0,03	0,91	0,945	1,0	1,09	1,16
0,05	0,86	0,93	1,0	1,07	1,17
0,08	0,90	0,93	1,0	1,10	1,22
0,10	0,91	0,935	1,0	1,08	1,16
$\Sigma h/n$	0,90	0,94	1,0	1,08	1,18

Из данных табл. 6.2 видно, что имеется общая закономерность влияния температуры воздуха на продолжительность охлаждения горячей асфальтобетонной смеси в установленном интервале температуры, которая представлена на рис. 6.4. Численное значение K_B определяется по формуле:

$$K_B = 0,866e^{0,0076t_{\text{воз}}}, \quad (6.4)$$

где t_B – температура воздуха, °С.

Продолжительность охлаждения горячей асфальтобетонной смеси при укладке зависит от толщины слоя. Согласно СП 34.13330.2011, толщина дорожной одежды должна быть не менее 0,03 м из песчаного асфальтобетона и 0,07 м из крупнозернистого.

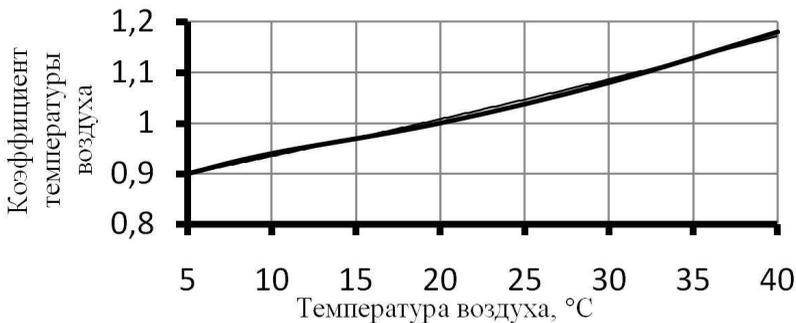


Рис. 6.4. Зависимость коэффициента влияния температуры воздуха на продолжительность охлаждения горячей смеси

Из данных рис. 6.4 видно, что с увеличением толщины слоя покрытия время охлаждения горячей смеси в определенном интервале температуры возрастает независимо от температуры окружающего воздуха. Аналогичные процессы происходят и при укладке слоя покрытия с разной температурой смеси (рис. 6.5).

Из рисунка 6.5 видно, что увеличение толщины слоя приводит к возрастанию времени охлаждения слоя смеси в температурном интервале с момента укладки смеси до начала процесса уплотнения, независимо от температуры смесей при укладке.

Анализ представленных зависимостей показал, что они характеризуются степенными зависимостями и могут быть описаны уравнениями в зависимости от температуры смеси:

$$160\text{ }^{\circ}\text{C}: \tau = 4486,8h_{\text{сл}}^{1,75}, \text{ мин};$$

$$140\text{ }^{\circ}\text{C}: \tau = 3914,7h_{\text{сл}}^{1,81}, \text{ мин};$$

$$160\text{ }^{\circ}\text{C}: \tau = 2717,6h_{\text{сл}}^{1,76}, \text{ мин};$$

$$130\text{ }^{\circ}\text{C}: \tau = 1168,9h_{\text{сл}}^{1,76}, \text{ мин},$$

(6.5)

где τ – время, мин; $h_{\text{сл}}$ – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Для уточнения влияния толщины слоя асфальтобетонной смеси на время нахождения горячей смеси в заданном интервале температуры представим данные на рис. 6.5 в относительных величинах, принимая время охлаждения смеси при укладке слоя толщиной 0,05 м за единицу. Установлено, что зависимость времени охлаждения смеси с учетом толщины укладываемого слоя можно представить в виде коэффициента влияния толщины слоя (K_h), который представлен на рис. 6.6.

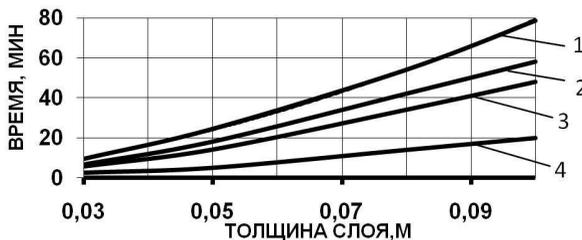


Рис. 6.5. Влияние толщины слоя на время охлаждения смеси в температурном интервале 160...100 °C

при температуре укладки 160 °C и скорости ветра 0 м/с:

1 – температура смеси 160 °C; 2 – 140 °C; 3 – 130 °C; 4 – 110 °C

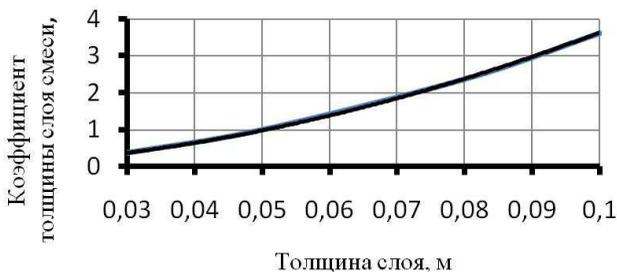


Рис. 6.6. Зависимость K_h от толщины слоя асфальтобетонной смеси при укладке в дорожное покрытие

Численное значение K_h определяется по формуле:

$$K_h = 284,4h^{1,892}, \quad (6.6)$$

где h – толщина слоя смеси при укладке в дорожное покрытие, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Результаты моделирования влияния температуры смеси при укладке в дорожное покрытие представлены на рис. 6.7.

Представленные на рис. 6.7 зависимости, могут быть аппроксимированы следующими уравнениями:

$$0,03 \text{ м: } \tau_{\text{ук}} = 19,25\ln(t_{\text{см}}) - 88,32, \text{ мин;}$$

$$0,05 \text{ м: } \tau_{\text{ук}} = 52,67\ln(t_{\text{см}}) - 242,0, \text{ мин;}$$

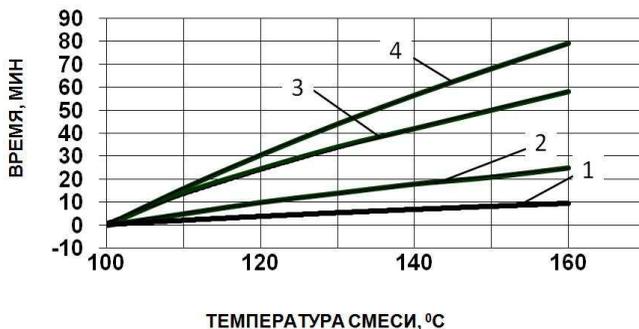


Рис. 6.7. Влияние температуры смеси на продолжительность охлаждения слоя покрытия в интервале температур 160...100 °C для смесей типов А и Б на битумах марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости от толщины слоя:
 1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,1 м

$$\begin{aligned}
 0,08 \text{ м: } \tau_{\text{ук}} &= 120,91 \ln(t_{\text{см}}) - 555,2, \text{ мин;} \\
 0,10 \text{ м: } \tau_{\text{ук}} &= 167,99 \ln(t_{\text{см}}) - 773,65, \text{ мин,}
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

где $\tau_{\text{ук}}$ – продолжительность охлаждения смеси от момента ее укладки до начала процесса уплотнения; $t_{\text{см}}$ – температура смеси при укладке на основание дороги. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Аналогичные закономерности имеют место при укладке смесей на битумах марок БНД 130/200, 200/300. Следовательно, с повышением толщины слоя смеси и ее температуры при укладке слоя время охлаждения смеси в отличие от принятых рекомендаций [6] характеризуется логарифмической зависимостью. Этот фактор является важным моментом при строительстве покрытий, особенно, при пониженных температурах воздуха.

Анализ полученных зависимостей влияния температуры смеси на время нахождения слоя смеси в заданном интервале температуры показал, что наблюдается общая закономерность.

Для установления общей закономерности представим данные на рис. 6.7 в относительных величинах. Принимаем за единицу время нахождения смеси в заданном интервале температуры при разной толщине слоев и максимальной температуре укладки (табл. 6.2).

Обозначим данную величину коэффициентом $K_{\text{тс}}$, значения которого с учетом толщины слоя и марки битума представлены в табл. 6.2.

6.2. Влияние температуры смеси на относительное время охлаждения при разной толщине укладываемого слоя для смесей на битумах марок БНД 40/60, 60/90, 90/130; БНД 130/200, 200/300

Толщина слоя, м \ Температура смеси, °С	0,03	0,05	0,08	0,10	Средняя величина, $\Sigma n/n$	Погрешность, %
БНД 40/60, 60/90, 90/130						
160	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	–
150	0,84	0,85	0,86	0,86	0,85	1,1
140	0,7	0,73	0,72	0,72	0,71	2,7
130	0,58	0,57	0,58	0,56	0,57	1,7

Продолжение табл. 6.2

Толщина слоя, м					Средняя величина, $\Sigma n/n$	Погреш- ность, %
	0,03	0,05	0,08	0,10		
Темпера- тура смеси, °С						
БНД 40/60, 60/90, 90/130						
120	0,40	0,41	0,42	0,39	0,4	4,7
110	0,24	0,2	0,24	0,2	0,22	9,1
БНД 130/200, 200/300						
140	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	–
130	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	–
120	0,74	0,75	0,75	0,76	0,75	2,7
110	0,61	0,63	0,64	0,63	0,63	1,7
100	0,48	0,48	0,5	0,5	0,49	4,7
80	0,23	0,2	0,21	0,19	0,21	9,5

Из данных таблицы видно, что коэффициент $K_{тс}$ зависит от температуры смеси при укладке и не зависит от толщины слоя. Численные значения $K_{тс}$, в зависимости от марки битума, определяются по уравнениям, приведенным ниже (коэффициент корреляции составляет 0,99):

– для смесей на битумах марок БНД 40/60, 60/90, 90/130:

$$K_{тс} = 2,06 \ln(t_{см}) - 9,46; \quad (6.8)$$

– для смесей на битумах марок БНД 130/200 и 200/300:

$$K_{тс} = 0,013 t_{см} - 0,82, \quad (6.9)$$

где $t_{см}$ – температура смеси при укладке.

Продолжительность процесса охлаждения смеси зависит от скорости ветра, поскольку перемещение воздушных масс способствует отводу тепла в окружающую среду.

На рисунке 6.8 представлены данные по продолжительности процесса укладки смеси в зависимости от скорости ветра при температуре смеси при укладке 160 °С и температура воздуха 20 °С.

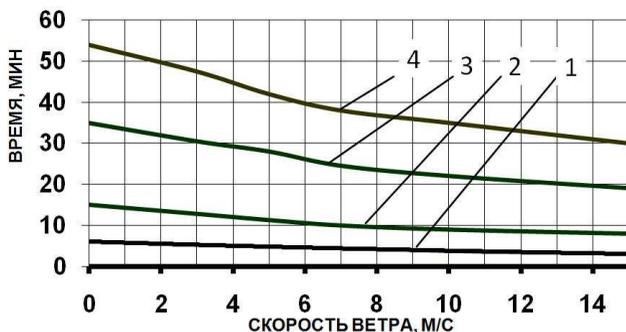


Рис. 6.8. Влияние скорости ветра на продолжительность укладки в зависимости от толщины слоя:
 1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Из представленных данных видно, что увеличение скорости ветра при укладке горячей смеси влияет на процесс охлаждения смеси и способствует сокращению времени на устройство дорожного покрытия. Следует отметить, что при укладке покрытия толщиной 0,03 м и скорости ветра более 10 м/с время охлаждения находится в пределах от 3 до 2 мин, что недостаточно для обеспечения фронта работы для уплотняющих машин. В этом случае укладку горячей смеси необходимо выполнять при повышенных скоростях перемещения асфальтоукладчика и процесс уплотнения необходимо вести сразу после укладки смеси.

Для установления общей закономерности влияния скорости ветра на время укладки смеси, представим данные на рис. 6.8 в относительных величинах, принимая за единицу время укладки каждого слоя при нулевой скорости ветра (табл. 6.3). Обозначим принятую величину коэффициентом влияния скорости ветра на время укладки смеси K_v .

Из данных видно, что с увеличением скорости ветра время укладки уменьшается независимо от толщины слоя. В относительных величинах зависимость величины коэффициента K_v от скорости ветра представлена на рис. 6.9.

Численное значение коэффициента K_v определяется формуле:

$$K_v = 0,98e^{-0,0466v}, \quad (6.10)$$

где v – скорость ветра, м/с; K_v – коэффициент влияния скорости ветра на время укладки слоя смеси, безразмерная величина. Коэффициент корреляции равен 0,99.

В зависимости от типа смеси и марки битума ее температура при окончании укладки имеет разные значения, что влияет на продолжительность укладки горячей смеси.

6.3. Влияние скорости ветра на продолжительность уплотнения

Толщина слоя, м	Скорость ветра, м/с					
	0	3	5	7	10	15
0,03	1	0,85	0,80	0,66	0,60	0,50
0,05	1	0,85	0,75	0,66	0,60	0,53
0,08	1	0,87	0,81	0,68	0,62	0,51
0,10	1	0,87	0,77	0,68	0,64	0,52
Средняя величина	1	0,86	0,78	0,67	0,61	0,51
Погрешность, %	–	1,1	3,8	1,5	4,6	5,6

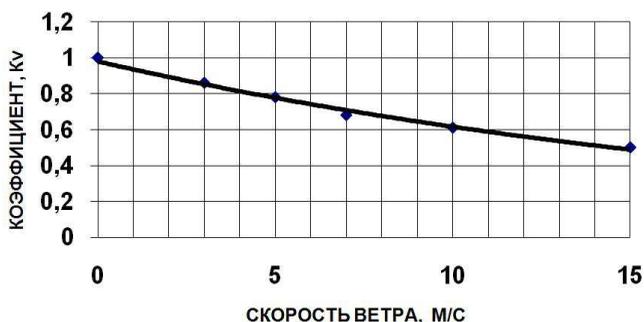


Рис. 6.9. Влияние скорости ветра на значение коэффициента K_v

В таблице 6.4 представлены данные по продолжительности охлаждения слоя для различных типов смесей и марок битумов с учетом температуры окончания укладки смеси.

Представим данные табл. 6.4 в относительных величинах, принимая условно за единицу время окончания процесса укладки для смесей 100 °С [6]. Полученную относительную величину, учитывающую нижнюю температурную границу укладки смеси, обозначим коэффициентом $K_{ук}$. Данные, приведенные в табл. 6.4 будут иметь вид, представленный в табл. 6.5.

Из представленных данных табл. 6.5 видно, что $K_{ук}$ не зависит от толщины укладываемого слоя смеси и характеризуется логарифмической зависимостью (рис. 6.10).

6.4. Время охлаждения смесей типа А, Б, В, Г, Д на битумах марок БН и БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости от времени окончания укладки при разной толщине слоя, мин

Температура смеси, °С \ Толщина слоя, м	150	140	130	120	110	100
0,03	1,5	2,5	4,5	5,5	7,5	9,5
0,05	3,5	7,0	10,5	15,0	19,0	24,5
0,08	9,5	17,5	25,0	35,0	46,0	58,0
0,10	10,5	21,0	33,0	46,0	61,0	78,0

6.5. Время охлаждения смесей типа А, Б, В на битумах марок БН и БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости от времени окончания укладки при разной толщине слоя (в относительных величинах)

Температура смеси, °С \ Толщина слоя, м	150	140	130	120	110	100
0,03	0,16	0,26	0,47	0,58	0,79	1,0
0,05	0,14	0,28	0,43	0,61	0,77	1,0
0,08	0,16	0,30	0,43	0,60	0,79	1,0
0,10	0,13	0,27	0,42	0,59	0,787	1,0
Средняя величина	0,15	0,28	0,43	0,59	0,78	1,0

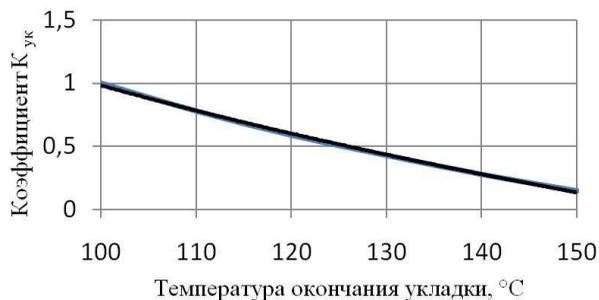


Рис. 6.10. Зависимость коэффициента $K_{ук}$ от температуры окончания укладки горячей смеси на основание дорожного покрытия

Численное значение $K_{ук}$ не зависит от толщины слоя и определяется по формуле

$$K_m = -2,092 \ln(t_{укс}) + 10,62, \quad (6.11)$$

где \ln – натуральный логарифм; $t_{укс}$ – температура окончания укладки смеси, °С. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

С учетом влияния рассмотренных факторов время укладки слоя горячей асфальтобетонной смеси в дорожное покрытие имеет вид:

$$\tau_{ук} = K_h K_b K_{тс} K_v K_m K_{ос}, \text{ мин}, \quad (6.12)$$

где K_h – коэффициент, зависящий от толщины укладываемого слоя покрытия; t_b – температура воздуха, °С; $K_{тс}$ – коэффициент, зависящий от температуры смеси при укладке; K_v – коэффициент, зависящий от скорости ветра, м/с; K_m – коэффициент, зависящий от типа смеси и марки битума; $K_{ос}$ – коэффициент, учитывающий температуру основания.

Сравнение экспериментальных данных по продолжительности укладки горячих асфальтобетонных смесей типа А при слое толщиной 0,05 м с применением битума марки БНД 90/130 с расчетными данными представлено в табл. 6.6.

6.6. Сравнение экспериментальных данных измерений по продолжительности укладки горячих асфальтобетонных смесей с расчетными данными

№	Температура смеси при укладке, °С	Температура воздуха, °С	Температура основания, °С	Скорость ветра, м/с	Продолжительность укладки, мин		Погрешность, %
					Экспериментальная	Расчетная	
1	130	29	40	3,4	7,0	6,5	7,1
2	140	18	18	3,0	7,0	7,5	7,1
3	150	30	42	–	15	15,2	1,3
4	160	16	16	–	16	14,3	4,6
5	160	42	45	–	20	19,5	2,5

6.2. ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ОТДЕЛЬНЫМИ ПОЛОСАМИ

При производстве ремонтных работ и реконструкции дорожных одежд, при небольших объемах работ по устройству полос покрытия нежесткого типа, а также при недостаточной мощности асфальтобетонного завода укладку горячей смеси в пределах захватки выполняют одним асфальтоукладчиком отдельными полосами. В этом случае за захватку принимают длину укладываемой полосы, равной сменной производительности асфальтоукладчика. Сопряженная полоса устраивается через сравнительно продолжительное время, в пределах которого температура уложенной смеси первой полосы снижается и к моменту укладки сопряженной полосы равняется температуре воздуха или несколько выше. Ширина укладываемой полосы асфальтобетонной смеси принимается равной ширине полосы движения транспортных средств. При такой технологии устройства покрытия обеспечивается движение транспортного потока при производстве работ и не требуются временные дороги.

К недостаткам следует отнести образование при устройстве покрытия продольного шва на стыке сопряженных полос. Устранить отмеченный недостаток можно за счет обеспечения, в процессе уплотнения стыка сопряженных полос, температурных режимов применяемых горячих смесей. Инструкциями и нормативными документами предусматривается перед укладкой второй полосы покрытия производить прогрев края ранее уложенной полосы, но неуплотненной, на ширину 0,1...0,15 м до температуры 70...80 °С [43].

Современные конструкции разогревателей позволяют разогревать асфальтобетон слоем 30...40 мм за 2...3 мин до температуры 80...100 °С. До начала укладки новой полосы вертикальный край ранее уложенного асфальтобетона смазывается битумной эмульсией. При сопряжении смежных полос, перед укладкой второго слоя, разогреватель перемещают со скоростью, обеспечивающей нагрев асфальтобетона до температуры 70...80 °С по краю ранее уложенной полосы асфальтобетона на ширину 100...150 мм, который не подвергается уплотнению. Вновь устраиваемая полоса соприкасается в этом случае с разогретым краем ранее устроенной полосы, который уплотняется одновременно с новой полосой. В некоторых случаях, при небольших объемах работ, для нагрева края ранее уложенной полосы применяют способ нагрева за счет температуры сопряженного слоя. В этом случае при укладке параллельной полосы накладывают слой горячей смеси на край первой полосы. За счет передачи теплового потока от сопряженного слоя край полосы нагревается до определенной температуры, ве-

личина которой зависит от условий производства работ и применяемых смесей.

Качество строительства дорожных покрытий нежесткого типа в значительной степени зависит от обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении горячих асфальтобетонных смесей. Для обеспечения требуемых характеристик асфальтобетона по ширине покрытия необходимо обеспечить температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси в зоне сопряжения полос. Нарушение этого условия не позволяет достичь требуемых параметров уплотнения (коэффициент уплотнения, водонепроницаемость, плотность), что в процессе эксплуатации дороги способствует образованию дефектов в виде трещин, выкрашивания, образования выбоин. Установлено, что распределение температуры по ширине полосы покрытия неравномерно. В крайних точках полосы покрытия охлаждение горячей смеси происходит более интенсивно, чем в центре (рис. 6.11).

При укладке горячей асфальтобетонной смеси на основание происходит понижение ее температуры во времени за счет отдачи тепла в окружающую среду и нижележащий слой на счет коэффициента теплопередачи материала. Наиболее интенсивно охлаждение горячей смеси происходит сразу после укладки в течение нескольких минут, что способствует, в зависимости от принятой технологии строительства покрытия и конкретных условий производства работ, нарушению температурных режимов смеси на стыке смежных полос при уплотнении.

При устройстве многополосного дорожного покрытия одним укладчиком температура смеси на стыке полос зависит от конкретных условий производства работ (погодные условия, конструкции дорожной одежды, условия работы и т.д.). Поэтому для обеспечения температурных режимов горячей смеси предусматривается осуществлять дополнительный нагрев края уложенной ранее полосы разогревателями



а)



б)

Рис. 6.11. Внешний вид стыка полос дорожного покрытия (а) и тепловизионная съемка распределения температуры горячей смеси по ширине на стыке полос покрытия (б)

асфальтобетона (типа КР-53А или КР-10), а также допускается осуществлять нагрев за счет температуры слоя горячей смеси смежной полосы покрытия. С этой целью при укладке сопряженной полосы покрытия горячую смесь новой полосы накладывают на уложенный ранее слой первой. За счет теплопередачи от верхнего слоя горячей смеси происходит нагрев ранее уложенного слоя смеси. Согласно существующим рекомендациям, при такой технологии, остывшую кромку ранее уложенной полосы обрубают в вертикальной плоскости по высоте слоя, обмазывают жидким битумом и сверху укладывают горячую смесь шириной 10...20 см. После разогрева кромки полосы смесь сдвигают на укладываемую полосу [1, 43].

Следует заметить, что применение такой технологии научно не обосновано, так как отсутствуют рекомендации по ее применению и не выяснено влияние различных факторов на процесс нагрева ранее уложенного слоя покрытия. Процесс нагрева края ранее уложенной полосы за счет температуры асфальтобетонной смеси сопряженного слоя можно представить моделью, изображенной на рис. 6.12.

Коэффициент теплопередачи асфальтобетонной смеси (λ) зависит от температуры горячей смеси и объемной массы. При разработке математической модели приняты следующие допущения:

– температурные режимы укладки и уплотнения горячей смеси при производстве работ зависят от типа смеси, марки битума и ограничены во времени температурным интервалом 180...50 °С;

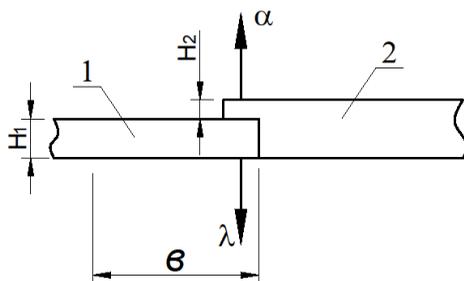


Рис. 6.12. Модель передачи тепла от слоя горячей смеси ранее уложенной асфальтобетонной смеси в полосу покрытия:

1 – асфальтобетонная смесь, уложенная в первую полосу дорожного покрытия;

2 – асфальтобетонная смесь сопряженной полосы дорожного покрытия;

h_i – толщина слоя асфальтобетонной смеси, м;

λ_i – коэффициент теплопередачи асфальтобетонной смеси;

α – коэффициент теплоотдачи, численное значение которого зависит от скорости перемещения воздушных масс

- ширина перекрываемого слоя сопряженных полос зависит от толщины слоя покрытия и находится в пределах 0,3...05 м;
- в начальный момент времени температура горячей смеси по толщине слоя имеет одинаковую величину;
- укладываемый материал в выбоину однородный;
- потери тепла происходят через верхнюю поверхность слоя за счет теплового излучения и конвективного обмена в атмосферу, а также через боковую поверхность полосы за счет теплопроводности материала;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярно к поверхности выбоины;
- потери тепла в основание выбоины происходят через нижнюю поверхность слоя за счет теплопроводности материала;
- сцепление слоев обеспечивает достаточный термоконттакт;
- температура окружающей среды и скорости воздушных масс с момента укладки слоя смеси и до окончания процесса уплотнения остаются постоянными.
- ширина перекрытия сопряженных полос значительно больше толщины слоя и тепловой поток передается за счет контактной поверхности слоев.

При моделировании тепловых процессов приняты граничные условия на основе следующих допущений:

- соблюдается условие конвективного теплообмена на границе верхнего слоя с окружающей средой

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{h=0} = \alpha [t(0; \tau) - t_b]; \quad (6.13)$$

- условие равенства тепловых потоков на границах контакта сопряженных полос покрытия имеют вид:

$$\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial y_i} \Big|_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial t_{i+1}}{\partial y_{i+1}} \Big|_{y_i=y_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad (6.14)$$

$$\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial y_i} \Big|_{x_i=b_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial t_{i+1}}{\partial x_{i+1}} \Big|_{x_i=x_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (6.15)$$

где h_i – толщины слоев дорожной конструкции, м; τ – время, с; t_b – температура воздуха, °С; $t(0; \tau)$ – температура смеси в момент укладки, °С; b – ширина полосы покрытия, м; α – суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·град.

Температура асфальтобетонной смеси, уложенной в первую полосу дорожного покрытия, нагревается за счет теплопередачи от горячей смеси второй полосы. Интенсивность нагрева, а также температура нижнего слоя смеси зависит от температуры и толщины верхнего накладываемого слоя, температуры окружающего воздуха, температуры смеси первой полосы, толщины уложенного ранее слоя полосы, скорости ветра и теплофизических свойств смеси и общем виде может быть представлена выражением:

$$t_{\text{нагр}} = f(t_{\text{смеси}}; t_{\text{возд}}; h_{\text{слоя}}; h_{\text{од}}; t_{\text{осн}}; v_{\text{в}}; \tau_{\text{нагр}}), \quad (6.16)$$

где $t_{\text{смеси}}$ – температура горячей смеси при укладке в дорожное покрытие; $t_{\text{возд}}$ – температура воздуха; $h_{\text{слоя}}$ – толщина слоя горячей смеси при распределении по краю первой полосы; $h_{\text{од}}$ – толщина слоя первой полосы покрытия; $t_{\text{осн}}$ – температура края первой полосы покрытия; $v_{\text{в}}$ – скорость ветра, м/с; $\tau_{\text{нагр}}$ – время нагрева края полосы до максимальной температуры смеси, мин.

Моделирование тепловых процессов осуществлялось с помощью программ для расчета температурных режимов асфальтобетонных покрытий [25, 31]. Температура нагрева края полосы покрытия при распределении горячей смеси поверху слоя зависит от количества тепла передаваемого от температуры массы распределенной горячей смеси.

В таблицах 6.7 и 6.8 представлены результаты моделирования тепловых процессов при разной относительной толщине слоев покрытия и температуры смеси (рис. 6.13).

По результатам моделирования получены значения температуры края полосы при относительной толщине слоев 1,5 и 2,0. Для установления общей закономерности влияния относительной толщины слоев на нагрев первого слоя покрытия представим полученные результаты в относительных величинах. За единицу принята температура нагрева при относительной толщине слоев равной единице. Обозначим полученную величину через коэффициент влияния относительной толщины слоя на нагрев нижнего слоя полосы покрытия. Численное значение коэффициента можно определить из выражения:

$$K_h = 1,049(h_2 / h_1)^{0,22}. \quad (6.17)$$

Коэффициент корреляции равен 0,95.

Известно, что темп охлаждения горячей асфальтобетонной смеси зависит от температуры окружающего воздуха. В таблицах 6.9 и 6.10 представлены значения температуры нагрева нижнего слоя дорожного покрытия при постоянной относительной толщине слоя и температуре воздуха 5 и 30 °С.

6.7. Влияние толщины накладываемого слоя горячей смеси на температуру нагрева нижнего слоя покрытия (при относительной толщине слоев 0,4 и температуре воздуха +20 °С)

Температура смеси, °С	180	160	150	140	120	100
Температура смеси по оси сопряженной полосы, °С	129	121	109	104	85	79
Температура поверхности нагреваемой полосы, °С	79	71	68	64	57	49
Время достижения максимальной температуры слоя, мин	16...23	14...27	16...22	15...25	18...20	13...27
Температура нагрева нижней части полосы, °С	21...25	21...26	21...23	21...24	20...21	19...22

6.8. Влияние толщины накладываемого слоя горячей смеси на температуру нагрева нижнего слоя покрытия (при относительной толщине слоев 1,0 и температуре воздуха +20 °С)

Температура, °С	100	120	140	160	180	Σ/n
Относительная толщина (h_2 / h_1)						
0,4	1,256	1,295	1,333	1,339	1,362	1,317
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,5	0,907	0,966	0,955	0,959	0,963	0,950
2,0	0,942	0,950	0,910	0,922	0,929	0,93

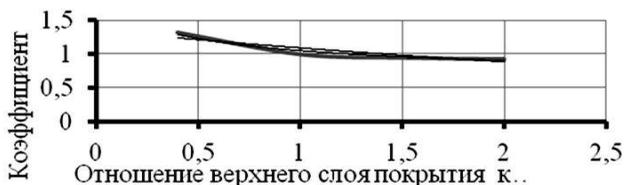


Рис. 6.13. Значение коэффициента влияния толщины слоя горячей смеси от толщины слоя полосы покрытия

6.9. Влияние температуры воздуха на температурные режимы края полосы (температура воздуха 5 °С)

Показатель	Значение				
	180	160	140	120	100
Температура смеси при укладке, °С	180	160	140	120	100
Температура смеси по оси полосы, °С	113	100	88	75	65
Температура нагрева поверхности первой полосы, °С	78	69	62	53	45
Время достижения максимальной температуры нагреваемого слоя, мин	53	54	54	55	49
Температура нагрева нижней части полосы, °С	23	21	19,6	18	15

6.10. Влияние температуры воздуха на температурные режимы края полосы (температура воздуха 30 °С)

Показатель	Значение				
	180	160	140	120	100
Температура смеси, °С	180	160	140	120	100
Температура смеси по оси сопряженной полосы, °С	131	117	104	92	79
Температура нагрева поверхности первой полосы, °С	90	82	74	65	57
Время достижения максимальной температуры нагреваемого слоя, мин	39	40	38	35	32
Температура нагрева нижней части полосы, °С	30	29	27	26	24

Из представленных данных видно, что температура воздуха влияет на температурные режимы горячей смеси, следовательно, на нагрев нижнего слоя покрытия.

Исследуя влияние температуры воздуха на температурные режимы в диапазоне 5...40 °С, получены значения температуры нагрева края полосы покрытия под слоем горячей смеси при относительной толщине слоев равной единице.

Принимая за единицу значения температуры нагрева нижнего слоя покрытия при температуре воздуха 20 °С, установлено значение коэффициента влияния температуры воздуха на процесс нагрева ранее уложенной полосы асфальтобетонной смеси при укладке на нее горячей смеси, которая имеет вид:

$$K_t = 0,862e^{0,007t_v}, \quad (6.18)$$

где K_t – коэффициент влияния температуры воздуха на нагрев края полосы дорожного покрытия, безразмерная величина. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Известно, что в зависимости от времени укладки сопряженной полосы покрытия температура смеси ранее уложенной полосы будет иметь разное значение.

С целью выявления закономерности влияния температуры края ранее уложенной полосы на ее нагрев за счет температуры смеси при распределении второй полосы произведено моделирование тепловых процессов, результаты которых представлены в табл. 6.11.

6.11. Влияние температуры края полосы на нагрев от слоя горячей смеси (температура смеси при укладке 160 °С, температура воздуха 20 °С)

Показатель	Значение					
	5	10	20	40	60	80
Температура края полосы, °С	5	10	20	40	60	80
Температура смеси по оси сопряженной полосы, °С	104	108	121	125	131	136
Температура нагрева поверхности первой полосы, °С	63	65	71	83	95	107
Время достижения максимальной температуры нагреваемого слоя, мин	13	14	18	25	32	39
Температура нагрева нижней части полосы, °С	19	19	14...27	13...20	11	9

Из данных табл. 6.11 видно, что с повышением температуры смеси края полосы нагрев за счет горячей смеси достигает более высокой температуры.

Для уточнения влияния на нагрев ранее уложенной полосы покрытия за счет температуры горячей смеси при ее распределении по краю полосы сопряженного слоя, представим данные табл. 6.11 в относительных величинах, приняв величину нагрева смеси при температуре воздуха за единицу (рис. 6.14). Обозначим величину, характеризующую влияние температуры края полосы на нагрев смеси, коэффициентом влияния температуры асфальтобетона на крае полосы K_t .

Численное значение коэффициента K_t определяется зависимостью

$$K_t = 0,864e^{0,007t_{\text{пок}}}, \quad (6.19)$$

где K_t – коэффициент влияния температуры асфальтобетона ранее уложенной полосы покрытия, безразмерная величина. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Нагрев ранее уложенной полосы покрытия в значительной степени зависит от температуры распределяемой горячей смеси сопряженной полосы. Результаты моделирования влияния температуры горячей смеси при ее распределении по поверхности ранее уложенной полосы покрытия представлены на рис. 6.14.

Из представленных результатов видно, что с повышением температуры смеси при распределении поверх слоя покрытия нагрев осуществляется более интенсивно.

По результатам моделирования установлена связь между температурой горячей смеси при распределении по ранее уложенной полосе покрытия и температурой нагрева края полосы, которая имеет вид

$$t_{\text{нагр}} = 27,73e^{0,005t_{\text{см}}}, \quad (6.20)$$

где $t_{\text{см}}$ – температура горячей смеси второй полосы дорожного покрытия, °С. Коэффициент корреляции равен 0,95.

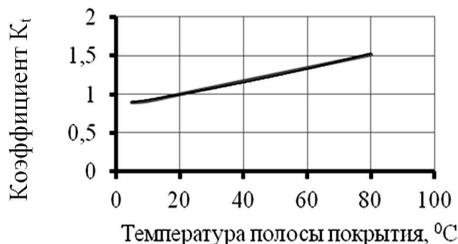


Рис. 6.14. Зависимость коэффициента K_t от температуры края полосы покрытия на нагрев от слоя горячей смеси

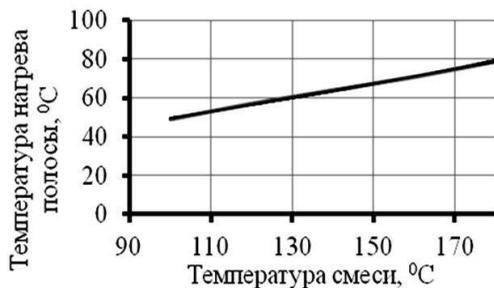


Рис. 6.15. Влияние температуры горячей смеси на нагрев ранее уложенной смеси покрытия

Установлено, что скорость ветра незначительно влияет на нагрев края ранее положенной полосы и при определении температуры нагрева ее можно не учитывать.

В общем виде зависимость для определения нагрева края полосы за счет температуры горячей смеси сопряженной полосы при строительстве многополосных покрытий имеет вид

$$t_{\text{нагр}} = 20,63K_{\text{н}}e^{0,005t_{\text{см}} + 0,007t_{\text{в}} + 0,007t_{\text{осн}}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6.21)$$

На основании полученных результатов моделирования нагрева края ранее уложенной полосы асфальтобетона за счет температуры горячей смеси сопряженной полосы можно сделать следующие выводы.

1. Установлена закономерность между температурой смеси при устройстве стыка покрытий многополосных дорог и температурой нагрева края ранее уложенной полосы, позволяющая контролировать температуру нагрева края полосы для обеспечения качественного стыка полос.

2. Скорость перемещения воздушных масс не влияет на процесс нагрева края полосы покрытия.

3. Для достижения максимальной температуры нагрева края полосы необходим перерыв между процессом нагрева при укладке и уплотнении, который зависит от толщины укладываемых слоев и составляет порядка 5...15 мин.

4. При высокой температуре смеси (160...180 °C) и температуре воздуха более 30 °C возможно обеспечить качественный стык полос дорожного покрытия.

5. Для обеспечения качества строительства многополосных покрытий при раздельной укладке полос необходимо осуществлять разорыв стыка с помощью разогревателей асфальтобетона.

6. Время достижения максимальной температуры нагрева полосы покрытия зависит от относительной толщины нагреваемого слоя и не зависит от температуры укладываемой смеси на вторую полосу.

7. Температура нижней точки полосы покрытия, независимо от температуры горячей смеси верхнего слоя, не соответствует температурным режимам асфальтобетонной смеси при уплотнении сопрягаемых слоев.

8. Неравномерность распределения температуры нагреваемой смеси сопрягаемых полос дорожного покрытия способствует образованию некачественного стыка при сопряжении полос покрытия, что приводит в процессе эксплуатации к разрушению дорожного покрытия в местах сопряжения полос.

6.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ СТЫКА ПОЛОС ЗА СЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ СМЕСИ СОПРЯЖЕННОГО СЛОЯ ПОКРЫТИЯ

При строительстве многополосных покрытий нежесткого типа технологией работ предусматривается осуществлять нагрев стыка ранее уложенной полосы асфальтобетонной смеси за счет температуры укладываемой горячей смеси сопряженной полосы.

С целью выяснения возможности нагрева края уложенной ранее полосы за счет температуры горячей асфальтобетонной смеси сопряженной полосы проведены экспериментальные исследования, в процессе которых контролировался процесс передачи тепла от одной вырубki асфальтобетона с размерами 100 на 100 мм к другому. Нагрев асфальтобетонного образца осуществлялся в сушильном шкафу до температуры 120 °С в течение 4 ч, температура холодного образца и воздуха составляла 13 °С. Измерение температуры и динамика процесса нагрева и охлаждения образцов производилась термометрами и тепловизионной камерой testo 880.

Результаты измерения температуры на стыке полос в виде теплового изображения и динамика нагрева – охлаждения стыка краев сопрягаемых полос асфальтобетонного покрытия во времени представлены на рис. 6.16 – 6.18.

Из представленных данных видно, что для нагрева холодного стыка полосы требуется определенное время, зависящее от величины теплового потока и теплофизических характеристик материала. Результаты измерения температуры в зоне стыка полос представлены в табл. 6.12.

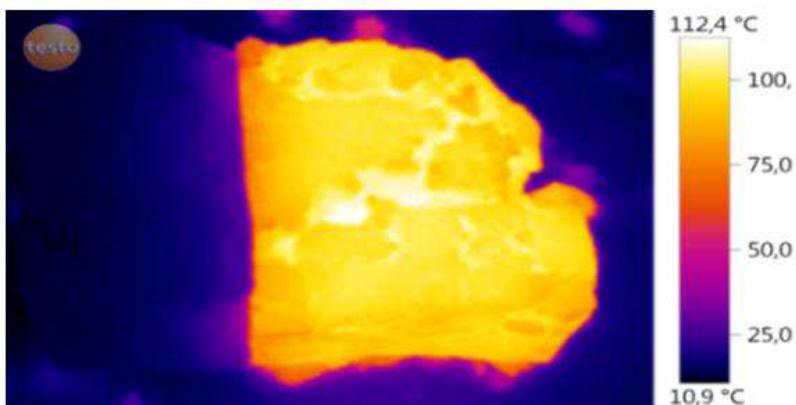


Рис. 6.16. Тепловое изображение стыка после 5 мин совмещения образцов асфальтобетона
 (температура воздуха и температура основания 13 °С, начальная температура смеси и начальная температура холодной смеси 120 °С, скорость ветра от 0 м/с)

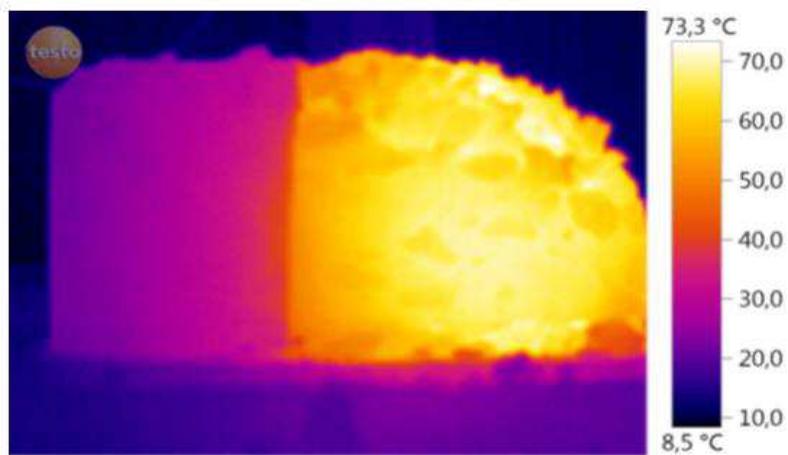


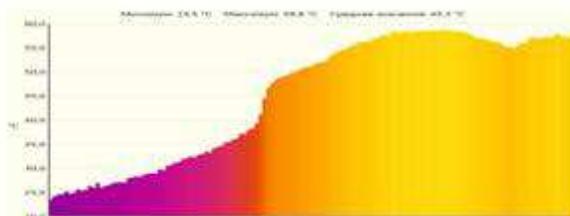
Рис. 6.17. Тепловое изображение стыка через 20 мин после совмещения образцов



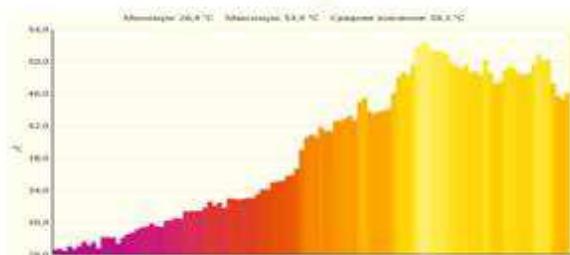
Рис. 6.18. Динамика нагрева–охлаждения во времени стыка края сопрягаемых полос асфальтобетонного покрытия



25 мин после совмещения образцов



30 мин после совмещения образцов



35 мин после совмещения образцов

Рис. 6.18. Продолжение

6.12. Результаты измерения температуры в зоне стыка полос

Время, мин	Температура на крае уложенной полосы, °С	Температура в центре	Температура на стыке холодной полосы	Температура на стыке горячей полосы	Температура в центре горячей полосы	Температура на крае горячей полосы
13.11	12	12,3	33	80	105	97
13.12	12,6	14,7	46	77	102	85
13.16	14,5	18	45	64	92	70

Вре- мя, мин	Темпера- тура на крае уло- женной полосы, °С	Темпе- ратура в цен- тре	Темпера- тура на стыке холодной полосы	Темпера- тура на стыке горячей полосы	Темпера- тура в центре горячей полосы	Темпера- тура на крае горя- чей поло- сы
13.18	16	23,5	56	58	85	63
13.22	18	25	45	52	71	55
13.26	20	28	42	45	67	49
13,33	23	29	40	49	61	45
13,38	25	30	36	40	55	41
13,44	25	31	35	36	50	35

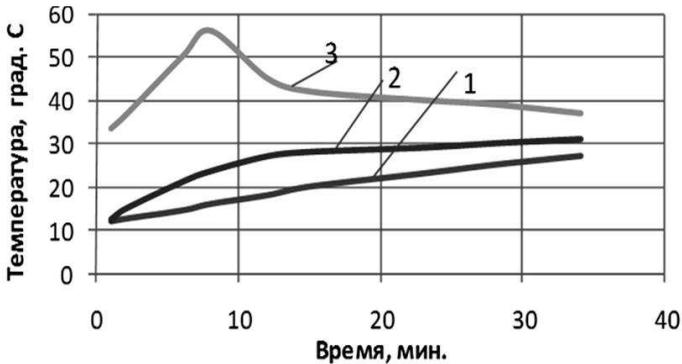


Рис. 6.19. Изменение температуры асфальтобетона в слое холодной вырубki покрытия при нагреве за счет передачи тепла от сопряженного слоя покрытия:
 1 – край полосы контакта с воздухом; 2 – по оси вырубki;
 3 – в зоне контакта с горячим слоем вырубki

Установлено, что имеется различие в характере изменения температуры в зоне стыка холодного и горячего асфальтобетона. На рисунке 6.19 представлены результаты измерения температуры в зоне стыка асфальтобетона с пониженной температурой.

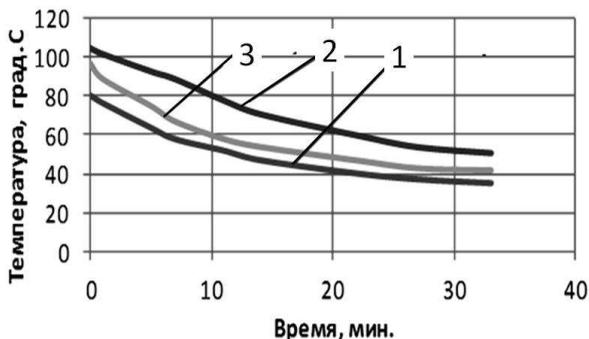


Рис. 6.20. Изменение температуры асфальтобетона в слое горячей вырубki:

1 – край полосы контакта с воздухом; 2 – по оси вырубki;
3 – в зоне контакта горячего слоя вырубki

Из представленных данных видно, что в зоне стыка холодного асфальтобетона наблюдается повышение температуры до максимальной величины, зависящей от энергии теплового потока. При достижении максимальной температуры в дальнейшем происходит охлаждение слоя. Продолжительность нагрева, как и достижение максимальной температуры нагрева, зависит от теплофизических характеристик асфальтобетона и находится в пределах от 0,1 до 0,15 ч. Характер нагрева слоя говорит о протекании в зоне стыка асфальтобетона сложных тепловых процессах, что характерно для нестационарных тепловых процессов.

В зоне стыка горячего асфальтобетона процесс охлаждения подчиняется общим законам теплопередачи тепла и характеризуется экспоненциальной зависимостью (рис. 6.20). Из представленных данных видно, что температура асфальтобетона по ширине полосы распределяется неравномерно. Наиболее низкая температура после укладки соответствует зоне стыка полос за счет коэффициента теплопередачи (λ) от одной полосы покрытия к другой.

6.4. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ К УСТРОЙСТВУ МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Экспериментально доказано, что под действием солнечной радиации температура покрытия может прогреваться до температуры 30...60 °С в зависимости от климатических условий [1, 33]. Это способствует увеличению времени на строительство покрытий.

При строительстве многополосных покрытий автомобильных дорог, когда сопрягаемые полосы покрытия укладываются в разное время, в зоне стыка полос происходит передача тепла от одной полосы к другой за счет теплопередачи горячей смеси.

Моделирование процесса нагрева–охлаждения смеси полосы с низкой температурой и смеси полосы с более высокой температурой происходит по одинаковому закону, хотя между ними существуют определенные различия. В зоне стыка сопрягаемых полос покрытия асфальтобетон, с пониженной температурой, за счет теплопередачи от полосы с более высокой температурой, нагревается до определенной температуры и затем происходит охлаждение обеих полос покрытия. В этот промежуток времени в асфальтобетоне происходят сложные тепловые процессы, характерные для нестационарных тепловых процессов. Характер процесса нагрева–охлаждения асфальтобетона в зоне стыка представлен на рис. 6.21.

Анализ распределения температуры на стыке сопрягаемых полос показал, что распределение температуры по толщине слоя происходит неравномерно за счет отдачи тепла в окружающую среду и нижележащий слой основания. Передача тепла в зоне стыка по поверхности соприкосновения слоев способствует повышению отдачи тепла от горячего слоя покрытия, за счет коэффициента теплопередачи, к слою с низкой температурой, что приводит к повышению интенсивности охлаждения горячей смеси по отношению к оси полосы. Экспериментально установлено, что ширина зоны полосы снижения температуры в слое горячей смеси находится в пределах 0,1...0,2 м. Установлено, что продолжительность периода нагрева асфальтобетона в зоне стыка зависит от разницы температуры полос покрытия и толщины укладываемого слоя.

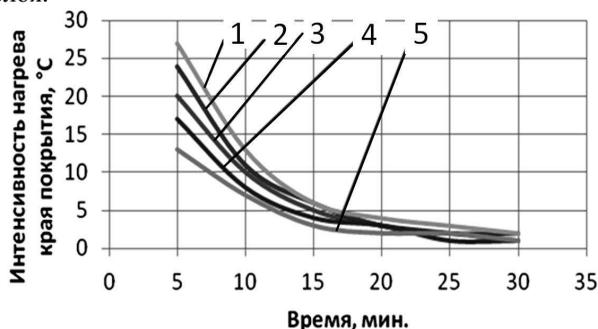


Рис. 6.21. Характер изменения интенсивности нагрева края ранее уложенной полосы от температуры смеси сопрягаемой полосы при температуре воздуха 20 °C:

1 – температура смеси 180 °C; 2 – 160 °C; 3 – 140 °C; 4 – 120 °C; 5 – 100 °C

6.13. Продолжительность этапа интенсивного прогрева асфальтобетона

Толщина слоя покрытия, м	Продолжительность интенсивного прогрева, ч
0,05	0,25
0,10	0,5
0,15	0,75
0,2	1,15

На рисунке 6.21 представлено распределение температуры на стыке сопрягаемых полос при разных температурах укладки горячей смеси. Из представленных данных видно, что характер изменения температуры «нагрев–охлаждение» в зоне стыка полос не зависит от температуры горячей смеси, но величина нагрева асфальтобетона края полосы с низкой температурой зависит от температуры горячей смеси сопрягаемой полосы.

Установлено, что продолжительность интенсивного нагрева края полосы с пониженной температурой не зависит от температуры горячей смеси сопряженной полосы и, при равной толщине укладываемого слоя, находится в пределах 15...20 мин (табл. 6.13).

Распределение температуры на стыке полос покрытия при процессе «нагрев – охлаждение» позволяет сделать вывод, что на стык полос покрытия происходит нестационарный тепловой процесс.

6.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ ПРИ УКЛАДКЕ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Экспериментальными исследованиями установлено, что при распределении и предварительном уплотнении горячей асфальтобетонной смеси, независимо от ширины полосы покрытия, в поперечном профиле покрытия имеются участки, на которых коэффициент предварительного уплотнения горячей смеси ниже, чем в средней части покрытия [12].

Установленная неравномерность в распределении коэффициента предварительного уплотнения отмечена при работе асфальтоукладчиков как иностранного производства, так и отечественного при устройстве полос покрытия шириной 3,5 и 7,5 м.

В обоих случаях понижение коэффициента наблюдается на крае укладываемой полосы. Такое распределение предварительной плотности горячей смеси при укладке можно объяснить неравномерностью распределения параметров вибрации по длине вибрационного бруса или нарушением температурных режимов горячей смеси по ширине покрытия полосы.

С целью уточнения распределения температуры по ширине полосы покрытия проведены исследования в производственных условиях (рис. 6.22). Измерение температуры в разных точках по ширине полосы покрытия осуществлялось термометрами и тепловизором Testo 880, съемка производилась при разных температурах воздуха (рис. 6.23).

Измерения температуры производились непосредственно по окончании распределения смеси и продолжались в процессе охлаждения полосы покрытия до момента окончания работы катков. На рисунке 6.24 представлен снимок теплового изображения места стыка полос покрытия.

Из представленного рисунка видно, что температура горячей асфальтобетонной смеси меняет свою величину по мере приближения к остывшему асфальтобетону, что характерно для устройства многополосных дорожных покрытий нежесткого типа.

Наиболее резкое понижение температуры наблюдается в зоне стыка полос покрытия, причем непосредственно сразу после укладки горячей смеси. Изменение температуры смеси в зоне контакта будет зависеть от теплофизических характеристик асфальтобетонной смеси. Характер изменения теплового изображения при разных температурах горячей смеси представлен на рис. 6.25, 6.26.



Рис. 6.22. Строительство дорожного покрытия автомобильной дороги «Тамбов – Воронеж»



Рис. 6.23. Укладка новой полосы покрытия с ранее уложенной

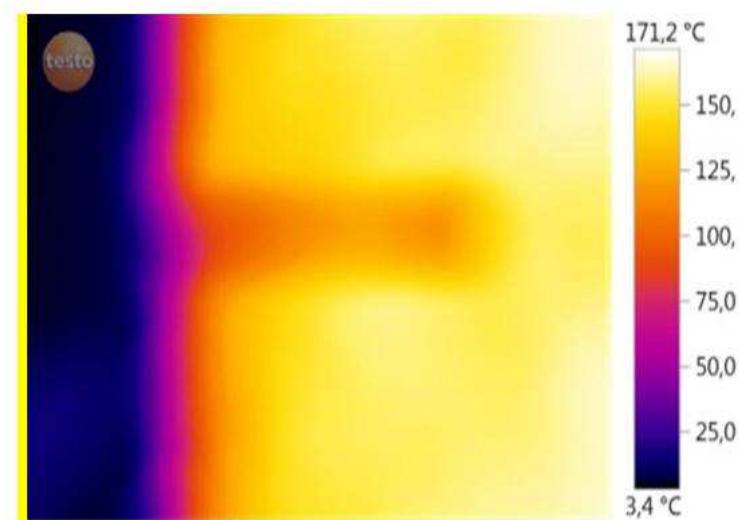


Рис. 6.24. Тепловое изображение участка покрытия после распределения смеси
 (температура воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура основания $-2\dots+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура смеси $165\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость ветка от 0 до 3 м/с)



Рис. 6.25. Тепловое изображение участка покрытия через 5 минут после распределения смеси
 (температура воздуха $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура основания $2\dots3\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура смеси $165\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость ветка от 0 до 3 м/с)

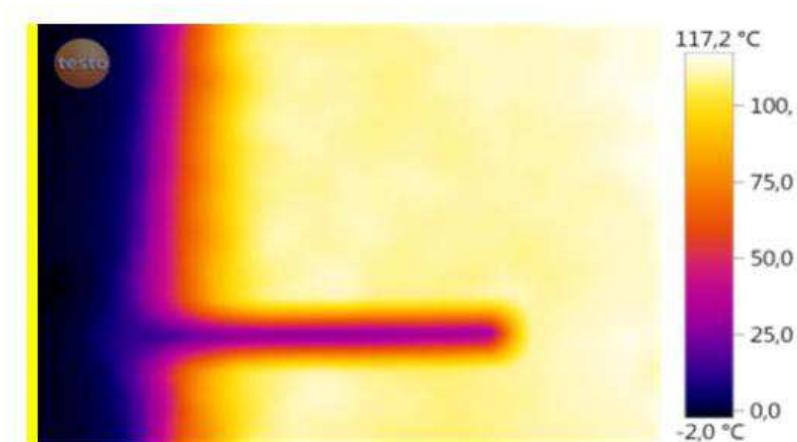


Рис. 6.26. Тепловое изображение участка покрытия через 15 мин после распределения смеси

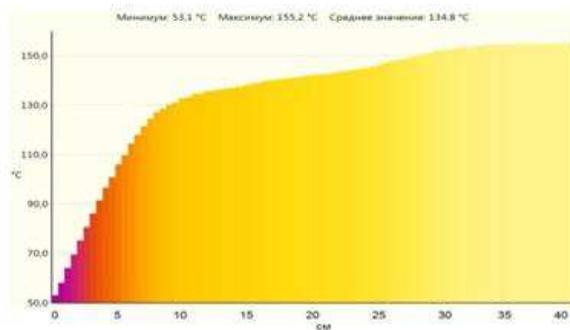
На рисунке 6.27 представлено распределение температуры горячей смеси полосы покрытия на разном расстоянии (до 0,4 м) от места стыка полос покрытия при разной продолжительности охлаждения горячей смеси.

Анализ результатов распределения температуры смеси на полосе покрытия на разном расстоянии от места стыка сопряженных полос приведен на рис. 6.28.

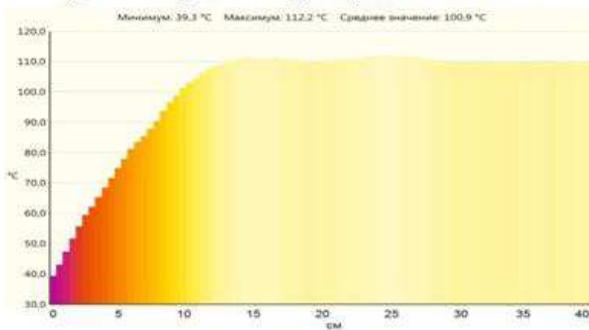
Анализируя данные рис. 6.28, можно сделать вывод, что ширина полосы охлаждения достигает 10...12 см. Зона с пониженной температурой смеси, при которой процесс уплотнения не соответствует обеспечению температурных режимов, достигает от 0,03 до 0,1 м в зависимости от температуры смеси при укладке сопряженного слоя. В ходе эксплуатации данный участок в большинстве случаев разрушается, что ведет к необходимости его ремонта после нескольких лет эксплуатации.

На рисунке 6.29 представлено распределение температуры асфальтобетона по ширине полосы покрытия во времени, полученное непосредственно при производстве работ по устройству покрытия.

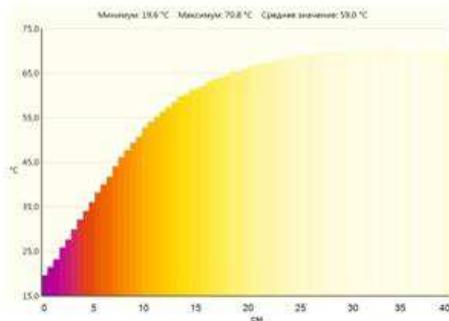
Из представленных на рис. 6.29 данных видно, что в зоне контакта сопряженных полос покрытия при раздельном способе их укладки происходит резкое понижение температуры асфальтобетонной смеси. Нагрев смеси за счет передачи тепла от сопряженного слоя полосы не обеспечивает достижения требуемой температуры.



через 5 минут после распределения смеси



через 15 минут после распределения смеси;



через 30 минут после распределения смеси;

Рис. 6.27. Тепловое изображение участка автомобильной дороги в зависимости от времени распределения асфальтобетонной смеси по покрытию (температура воздуха 5 °С, температура основания 2...3 °С, начальная температура смеси 165 °С, скорость ветка от 0...3 м/с)

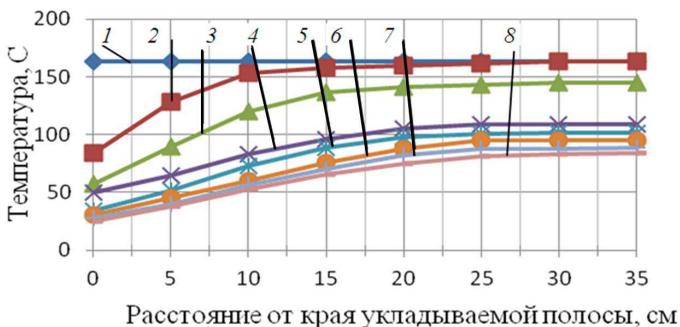


Рис. 6.28. Изменение температуры горячей асфальтобетонной смеси от времени укладки в зависимости от расстояния края укладываемой полосы покрытия:

1 – после укладки; 2 – через 5 мин; 3 – 10 мин; 4 – 15 мин; 5 – 20 мин; 6 – 25 мин; 7 – 30 мин; 8 – 35 мин

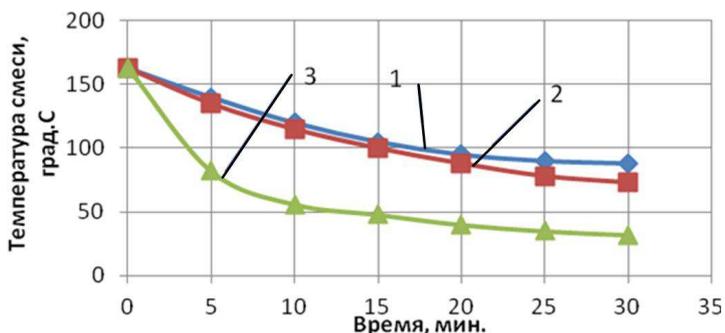


Рис. 6.29. Зависимость изменения температуры горячей асфальтобетонной смеси по ширине полосы покрытия от времени:

1 – посередине (оси) полосы; 2 – на расстоянии 0,2 м от края полосы; 3 – на стыке сопряженных полос

Как уже отмечалось ранее, перед укладкой сопряженной полосы покрытия необходимо производить прогрев края ранее уложенной полосы на ширину 0,1...0,15 м до температуры 70...80 °С [43]. Для этой цели применяют линейку-разогреватель, которая разогревает слой асфальтобетона толщиной 30...40 мм на ширину 0,1...0,15 м за 2...3 мин до температуры 80...100 °С. До начала укладки новой полосы вертикальный край асфальтобетона ранее уложенной полосы смазывают битумной эмульсией. Вновь устраиваемая полоса соприкасается в этом случае с разогретым краем ранее уложенной полосы, который

уплотняется одновременно с новой, что позволяет обеспечить необходимый температурный режим горячей смеси в зоне стыка полос.

Для уточнения влияния температуры асфальтобетонной смеси ранее уложенной полосы покрытия в зоне стыка полос разработана программа, позволяющая определять распределение температуры в зоне стыка сопряженных полос при разной температуре асфальтобетона края первой полосы [24]. На рисунке 6.30 представлены результаты моделирования распределения температуры в зоне стыка сопряженных полос при разных значениях температуры края ранее уложенной полосы покрытия при температуре воздуха 20 °С и толщине слоя при укладке 0,05 м.

Существующими инструкциями по строительству дорожных асфальтобетонных покрытий предусматривается, при укладке отдельных полос дорожного покрытия, перед укладкой второй полосы покрытия производить прогрев края ранее уложенной полосы на ширину 0,1...0,15 м до температуры 70...80 °С [43, 49]. Для этой цели применяют линейку-разогреватель, которая позволяет разогревать асфальтобетон слоем 30...40 мм на ширину 0,1...0,15 м за 2...3 мин до температуры 80...100 °С [6, 49]. До начала укладки новой полосы вертикальный край ранее уложенного асфальтобетона смазывают битумной эмульсией. При устройстве новой полосы смесь распределяется толщиной слоя, с учетом его уменьшения при уплотнении до толщины ранее устроенной полосы. Вновь устраиваемая полоса соприкасается в этом случае с разогретым краем ранее устроенной полосы, который уплотняется одновременно с новой полосой, что позволяет обеспечить температурные режимы горячей смеси в зоне стыка полос.

Для уточнения влияния температуры асфальтобетона ранее уложенной полосы на изменение температуры асфальтобетона в зоне стыка полос разработана программа, позволяющая определять распределение температуры в зоне стыка сопряженных полос при разной температуре асфальтобетона края первой полосы. На рисунке 6.31 представлены результаты моделирования распределения температуры в зоне стыка сопряженных полос при разных значениях температуры края ранее уложенной полосы покрытия при температуре воздуха 20 °С и толщине слоя при укладке 0,05 м (тип смеси Б, битум марки 90/130). Из представленных результатов видно, что температура асфальтобетона на крае ранее уложенной полосы покрытия существенно влияет на распределение температуры горячей смеси в зоне стыка сопряженных полос. При укладке сопряженного слоя покрытия с более высокой температурой смеси, за счет передачи тепла, происходит дополнительный нагрев ранее уложенного слоя. Повышение температуры края ранее уложенной полосы составляет в зависимости от разницы температуры слоев от 15 до 20 °С.

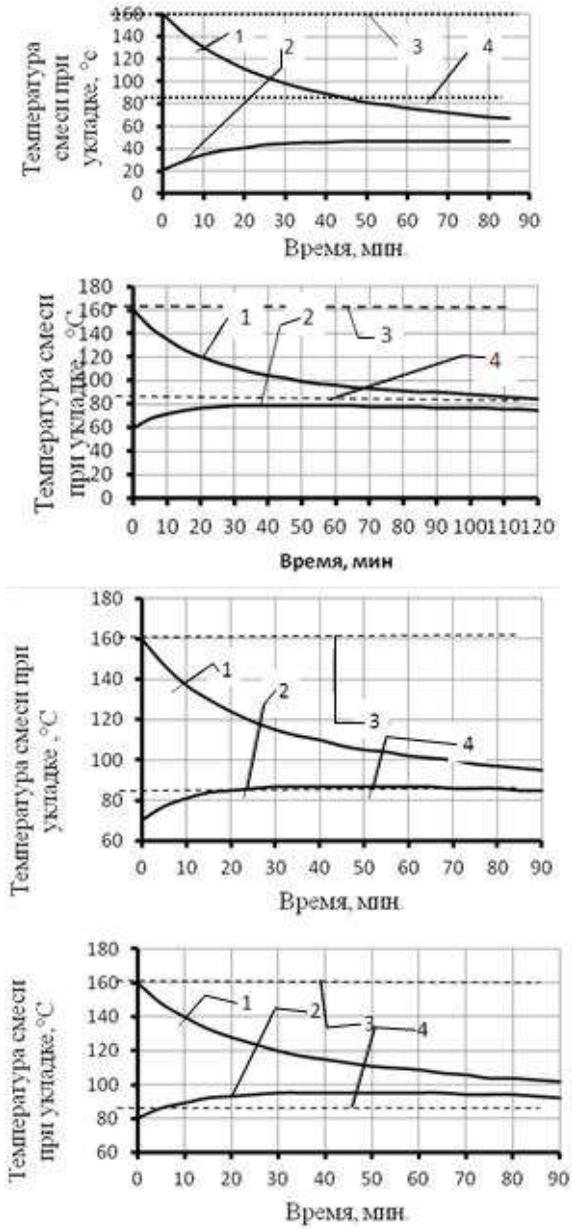


Рис. 6.30. Распределение температуры смеси в зоне стыка полос покрытия

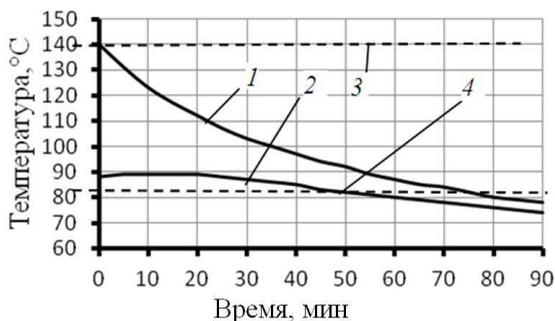


Рис. 6.31. Распределение температуры асфальтобетона в зоне стыка полос (температура смеси при укладке 140 °С, толщина слоя укладки 0,05 м, температура воздуха 20 °С)

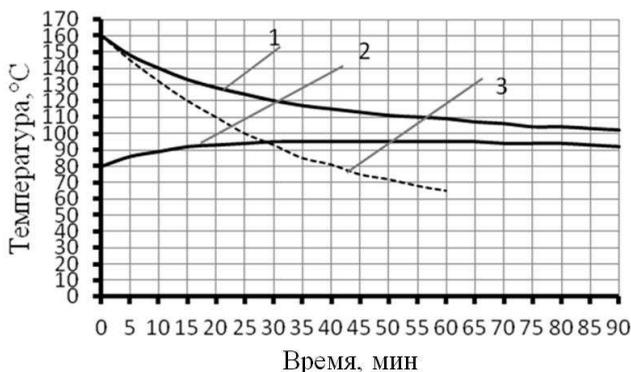


Рис. 6.32. Изменение температуры асфальтобетона в зоне стыка сопряженных полос покрытия:

1 – первая полоса; вторая полоса, 2 – сопряженная полоса;
3 – при укладке одной полосы покрытия

Анализ результатов показал, что после укладки сопряженного слоя максимальная температура края полосы, за счет нагрева от сопряженного слоя, достигается через 10...20 мин. Следовательно, процесс уплотнения асфальтобетона на стыке полос необходимо осуществлять после нагрева через некоторый промежуток времени после укладки сопряженного слоя покрытия.

Рекомендуемые температуры нагрева асфальтобетона на крае первой полосы не соответствуют температурным режимам горячей смеси при уплотнении [43]. При нагреве асфальтобетона в зоне стыка до 80 °С и дополнительного повышения температуры смеси на 15...

20 °С, температура смеси достигнет величины 95...100 °С, что не соответствует температуре смеси в начале процесса уплотнения. При укладке асфальтобетонной смеси с более низкими температурами эффект дополнительного нагрева асфальтобетона в зоне стыка полос понижается (рис. 6.31).

Установлено, что темп охлаждения горячей смеси в зоне стыка полос при укладке сопряженного слоя покрытия понижается, что позволяет увеличить время на уплотнение асфальтобетона в зоне стыка (рис. 6.32).

6.6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УКЛАДКИ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ОДНИМ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОМ СО СМЕЩЕНИЕМ ПОЛОС ПОКРЫТИЯ ПРИ УКЛАДКЕ

В зависимости от условий производства работ применяется технология устройства многополосных покрытий нежесткого типа одним асфальтоукладчиком, при которой асфальтоукладчик смещается с полосы на полосу при устройстве покрытия (рис. 6.33).

Схема укладки асфальтобетонной смеси представлена на рис. 6.34. Длина захватки по укладке асфальтобетонной смеси при такой технологии, с условием обеспечения температурных режимов в зоне стыка



Рис. 6.33. Укладка асфальтобетонной смеси одним асфальтоукладчиком со смещением полос дорожного покрытия

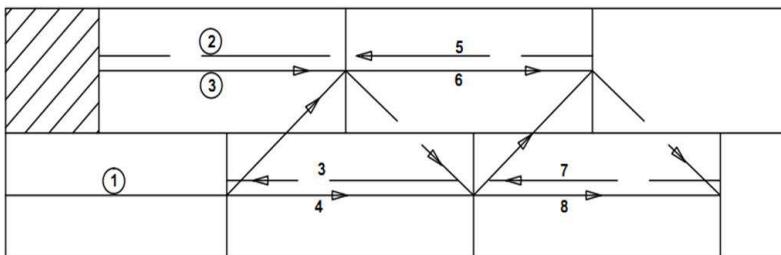


Рис. 6.34. Схема укладки полос дорожного покрытия нежесткого типа одним асфальтоукладчиком со смещением полос

сопрягаемых полос покрытия, зависит от темпа охлаждения горячей смеси. Известно, что на темп охлаждения горячей смеси влияют теплофизические свойства, конструктивные параметры покрытия, скорость ветра. В то же время существующими рекомендациями при определении длины укладываемой полосы, с учетом обеспечения температурных режимов горячей смеси в зоне стыка сопряженных полос, учитывается толщина слоя и температура окружающего воздуха (табл. 6.14) [6, 14].

В зависимости от свойств асфальтобетонной смеси, температурных условий производства работ и конструктивных параметров покрытия длину захватки при укладке горячей смеси, с учетом обеспечения температурных режимов смеси на стыке полос, предложено определять выражением [8]

$$l_{\text{дл}} = K_1 K_2 h (C\gamma - 2t) v_1 v_2 / (a_1 + a_2)(v_1 + v_2), \text{ м}, \quad (6.21)$$

6.14. Влияние температуры воздуха на длину полосы укладки

Температура воздуха при отсутствии ветра, °С	Длина укладываемой полосы, м	
	Защищенные от ветра	Открытые участки
5...10	30...40	25...30
10...15	40...60	30...50
15...20	60...80	50...70
20...25	80...100	70...80
≥ 25	100...150	80...100

где K_1 – коэффициент, зависящий от температурных условий производства работ, определяемый из выражения

$$K_1 = 7,5(t_v - t_b / t_k - t_b); \quad (6.22)$$

здесь t_v – температура горячей смеси в начале уплотнения, °С; t_k – допустимая температура смеси в зоне стыка сопрягаемых полос покрытия (60...70 °С), °С; t_b – температура воздуха, °С; K_2 – коэффициент, учитывающий температуру основания (при температуре основания, равной температуре воздуха и соответствует температуре воздуха до 25 °С, коэффициент принимается равным 1. При температуре воздуха свыше 25 °С, численное значение K_2 принимается равным 1,2); h – толщина укладываемого слоя покрытия, м; C – теплоемкость асфальтобетонной смеси, ккал/(кг·град), принимается (0,3...0,4); γ – требуемая плотность асфальтобетона, кг/м³; t – продолжительность перехода на смежную полосу, ч (примерно 0,06 ч); v_1 – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; v_2 – транспортная скорость асфальтоукладчика, м/мин (примерно 10...12); a_1 – коэффициент теплоотдачи от горячей смеси за счет излучения, ккал/(м²ч град, примерно равен 6); a_2 – коэффициент теплоотдачи от горячей смеси за счет конвекции (при скорости ветра до 1 м/с принимается равным 5, при скорости ветра 10 м/с принимается равным 12, при большем значении скорости принимается 16).

Используя предложенную на рис. 6.35 зависимость, представлены результаты расчетов по определению длины полосы укладки с учетом температурных режимов горячей смеси в зоне стыка полос покрытия в зависимости от температуры воздуха при разных значениях температуры горячей асфальтобетонной смеси при укладке.

Анализ предложенной зависимости и представленных на рис. данных показали, что при повышении температуры воздуха свыше 20 °С наблюдается резкое увеличение длины укладываемой полосы покрытия, что можно объяснить введением в предложенную зависимость коэффициента влияния температуры основания K_2 [8, 33].

Действительно, температура основания влияет на температурные режимы горячей смеси, но не скачкообразно, а с учетом разницы температуры основания и окружающего воздуха [15].

Установлено, что теплоемкость асфальтобетонной смеси, влияющая на температурные режимы горячей смеси, зависит от температуры битума и процентного содержания минерального материала [15]. В связи с этим, принятая допустимая температура асфальтобетона в зоне стыка полос не учитывает свойств применяемого асфальтобетона, которые зависят от типа смеси и марки битума и имеют разные температурные режимы как при укладке, так и уплотнении.

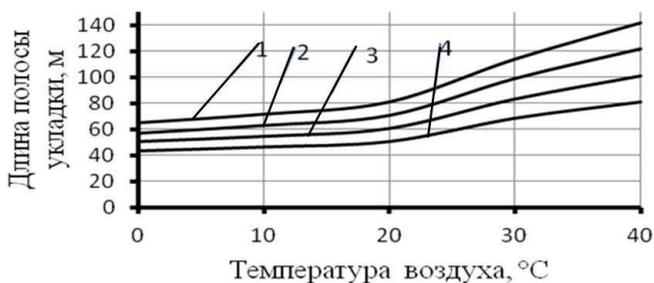


Рис. 6.35. Влияние температуры воздуха на длину полосы укладки горячей смеси одним асфальтоукладчиком:
 1 – температура смеси 180 °C; 2 – 160 °C; 3 – 140 °C; 4 – 120 °C

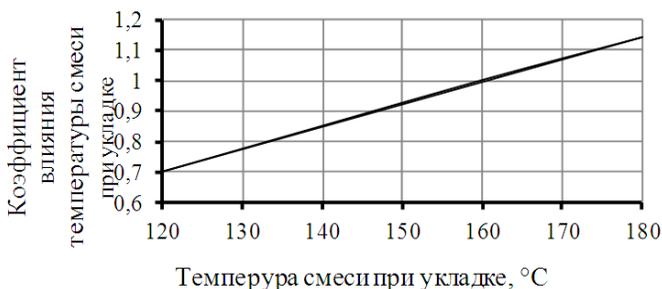


Рис. 6.36. Влияние температуры смеси при ее укладке в дорожное покрытие

В результате проведенного анализа данной зависимости установлено, что между температурой смеси при укладке и длиной полосы покрытия существует прямо пропорциональная зависимость, которая получена по результатам расчета предложенной зависимости и представлена в виде коэффициента влияния температуры смеси при укладке на длину укладываемой полосы покрытия (рис. 6.36).

Известно, что обеспечение температурных режимов асфальтобетонной смеси в зоне стыка сопрягаемых полос покрытия зависит от своей смеси, темпа охлаждения и промежутка времени между укладками смежных полос.

С учетом этих факторов длина полосы укладки будет зависеть также от рабочей скорости асфальтоукладчика, которая зависит от принятого темпа строительства покрытия и производственных возможностей обеспечения горячей смесью объекта работ.

При раздельной укладке полос покрытия между длиной укладываемой полосы и скоростью асфальтоукладчика существует линейная

зависимость. При укладке смеси со смещением асфальтоукладчика его производительность снижается за счет его перемещения с одной захватки на другую, что влияет на среднюю скорость укладки смеси.

Зависимость длины полосы укладки от рабочей скорости асфальтоукладчика, рассчитанная по зависимости (6.22), представлена на рис. 6.37.

Из представленных данных видно, что в отличие от технологии укладки горячей смеси при устройстве покрытия отдельными полосами, а также с увеличенной шириной полосы укладки, длина полосы укладки со смещением асфальтоукладчика с одной полосы на другую уменьшается, что свидетельствует о снижении эффективности работы механизированного звена машин по устройству дорожного покрытия нежесткого типа.

Зависимость длины захватки при такой технологии от рабочей скорости имеет вид:

$$L = 74v^{0.778}, \text{ м}, \quad (6.23)$$

где L – длина захватки при укладке горячей смеси; v – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Доказано, что при укладке горячей асфальтобетонной смеси в дорожную полосу покрытия охлаждение происходит не только на поверхности слоя, но и на боковой поверхности, что способствует повышению интенсивности охлаждения смеси в зоне стыка сопряженных полос. Охлаждение смеси в зоне стыка зависит не только от температуры поставляемой смеси и температуры воздуха, но и продолжительности между укладками горячей смеси в смежные полосы покрытия. Увеличение длины укладки асфальтобетонной смеси, при незначительной рабочей скорости асфальтоукладчика, приводит к повышению времени укладки смеси сопряженной полосы, что приводит к понижению температуры смеси в зоне стыка полос. Понижение температуры



Рис. 6.37. Зависимость длины захватки от рабочей скорости асфальтоукладчика при укладке

горячей смеси в зоне сопряжения полос, ниже предельной, приводит к снижению физико-механических характеристик асфальтобетона при уплотнении (прочности, водонепроницаемости, плотности), что способствует разрушению дорожного покрытия в зоне стыка полос в процессе эксплуатации (рис. 6.38).

Условие обеспечения температурного режима в зоне стыка сопряженных полос покрытия при укладке асфальтобетонной смеси можно представить в виде

$$t_{см} \geq [t_{см}], \quad (6.24)$$

где $t_{см}$ – температура смеси при укладке сопряженной полосы, °С; $[t_{см}]$ – допускаемая нижняя граница температурного интервала горячей смеси при укладке асфальтобетонной смеси, зависящая от типа смеси и марки битума, °С.

Следовательно, условие (6.24) можно представить в виде

$$t_{ны} - t_{оу} = \Delta t \geq [t_{см}], \quad (6.25)$$

где Δt – температурный интервал между началом ($t_{ны}$) и $t_{оу}$ окончанием укладки горячей асфальтобетонной смеси, °С.

Установленный температурный интервал при укладке горячей асфальтобетонной смеси зависит от свойств смеси, характеризуемой вяжущим материалом. Изменение температуры в заданном интервале зависит от темпа охлаждения слоя покрытия, который определяет время нахождения горячей смеси в установленном интервале температур, а следовательно и время укладки асфальтобетонной смеси. В зависимости от принятой скорости асфальтоукладчика и времени укладки смеси определяется длины полосы укладки.

Ранее отмечалось, что рабочая скорость асфальтоукладчика зависит от конкретной организации производства работ. Поэтому для обеспечения качества работ при строительстве многополосных покры-



Рис. 6.38. Дефект дорожного покрытия на стыке двух полос

тий и обеспечения качества уплотнения асфальтобетонной смеси в зоне стыка сопряженных полос необходимо знать время нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале с учетом разных факторов, влияющих на процесс охлаждения горячей смеси.

Снижение температуры горячей смеси после укладки смежной полосы зависит от разных факторов и в общем виде можно представить в виде функции:

$$t_{\text{ст}} = f(t_{\text{в}}; t_{\text{см}}; h; v_{\text{в}}; K_{\text{ш}}; t_{\text{ос}}; \tau), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.26)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{см}}$ – температура смеси при укладке, $^\circ\text{C}$; h – толщина слоя смеси; $v_{\text{в}}$ – скорость ветра, м/с; $K_{\text{к}}$ – коэффициент, учитывающий снижение температуры смеси на стыке смежных полос, $t_{\text{ос}}$ – температура основания; τ – промежуток времени между температурой смеси при укладке и ее измерением, мин.

С учетом отмеченных факторов время охлаждения горячей смеси можно представить в виде:

$$\tau = f(t_{\text{в}}; t_{\text{см}}; t_{\text{оп}}; h; v_{\text{в}}; K_{\text{ш}}; K_{\text{ос}}), \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ мин}, \quad (6.27)$$

где $t_{\text{оп}}$ – температура смеси при окончании укладки смеси в полосу покрытия, $^\circ\text{C}$.

При назначении длины захватки необходимо обеспечить монолитность продольного шва в зоне стыка сопряженных полос, которая возможна при условии обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей. Температурные режимы асфальтобетонных смесей зависят от типа смеси и марки битума, конструктивных параметров слоя, погодными условиями и регламентированы нормативными документами [6, 16, 43].

В таблице 6.15 представлены температурные режимы горячих асфальтобетонных смесей в зависимости от типа смеси и марки битума [6].

Для установления общей закономерности влияния отмеченных факторов на время соответствия температуры смеси принятым температурным интервалам смеси при устройстве многополосных покрытий при смещении асфальтоукладчика с одной полосы на другую использована программа по расчету процесса охлаждения горячей смеси [31].

Анализ значений температур, представленных в табл. 6.15, показал, что температурные границы укладки смеси и окончания уплотнения покрытия находятся в широком интервале значений и зависят от применяемой смеси.

Моделирование процесса укладки с учетом данных табл. 6.15 осуществлялось в температурном интервале 160...90 $^\circ\text{C}$. В таблице 6.16 представлено время охлаждения горячей смеси при разных

**6.15. Рекомендуемые температурные режимы уплотнения
плотного асфальтобетона разных типов в зависимости
от марки битума**

Марка битума	Рекомендуемые интервалы температуры уплотнения дорожных покрытий на этапах, °С					
	Предварительный		Основной		Окончательный	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец

Асфальтобетон типа А

БНД 40/60	160...150	140...135	140...135	115...110	115...110	105...100
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	110...105	110...105	100...95
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	105...100	105...100	95...90
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	95...90	95...90	85...80
БНД 200/300	130...120	110...105	110...105	90...80	90...80	75...70
СГ 130/200	120...110	100...90	100...90	75...65	75...65	60...55

Асфальтобетон типа Б

БНД 40/60	160...150	140...130	140...130	110...105	110...105	100...95
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	115...105	115...105	95...90
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	105...100	105...100	90...85
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	95...90	95...90	80...75
БНД 200/300	130...120	110...100	110...100	80...75	80...75	70...65
СГ 130/200	120...110	95...90	95...90	70...65	70...65	55...50

<i>Асфальтобетон типа В</i>								
БНД 40/60	160... 150	140... 135	140... 135	125... 120	125... 120	110... 105	110... 105	95...90
БНД 60/90	155... 145	135... 130	135... 130	120... 115	120... 115	105... 100	105... 100	90...85
БНД90/130	150... 140	130... 125	130... 125	115... 110	115... 110	100...95	100...95	85...80
БНД130/200	140... 130	115... 110	115... 110	105... 110	105... 110	90...85	90...85	75...70
БНД200/300	130... 120	110... 100	110... 100	90...95	90...95	75...80	75...80	65...60
СГ 130/200	120... 110	95...90	95...90	80...75	80...75	65...60	65...60	55...50

<i>Асфальтобетон типа Г</i>								
БНД 40/60	160... 150	140... 135	140... 135	125... 120	125... 120	110... 105	110... 105	95...90
БНД 60/90	155... 145	135... 130	135... 130	120... 115	120... 115	105... 100	105... 100	90...85
БНД 90/130	150... 140	130... 125	130... 125	115... 110	115... 110	100... 95	100... 95	85...80
БНД130/200	140... 130	115... 110	115... 110	105... 110	105... 110	90...85	90...85	75...70
БНД200/300	130... 120	110... 100	110... 100	90...95	90...95	75...80	75...80	65...60
СГ 130/200	120... 110	95...90	95...90	80...75	80...75	65...60	65...60	55...50

6.16. Влияние температуры воздуха и горячей смеси при укладке на время охлаждения при устройстве многополосных дорожных покрытий

Температура воздуха, °С		-10	0	5	10	20	30	40	50	Зависимость
Температура смеси, °С	160	36,6	40,5	42,8	45,4	51,7	60,5	74,0	99,0	$\tau = 40,5e^{0,0143t_B}$
	140	30,2	33,6	35,6	37,9	43,6	51,5	63,8	83,7	$\tau = 33,4e^{0,0153t_B}$
	120	23,6	26,4	28,1	30,1	34,9	41,9	52,8	74,1	$\tau = 26,5e^{0,0164t_B}$
	100	16,5	18,7	20,0	21,5	25,4	31,0	40,2	58,9	$\tau = 18,6e^{0,0194t_B}$

температурах ее укладке с учетом обеспечения температурных режимов на стыке сопряженных полос покрытия (толщина слоя 0,05 м, скорость укладки смеси 1 м/мин, скорость ветра – 0 м/с).

Для установления общей закономерности влияния температуры воздуха на время охлаждения смеси, представим данные табл. 6.16 в относительных значениях, принимая за единицу температуру смеси 160 °С (табл. 6.17).

Из представленных в табл. 6.17 данных видно, что в отличие от температуры воздуха, температура смеси при укладке в большей степени влияет на время укладки смеси в полосу покрытия, чем температура воздуха.

6.17. Влияние температуры воздуха и горячей смеси на процесс охлаждения асфальтобетонной смеси (в относительных значениях)

Температура воздуха, °С		-10	0	5	10	20	30	40	50	$\Sigma n/n$
Температура смеси при укладке, °С.	160	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	140	0,83	0,83	0,83	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88	0,84
	120	0,64	0,65	0,65	0,66	0,67	0,69	0,71	0,74	0,67
	100	0,45	0,46	0,47	0,47	0,49	0,51	0,54	0,59	0,49
	80	0,24	0,25	0,25	0,25	0,27	0,29	0,32	0,38	0,28

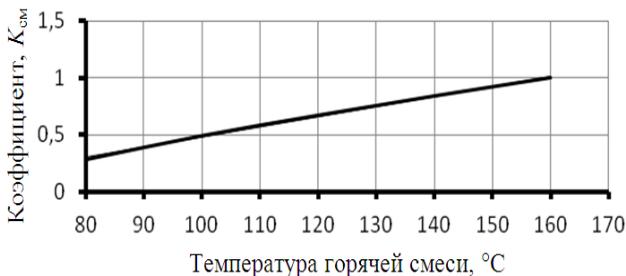


Рис. 6.39. Зависимость коэффициента влияния температуры смеси $K_{см}$ при укладке на время работы звена машин при устройстве многополосного покрытия

Анализ данных табл. 6.17 в относительных значениях показал, что при температуре воздуха до 20 °C влияние температуры укладываемой горячей смеси проявляется значительней, чем при более высоких температурах воздуха. Однако, независимо от температуры воздуха, влияние температуры смеси на время работы носит общий характер.

Обозначим влияние температуры горячей смеси на продолжительность устройства смежных полос покрытия через коэффициент $K_{см}$. Зависимость коэффициента $K_{см}$ от температуры смеси при укладке на время работы звена машин при устройстве смежных полос покрытия представлено на рис. 6.39.

Численное значение коэффициента $K_{см}$ определяется из выражения

$$K_{см} = 0,0089t_{см} - 0,418, \quad (6.28)$$

где $t_{см}$ – температура горячей смеси при укладке, °C. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Темп охлаждения горячей смеси при устройстве дорожных покрытий, в том числе и зоне стыка сопряженных полос покрытия, зависит от толщины укладываемых слоев полос покрытия. Минимальная толщина слоя покрытия регламентирована и находится в интервале от 0,03 до 0,08 м [45].

Влияние толщины слоя полосы покрытия на продолжительность охлаждения горячей смеси в зоне стыка полос покрытия представлено в табл. 6.18 и на рис. 6.40. Коэффициент корреляции уравнений, представленных в табл. 6.18, составляет 0,98...0,99.

Из представленных данных видно, что температура воздуха существенно влияет на темп охлаждения горячей асфальтобетонной смеси в зоне сопряженных полос покрытия и зависит от толщины укладываемого слоя. Распределение горячей смеси производится слоями на

**6.18. Влияние толщины слоя полосы покрытия
на продолжительность охлаждения смеси в зоне стыка полос
в заданном температурном интервале**

Температура воздуха, °С		-10	0	5	10	20	30	40	50	Зависимость
Толщина слоя, см	3	22,0	24,3	25,7	27,2	31,0	36,3	44,4	50,4	$\tau = 24,2e^{0,0142t_B}$
	5	36,6	40,5	42,8	45,3	51,7	60,5	74,0	99,0	$\tau = 40,5e^{0,0143t_B}$
	7	51,3	56,7	59,9	63,5	72,4	84,8	103	138	$\tau = 56,7e^{0,0146t_B}$
	10	73,3	81,0	85,6	90,7	103	121	147	170	$\tau = 81e^{0,0143t_B}$

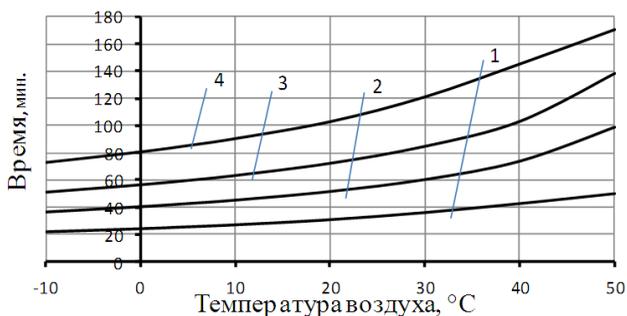


Рис. 6.40. Зависимость времени охлаждения горячей смеси в зоне стыка полос от температуры воздуха при разных толщинах укладываемого слоя полосы покрытия:

1 – толщина слоя 0,03 м; *2* – 0,05 м; *3* – 0,07 м; *4* – 0,1 м

большую поверхность покрытия при сравнительно небольшой толщине слоя. При одинаковых теплофизических характеристиках горячей смеси и равной поверхности покрытия количество тепла в слое зависит от толщины укладываемого слоя. Поэтому температура асфальтобетонной смеси в зоне стыка полос зависит от толщины слоя полосы покрытия.

Представим данные табл. 6.18 в относительных величинах, принимая за единицу время при толщине слоя 0,05. Анализ значений в относительных величинах показал, что между толщиной слоя покрытия и временем нахождения горячей смеси в требуемом интервале температур существует зависимость, которая представлена на рис. 6.41.

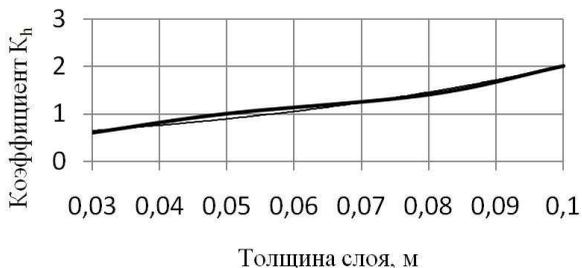


Рис. 6.41. Зависимость коэффициента влияния толщины слоя полосы покрытия на время соответствия температуры смеси в зоне ее стыка температурным интервалам

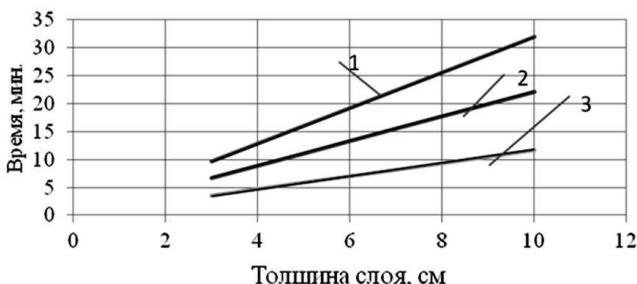


Рис. 6.42. Влияние температуры смеси при укладке на время охлаждения горячей смеси в интервале температуры 160...60 °C при разной толщине укладываемого слоя:
 1 – температура смеси 160 °C; 2 – 140 °C; 3 – 120 °C
 (смесь типа А на битуме марки 40/60)

Численное значение коэффициента определяется из выражения:

$$K_h = 0,395e^{16,27h}, \quad (6.29)$$

где h – толщина слоя покрытия, м. Коэффициент корреляции равен 0,97.

Установлено, что время нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале зависит от температуры смеси при укладке. При понижении температуры смеси при укладке от 160 до 120 °C численное значение коэффициента K_h уменьшается на треть (рис. 6.42).

Ранее доказано, что скорость ветра значительно влияет на темп охлаждения горячей смеси, а следовательно, на время нахождения смеси в заданном температурном интервале, зависит от скорости ветра. По результатам моделирования установлено, что влияние скорости ветра на время охлаждения можно определить по формуле

$$K_v = 0,92e^{-0,067v}, \quad (6.30)$$

где v – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции 0,97.

Нормативными документами определены рекомендуемые области применения асфальтобетонов при устройстве дорожных покрытий, которые зависят от дорожно-климатической зоны строительства автомобильной дороги [40, 48].

Для приготовления горячих асфальтобетонных смесей, для одного и того же типа смеси, могут применяться разные марки битума, которые рекомендованы в зависимости от дорожно-климатической зоны строительства автомобильной дороги. С учетом этого эффективные температурные режимы асфальтобетонных смесей при устройстве дорожных покрытий нежесткого типа различаются между собой.

Нормативными документами рекомендуется для 1 – 3 дорожно-климатических зон для приготовления горячих асфальтобетонных смесей применять битумы марок 60/90, 90/130, 130/200, для 1, 2 – марки битумов 40/60, 60/90 и 90/130.

В таблице 6.19 представлены значения времени соответствия температурных режимов горячих смесей в зависимости от температуры воздуха для разных типов смеси и марок битума, а также данные по продолжительности охлаждения горячих асфальтобетонных смесей при условии обеспечения температурных режимов при разной толщине укладываемого слоя полосы.

Из данных табл. 6.19 видно, что продолжительность нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале зависит от температуры окончания эффективного уплотнения горячей смеси, с учетом типа смеси и марки битума, и не зависит от толщины слоя покрытия.

Для установления общей закономерности влияния нижней температурной границы уплотнения горячей асфальтобетонной смеси представим данные табл. 6.19 в относительных величинах, условно принимая за единицу продолжительность охлаждения горячей смеси при ее температуре 60°C . Обозначим данную величину коэффициентом влияния окончания уплотнения покрытия $K_{н.г}$.

На рисунке 6.43 представлена зависимость коэффициента $K_{н.г}$ от численного значения нижнего температурного интервала горячей смеси в зависимости от типа смеси и марки битума. Численное значение коэффициента влияния нижней температурной границы окончания работ на продолжительность нахождения горячей смеси в зоне стыка полос определяется из зависимости

$$K_{н.г} = -0,9465\ln(t_{ук}) + 4,85, \quad (6.31)$$

где $t_{ук}$ – нижняя температурная граница смеси при укладке. Коэффициент корреляции равен 0,975.

**6.19. Влияние типа асфальтобетона и марки битума
на продолжительность охлаждения горячей смеси
на стыке сопряженных полос покрытия**

Температура воздуха, °С	-10	0	10	20	40
-------------------------	-----	---	----	----	----

Асфальтобетон типа А. Битум 40/60.

Температура окончания уплотнения – 100 °С

Температура смеси при укладке, °С	160	19,5	21	22,8	25	31
	140	13,3	14,5	15,8	17,4	22
	120	6,9	7,5	8,3	9,2	11,9

Асфальтобетон типа А. Битум 60/90.

Температура окончания уплотнения – 95 °С

Температура смеси при укладке, °С	155	19,8	21,5	23,4	25,8	32,3
	140	15,2	16,5	18,1	20,0	25,4
	120	8,7	9,5	10,5	11,8	15,3
	100	1,8	2,0	2,2	2,5	3,4

Асфальтобетон типа А. Битум 90/130.

Температура окончания уплотнения – 90 °С

Температура смеси при укладке, °С	150	22,4	24,2	26,7	29,6	37,6
	140	19	20,7	22,7	25,2	32,6
	120	11,8	12,9	14,3	16,0	21,1
	100	4,1	4,5	5,1	5,8	7,9

Асфальтобетон типа Б. Битум 40/60.

Температура окончания уплотнения – 95 °С

Температура смеси при укладке, °С	160	21,3	23,1	25,2	27,6	34,5
	140	15,2	16,5	18,1	20,0	25,4
	120	8,7	9,5	10,5	11,8	15,3
	100	1,8	2,0	2,2	2,5	3,0

Продолжение табл. 6.19

Температура воздуха, °С	-10	0	10	20	40
-------------------------	-----	---	----	----	----

Асфальтобетон типа Б. Битум 60/90.

Температура окончания уплотнения – 90°С

Температура смеси при укладке, °С	155	22,3	24,3	26,5	29,3	37,2
	140	17,6	19,1	21,0	23,3	30,0
	120	10,9	12,0	13,2	14,8	19,6
	100	3,8	4,2	4,7	5,3	7,3

Асфальтобетон типа Б. Битум 90/130.

Температура окончания уплотнения – 85°С

Температура смеси при укладке, °С	150	24,6	20,8	29,5	32,8	42,3
	140	21,3	23,1	25,5	28,4	37,0
	120	14,0	15,4	17,1	19,2	25,6
	100	6,3	6,95	7,8	8,9	12,3

Асфальтобетон типа В. Битум 40/60.

Температура окончания уплотнения – 90°С

Температура смеси при укладке, °С	160	23,3	25,2	27,6	30,4	38,4
	140	17,1	18,6	20,5	22,7	29,2
	120	10,6	11,6	12,9	14,4	19,0
	100	3,7	4,1	4,6	5,2	7,1

Асфальтобетон типа В. Битум 60/90.

Температура окончания уплотнения – 85°С

Температура смеси при укладке, °С	155	20,0	27,2	29,9	33,1	42,6
	140	20,1	22,0	24,2	27,0	35,1
	120	13,3	14,6	16,2	16,2	24,3
	100	6,0	6,6	7,4	8,4	11,7

Температура воздуха, °С	-10	0	10	20	40	
<i>Асфальтобетон типа В. Битум 90/130.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения – 80°С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	150	26,9	29,4	32,4	36,2	47,3
	140	23,4	25,7	28,4	31,8	42,0
	120	16,2	17,9	19,9	22,5	30,6
	100	8,5	9,5	10,6	12,18	17,2

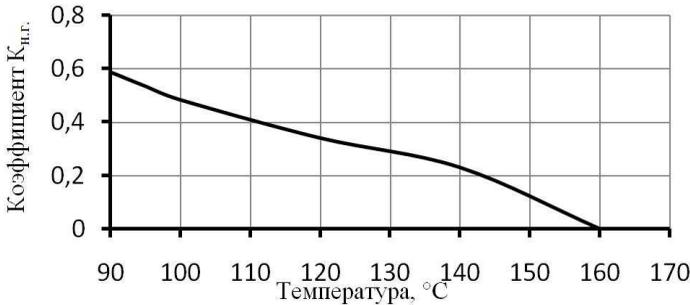


Рис. 6.43. Влияние нижней температурной границы производства работ на продолжительность нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале

В общем виде время охлаждения асфальтобетонной смеси, при условии обеспечения температурных режимов горячей смеси в зоне сопряжения полос, имеет вид:

$$\tau = 40,5 K_{см} K_h K_v K_{ш} K_{oy} e^{-0,0143 \Delta t_B}, \text{ мин.} \quad (6.32)$$

Подставив численные значения коэффициентов в зависимость (6.32), определим продолжительность охлаждения смеси в заданном температурном интервале:

$$\tau = 24,5 h K_{см} K_{op} K_{ш} e^{-0,0143 \Delta t_B - 0,075 v}, \text{ мин.} \quad (6.33)$$

При устройстве дорожного покрытия нежесткого типа соблюдается принцип непрерывности процессов укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей при работе механизированного звена машин. Ско-

рость движения звена машин определяется рабочей скоростью асфальтоукладчика, при этом звено уплотняющих машин выбирается из условия обеспечения требуемого качества уплотнения смеси с учетом их температурных режимов. Общая длина захватки звена машин определяется зависимостью:

$$L_{\text{общ}} = v_{\text{ук}} \tau_{\text{стр}}, \quad (6.34)$$

где $v_{\text{ук}}$ – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; $\tau_{\text{стр}}$ – время охлаждения горячей смеси в заданном температурном интервале с учетом укладки и уплотнения, зависящим от типа смеси и марки битума, мин.

Согласно технологической схеме производства работ по устройству многополосного покрытия одним асфальтоукладчиком, время охлаждения горячей смеси крайней точки полосы зависит от длины захватки, определяемой температурой воздуха, а также скоростными режимами укладки и временем перемещения асфальтоукладчика с одной полосы на другую.

В этом случае продолжительность охлаждения асфальтобетонной смеси на крае полосы покрытия с учетом обеспечения температурных режимов горячей смеси определяется:

$$\tau = L / 2v_{\text{ук}} + \tau_{\text{пов}} + (L / 2) / v_{\text{тр}}, \text{ мин}, \quad (6.35)$$

где L – длина захватки, м; $v_{\text{ук}}$ – скорость укладки горячей смеси, м/мин; $v_{\text{тр}}$ – транспортная скорость асфальтоукладчика, м/мин; $\tau_{\text{пов}}$ – время на перемещении асфальтоукладчика с одной полосы на другую, мин.

Следует заметить, что при такой технологии, помимо охлаждения края сопрягаемых полос покрытия, возникает вопрос определения температуры (охлаждения) горячей смеси в поперечном стыке полосы покрытия, зависящего от продолжительности между укладкой смеси на захватке. Продолжительность охлаждения горячей смеси в поперечном стыке полосы будет определяться

$$\tau = L / v_{\text{ук}} + 2\tau_{\text{пов}} + L / v_{\text{тр}}. \quad (6.36)$$

Тогда длина полосы укладки, в зависимости от температуры смеси при доставке к месту производства работы и температуры окончания укладки, будут определяться:

– для поперечного стыка

$$L = (\tau - 2\tau_{\text{п}})v_{\text{ук}}v_{\text{тр}} / v_{\text{ук}} + v_{\text{тр}}, \text{ м}; \quad (6.37)$$

– для продольного стыка

$$L = 2(\tau - \tau_{\text{п}})v_{\text{ук}}v_{\text{тр}} / v_{\text{ук}} + v_{\text{тр}}, \text{ м}, \quad (6.38)$$

где L – длина полосы укладки горячей смеси, м; τ – продолжительность укладки горячей смеси с учетом температурных режимов горячей смеси, мин; τ_n – время на перемещение асфальтоукладчика с одной полосы на другую, мин; $v_{ук}$ – скорость укладки горячей смеси, м/мин; $v_{тр}$ – транспортная скорость асфальтоукладчика, м/мин.

Из зависимостей (6.37) и (6.38) видно, что продолжительность охлаждения горячей смеси на поперечном стыке полосы меньше, чем в зоне продольного стыка.

Максимальная скорость укладки горячей асфальтобетонной смеси зависит от заданного темпа строительства дорожного покрытия. Минимальная рабочая скорость асфальтоукладчика определяется из условия обеспечения работы уплотняющих машин с учетом температурных режимов применяемой смеси, при этом длина захватки должна быть равна не менее 3 – 5 длины применяемых катков (по условию разгона и торможения). Принимаем время перехода асфальтоукладчика с одной полосы на другую 0,06 ч, а транспортную скорость 10...12 м/мин, с учетом данных, представленных в работе [8].

На рисунке 6.44 представлены зависимости длины захватки при разной температуре воздуха.

Представленные зависимости можно представить в виде уравнений:

1) $L = 21,94 e^{-0,063t_v}$ – по рекомендациям;

2). $L = 48,67 e^{-0,022t_v}$ – Н. В. Горельшева;

3) $L = 27,38 e^{-0,025t_v}$ – расчетная.

(6.39)

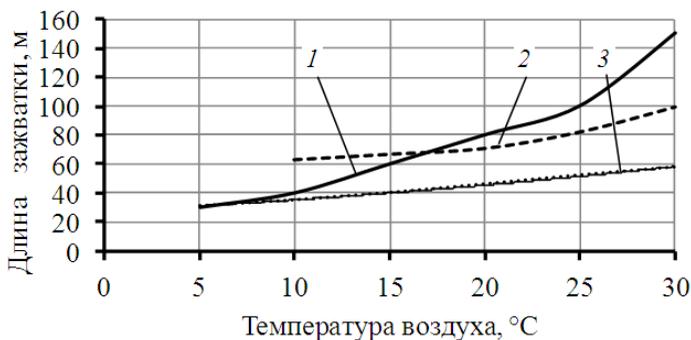


Рис. 6.44. Зависимость длины захватки от температуры воздуха:

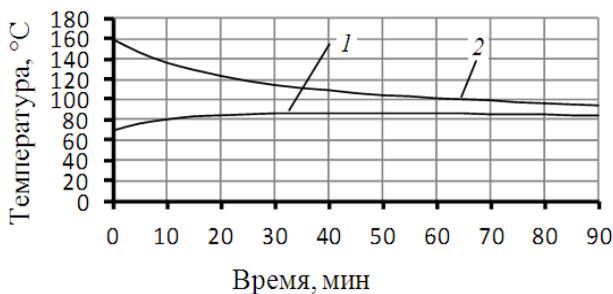
1 – согласно рекомендациям; 2 – по данным Н. В. Горельшева;

3 – по предложенной зависимости (при скорости укладки смеси 5 м/мин)

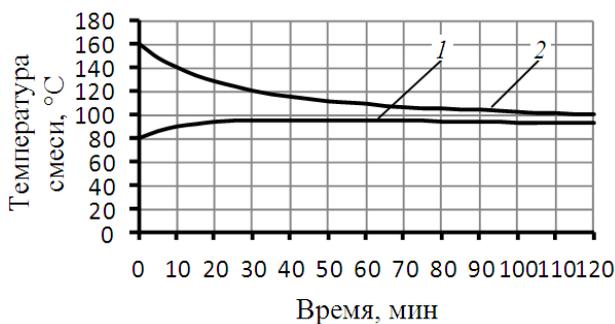
Используя представленные зависимости при температуре воздуха 10 °С, и заданных скоростях укладки асфальтобетонной смеси (3 и 5 м/мин), определено время укладки сопряженного слоя горячей смеси, которое будет равно соответственно 8,3; 12,2 и 7 мин.

Используя программу для определения температуры смеси в зоне стыка сопряженных полос, получены данные по температуре в зоне стыка полос ранее уложенной полосы. Результаты расчетов представлены на рис. 6.45.

Из представленных данных видно, что при укладке сопрягаемого слоя покрытия с более высокой температурой смеси способствует повышению температуры смеси в зоне стыка полос. В то же время несоблюдение температурных режимов в стыке сопрягаемых полос способствует недоуплотнению смеси и характеризуется низким качеством работ.



а)



б)

Рис. 6.45. Распределению температуры в зоне стыка полос при разных температурах смеси в зоне стыка ранее уложенной полосы:
а – при 70 °С; *б* – при 80 °С (*1* – температура асфальтобетона края первой полосы; *2* – температура смеси при укладке слоя сопряженной полосы)

Анализ представленных данных на рис. 6.45 и позволяет сделать вывод, что уплотнение стыка полос покрытия необходимо выполнять после достижения температуры смеси в стыке максимального значения и в отличие от существующих рекомендаций необходимо уплотнять горячую смесь на стыке полос сразу после укладки второго сопряженного слоя покрытия [43].

6.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПО УСТРОЙСТВУ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ДВУХ И БОЛЕЕ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОВ

При устройстве многополосных покрытий нежесткого типа широкое применение получила технология укладки горячей смеси несколькими асфальтоукладчиками, смещенными относительно друг друга в плане на некоторое расстояние (рис. 6.46).

В зависимости от темпа строительства дорожного покрытия и условий производства работ (температуры воздуха, дальности транспортирования горячей смеси, теплофизических свойств применяемой смеси, скорости ветра) длина полосы укладки может находиться в пределах от 60 до 200 м. Длина полосы укладки принимается из условия обеспечения хорошего сопряжения смежных полос [6]. Возможную длину полосы укладки принимают по табл. 6.20 [6, 14].

При назначении длины захватки необходимо обеспечить монолитность продольного шва в зоне стыка сопряженных полос, которая возможна при условии обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей.

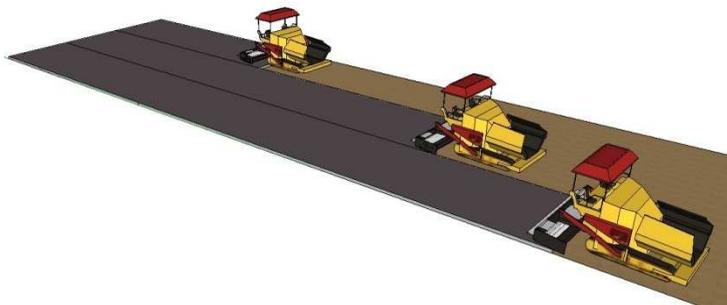


Рис. 6.46. Технология укладки смеси несколькими асфальтоукладчиками

6.20. Зависимость длины полосы укладки горячей смеси от температуры воздуха

Температура воздуха, °С	Длина укладываемой полосы при работе двумя асфальтоукладчиками
5...10	60...70
10...15	70...80
15...20	80...100
20...25	100...150
Более 25	150...200

Общая длина захватки при устройстве покрытия нежесткого типа зависит от скорости асфальтоукладчика и времени нахождения горячей смеси в заданном интервале температур, зависящем от свойств применяемой асфальтобетонной смеси. При укладке горячей смеси асфальтоукладчик не только распределяет смесь по ширине полосы покрытия, но и выполняет процесс предварительного уплотнения уложенного слоя асфальтобетонной смеси. Установлено, что в зависимости от конструктивных параметров асфальтоукладчика величина предварительного уплотнения смеси, который характеризуется коэффициентом предварительного уплотнения смеси, находится в пределах от 0,9 до 0,96.

Следовательно, в зависимости от достижения величины предварительного уплотнения смеси, состав звена катков будет разным, поскольку каждый тип катка обеспечивает достижение коэффициента уплотнения асфальтобетона до определенного значения.

При определении длины захватки и при назначении звена машин необходимо учитывать, что для обеспечения безопасных условий работы катков минимальная длина участка укладки должна составлять от 3 до 5 длины каждого типа катка. Статистический анализ параметров дорожных катков показал, что длина катков составляет 5...6 м. Следовательно, минимальная длина участка укладки асфальтоукладчиком должна соответствовать 15...30 м (с учетом разгона и торможения).

Длина укладываемой полосы асфальтоукладчиком определяется зависимостью

$$L_y = v_{ук} \tau_{укл} \cdot M, \quad (6.40)$$

где $\tau_{укл}$ – время, определяемое температурой смеси от момента укладки до нижней температурной границы укладки асфальтобетонной смеси.

Время укладки асфальтобетонной смеси зависит от свойств смеси, толщины слоя покрытия, так и условий производства и организации работ по устройству покрытия. С учетом отмеченных факторов время укладки асфальтобетонной смеси, с учетом ее температуры в зоне стыка сопряженных полос и имеет вид:

$$\tau_{\text{укл}} = 40,5 K_{\text{см}} K_h K_M K_{\text{ор}} e^{-0,0143 t_{\text{в}}}, \text{ мин.} \quad (6.41)$$

Следовательно, задаваясь типом смеси и маркой битума, с учетом толщины укладываемого слоя полосы покрытия и конкретных условий производства работ, можно определить время укладки асфальтобетонной смеси и при заданной скорости асфальтоукладчика определить длину полосы укладки с учетом обеспечения температурных режимов смеси в зоне стыка сопряженных полос покрытия.

На рисунках 6.47 и 6.48 представлены результаты расчетов по определению длины полосы укладки асфальтобетонной смеси при совместной работе двух асфальтоукладчиков при условии обеспечения температурных режимов смеси в зоне стыка сопряженных полос.

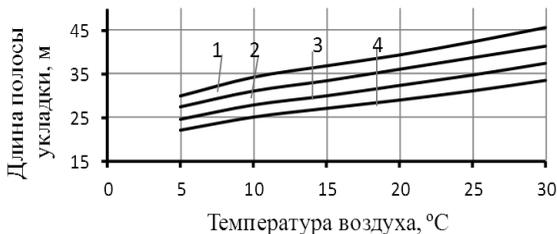


Рис. 6.47. Зависимость длины полосы укладки горячей смеси от температуры воздуха при разных температурах смеси при укладке:
 1 – температура при укладке 160 °C; 2 – 150 °C; 3 – 140 °C; 4 – 130 °C

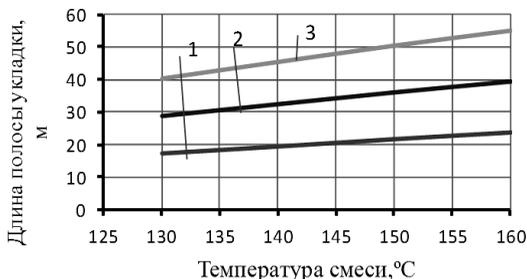


Рис. 6.48. Зависимость длины полосы укладки горячей смеси от температуры горячей смеси при разной толщине слоя покрытия.
 Температура воздуха 20 °C:

1 – при толщине слоя покрытия 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,07 м

Из представленных данных видно, что длина полосы укладки горячей асфальтобетонной смеси с учетом ее температурных режимов в зоне стыка сопряженных полос зависит не только от температуры воздуха, что учитывается рекомендациями, но и от темпа охлаждения горячей смеси. Укладка горячей смеси в смежные полосы покрытия при совместной работе двух асфальтоукладчиков без учета температурных режимов смеси в зоне стыка полос способствует образованию дефектов покрытия в процессе эксплуатации дороги.

В качестве примера на рис. 6.49 представлены результаты моделирования температурных режимов распределения температуры горячей смеси в зоне сопряжения полос при разных значениях температуры воздуха (скорость асфальтоукладчика 2 м/мин, толщина слоя 0,05 м, скорость ветра 0 м/с, смесь типа А, битум марки 40/60 и 60/90).

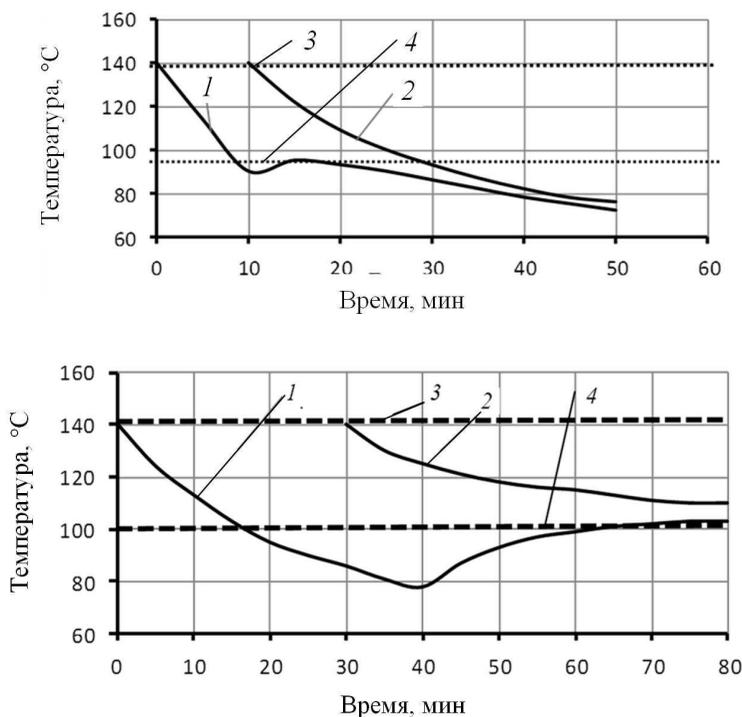


Рис. 6.49. Распределение температуры асфальтобетонной смеси в зоне стыка полос:

a – температура воздуха 5 °С; *б* – температура воздуха 20 °С
 1 – температура в зоне стыка первой полосы; 2 – в зоне второй полосы;
 3 – температура начала укладки; 4 – температура окончания уплотнения)

Из данных, представленных на рис. 6.49, *а* видно, что при рабочей скорости асфальтоукладчика 2 м/мин и времени распределения смеси 10 мин смещение в плане асфальтоукладчиков между собой составляет 20 м, что соответствует рекомендациям [6, 43]. В то же время в зоне стыка полос возникает незначительный участок, где нарушаются температурные режимы смеси при уплотнении, что и является причиной образования дефектов в зоне стыка сопряженных полос. При значительном смещении асфальтоукладчиков между собой (рис. 6.48, *б*) в процессе эксплуатации покрытия возникают участки со значительной протяженностью. Практика показывает, что такие участки покрытия требуют ремонтных работ уже через год эксплуатации дороги.

7. РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Заключительной стадией строительства автомобильных дорог является уплотнение дорожных покрытий, от качества выполнения которого зависит прочность, надежность и долговечность дороги. Обеспечение заданных качеств покрытия возможно только в определенном температурном интервале укладываемой смеси с учетом ее свойств, параметров уплотняющих машин и времени для осуществления технологического процесса укатки. Технологический процесс уплотнения покрытий осуществляется во времени, продолжительность которого определяется скоростью охлаждения уложенной смеси на основании дороги и зависит от конструктивных параметров дороги, применяемого материала, климатических условий строительства покрытий и применяемых типов машин.

Вопрос определения рациональных областей применения катков при строительстве асфальтобетонных покрытий рассмотрен в работе Е. С. Локшина [29]. В результате исследований им установлены зависимости, позволяющие определить температуру смеси по толщине уплотняемого слоя и ее распределение во времени.

Полученная зависимость позволяет определить возможное время уплотнения при температуре смеси в момент окончания процесса уплотнения 80 °С, что применимо для горячих асфальтобетонных смесей определенного типа. В то же время нижняя температурная граница окончания уплотнения, с учетом типа смеси, находится в пределах 110...60 °С. Следовательно, установленные зависимости времени уплотнения горячих смесей требует уточнения.

Достижение требуемого качества уплотнения возможна при определенной температуре начала уплотнения смеси и соответствующих параметрах уплотняющих машин [6, 8, 14, 16, 37]. Температура начала уплотнения регламентирована, а температура окончания укатки не регламентируется существующими рекомендациями в зависимости от типа смеси [6, 19, 45] и принимается в интервале 80...60 °С.

Для приготовления смесей заданного типа могут использоваться битумы разных марок. Поэтому при выборе температуры окончания укатки необходимо учитывать не только тип смеси, но и марку битума. Установлено, что для смесей на битумах марок БН и БНД нижняя температура эффективного уплотнения меняется в интервале 95...42 °С [11].

Следовательно, температуру начала укладки и окончания укатки необходимо назначать не только с учетом типа смеси, но и марки битума.

Обеспечения требуемых характеристик асфальтобетона можно достичь при условии, что уплотняющие машины за время нахождения смеси в заданном температурном интервале обеспечат необходимое количество проходов по одному следу при соответствующей рабочей скорости передвижения. Поэтому для обеспечения технологических режимов уплотнения покрытий необходимо знать время работы машины в заданных температурных интервалах с учетом свойств материала и производственных условий строительства.

Известно, что продолжительность охлаждения смеси зависит от ее теплофизических свойств, к которым относятся удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и коэффициент теплоотдачи. Экспериментально установлено, что при укладке горячей асфальтобетонной смеси на нижележащий слой за счет отдачи тепла, скорость охлаждения может достигать 5...6 °С/мин. В процессе уплотнения скорость охлаждения уменьшается и составляет в зависимости от плотности слоя 0,5...1,5 °С/мин.

Тепловые процессы в слое горячей асфальтобетонной смеси при уплотнении отличаются от процессов при укладке слоя покрытия. Если при укладке тепловые процессы подчиняются нестационарным законам теплопередачи, то при уплотнении тепловые процессы протекают по законам регулярного режима, при котором слой смеси охлаждается вместе с подогретым основанием. С учетом нестационарности тепловых процессов асфальтобетонной смеси при определении температурных режимов уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, а также времени устройства покрытия в расчетах необходимо принимать среднее значение температуры по толщине слоя покрытия.

Продолжительность процесса уплотнения зависит от разных факторов, каждый из которых влияет на время укатки. Получить зависимость влияния различных факторов на продолжительность уплотнения в производственных условиях представляет значительные сложности, так как они меняют свои значения с течением времени в процессе строительства. Поэтому для выяснения влияния разных факторов на продолжительность уплотнения покрытий из горячих асфальтобетонных смесей была использована математическая модель «основание – покрытие» [17].

Результаты расчетов времени уплотнения горячих асфальтобетонных смесей от температуры окружающего воздуха, при разной толщине укладываемых слоев, представлены на рис. 7.1.

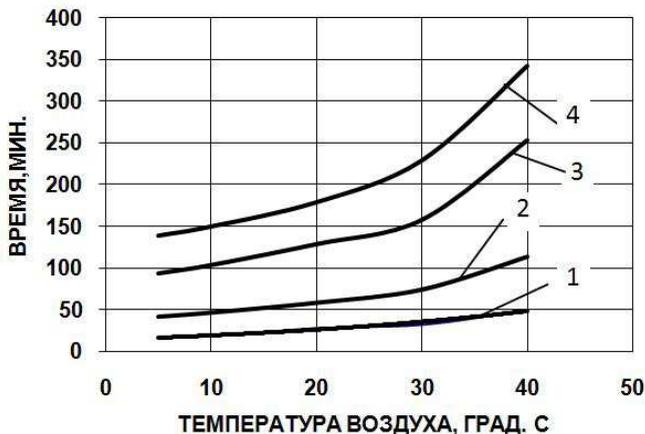


Рис. 7.1. Влияние температуры воздуха на охлаждение слоя покрытия при температуре смеси при укладке 160 °С, скорости ветра 0 м/с, температуре окончания уплотнения 60 °С в зависимости от толщины слоя:

1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Представленные на рис. 7.1 зависимости описываются уравнениями в зависимости от толщины слоя (коэффициент корреляции уравнений составляет 0,97...0,99), мин:

$$\begin{aligned}
 & - 0,03 \text{ м: } \tau_{\text{уп}} = 14,08e^{0,0306t_{\text{в}}}; \\
 & - 0,05 \text{ м: } \tau_{\text{уп}} = 35,25e^{0,026t_{\text{в}}}; \\
 & - 0,08 \text{ м: } \tau_{\text{уп}} = 80,47e^{0,0252t_{\text{в}}}; \\
 & - 0,10 \text{ м: } \tau_{\text{уп}} = 119,05e^{0,0234t_{\text{в}}},
 \end{aligned}$$

(7.1)

где $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, °С.

Анализ полученных зависимостей показывает, что они имеют общую закономерность влияния температуры воздуха на темп охлаждения горячей смеси. Представим данные на рис. 7.1 в относительных значениях, принимая продолжительность при температуре воздуха 20 °С за единицу и обозначим полученную величину коэффициентом влияния температуры воздуха на время, в пределах которого смесь соответствует заданным температурным интервалам процесса уплотнения ($K_{\text{в}}$).

В общем виде зависимость $K_{\text{в}}$ от температуры воздуха представлена на рис. 7.2.

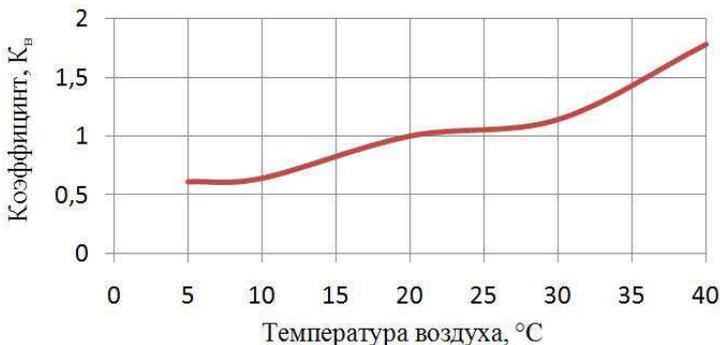


Рис. 7.2. Зависимость коэффициента $K_{\text{в}}$ от температуры воздуха

Следует отметить, что повышение температуры окружающего воздуха влияет в большей степени на укладку тонких слоев покрытия, чем толстых. Так, повышение температуры воздуха с 5 до 40 °C при укладке слоя смеси толщиной 0,03 м приводит к увеличению продолжительности времени в 2,94 раза, а при этих же условиях увеличение толщины слоя до 0,1 м приводит к увеличению продолжительности времени в 2,2 раза. Аналогичная закономерность характерна и для остальных слоев. Интенсивный рост допустимого времени строительства покрытий наблюдается при достижении температуры воздуха свыше 20 °C.

Численное значение коэффициента $K_{\text{в}}$ определяется по формулам:

– при толщине слоя полосы 0,03 м – $K_{\text{в}} = 0,5e^{0,03t_{\text{в}}}$;

– для слоев от 0,05 м и выше – $K_{\text{в}} = 0,61e^{0,027t_{\text{в}}}$,

(7.2)

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °C. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,97.

Анализ данных рис. 7.1 показал, что время соответствия температуры смеси установленным интервалам температур при укладке горячей смеси зависит от толщины слоя покрытия. С увеличением толщины покрытия время уплотнения возрастает, что подтверждается экспериментальными данными.

Представив данные в относительных значениях, и принимая за единицу время нахождения смеси в установленном интервале температуры при толщине слоя 0,05 м, получена общая зависимость влияния толщины слоя покрытия на время уплотнения, выраженное через коэффициент влияния толщины слоя ($K_{\text{л}}$) покрытия, которая представлена на рис. 7.3.

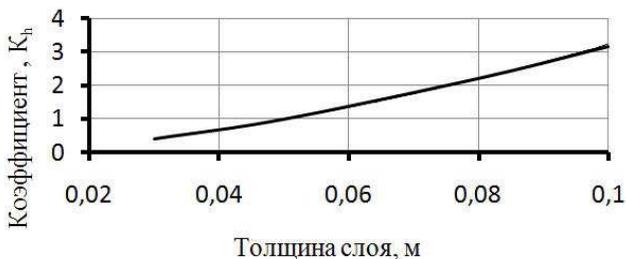


Рис. 7.3. Зависимость коэффициента K_h от толщины слоя

Коэффициент влияния толщины слоя покрытия определяется по формуле

$$K_h = 161,97h^{1,7}, \quad (7.3)$$

где h – толщина слоя покрытия, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

При уплотнении слоя покрытия темп охлаждения зависит от скорости перемещения воздушных масс, способствующая интенсивной отдаче тепла от поверхности слоя в окружающую среду. Влияние скорости ветра на продолжительность работ при разной толщине слоя представлено на рис. 7.4.

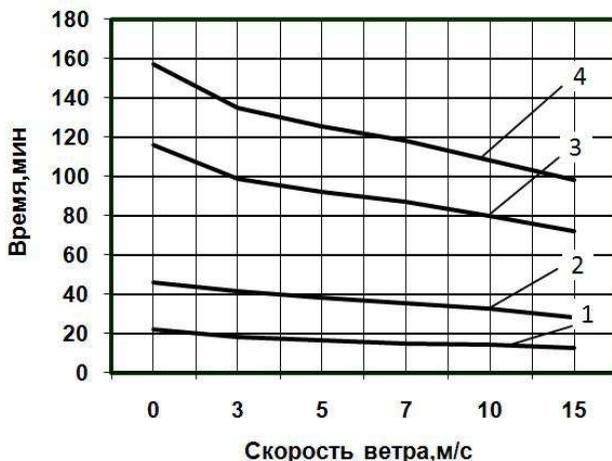


Рис. 7.4. Продолжительность процесса уплотнения в зависимости от скорости ветра при температуре воздуха 20 °С, температуре смеси при укладке 160 °С и толщины слоя:
1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Численные значения продолжительности процесса уплотнения при различной толщине слоя покрытия в зависимости от скорости ветра могут быть определены по следующим уравнениям в зависимости от толщины слоя, мин (коэффициент корреляции для данных уравнений составляет 0,96...0,9):

$$\begin{aligned}
 & - 0,03 \text{ м: } \tau_{\text{уп}} = 18,8e^{-0,0287v}; \\
 & - 0,05 \text{ м: } \tau_{\text{уп}} = 45,46e^{-0,0332v}; \\
 & - 0,08 \text{ м: } \tau_{\text{уп}} = 110,38e^{-0,031v}; \\
 & - 0,10 \text{ м: } \tau_{\text{уп}} = 149,78e^{-0,0031v},
 \end{aligned}
 \tag{7.4}$$

где v – скорость ветра, м/с.

Для уточнения влияния скорости ветра на допустимую продолжительность работ по уплотнению дорожных покрытий представим данные на рис. 7.4 в относительных величинах (K_v), приняв за единицу время на уплотнение при скорости ветра, равной нулю. Зависимость времени уплотнения от скорости ветра характеризуется экспоненциальной зависимостью.

Для слоя толщиной 0,03 м зависимость имеет вид (коэффициент корреляции равен 0,92):

$$K_v = 0,98e^{-0,0491v}, \tag{7.5}$$

где K_v – коэффициент, зависящий от скорости ветра, безразмерная величина; v – скорость ветра, м/с.

С увеличением слоя толщиной более 0,05 м влияние скорости ветра проявляется в меньшей степени. Так, при толщине слоя 0,05 м его влияние проявляется при скорости ветра 7 м/с и коэффициент влияния скорости ветра на допустимую продолжительность процесса уплотнения может быть определен по следующей зависимости (коэффициент корреляции равен 0,93)

$$K_v = 0,99e^{-0,041v}. \tag{7.6}$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что скорость ветра влияет на темп охлаждения горячей смеси независимо от толщины укладываемого слоя, а следовательно, и на время уплотнения.

В то же время увеличение скорости ветра приводит к значительному сокращению продолжительности работ при укладке тонких слоев. Так, при укладке слоя толщиной 0,03 м и скорости ветра 3...5 м/с продолжительность работ уменьшается на 20...25%, а при дальнейшем увеличении скорости ветра время сокращается на 30...50%.

Уплотнение дорожного покрытия начинается после укладки смеси асфальтоукладчиком при достижении температуры, соответствующей началу уплотнения. На практике время доставки к месту производства работ зависит от продолжительности транспортировки и погодных условий, что влияет на продолжительность работ по уплотнению покрытия.

Для установления зависимостей возможной продолжительности работы по уплотнению покрытий от температуры смеси при укладке при разной толщине слоев были выполнены расчеты, результаты которых представлены на рис. 7.5.

Из представленных данных видно, что температура смеси в момент укладки влияет на время уплотнения слоя покрытия. Следовательно, в процессе транспортировки смесей необходимо принимать меры для уменьшения потерь тепла в окружающую среду, особенно, при производстве работ в условиях пониженных температур окружающего воздуха, а также при укладке тонких слоев покрытия.

Для уточнения влияния температуры смеси начала уплотнения на время выполнения работ при разной толщине покрытия, представим данные на рис. 7.5 в относительных величинах, принимая при укладке каждого слоя покрытия температуру смеси 140 °С, за единицу. Обозначим влияние температуры смеси при укладке на возможную продолжительность уплотнения коэффициентом влияния температуры смеси при укладке $K_{т.}$. Из представленных данных видно, что с понижением температуры смеси при укладке допустимое время уплотнения уменьшается и такая закономерность характерна для покрытий с разной толщиной слоя. В большей степени этот фактор влияет при укладке слоев толщиной 0,03 м. Это объясняется тем, что поверхность покры-

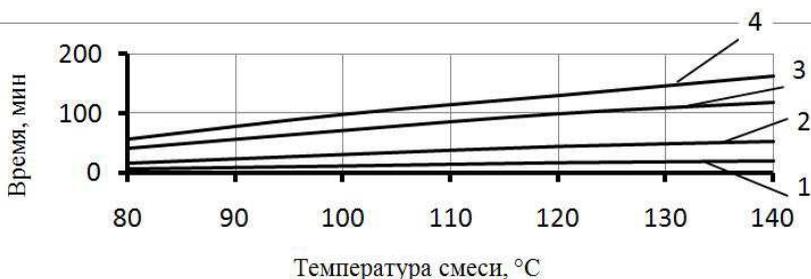


Рис. 7.5. Влияние температуры смеси при укладке на продолжительность работ по уплотнению покрытий при скорости ветра 0 м/с, температуре воздуха 20°С в зависимости от толщины слоя:

1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

тия имеет значительные размеры при небольшой толщине укладываемого слоя. Для покрытий с толщиной 0,05 м и более закономерность носит общий характер, подчиняется логарифмической зависимости и имеет вид (коэффициент корреляции равен 0,99)

$$K_{тс} = 1,138 \ln t_{см} - 4,623, \quad (7.7)$$

где $K_{тс}$ – коэффициент влияния температуры смеси, безразмерная величина; $t_{см}$ – температура смеси при укладке, °С.

Для слоя покрытия толщиной 0,03 м зависимость имеет вид (коэффициент корреляции равен 0,99)

$$K_{тс} = 1,236 \ln t_{с0,009} t_{см} - 5,098. \quad (7.8)$$

Согласно ГОСТ 9128 рекомендуемые области применения асфальтобетонов при устройстве верхних слоев покрытий зависят от дорожно-климатических зон (ДКЗ) строительства дорог.

Для I – III ДКЗ рекомендуется применять смеси с битумами марок 60/90, 90/130, 130/200 в зависимости от нормативной нагрузки, для IV, V ДКЗ рекомендуются смеси с битумами марок 40/60 и 60/90.

Применение разных марок битумов влияет на температурные границы окончания уплотнения покрытия, что влияет на возможную продолжительность работ. Предельные температурные границы эффективного уплотнения горячих асфальтобетонных смесей зависят от марки битума [11, 16].

Для приготовления смеси любого типа могут быть использованы разные марки битума, свойства которых зависят от температуры, а, следовательно, имеют разные температуры окончания работ.

Исследованиями Н. В. Горельшева [11] установлено, что для каждой марки битума существуют наиболее эффективные температурные интервалы, в пределах которых можно достичь требуемой плотности смеси. Предлагаемые температурные интервалы уплотнения асфальтобетонных смесей получены из условия обеспечения плотности смеси при приложении 30 циклов нагрузки. В то же время, согласно СП 78.13330.2012 количество проходов катков для обеспечения требуемой плотности асфальтобетона соответствует 18...21 проходам.

Используя данные работы [11] по уплотняемости асфальтобетонных смесей с разными марками битумов в зависимости от температуры, получены зависимости, характеризующие влияние числа циклов приложения нагрузки для смесей с разными марками битумов в зависимости от температуры смеси при условии получения проектной плотности (рис. 7.6).

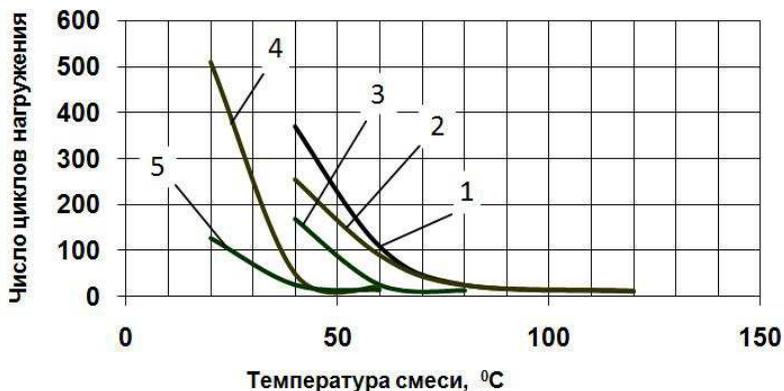


Рис. 7.6. Зависимость числа циклов приложения нагрузки от температуры смеси в зависимости от марки битума:
 1 – БНД 60/90; 2 – БНД 90/130; 3 – БНД 130/200;
 4 – БНД 200/300; 5 – БНД СГ 130/200

С учетом представленных данных получены уравнения, позволяющие определить температуру смеси (t), соответствующие получению заданной ее плотности с учетом марки битума при разном числе циклов нагружки (n), которые представлены в табл. 7.1.

Из представленных зависимостей видно, что при достижении смесью определенной температуры, характерной для каждой марки битума, для обеспечения необходимой плотности требуется увеличе-

7.1. Зависимость температуры смеси от числа циклов нагружки

Марка битума	Зависимость	Коэффициент корреляции	Число циклов нагружки (n)	
			20	30
БНД 60/90	$t = 245,27n^{-0,307}$	0,97	97	86
БНД 90/130	$t = 258,1n^{-0,335}$	0,97	94	82
БНД 130/200	$t = 151,9n^{-0,263}$	0,96	69	62
БНД 200/300	$t = 217,03n^{-0,396}$	0,97	66	56
СГ 130/200	$t = 202,21n^{-0,481}$	0,98	48	39

ние числа циклов приложения нагрузки, что свидетельствует о снижении уплотняемости смеси. Можно полагать, что температура, при которой происходит изменение уплотняемости смеси, является критической, ниже которой уплотнение становится не эффективным.

На основании полученных результатов предлагаются температуры окончания уплотнения с учетом типа смеси и марки битума, которые представлены в табл. 7.2.

Анализ значений температуры окончания эффективного уплотнения асфальтобетонных смесей показывает, что для смесей с битумами марок БНД 90/130, 60/90 и 40/60 необходимо увеличить температуру окончания эффективного уплотнения. Повышение температуры окончания уплотнения смесей приводит к уменьшению времени работы уплотняющих машин и требует тщательной проработки технологических схем работы применяемых машин при строительстве покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, а также постоянного контроля за температурой поставляемой смеси.

7.2. Рекомендуемая температура окончания уплотнения горячих асфальтобетонных смесей

Марка битума	Температура укладки, °С	Тип смеси				
		А	Б	В	Г	Д
БНД 40/60	150...160	105... 100	100... 95	95... 90	100... 95	95... 90
БНД 60/90	145...155	100... 95	95... 90	90... 85	95... 90	90... 85
БНД 90/130	140...150	95... 90	90... 85	85... 80	90... 85	85... 80
БНД 130/200	130...140	85... 80	80... 75	75... 70	80... 75	75... 70
БНД 200/300	120...130	75... 70	70... 65	65... 60	70... 65	65... 60
СГ 130/200	110...120	55... 60	55... 50	50... 45	55... 50	50... 45

Для достижения требуемого качества уплотнения каток должен обеспечить необходимое количество проходов по одному следу за время, в течение которого его параметры соответствуют температурному интервалу уплотняемого покрытия. В зависимости от типа смеси и марки битума температурные границы работы машин отличаются между собой. Используя данные результаты, разработаны рекомендуемые температуры уплотнения асфальтобетонных смесей с учетом типа смеси и марки битума, которые представлены в табл. 7.3.

7.3. Рекомендуемые температуры уплотнения плотного асфальтобетона различных типов в зависимости от марки битума

Марка битума	Рекомендуемые интервалы температуры уплотнения дорожных покрытий в зависимости от этапа, °С					
	Предварительный		Основной		Окончательный	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
<i>Асфальтобетон типа А</i>						
БНД 40/60	160...150	140...135	140...135	115...110	100...95	105...100
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	110...105	110...105	110...95
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	105...100	105...100	95...90
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	95...90	95...90	85...80
БНД 200/300	130...120	110...105	110...105	90...80	90...80	75...70
СГ 130/200	120...110	100...90	100...90	75...65	75...65	60...55
<i>Асфальтобетон типа Б</i>						
БНД 40/60	160...150	140...130	140...130	110...105	110...105	100...95
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	115...105	115...105	95...90
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	105...100	105...100	90...85
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	95...90	95...90	80...75
БНД 200/300	130...120	110...100	110...100	80...75	80...75	70...65
СГ 130/200	120...110	95...90	95...90	70...65	70...65	55...50

Продолжение табл. 7.3

Марка битума	Рекомендуемые интервалы температуры уплотнения дорожных покрытий в зависимости от этапа, °С							
	Укладка		Предварительное		Промежуточное		Окончательное	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
<i>Асфальтобетон типа В</i>								
БНД 40/60	160...150	140...135	140...135	125...120	125...120	110...105	110...105	95...90
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	120...115	120...115	105...100	105...100	90...85
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	115...110	115...110	100...95	100...95	85...80
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	105...110	105...110	90...85	90...85	75...70
БНД 200/300	130...120	110...100	110...100	90...95	90...95	75...80	75...80	65...60
СГ 130/200	120...110	95...90	95...90	80...75	80...75	65...60	65...60	55...50
<i>Асфальтобетон типа Г</i>								
БНД 40/60	160...150	140...135	140...135	125...120	125...120	110...105	110...105	95...90
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	120...115	120...115	105...100	105...100	90...85
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	115...110	115...110	100...95	100...95	85...80
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	105...110	105...110	90...85	90...85	75...70
БНД 200/300	130...120	110...100	110...100	90...95	90...95	75...80	75...80	65...60
СГ 130/200	120...110	95...90	95...90	80...75	80...75	65...60	65...60	55...50

Область применения асфальтобетона с учетом марки битума при устройстве слоев покрытия зависит от дорожно-климатической зоны строительства дороги и рекомендуется нормативной документацией [46, 48, 49].

Применение разных марок битума при изготовлении горячих смесей влияет на температуру окончания уплотнения, а, значит, и на время выполнения работы по уплотнению слоя покрытия. Предельные температурные границы эффективного уплотнения горячих смесей представлены в табл. 7.3. Продолжительность уплотнения горячих смесей разных типов и марок битумов представлена в табл. 7.4.

Представим данные таблицы в относительных величинах, принимая за единицу время окончания процесса уплотнения для данных смесей 60 °С, обозначив коэффициентом, учитывающим нижнюю температурную границу укладки смеси K_{op} . Тогда данные табл. 7.4 будут иметь вид, приведенный в табл. 7.5.

7.4. Продолжительность процесса охлаждения смесей типа А, Б, В, Г, Д на битумах марок БН и БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости от температуры окончания уплотнения при различной толщине слоя, мин

Температура смеси, °С \ Толщина слоя, м	120	110	100	90	80	70	60
0,03	1,0	3,0	5,0	6,0	10,0	15,0	25
0,05	5,0	9,0	14,0	21,0	29,0	41,0	58
0,08	10,0	21,0	33,0	48,0	66,0	91,0	129
0,10	13,0	28,0	45,0	66,0	92,0	125	179

7.5. Продолжительность процесса охлаждения асфальтобетонных смесей в относительных единицах

Температура смеси, °С \ Толщина слоя, м	120	110	100	90	80	70	60
0,03	0,04	0,11	0,19	0,23	0,38	0,58	1,0

Температура смеси, °С \ Толщина слоя, м	120	110	100	90	80	70	60
0,05	0,09	0,16	0,25	0,37	0,51	0,72	1,0
0,08	0,08	0,16	0,26	0,38	0,52	0,72	1,0
0,10	0,08	0,16	0,26	0,38	0,53	0,72	1,0
Средняя величина	0,08	0,16	0,26	0,38	0,52	0,72	1,0

Из данных таблицы видно, что при уплотнении асфальтобетона нижняя граница температуры асфальтобетона влияет на время выполнения операции по уплотнению горячей смеси.

На рисунке 7.7 представлена зависимость коэффициента влияния температуры окончания процесса уплотнения на время выполнения работы по уплотнению полосы дорожного покрытия. Численное значение коэффициента K_{op} для принятого типа смеси и марки битума определяется по следующей зависимости (коэффициент корреляции 0,98):

$$K_{op} = 12,57e^{-0,04t_{op}}, \quad (7.9)$$

где t_{op} – температура окончания уплотнения покрытия в зависимости от типа смеси и марки битума, °С.

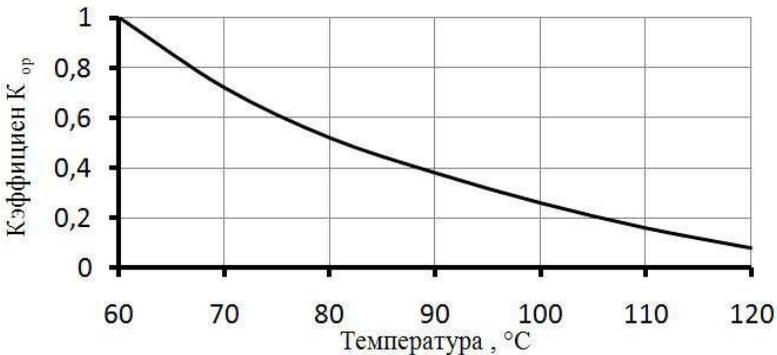


Рис. 7.7. Зависимость коэффициента K_{op} влияния температуры окончания процесса уплотнения от температуры

Процесс уплотнения асфальтобетонной смеси осуществляется звеном катков, каждый из которых выполняет уплотнение в заданном температурном интервале, соответствующем определенному времени работы катка.

Время работы катка (легкого, среднего и тяжелого) в заданном температурном интервале будет зависеть от температуры начала и окончания процесса уплотнения. В этом случае величина $K_{ор}$ будет определяться по следующей формуле

$$K_{ор} = K_{ор2} - K_{ор1}, \quad (7.10)$$

где $K_{ор1}$ и $K_{ор2}$ – коэффициенты, соответствующие значениям температуры начала и окончания работы катка данного типа.

В общем виде допустимое время уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей имеет вид

$$\tau_{уп} = K_{тс} K_v K_h K_m K_o K_{удс} K_\lambda e^{at_b}, \text{ мин}, \quad (7.11)$$

где $K_{тс}$, K_v , K_h , K_m , K_λ , $K_{удс}$, K_o – безразмерные коэффициенты, численное значения которых представлено в данной работе.

Таким образом, полученная зависимость позволяет определить продолжительность уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей с учетом температурных интервалов работы уплотняющих машин в зависимости от условий производства работ, что позволяет определить технологические режимы применяемых машин.

7.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Перспективным дорожным материалом для устройства покрытий, с учетом повышенной осевой нагрузки на дорожные конструкции, является щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА). Зарубежный и отечественный опыт применения ЩМА для строительства дорожных покрытий показал, что его эффективно применяют как при устройстве нижних, так и верхних слоев дорожного покрытия. Толщина укладываемого слоя составляет 0,03...0,06 м. ЩМА является одной из разновидностей горячего асфальтобетона. В отличие от горячих асфальтобетонных смесей, в состав которых входит щебень до 60% от общей массы, в составе ЩМА содержится 70...80% щебня с улучшенной кубовидной формой зерен, способствующей созданию устойчивого каркаса при уплотнении покрытия. Более высокое содержание вяжущего материала (от 5,5 до 7,5% по массе) и минерального порошка (8...15%)

обеспечивает низкий уровень пустот в уплотненном слое покрытия. В качестве стабилизирующих добавок применяют коротковолокнистый минеральный материал, чаще всего волокна целлюлозы длиной от 0,5 до 1,9 мм.

Этот тип асфальтобетона характеризуется более высокими показателями по сдвигоустойчивости, водонепроницаемости и шероховатости слоя покрытия. Согласно нормативным документам ЩМА применяют также для слоев износа, с толщиной слоя от 20 до 40 мм. По отношению к горячим асфальтобетонным смесям ЩМА обладает более высокой долговечностью, пониженным уровнем шума при движении транспортных средств, высоким коэффициентом сцепления шины с поверхностью покрытия, а также более высоким сопротивлением колееобразованию. Применение модифицирующих добавок влияет на температурные режимы ЩМА, что необходимо учитывать при его применении. Как показывает практика строительства покрытий с использованием ЩМА, при его применении не всегда учитываются особенности материала и при производстве работ используют те же температурные интервалы, как и при применении горячих асфальтобетонных смесей.

Анализ температуры приготовления и укладки ЩМАС показал, что рекомендованные значения для этого типа асфальтобетонной смеси выше по отношению к горячим асфальтобетонным смесям. Температура приготовления ЩМА, в зависимости от марки вяжущего, находится в интервале 175...160°C, что значительно выше температуры приготовления горячих асфальтобетонных смесей типа А.

В то же время рекомендуемая температура окончания уплотнения для ЩМА имеет диапазон от 120 до 80°C, что влияет на качество уплотнения и организацию работ по устройству покрытия. Анализ существующих рекомендаций по температурным режимам укладки и уплотнения ЩМА показал, что температура укладки смеси зависит от марки битума и находится в пределах 175...140°C.

С точки зрения организации работ и обеспечения требуемых параметров уплотнения важным параметром является эффективная температура окончания уплотнения, обеспечивающая высокие параметры уплотнения покрытия. Существующий разброс численных значений температуры окончания уплотнения ЩМА (120...80 °C) требует обоснованного подхода к этому параметру. Практика строительства дорожных покрытий с использованием ЩМАС показала, что при температуре смеси 100 °C практически уплотнить его невозможно. Наличие повышенного содержания вяжущего способствует образованию более толстой пленки на поверхности минерального материала, а более высокий процент минерального материала способствует изменению теп-

лофизических характеристик смеси, что влияет на темп охлаждения температуры при устройстве дорожного покрытия и температурные режимы смеси. Повышенное содержание вяжущего в ЩМА ограничивает применение стандартных технологий уплотнения покрытий.

Отсутствие научно обоснованных температурных границ эффективного применения ЩМА не позволяет обосновать эффективные технологические режимы при строительстве покрытий.

7.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭФФЕКТИВНОГО ОКОНЧАНИЯ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ЩМА

Обеспечение требуемых характеристик асфальтобетона при устройстве дорожного покрытия в значительной степени зависит от температурных режимов укладки и окончания уплотнения слоя покрытия. Поэтому научно обоснованный выбор температурных режимов технологии устройства асфальтобетонных покрытий позволяет регулировать процесс формирования макроструктуры при устройстве дорожного покрытия с применением ЩМА.

Известно, что обеспечить требуемые характеристики асфальтобетонного покрытия в процессе уплотнения возможно при соблюдении условия, когда контактные напряжения под вальцом катка близки пределу прочности уплотняемого материала, который зависит от температуры смеси. При выполнении данного условия необратимая деформация материала происходит за счет сближения частиц между собой, что приводит к снижению пористости уплотняемого материала и повышению его плотности.

Экспериментально установлено, что плотность материала при действии уплотняющей нагрузки зависит от соответствия уплотняющей нагрузки свойствам материала, скорости изменения напряженного состояния материала и времени действия нагрузки [20].

Принимая в качестве критерия время действия нагрузки, при формировании образца с учетом заданной плотности асфальтобетона, определена нижняя температурная граница при уплотнении, ниже которой эффект уплотнения снижается.

Полученные результаты представлены на рис. 7.8. Каждая точка на графике соответствует среднему значению полученных результатов при испытании трех образцов. Из представленных результатов видно, что с понижением температуры горячей смеси ниже 110 °С время для достижения заданной плотности возрастает. В интервале температуры 170...110 °С требуемое время для обеспечения заданной плотности образца остается постоянным.

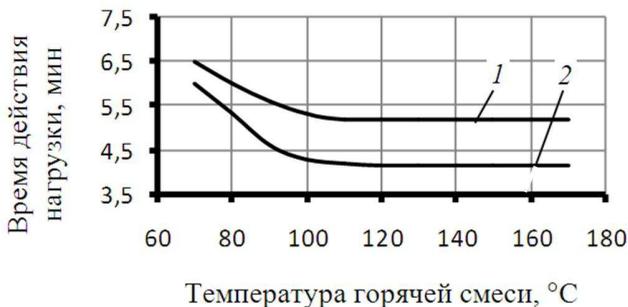


Рис. 7.8. Зависимость времени действия нагрузки для достижения требуемой плотности асфальтобетона от температуры:
 1 – ЩМАС-20, 2 – ЩМАС-10 и ЩМАС-15 (битум марки БНД 60/90)

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что минимальная температура эффективного уплотнения горячей ЩМАС соответствует температуре в пределах 110...115 °C. Установлено также, что изменение толщины слоя и типа ЩМАС не влияет на характер зависимости.

Следовательно, температура эффективного окончания уплотнения ЩМАС выше, чем при использовании горячих асфальтобетонных смесей. Для сравнения – температура окончания эффективного уплотнения для горячего асфальтобетона с битумом марки БНД 60/90 равна 85...90 °C.

7.3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ СМЕСИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Качество строительства автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа в значительной степени зависит от температуры смеси при выполнении технологических процессов укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси, которая влияет на прочностные характеристики асфальтобетона. Изменение прочности асфальтобетона, связанное с температурой, происходит не только на этапе строительства покрытия, но и в процессе эксплуатации автомобильных дорог. Установлено, что достижение требуемой плотности и прочности асфальтобетона зависит от соблюдения температурных режимов при устройстве покрытия [6, 12, 14, 15].

В качестве одного из критериев, характеризующего качество строительства, принят коэффициент уплотнения (K_u), который характеризует относительную величину достигнутой плотности материала к

стандартной плотности образца. Опыт строительства дорожных покрытий нежесткого типа показал, что в некоторых случаях для достижения высокого коэффициента уплотнения, при пониженных температурах горячей смеси (нарушение температурных режимов), применяют тяжелые катки и обеспечивают при этом коэффициент уплотнения 0,995...0,996. Однако при этом прочность асфальтобетонного покрытия, в зависимости от типа смеси, снижается от 17 до 31% [34].

Многочисленными исследованиями доказано, что предел прочности асфальтобетона, а также деформативная способность горячей смеси при одном и том же составе зависит от температуры [6, 11, 28]. Понижение температуры асфальтобетонной смеси в пределах от 150 °С до 50 °С способствует возрастанию предела прочности асфальтобетона в 2,0 – 2,5 раза. При этом деформативная способность материала (способность материала сопротивляться внешней нагрузке) увеличивается в 4 раза [28]. Поэтому, согласно существующим нормативным документам и рекомендациям на всем этапе строительства асфальтобетонных покрытий независимо от типа смеси необходим контроль за температурой горячей смеси.

Отмечалось, что для строительства дорожных покрытий применяют разные типы смесей, каждая из которых имеет свои прочностные характеристики.

На рисунке 7.9 представлены пределы прочности разных типов асфальтобетонов, полученные другими авторами [6, 11, 34]. Из представленных данных видно, что численные значения предела прочности асфальтобетонной смеси зависят от типа смеси и температуры на протяжении всего процесса уплотнения.

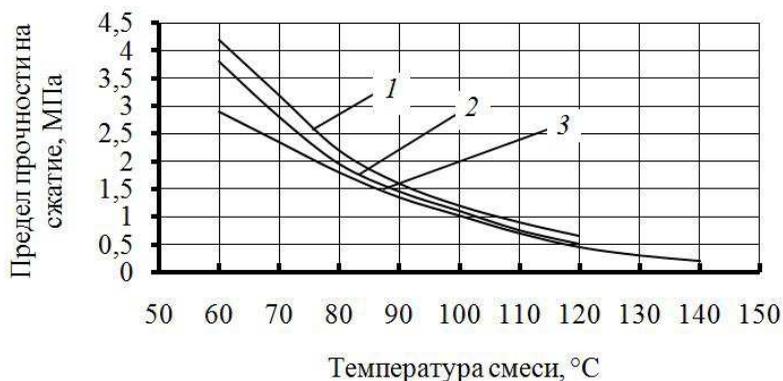


Рис. 7.9. Влияние температуры смеси на предел прочности при сжатии:
1 – смеси типа А; 2 – смеси типа В; 3 – по данным [28]

Установлено, что предел прочности смеси зависит не только от содержания битума и щебня, но и марки битума [11, 28]. Зависимость между пределом прочности и температурой носит нелинейный характер. Если на начальной стадии уплотнения значения пределов прочности, в зависимости от типа смеси, отличаются незначительно, то в конце процесса уплотнения эти различия существенны. На основании этого можно сделать вывод, что для обеспечения качества работ необходимо знать температуру окончания процесса уплотнения, которая зависит не только от типа смеси, но и марки битума (табл. 7.3).

Толщина дорожного покрытия, в том числе дорожных слоев, определяется на стадии проектирования и ограничивает минимальную толщину слоя [45]. Качество уплотнения и предел прочности асфальтобетона определяют на основании испытаний образцов, взятых с дорожных покрытий. За сравниваемую величину принимают результаты испытания стандартных образцов, у которых отношение диаметра и высоты цилиндра равно единице. На практике толщина слоя покрытия может иметь разное значение. Поэтому для объективности получаемых результатов испытаний необходимо уточнить влияние высоты образца на прочностные характеристики асфальтобетона в покрытии. Данное обстоятельство влияет также на выбор средств механизации при уплотнении слоев с малой толщиной, в также слоев износа.

Анализ зависимостей предела прочности и модуля деформации асфальтобетонных смесей от температуры показывает, что модуль деформации возрастает более интенсивно со снижением температуры, чем предел прочности смеси. Это обстоятельство говорит о том, что при уплотнении асфальтобетонных покрытий попытки увеличения плотности смеси за счет повышения давления на контакте рабочего органа катка приведут к появлению пластических деформаций и, следовательно, к снижению качества покрытия. Поэтому для обеспечения требуемых показателей при строительстве покрытий необходим контроль за соответствием деформационно-прочностных характеристик смеси и параметрами машин в процессе укладки и уплотнения.

Установлено, что предел прочности горячего асфальтобетона зависит от температуры, типа смеси, степени уплотнения и толщины уплотняемого слоя. В общем виде зависимость предела прочности асфальтобетона, с учетом отмеченных параметров, может быть представлена в виде функции

$$\sigma_{\text{пр}} = f(t_{\text{см}}, K_y, h/d), \quad (7.12)$$

где $t_{\text{см}}$ – температура смеси, °С; K_y – коэффициент уплотнения; h/d – отношение толщины слоя к дуге контакта вальца катка с материалом.

На основании проведенных исследований предложена зависимость для определения предела прочности горячей асфальтобетонной смеси, которая имеет вид

$$\sigma_{\text{пр}} = 0,08e^{[5,876K_y - 0,697(h/d) - 0,025t_{\text{см}}]}, \quad (7.13)$$

где K_y – коэффициент предварительного уплотнения; e – основание натурального логарифма; h – толщина слоя, м; d – диаметр штампа, соответствующий длине дуги контакта рабочего органа машины с материалом, м; $t_{\text{см}}$ – температура горячей смеси, °С.

7.4. ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА

Строительство дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей разрешается вести при положительных температурах воздуха. В некоторых случаях на практике производятся работы по устройству покрытий из горячих асфальтобетонных смесей при пониженных температурах, когда температура воздуха опускается ниже нулевой отметки [6].

Зимним периодом считается время года между датами наступления и окончания устойчивой отрицательной среднесуточной температуры в районе строительства. Рекомендациями допускается устраивать асфальтобетонные покрытия из горячих асфальтобетонных смесей при соблюдении следующих условий:

- при температуре воздуха не ниже 0 °С;
- основание должно быть построено до наступления периода пониженных температур и иметь коэффициент уплотнения в соответствии с проектом;
- при устройстве двухслойного покрытия следует устраивать только нижний слой;
- при одновременной укладке двухслойного покрытия верхний слой укладывают на свежеложенный нижний слой при температуре нижнего слоя не ниже 20 °С;
- толщина укладываемого слоя должна быть не менее 0,04 м;
- не допускается простоя асфальтоукладчика;
- транспортировка смесей должна осуществляться автосамосвалами большой грузоподъемности;
- автотранспорт должен быть оснащен обогреваемыми кузовами и утеплительными устройствами (брзантовые чехлы, маты);

– при работе одним асфальтоукладчиком длина захватки должна быть минимальной, чтобы новая полоса укладки примыкала к ранее уложенной неостывшей кромке полосы.

В исключительных случаях допускается строительство покрытий из горячих асфальтобетонных смесей при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ при следующих условиях:

- толщина укладываемого слоя не менее 0,05 м;
- устройство только нижнего слоя двухслойного покрытия;
- устройство верхнего слоя только по свежееуложенному нижнему слою при температуре нижнего слоя не ниже $10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- повышение подвижности смеси за счет применения ПАВ и повышения температуры смеси при укладке;
- повышения интенсивности уплотнения смеси;
- уплотнение смеси должно производиться при температуре смеси не ниже $80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- выбор уплотняющих машин необходимо осуществлять с учетом конкретных условий производства работ.

При пониженных температурах воздуха происходит интенсивное охлаждение горячей смеси за счет отдачи тепла в окружающую среду и основание, а также за счет контакта поверхности слоя с рабочими органами уплотняющих машин. Интенсивное охлаждение смеси приводит к уменьшению продолжительности строительства и для обеспечения требуемого качества работ необходима тщательная увязка технических и технологических параметров применяемого оборудования.

В зависимости от конкретных условий строительства возможны разные технологические схемы производства работ: укладка одного нижнего слоя или двух слоев при условии, что температура свежееуложенного нижнего слоя покрытия не менее $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если предусматривается укладка нескольких слоев покрытия одного состава смеси, то целесообразно укладку вести одним слоем повышенной толщины.

Принято считать, что при значительной толщине слоя нижняя часть покрытия недоуплотняется и поэтому ограничивают наибольшую толщину уплотняемого слоя. Однако, как показали результаты измерений плотности в разных точках толщины покрытия, достигаемая плотность при уплотнении слоя толщиной 0,15 м выше, чем при уплотнении такой же толщины слоя в два приема (рис. 7.10) [15].

Средняя пористость асфальтобетонного покрытия, уложенного за один прием, составляет 6,6%, а покрытия в два приема – 9,8%. Из представленного графика видно, что на стыке двух слоев наблюдается зона пониженной плотности. Это можно объяснить тем, что при уплотнении в два приема на стыке двух слоев происходит резкое сниже-

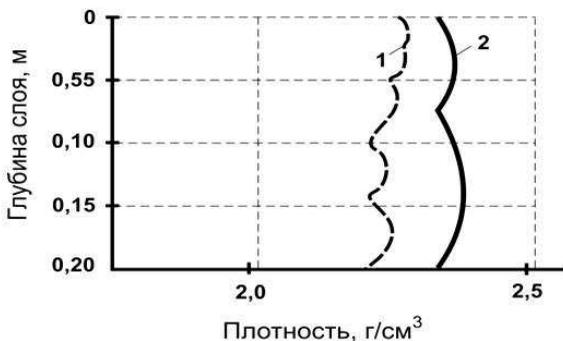


Рис. 7.10. Распределение плотности асфальтобетона по глубине слоя покрытия:

- 1 – уплотнение двух слоев толщиной по 0,075 м;
2 – уплотнение одного слоя толщиной 0,15 м

ние температуры смеси, что и оказывает влияние на качество уплотнения дорожного покрытия.

При укладке слоев покрытия с разными по составу смесями может применяться немецкая технология «компактасфальт». Известно, что теплофизические свойства асфальтобетонных смесей зависят от температуры, что влияет на продолжительность строительства. В связи с этим, используя полученные ранее зависимости влияния температуры на удельную теплоемкость и коэффициент теплопередачи асфальтобетонной смеси, были смоделированы тепловые режимы при укладке нижнего слоя покрытия, уложенного на слой из гранитного щебня толщиной 0,3 м. Результаты расчетов представлены в табл. 7.6.

7.6. Влияние температуры воздуха на продолжительность строительства

Толщина слоя, м \ Температура воздуха, °С	-10	-5	0	+5	+10	Расчетная зависимость
	0,04	$\frac{25}{25}$	$\frac{26}{27}$	$\frac{28}{30}$	$\frac{30}{32}$	
0,05	$\frac{35}{38}$	$\frac{37}{41}$	$\frac{40}{44}$	$\frac{43}{48}$	$\frac{47}{53}$	$\tau = 40,17e^{0,0148t}$ $\tau = 44,49e^{0,0165t}$

Продолжение табл. 7.6

Толщина слоя, м \ Температура воздуха, °С	-10	-5	0	+5	+10	Расчетная зависимость
0,08	$\frac{89}{91}$	$\frac{95}{98}$	$\frac{101}{104}$	$\frac{108}{113}$	$\frac{117}{124}$	
0,10	$\frac{122}{131}$	$\frac{129}{135}$	$\frac{138}{144}$	$\frac{149}{156}$	$\frac{161}{167}$	$\tau = 139,11e^{0,014t}$ $\tau = 144,64e^{0,0145t}$

В числителе представлена продолжительность охлаждения смесей с марками битумов БНД 60/90, 90/130, 40/60 и температурами смеси при укладке 160 °С и окончания уплотнения 60 °С, в знаменателе для смесей с битумами марок БНД 130/200, 200/300 и температурами при укладке 140 °С и окончания уплотнения 50 °С при скорости ветра равной нулю.

Анализ данных, представленных в табл. 7.6 показал, что они подчиняются общим закономерностям продолжительности строительства покрытий из горячих смесей и могут быть представлены в виде

$$\tau_{\text{стр}} = K_h e^{\alpha t_b}, \quad (7.14)$$

где $\tau_{\text{стр}}$ – продолжительность строительства, мин; t_b – температура воздуха, °С; α – коэффициент, зависящий от толщины слоя; K_h – безразмерный коэффициент, зависящий от типа смеси.

Численное значение коэффициентов определяется по формулам:
– для смесей с битумами марок БНД 40/60, 60/90, 90/130:

$$K_h = 8927,3h^{1,793}, \quad (7.15)$$

– для смесей с битумами марок БНД 130/200, 200/300:

$$K_h = -27181h^3 + 60937h^2 - 2373,4h + 44,42;$$

$$\alpha = 4,16h^3 - 0,79h^2 + 0,0058h + 0,0177, \quad (7.16)$$

где h – толщина слоя, м.

Из представленных результатов видно, что понижение температуры воздуха с +5 до -10 °С приводит к сокращению продолжительности строительства на 20...22% независимо от толщины слоя.

На практике для увеличения продолжительности строительства увеличивают толщину слоя или повышают температуру смеси при ее укладке. Повышение температуры смеси выше допустимой приводит к

необратимым изменениям структуры и свойств битума, происходящим в результате термоокислительных процессов при высоких температурах, что ухудшает качество смеси и снижает работоспособность покрытия. Увеличение толщины слоя способствует повышению расхода смеси, что приводит к повышению стоимости строительства.

Строительство покрытий при пониженных температурах воздуха с укладкой тонких слоев при условии обеспечения требуемых качеств с точки зрения организации и производства работ вызывает некоторые сложности по следующим причинам:

- поверхность покрытия велика по сравнению с объемом укладываемого материала, что приводит к интенсивному охлаждению слоя смеси;
- на выполнение работ по укладке и уплотнению горячих смесей в заданном температурном интервале остается недостаточно времени из-за быстрого снижения температуры смеси.

С целью уточнения влияния этих факторов на продолжительность строительства были смоделированы тепловые режимы при разных температурах смеси при укладке в зависимости от толщины слоя. Полученные результаты представлены на рис. 7.11.

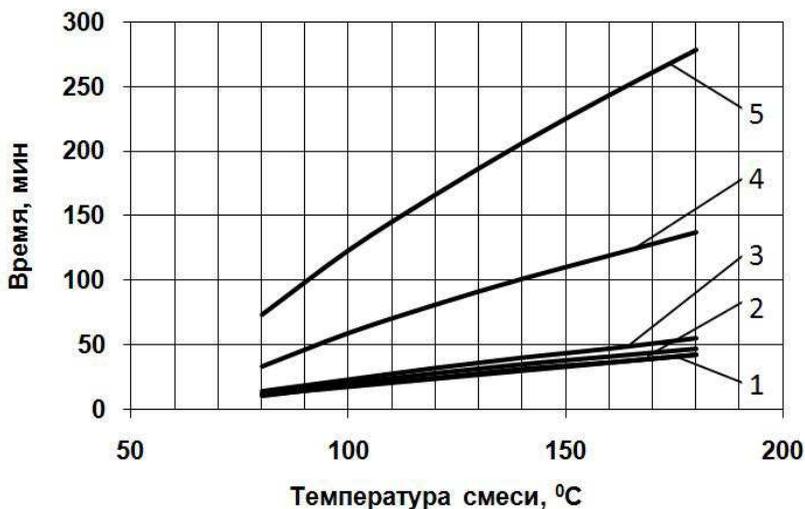


Рис. 7.11. Влияние температуры смеси при укладке на продолжительность строительства:

- 1, 2, 3 – температура воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ при толщине слоя $0,05\text{ м}$;
4, 5 – толщина слоя $0,1$ и $0,15\text{ м}$ при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Из представленных результатов видно, что увеличение толщины слоя и повышение температуры смеси при укладке способствуют увеличению продолжительности строительства.

Следует заметить, что толщина укладываемого слоя горячей смеси влияет на нагрев нижележащего слоя. Так, при укладке слоя толщиной 0,04 м и температуры смеси 160 °С температура основания нагревается до 40...43 °С. При увеличении толщины слоя до 0,1 м нижележащий слой прогревается до температуры 60 °С, что обеспечивает лучшее сцепление слоев между собой.

С целью установления общей закономерности влияния данных фактов на продолжительность устройства покрытия представим данные на рис. 7.11 в относительных величинах, принимая условно за единицу продолжительность строительства покрытия при температуре смеси 120 °С. Обозначим полученную величину коэффициентом влияния температуры смеси при укладке ($K_{тс}$). Тогда в относительных величинах данные на рис. 7.11 будут иметь значения табл. 7.7.

**7.7. Влияние температуры смеси при укладке
на продолжительность строительства
(в относительных величинах)**

Толщина слоя, м	0,05			0,10			0,15			Сред- няя вели- чина
	Темпе- ратура возду- ха, °С									
Темпе- ратура смеси, °С	-10	0	10	-10	0	10	-10	0	10	
180	1,70	1,67	1,71	1,69	1,69	1,70	1,67	1,61	1,66	1,68
160	1,50	1,46	1,46	1,47	1,47	1,48	1,46	1,45	1,45	1,46
140	1,29	1,25	1,25	1,25	1,24	1,25	1,24	1,24	1,23	1,25
120	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100	0,70	0,71	0,72	0,72	0,70	0,73	0,74	0,74	0,74	0,74
80	0,40	0,43	0,44	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43	0,43

Из данных таблицы видно, что повышение температуры смеси при укладке способствует увеличению продолжительности процесса уплотнения. Увеличение температуры смеси от 120 до 160 °С увеличивает продолжительность работ на 40...50% независимо от толщины укладываемого слоя и температуры окружающего воздуха. При снижении температуры поставляемой смеси ниже 120 °С продолжительность работ снижается на 25...50% независимо от толщины укладываемого слоя.

Анализ данных табл. 7.7 показал, что существует зависимость влияния температуры смеси на время нахождения горячей смеси в установленном температурном интервале, которая представлена на рис. 7.12 и может быть аппроксимирована уравнением

$$K_{тс} = 0,0124t_{тс} - 0,515, \quad (7.17)$$

где $K_{тс}$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры смеси при укладке на продолжительность строительства, безразмерная величина; $t_{тс}$ – температура смеси при укладке, °С.

С увеличением толщины укладываемого слоя продолжительность времени на уплотнение возрастает. При этом основание прогревается до более высокой температуры, которая составляет порядка 50...60 °С, что сказывается на качестве уплотнения.

Обработка полученных данных позволяет сделать вывод об эффективности укладки горячих асфальтобетонных смесей, с точки зрения увеличения времени строительства, повышенной толщины по отношению к укладке горячих смесей с высокой температурой смеси.

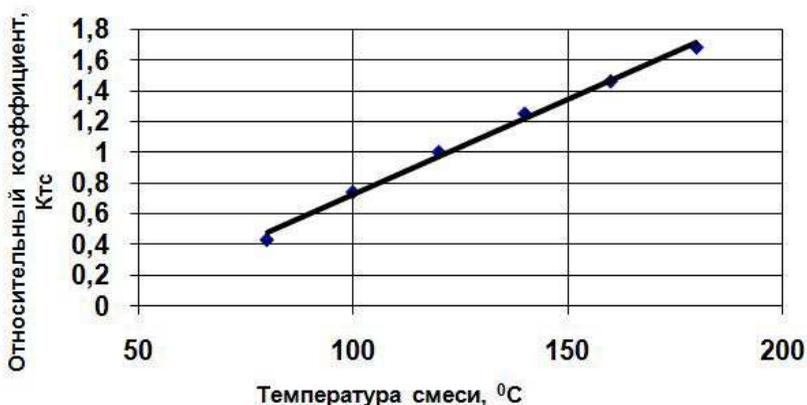


Рис. 7.12. Зависимость величины коэффициента $K_{тс}$ от температуры смеси при укладке

Принимая время строительства покрытия толщиной 0,05 м за единицу, по отношению к слоям с разной относительной толщиной при разных температурах смеси при укладке, определим эффективность разных способов повышения времени на выполнение работы по укладке и уплотнению горячих смесей. Результаты представлены в табл. 7.8.

Из данных таблицы видно, что с увеличением толщины слоя возможная продолжительность строительства увеличивается в несколько раз независимо от температуры окружающего воздуха. Поэтому повышение толщины укладываемого слоя при пониженных температурах окружающего воздуха следует считать более эффективным методом повышения возможного времени строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей.

Используя данные, опубликованные в работах [11, 15], представим их в относительных величинах, полученные зависимости представим на рис. 7.13.

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением толщины укладываемого слоя смеси время увеличивается более интенсивно и зависимость носит нелинейный характер. При одной и той же относительной толщине слоя, возможное время на производство рабо-

7.8. Влияние относительной толщины слоя на продолжительность процесса уплотнения при различной температуре смеси при укладке

Относительная толщина слоя		2,0			3,0		
Температура смеси, °С	Температура воздуха, °С	-10	0	10	-10	0	10
	180		3,26	3,27	3,22	6,62	6,63
160		3,30	3,27	3,27	6,75	6,63	6,50
140		3,25	3,22	3,25	6,64	6,60	6,60
120		3,30	3,25	3,25	6,92	6,67	6,69
100		3,27	3,30	3,30	6,83	6,9	6,87
80		3,30	3,17	3,14	7,30	6,83	6,70

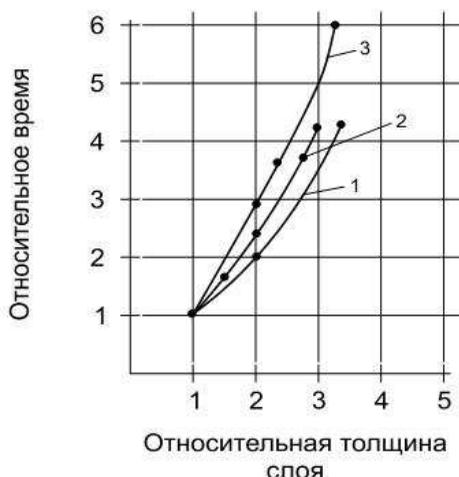


Рис. 7.13. Влияние относительной толщины уплотняемого слоя на время уплотнения:

- 1 – по данным Н. В. Горельшова для крупнозернистой асфальтобетонной смеси;
 2 – по данным К. Нижбойера для мелкозернистой асфальтобетонной смеси;
 3 – по экспериментальным данным для песчаной асфальтобетонной смеси

ты зависит от типа смеси и с увеличением размера минерального материала, будет уменьшаться.

Так, если при увеличении толщины слоя из песчаной асфальтобетонной смеси в два раза время на ее уплотнение увеличивается в три раза, для среднезернистых смесей время в 2,5 раза, крупнозернистых – в 2 раза.

В процессе строительства при пониженных температурах воздуха значительное влияние на возможное время укладки и уплотнения смесей оказывает скорость ветра. В соответствии с рекомендациями [43, 49] разрешается укладывать горячую асфальтобетонную смесь на подготовленное основание при условии, что скорость ветра не превышает пределов, указанных в табл. 7.9.

7.9. Допускаемая предельная скорость ветра при укладке горячих смесей при пониженных температурах окружающего воздуха

Температура воздуха, °С	От +10 до 0 °С	От 0 до –5 °С	От –5 до –10 °С
Скорость ветра, м/с	7	5	3

Установлено, что характер влияния скорости ветра на продолжительность работ по строительству покрытий не зависит от толщины укладываемого слоя. Увеличение скорости ветра приводит к снижению продолжительности процесса строительства за счет интенсивной отдачи тепла в окружающую среду. Обозначив влияние скорости ветра на возможную продолжительность строительства коэффициентом K_v , получим зависимость коэффициента влияния скорости ветра на продолжительность работ, которая представлена на рис. 7.14.

Численное значение коэффициента K_v может быть определено по следующей зависимости (коэффициент корреляции составляет 0,98):

$$K_v = 0,98 \cdot e^{-0,039v}, \quad (7.18)$$

где v – скорость ветра, м/с.

В зависимости от конструкции дорожного покрытия используются разные смеси и технологические схемы производства работ, влияющие на продолжительность строительства.

При строительстве дорожных покрытий в два слоя используется раздельная укладка смеси. В этом случае материал слоя покрытия регламентирован СП 34.13330.2011 и зависит от категории дороги [45]. В нижние слои покрытия укладывают крупнозернистые смеси, а в верхние – мелкозернистые или песчаные. С целью обеспечения безопасности движения в верхние слои покрытия укладывают смеси с большим содержанием щебня (тип А) или отсевов дробления (тип Б, Г). Если предусмотрена укладка разных по составу смесей, то укладку

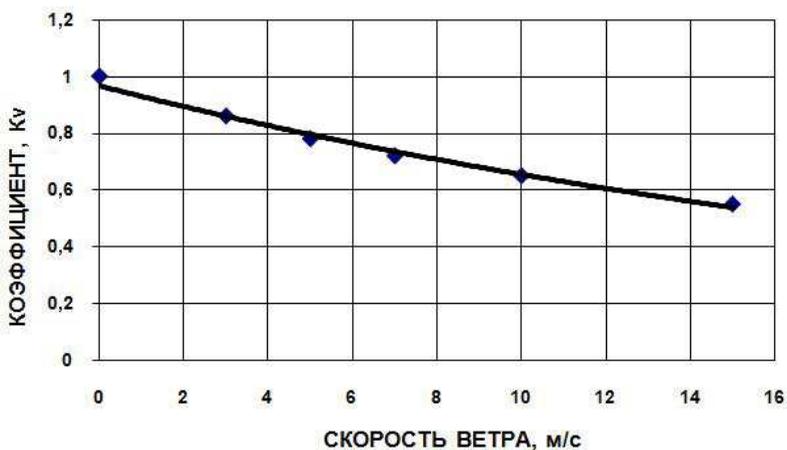


Рис. 7.14. Зависимость величины коэффициента K_v от скорости ветра

ведут в два слоя и верхний слоя покрытия укладывают после уплотнения нижнего слоя и снижения температуры покрытия до 20...30 °С при температуре окружающего воздуха до +10 °С.

В условиях пониженных температур окружающего воздуха при устройстве двухслойного покрытия допускается укладывать верхний слой на свежеложенный нижний слой при его температуре 20...40 °С и температуре воздуха ниже +10 °С [43, 49].

Наличие нижнего слоя покрытия с более высокой температурой по отношению к температуре окружающего воздуха способствует уменьшению отдачи тепла основанию и приводит к увеличению возможного времени строительства верхнего слоя покрытия. Аналогичная закономерность была установлена при определении продолжительности строительства покрытий при высоких температурах окружающего воздуха [16].

В таблице 7.10 представлены данные по продолжительности строительства покрытия при укладке верхнего слоя горячей асфальтобетонной смеси толщиной 0,05 м на уложенный ранее нижний слой асфальтобетона толщиной 0,08 м при температуре воздуха –10 °С, скорости ветра 0 м/с и температуре смеси при укладке 160 °С.

Из данных таблицы видно, что при строительстве покрытий при пониженных температурах окружающего воздуха температура нижнего слоя влияет на возможное время строительства, в том числе и на процесс уплотнения покрытия.

Увеличение температуры основания до 30...40 °С при температуре окружающего воздуха –10 °С способствует увеличению продолжительности строительства покрытий в интервале температур 160...60 °С на 25...35%, аналогично увеличивается и возможная продолжитель-

7.10. Влияние температуры основания на продолжительность строительства

Температура основания, °С	-10	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160
Время строительства, мин	44	47	50	54	59	64	70	76	92	111	132	155	179
Время укладки, мин	12	12	12	12,5	13	13,5	14	15	15,5	17	19	21	26
Время уплотнения, мин	32	35	38	42	46	51	56	61	77	94	113	134	153

ность процесса уплотнения. На продолжительность распределения смеси температура основания оказывает незначительное влияние. Продолжительность укладки смеси, исходя из непрерывности строительства, может быть увеличена за счет повышения температуры смеси в момент ее распределения.

На рисунке 7.15 представлена зависимость влияния температуры основания на продолжительность строительства. Численное значение коэффициента влияния температуры основания $K_{осн}$ на продолжительность строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей может быть определено по следующей зависимости

$$K_{осн} = 0,99e^{0,0086t_{см}}, \quad (7.19)$$

где $t_{см}$ – температура смеси, °С.

Установлено, что коэффициент влияния нижнего слоя не зависит от температуры укладываемой смеси.

В общем виде продолжительность строительства дорожных покрытий при пониженных температурах воздуха можно определить по зависимости, приведенной ниже:

$$\tau_{стр} = K_l K_{тс} K_v K_M K_{осн} K_{см} e^{at_b}, \text{ мин.} \quad (7.20)$$

Принятая технология производства работ влияет не только на продолжительность строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, но и на качество строительства.

На рисунке 7.16 представлено распределение температуры смеси по толщине слоя в зависимости от принятой технологии строительства.

Из рисунка 7.16 видно, что при раздельной укладке нижнего или верхнего слоев из горячих асфальтобетонных смесей при пониженных температурах воздуха на границе укладываемого слоя происходит рез-

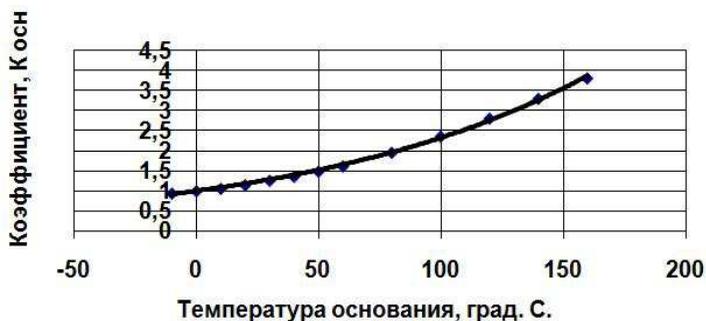


Рис. 7.15. Зависимость величины коэффициента влияния температуры основания $K_{осн}$ на продолжительность строительства

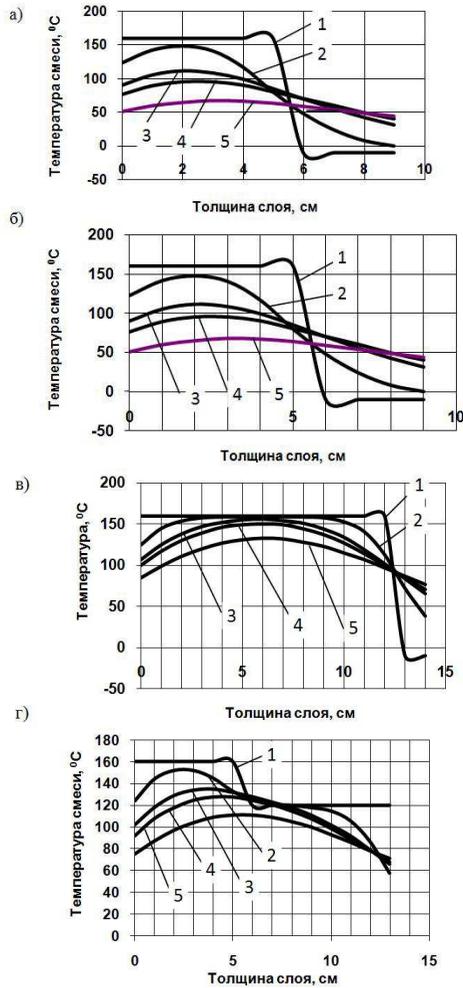


Рис. 7.16. Распределение температуры по толщине слоя в зависимости от принятой технологии строительства покрытия при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорости ветра 0 м/с , температуре смеси при укладке $160\text{ }^{\circ}\text{C}$:

а – распределение температуры при укладке нижнего слоя покрытия на слой щебня; *б* – при укладке верхнего слоя покрытия на нижний слой покрытия из крупнозернистого асфальтобетона при его температуре $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$;

в – распределение температуры смеси при укладке одним слоем толщиной 12 см ; *г* – распределение температуры в покрытии при применении метода «компактаасфальт»;

1 – температура смеси после укладки, $^{\circ}\text{C}$; *2* – 5 мин ;

3 – 20 мин ; *4* – 30 мин ; *5* – 60 мин

кое понижение температуры смеси, что приводит к снижению качества работ. Укладка смесей повышенной толщины слоя способствует увеличению продолжительности строительства и обеспечивает равномерное распределение температуры по толщине слоя, что позволяет получить более высокую плотность покрытия. Применение технологии «компактасфальт» также способствует увеличению продолжительности строительства и обеспечивает равномерное распределение температуры по толщине слоя и получение высокой плотности покрытия.

7.5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Строительство дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей ведется комплектом машин, состоящим из асфальтоукладчика и уплотняющих машин, параметры которых зависят от заданной производительности строительства, условий производства работ и применяемого материала. С учетом непрерывности строительства дорожных покрытий из горячих смесей эффективность работы машин зависит от результатов совместной работы, при которой каждая машина (асфальтоукладчик, каток) выполняет свои функции в конкретных температурных интервалах и создает фронт работы для других машин.

Продолжительность выполнения отдельных операций (укладка, уплотнение) зависит от условий строительства и применяемой смеси (типа и марки битума). Достичь требуемых показателей качества строительства можно при условии, что температура поставляемой смеси и работа машин осуществляется в температурных интервалах, зависящих от свойств материала и параметров машин, а также достаточного времени для выполнения операций по укладке и уплотнению покрытия.

Качество строительства покрытия зависит от температурных и технологических режимов укладки и уплотнения смеси, к которым относятся температура начала и окончания процессов, рабочие скорости передвижения машин, число проходов катков по одному следу и соответствие параметров машин свойствам материала. Обеспечить заданное число проходов с установленными скоростями необходимо за время, в течение которого асфальтобетонная смесь находится в заданном температурном интервале. Поэтому параметры машин, входящие в комплект оборудования для строительства дорожных покрытий из горячих смесей, должны быть взаимосвязаны между собой как по продолжительности выполнения операций, так и температурным режимам.

Температура поставляемой смеси к месту производства работ зависит от применяемого материала и температуры смеси при отгрузке, дальности ее перемещения и скоростей движения транспортных средств, температуры воздуха и применения защитных устройств от неравномерности охлаждения смеси и ее величина оказывает влияние как на коэффициент уплотнения, так и прочность покрытия.

На практике горячие асфальтобетонные смеси уплотняют и при пониженных температурах смеси при наличии тяжелых катков, однако это приводит к снижению эффективности работы уплотняющих машин и низкому качеству покрытий. Исследованиями В. Б. Пермякова установлено, что при одном и том же коэффициенте уплотнения (0,995...0,996) прочность образцов на сжатие при температуре 50 °С (R50) уменьшается с понижением температуры, при которой они формировались. Наиболее существенное снижение прочности образцов наблюдается для многощебенистых смесей типа А (31,1%). Для малощебенистых смесей типа В снижение прочности образцов составляет 12,2% [34].

Продолжительность транспортировки асфальтобетонных смесей устанавливается из условия обеспечения температуры при укладке. Анализ температуры смеси при отгрузке и укладке показывает, что в процессе транспортировки смеси тепловые потери должны быть сведены к минимуму, что возможно только при использовании различных защитных устройств. При движении транспортных средств температура слоев смеси, расположенной у боковой поверхности кузова и верхней части транспортируемой смеси, за счет конвективной теплоотдачи, снижается. Это способствует образованию слоя с более высокими вязкостными свойствами, что приводит к снижению коэффициента уплотнения и прочности покрытия. Загрузку автотранспорта смесью необходимо производить в несколько приемов. При заполнении емкости кузова транспортной машины крупный заполнитель скатывается по боковой поверхности образующей конуса, что способствует расслоению смеси. При загрузке такой смесью бункера асфальтоукладчика образуются участки с неоднородной структурой, снижающие качество строительства покрытия.

При ограниченных объемах поставляемой смеси длина сменной захватки будет определяться по формуле

$$L = G / bc, \text{ м}, \quad (7.21)$$

где G – количество асфальтобетонной смеси, выделяемой на объект, кг; b – ширина полосы укладки, м; c – расход смеси, кг/м² [6].

При заданной производительности строительства и работе одного асфальтоукладчика для сопряжения двух параллельных полос длина полосы укладки зависит от температуры окружающего воздуха и условий производства работ. Минимальная длина полосы укладки принимается в пределах 10...15 м из условия разгона и торможения уплотняющих машин [6, 14]. При одновременной работе нескольких асфальтоукладчиков они располагаются уступом в плане один относительно другого в пределах 10...15 м.

Процесс строительства покрытий ведется непрерывным потоком и за время охлаждения смеси с момента укладки до начала процесса укатки, асфальтоукладчик ведет укладку и предварительное уплотнение смеси без работы уплотняющих машин. В зависимости от типа смеси и марки битума, а также условий строительства, продолжительность охлаждения слоя будет разной. За этот промежуток времени асфальтоукладчик должен обеспечить фронт работы для катков, уплотняющих покрытие в заданных температурных границах с обеспечением требуемого качества работ. Длина полосы укладки будет определяться по следующей формуле

$$L_{ук} = v_a \tau_{ук}, \text{ м}, \quad (7.22)$$

где v_a – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; $\tau_{ук}$ – время укладки, мин.

Согласно существующим рекомендациям, руководствам и правилам по производству работ при устройстве покрытий из горячих асфальтобетонных смесей [6, 14] продолжительность укладки принимается в зависимости от общего времени охлаждения смеси от момента укладки до окончания уплотнения – $\tau_{стр}$, равной $0,16\tau_{стр}$ при работе легкого, среднего и тяжелого катков и $0,25\tau_{стр}$ – среднего и тяжелого катков, или предлагаются численные значения времени с учетом толщины укладываемого слоя и скорости ветра. Как говорилось ранее, время охлаждения смеси зависит от многих факторов и может меняться в широких пределах. В связи с этим предлагаемые соотношения продолжительности укладки от времени охлаждения смеси не всегда соответствуют действительности.

Рабочая скорость ведущей машины – асфальтоукладчика, определяющей производительность строительства, принимается исходя из требуемой производительности строительства при условии обеспечения требуемых показателей качества уплотнения катками. Причем, асфальтоукладчик не только укладывает слой смеси с заданными параметрами, но и производит предварительное его уплотнение. Качество укладки смеси зависит от конструктивных параметров машины, температуры смеси при укладке, ее свойств и рабочей скорости пере-

мещения асфальтоукладчика. Анализ технических характеристик асфальтоукладчиков показал, что рабочие скорости укладки находятся в пределах от 0,8 до 27 м/мин при темпах укладки от 0,3 до 10 км/см [6].

При выборе скорости укладки необходимо учитывать скорость движения асфальтоукладчика с целью обеспечения заданной производительности строительства, а также его рабочую скорость, которая должна быть согласована со скоростными режимами и типами катков для достижения требуемой прочности покрытия.

С учетом непрерывности строительства длина захваток укладки и уплотнения катком конкретного типа в заданных температурных интервалах должны быть равны между собой. Для достижения требуемого качества уплотнения каток должен обеспечить необходимое количество проходов по одному следу за время, в течение которого его параметры соответствуют температурному интервалу уплотняемого покрытия. Для приготвления смеси любого типа могут быть использованы разные марки битума, свойства которых зависят от температуры, а, следовательно, имеют разные температуры окончания работ.

Длина захватки при работе катка в заданном температурном интервале, с учетом числа укатываемых полос (ϵ) и числа проходов по одному следу (n) будет определяться:

$$L_{\text{уп}} = v_{\text{к}}\tau_{\text{уп}}/bn, \text{ м} \quad (7.23)$$

где $v_{\text{к}}$ – средняя рабочая скорость катка, м/мин; $\tau_{\text{уп}}$ – возможное время работы катка в заданном температурном интервале, мин.

С учетом непрерывности строительства покрытия необходимо, чтобы длина укладываемой полосы и длина захватки катком в заданных температурных границах были равны между собою. Это условие имеет вид

$$L_{\text{ук}} = L_{1\text{уп}} = L_{2\text{уп}} = L_{3\text{уп}}, \quad (7.24)$$

где $L_{1\text{уп}}$; $L_{2\text{уп}}$; $L_{3\text{уп}}$ – длина захватки при уплотнении легким, средним, тяжелым катками в соответствующих температурных интервалах, м.

Исходя из данного условия, для обеспечения непрерывности строительства покрытия, соотношения между рабочими скоростями асфальтоукладчика и катками в заданных температурных интервалах имеют вид

$$v_{\text{а}} = v_{\text{к}}\tau_{\text{уп}} / \tau_{\text{ук}}bn, \text{ м/мин.} \quad (7.25)$$

Из зависимости видно, что скорость укладки слоя покрытия зависит не только от средней скорости укатки и числа проходов по одному следу, но и продолжительности укладки и уплотнения слоя в заданных температурных интервалах.

Данная зависимость позволяет решать и другие вопросы. При заданных скоростях укладки слоя и числа проходов катка в заданном температурном интервале уплотнения можно определить среднюю скорость катка, на основании которой, с учетом существующих рекомендаций, можно выбирать тип уплотняемой машины. Аналогичным образом можно определить число проходов катка по одному следу.

Таким образом, данная зависимость позволяет осуществлять выбор технологических параметров машин для строительства покрытий их горячих асфальтобетонных смесей

Анализ представленной зависимости показывает, что при совместной работе асфальтоукладчика с катками возможны следующие условия производства работ при обеспечении заданного числа проходов катка и скорости потока:

1. Время работы асфальтоукладчика и катка в заданном температурном интервале равны между собой, т.е., $\tau_{уп} / \tau_{ук} = 1$. При таком соотношении непрерывность процесса обеспечивается, предложенная зависимость имеет вид, что и в работе [14]. Исследования показали, что это условие не всегда выполняется. Так, при укладке слоя толщиной 0,03...0,04 м, температуре смеси при укладке 140 °С и температуре окружающего воздуха 23...25 °С время укладки составляет 3...4 мин, а время работы среднего катка в температурном интервале 105...85 °С составляет 11...13 мин, время работы тяжелого катка при этих условиях в интервале температур 85...70 °С составляет 18...20 мин.

2. Время уплотнения определенным типом катка превышает время укладки, т.е., $\tau_{уп} / \tau_{ук} > 1$. Это условие означает, что асфальтоукладчик работает с низкими скоростями укладки и каток простаивает из-за отсутствия фронта работ. Для обеспечения непрерывности процесса строительства необходимо увеличить скорость укладки слоя или уменьшить скорость катка, что снижает эффективность применяемых машин.

3. Время укладки больше времени уплотнения, т.е., $\tau_{уп} / \tau_{ук} < 1$. При этом условии каток не успевает уплотнять укладываемый слой покрытия в заданном интервале температур. Следовательно, необходимо уменьшить скорость укладки смеси или вести процесс уплотнения при пониженных температурах, что влияет на качество покрытия. В этом случае возможно использовать дополнительный каток аналогичного типа или увеличить скорость укатки при условии обеспечения скоростных режимов уплотнения.

Качество строительства покрытия зависит от числа проходов по одному следу и скоростных режимов уплотнения. Необходимое количество проходов и рабочие скорости катков для обеспечения требуе-

мой плотности различных типов асфальтобетонных смесей регламентировано нормативными документами.

Для обеспечения непрерывности строительства покрытия необходимо знать время укладки и уплотнения покрытия в заданных температурных интервалах.

Проведенными исследованиями установлено, что время охлаждения слоя горячей смеси зависит от погодных условий, конструкции покрытия и свойств уплотняемого материала.

В общем виде продолжительность нахождения слоя в определенном температурном интервале, с учетом влияния перечисленных факторов, может быть определена по формуле:

$$\tau = K_c K_{тс} K_v K_{oc} K_m K_h e^{\alpha t_b}, \text{ мин}, \quad (7.26)$$

где K_c , $K_{тс}$, K_v , K_m , K_{oc} , K_m , K_h – безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств смеси, ее температуры при укладке, скорости ветра, температуры основания и окончания процесса, толщины слоя; t_b – температура окружающего воздуха, °С; α – коэффициент, зависящий от толщины слоя, которые определяется по формулам:

– для смесей с битумами марок БНД 40/60, 60/90, 90/130

$$\alpha = 128,3h^3 - 28,15h^2 + 1,96h - 0,029; \quad (7.27)$$

– для смесей с битумами марок БНД 130/200, 200/300

$$\alpha = 4,2h^3 - 0,79h^2 - 0,0058h + 0,02, \quad (7.28)$$

где h – толщина слоя, м.

Численные значения коэффициентов определяются по зависимостям, представленным в табл. 7.18.

7.18. Зависимости для определения численных значений коэффициентов формулы (7.26)

Коэффициент	При укладке смеси	При уплотнении слоя
$K_c = K_\lambda K_{yt}$	$K_\lambda = 2,34e^{-0,6\lambda} [0,89(t_{cm}/100 - 0,42)];$ $K_{yt} = (0,76C_{cm} - 0,26)[0,88(t_{cm}/100 - 0,41)]$	$K_\lambda = 2,34e^{-0,6\lambda} [0,89(t_{cm}/100 - 0,42)];$ $K_{yt} = (0,76C_{cm} - 0,26)[0,88(t_{cm}/100 - 0,41)]$
$K_{тс}$	$0,015t_{cm} - 1,43$	$1,005 \ln t_{cm} - 4,0791$
K_v	$0,98e^{-0,047v}$	$0,98e^{-0,049v}$
K_{oc}	$0,99e^{0,013\Delta t}$	$0,99e^{0,013\Delta t}$

Коэффициент	При укладке смеси	При уплотнении слоя
K_m	$-2,092\ln(t_{op}) + 10,62$	$-2,62A^3 + 9,096A^2 - 11,293A + 5,061,$ при $h = 0,05$ м и более; $-4,788A^3 + 15,85A^2 - 17,979A + 7,09,$ при $h = 0,03 - 0,04$ м
K_h	$3586,9h^{1,8876}$	$7072h^{1,7723}$
α	$20h^3 - 5,11h^2 + 0,38h - 0,0004$	$-76,19h^3 + 16,25h^2 - 1,1572h + 0,05$

Обозначения: t_{cm} – температура смеси при укладке, °С; v – скорость ветра, м/с; Δt – разница в температурах основания и окружающего воздуха, °С; e – основание натурального логарифма; \ln – натуральный логарифм; h – толщина укладываемого слоя, м; A – условная величина, определяемая выражением $(t_{op} / 100)$; t_{op} – температура окончания процесса, °С; C_{cm} – удельная теплоемкость смеси, кДж/кг-град; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м-град.

При расчете возможной продолжительности работы катков в заданных температурных интервалах величина коэффициента K_m будет определяться следующим образом:

$$K_m = K_{m2} - K_{m1}, \quad (7.29)$$

где K_{m2} – коэффициент, учитывающий температуру смеси при окончании работы катка; K_{m1} – коэффициент, учитывающий температуру смеси в начале работы катка.

Известно, что выбор машин для строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей будет зависеть от асфальтоукладчика, который определяет не только темп строительства, но и влияет на состав машин для уплотнения покрытий. Анализ конструкций асфальтоукладчиков показал, что в настоящий момент машины для укладки смесей оборудуются рабочими органами, работающими в динамическом режиме, что позволяет производить предварительное уплотнение смесей одновременно с укладкой и обеспечивать сравнительно высокий коэффициент уплотнения.

Степень предварительного уплотнения смеси зависит от ее состава (типа смеси), температуры при укладке и рабочей скорости асфальтоукладчика [14, 32].

Установлено, что в зависимости от степени уплотнения смеси для обеспечения требуемого качества уплотнения требуются разные типы катков, что влияет на выбор технологии производства работ, см. табл. 7.18 [34, 38].

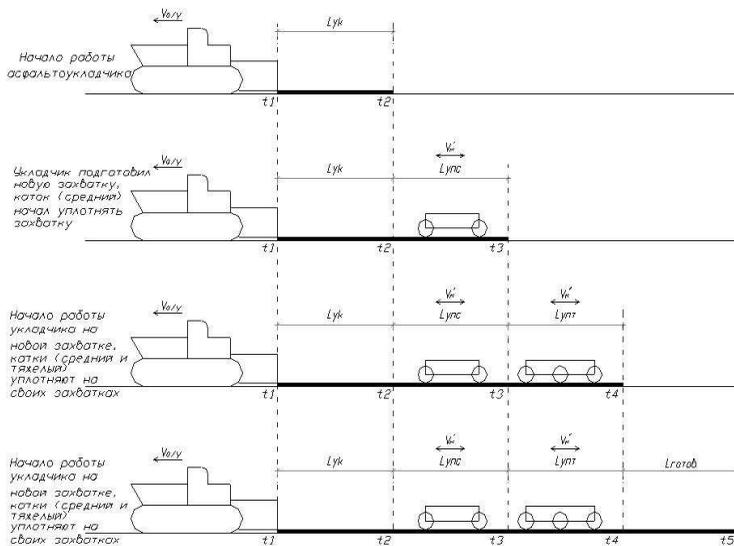
Следовательно, зная заданную производительность строительства, т.е. необходимую скорость укладки смеси, можно ориентировочно на основании данных зависимостей определить степень предварительного уплотнения смеси при укладке с учетом ее типа и выбрать типы катков для обеспечения заданного качества строительства.

Практика строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей показала, что качество уплотнения зависит также от применяемого метода уплотнения. При укладке многощелебнистых смесей с содержанием щебня свыше 60%, а также смесей типа А и Б, хорошие результаты достигаются при использовании вибрационных катков. Применение при уплотнении таких смесей других катков (статических, на пневматических шинах) менее эффективно. При уплотнении смесей типа В, Г и Д применение вибрационных катков дает меньший эффект уплотнения. Требуемой плотности при уплотнении таких смесей можно достичь применением легких, средних и тяжелых катков статического действия [19, 21].

В зависимости от величины коэффициента уплотнения, достигаемого при укладке и предварительном уплотнении асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиком разработаны технологические схемы (рис. 7.17 – 7.19, табл. 7.20 – 7.22).

7.19. Влияние коэффициента уплотнения на выбор уплотняющих машин

Коэффициент уплотнения	Период уплотнения	Тип катка
0,7 0,85	Начало Конец	Легкий
0,85 0,92	Начало Конец	Средний
0,92 1,0	Начало Конец	Тяжелый



Примечание:

1. Значение температурных интервалов (t_2 , t_3 , t_4) представлено в таблице. Численные значения времени соответствуют температуре начала укладки 160°C и окончанию процесса уплотнения 60°C .
2. При изменении температуры начала укладки и окончания уплотнения необходимо вносить поправки за счет коэффициентов $K_{тв}$ и $K_{ж}$.

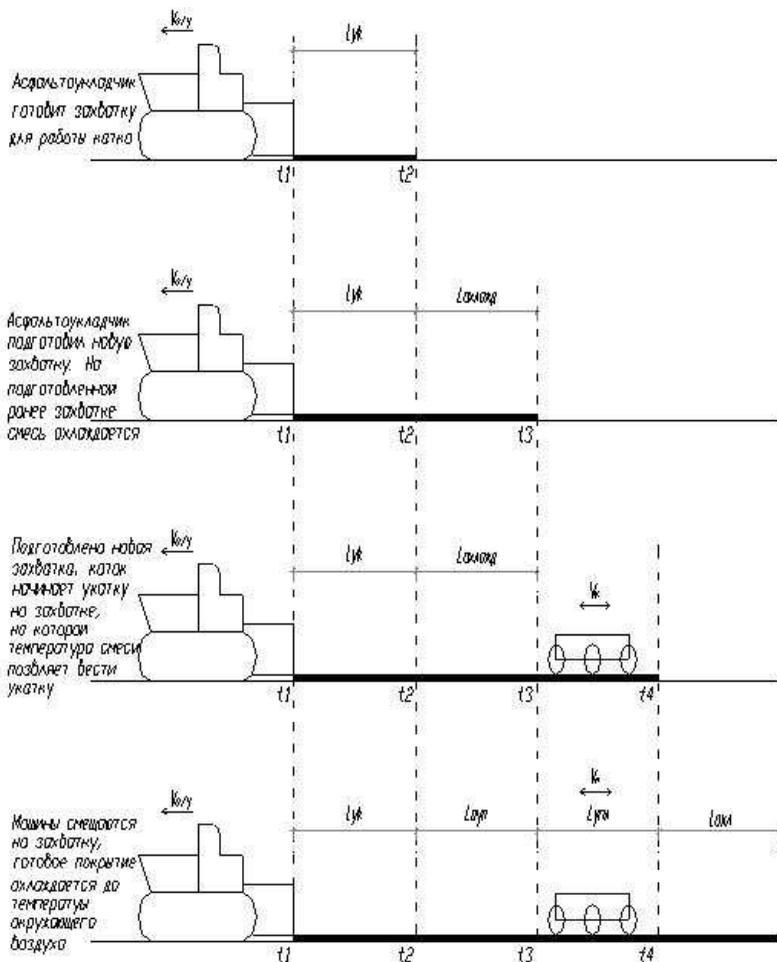
Рис. 7.17. Технологическая схема устройства покрытия асфальтоукладчиком и одним катком с повышенной степенью коэффициента предварительного уплотнения $K_y = 0,92$ и более

7.20. Распределение машин по температурным интервалам с учетом времени работы одного катка в зависимости от типа смеси

Марка битума	Температура смеси при укладке, $^\circ\text{C}$	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, $^\circ\text{C}$				Среднее время работы, мин	
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{уп}$
<i>Tun A</i>								
БНД 40/60	160...150	25,5	160	140	115	100	8,5	8,5
БНД 60/90	155...145	28,0	155	135	110	95	9	9

Продолжение табл. 7.20

Марка битума	Температура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Среднее время работы, мин	
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{уп}$
<i>Тун А</i>								
БНД 90/130	150...140	30,0	150	130	105	90	10	10
БНД 130/200	140...130	23,0	140	115	95	80	8	8
БНД 200/300	130...120	29,0	130	105	85	70	10	10
СГ 130/200	120...110	40,0	120	90	70	55	13	12
<i>Тун Б</i>								
БНД 40/60	160...150	28	160	145	110	100	8,5	8,5
БНД 60/90	155...145	28,5	155	145	110	95	9	9
БНД 90/130	150...140	33	150	125	105	90	10	10
БНД 130/200	140...130	26,0	140	110	95	80	8	8
БНД 200/300	130...120	33,0	130	105	85	70	10	10
СГ 130/200	120...110	45,0	120	90	70	55	13	12



Примечание:

1. Значения температурных интервалов (t_2, t_3, t_4) представлено в таблице. Численные значения времени соответствуют температуре начала укладки 160°C и окончания процесса уплотнения 60°C .
2. При изменении температуры начала укладки и окончания уплотнения необходимо вносить поправки за счет коэффициентов $K_{тс}$ и $K_{тн}$.

Рис. 7.18. Технологическая схема устройства покрытия асфальтоукладчиком и звеном из двух катков с величиной коэффициента предварительного уплотнения $K_y = 0,85...0,92$

**7.21. Распределение машин по температурным интервалам
с учетом времени работы одного катка
в зависимости от типа смеси**

Марка битума	Темпера- тура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Среднее время работы, мин		
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{уп1}$	$\tau_{уп2}$
<i>Tun A</i>									
БНД 40/60	160...150	25,5	160	140	115	100	8,5	12	5
БНД 60/90	155...145	28,0	155	135	110	95	9	12	7
БНД 90/130	150...140	30,0	150	135	100	90	9	13	7
БНД 130/200	140...130	27,0	140	115	90	80	10	10	7
БНД 200/300	130...120	28,0	130	105	80	70	10	11	7
СГ 130/200	120...110	36,0	120	90	65	55	12	14	10
<i>Tun B</i>									
БНД 40/60	160...150	28,0	160	135	105	95	10	11	7
БНД 60/90	155...145	30,0	155	130	105	90	9	12	9
БНД 90/130	150...140	33,0	150	125	100	85	10	13	10
БНД 130/200	140...130	26,0	140	110	90	75	8	10	8
БНД 200/300	130...120	33,0	130	100	75	65	11	13	9

Продолжение табл. 7.21

Марка битума	Температура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Среднее время работы, мин		
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{уп1}$	$\tau_{уп2}$
<i>Tun B</i>									
БНД 40/60	160...150	32	160	135	105	90	10	12	10
БНД 60/90	155...145	33	155	130	100	85	9	13	11
БНД 90/130	150...140	34	150	125	95	80	8	14	12
БНД 130/200	140...130	31,0	140	110	85	70	9	11	10
БНД 200/300	130...120	43,0	130	100	70	60	11	17	15
СТ 130/200	120...110	44,0	120	80	60	45	14	20	10

7.22. Распределение машин по температурным интервалам с учетом времени работы одного катка в зависимости от типа смеси

Марка битума	Температура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Среднее время работы, мин			
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{уп1}$	$\tau_{уп2}$	$\tau_{уп3}$
<i>Tun A</i>										
БНД 40/60	160...150	25,0	145	130	110	100	6	5	8	6
БНД 60/90	155...145	26,0	140	125	105	95	6	5	8	7
БНД 90/130	150...140	30,0	130	120	100	80	6	4	9	7

Продолжение табл. 7.22

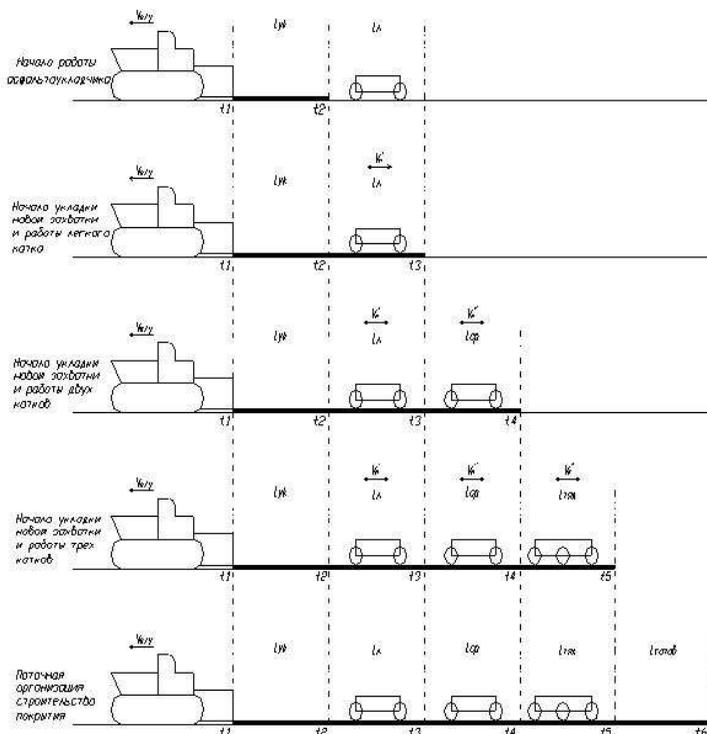
Марка битума	Температура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Среднее время работы, мин			
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{уп1}$	$\tau_{уп2}$	$\tau_{уп3}$
БНД 130/200	140...130	22,0	120	105	90	80	6	4	7	5
БНД 200/300	130...120	29,0	115	100	80	70	7	4	10	8
СГ 130/200	120...110	40,0	90	80	65	60	9	5	11	9

Tun B

БНД 40/60	160...150	28,0	145	130	110	95	7	4	8	9
БНД 60/90	155...145	30,0	140	125	105	90	6	6	8	10
БНД 90/130	150...140	32,0	135	120	100	85	5,5	5,5	8	10
БНД 130/200	140...130	26,0	120	100	85	75	6	6	8	6
БНД 200/300	130...120	33,0	110	90	75	65	8	7,5	8	9,5
СГ 130/200	120...110	41,0	90	70	60	50	9	11	13	8

Tun B

БНД 40/60	160...150	32	140	120	105	90	9	6	7	10
БНД 60/90	155...145	34,0	135	115	100	85	10	6	7	11
БНД 90/130	150...140	37,0	125	110	95	80	10	6	9	12
БНД 130/200	140...130	31,0	120	100	85	70	5	6	10	10
БНД 200/300	130...120	43,0	110	95	80	60	7	8	10	18
СГ 130/200	120...110	42,0	90	75	60	45	7	7	10	18



Примечание:

1. Значение температурных интервалов (t_2 , t_3 , t_4) представлено в таблице. Численные значения времени соответствуют температуре начала укладки 160°C и окончания процесса уплотнения 60°C .
2. При изменении температуры начала укладки и окончания уплотнения необходимо вносить поправки за счет коэффициентов K_5 и K_6 .

Рис. 7.19. Технологическая схема устройства покрытия асфальтоукладчиком и звеном из трех катков с величиной коэффициента предварительного уплотнения $K_v = 0,70...0,85$

Приведенные в табл. 7.21, 7.22 данные соответствуют температуре окружающего воздуха и основания 20°C , скорости ветра 0 м/с , толщине слоя в плотном состоянии $0,05\text{ м}$ и температуре смеси при укладке с использованием битумов марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 – 160°C и температуре смеси при окончании укатки 60°C , для смесей с битумами марок БНД 130/200, 200/300 и СГ 130/200 – 140°C при температуре укладки и окончания работ 140 и 50°C соответственно.

При изменении условий строительства и свойств смеси необходимо вносить поправки в продолжительность выполнения операций укладки и уплотнения за счет коэффициентов K_m , $K_{тс}$, K_0 , K_c , K_h , K_v и α .

7.6. ОСОБЕННОСТИ УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ В ЗОНЕ СТЫКА СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛОС

Независимо от способа устройства многополосных дорожных покрытий нежесткого типа обеспечение необходимых температурных режимов асфальтобетонных смесей при укладке и уплотнении должны быть обеспечены не только по полосе движения транспортных средств, но и на стыках сопряженных полос покрытия, так как от этого будет зависеть срок службы дорожного покрытия.

Применение метода технологии устройства многополосных покрытий с устройством отдельных полос требует в обязательном порядке применения асфальтозагревателей. В этом случае до начала укладки сопряженного слоя производят обрезку края ранее уложенной полосы шириной до 0,05 м, на который наносят слой горячего вяжущего. Затем, с применением асфальтозагревателя прогревают край уложенной полосы покрытия на ширину до 0,15 м. Нагрев края асфальтобетонной полосы в зависимости от типа смеси и марки битума осуществляют до температуры 100...110 °С. Высота нового укладываемого слоя должна быть равна высоте ранее уложенного слоя с учетом коэффициента уплотнения. Нарушение этого условия способствует снижению коэффициента уплотнения асфальтобетона в зоне стыка полос. Применение способа нагрева края уложенной полосы за счет температуры сопряженного слоя покрытия не обеспечивает нагрева до требуемой температуры смеси.

Уплотнение асфальтобетонного слоя в зоне стыка сопряженных полос при перемещении катка по ранее уплотненной полосе является неэффективным способом, т.к. в этом случае передаваемая нагрузка от вальца на слой материала снижается за счет ее передачи на ранее уплотненную поверхность покрытия. Это приводит к снижению достигаемого коэффициента уплотнения в зоне стыка.

При организации работ по укладке асфальтобетонных смесей сопряженных полос одним асфальтоукладчиком со смещением его с одной полосы на другую необходимо определить длину захватки, обеспечивающую необходимые температурные режимы горячей смеси в зоне стыка, с учетом рабочей скорости асфальтоукладчика и темпа охлаждения смеси. Технологический процесс уплотнения асфальтобетонной смеси в зоне стыка полос предусматривает первый проход катка по свежеложенной полосе с перекрытием смежной полосы покрытия на 150 мм. Причем, первый проход выполняется через 5...7 мин после укладки смежной полосы, данное обстоятельство позволяет дополнительно прогреться краю первой полосы на 10...20 °С за счет температуры смеси смежной полосы..

При совместной работе двух и более асфальтоукладчиков может применяться метод уплотнения асфальтобетона в зоне стыка с отступом от шва сопряжения. При этом методе край первой и второй полос не уплотняют на расстоянии 0,15 м. После укатки сопряженных полос производят уплотнение асфальтобетона в зоне их стыка. Данный метод эффективен при устройстве покрытий с повышенной толщиной слоя.

Широкое применение при устройстве многополосных покрытий получила технология уплотнения катком по свежеложенной полосе с перекрытием смежной полосы покрытия на 0,15 м.

Учитывая вышеизложенное, стоит отметить, что из рассмотренных способов технологии устройства стыка сопряженных полос наиболее эффективным является уплотнение асфальтобетонной смеси с «горячей» стороны.

8. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

8.1. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КАТКОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВАЛЬЦОМ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Установлено, что работоспособность дорожных одежд зависит от качества уплотнения. На участках с недеформированными покрытиями коэффициент уплотнения составляет не менее 0,97...0,98, на участках с деформированными и разрушенными покрытиями его величина составляет менее 0,95...0,97, а на участках со значительными разрушенными покрытиями менее 0,9. Одновременно с повышением коэффициента уплотнения улучшаются и свойства материалов. Увеличение коэффициента уплотнения асфальтобетонного покрытия на 0,01 (в пределах 0,96...1,0) увеличивает его прочность на 4...8%, что равнозначно увеличению толщины покрытия на 5...10 мм.

При строительстве дорожных одежд применяется материал с разными физико-механическими свойствами. Анализ применяемых технологических схем для строительства автомобильных дорог показал, что в зависимости от используемого материала и его свойств используются разные машины для распределения и уплотнения дорожных одежд. Парк уплотняющих машин представляет группу машин, отличающихся не только техническими характеристиками, но и принципом воздействия рабочего органа машины на уплотняемый материал. Для уплотнения дорожных одежд рекомендуется применять катки статического и вибрационного действия, катки на пневматических шинах и катки комбинированного действия. Катки статического действия могут применяться на всех этапах строительства дорожных одежд и покрытий и в обязательном порядке на заключительной стадии уплотнения покрытий нежесткого типа. Эти машины, при правильном выборе их параметров, обеспечивают требуемое качество уплотнения, но характеризуются высокой металлоемкостью.

В дорожном строительстве широкое применение получили самоходные катки на пневматических шинах. Они эффективны при уплотнении материала дорожных одежд с низкими прочностными характеристиками. На начальной стадии уплотнения, за счет малой способности материала сопротивляться внешней нагрузке, пневматическая шина ведет себя как жесткий валец. С увеличением плотности материала

и повышением его способности сопротивляться нагрузке пневматическая шина начинает деформироваться, что приводит к увеличению площади контакта шины с материалом, более равномерному распределению нагрузки в зоне контакта и увеличению времени действия нагрузки. Применяемая система регулирования давления в пневматических шинах позволяет, за счет деформации шины, менять площадь контакта, а, следовательно, и величину контактных напряжений, что позволяет использовать их при уплотнении разных материалов. Однако ряд недостатков, заложенных в конструкцию машин, снижают эффективность их применения. Наличие зазоров между шинами способствуют поперечному перемещению материала на начальном этапе укатки асфальтобетонного покрытия. Поэтому для обеспечения ровности покрытия необходимо, на заключительной стадии уплотнения, применение катков с жесткими вальцами.

Анализ выпуска уплотняющих машин показал, что широкое применение в настоящее время получили вибрационные катки. При работе вальца его колебательные движения передаются частицам уплотняемого материала, что способствует уменьшению сил трения и сцепления между ними и повышает эффективность уплотнения такими катками. Установлено, что при равном уплотняющем эффекте масса вибрационного катка может быть уменьшена от 1,3 до 4 раз в зависимости от свойств материала [6, 15]. При уплотнении покрытий из горячих асфальтобетонных смесей вибрационные катки могут быть использованы как на начальной стадии уплотнения (без вибрации), так и на основной стадии уплотнения, что позволяет уменьшить количество применяемых машин.

Исследованиями установлено, что динамический эффект от воздействия вибрации зависит от частоты колебаний и величины относительной вынуждающей силы. Такие катки наиболее эффективны при уплотнении смесей с высоким содержанием щебня (до 80%), а также смесей типа А и Б. В зависимости от конкретных условий строительства и параметров машин вибрационные машины могут работать как в статическом, так и динамическом режимах. Одним из недостатков, характерным для вибрационных катков при работе в динамическом режиме, является снижение их ходовых качеств за счет уменьшения коэффициентов трения при управлении и сцепления при ведущем вибрационном вальце, что влияет на качество уплотнения дорожных покрытий. Анализ конструкций самоходных катков показал, что у существующих катков вибрационный валец может иметь разное расположение относительно направления движения.

8.2. РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ЖЕСТКИМ ВАЛЬЦОМ ДОРОЖНОГО КАТКА

Эффективность работы уплотняющих машин определяется величиной контактных напряжений под вальцом катка. Установлено, что эффективность уплотнения достигается при условии, когда контактные напряжения под вальцом катка близки к пределу прочности уплотняемого материала [38]. При превышении контактных напряжений под рабочим органом машины предела прочности уплотняемого материала, происходит разрушение его структуры, что проявляется в виде пластических деформаций и волнообразования на поверхности покрытия. При незначительной величине контактных напряжений достичь требуемых параметров уплотнения практически невозможно. Поэтому выбор катков необходимо производить с учетом их параметров, свойств уплотняемого материала и условий производств работ. При перемещении жесткого вальца катка по поверхности уплотняемого материала в зоне его контакта возникают напряжения, под действием которых происходит уплотнение материала.

Анализ методов определения контактных напряжений показал, что в отличие от имеющихся решений по взаимодействию контактируемых тел, при решении данной задачи свойства одного из контактируемых тел меняются в довольно широких пределах.

При строительстве дорожных одежд применяемый материал проявляет упруго-вязко-пластические свойства в зависимости от рассматриваемого этапа уплотнения. Существующие зависимости для определения сжимающих контактных напряжений получены без учета упругих деформаций и не отражают реальной картины взаимодействия жесткого вальца с уплотняемым материалом. Применяемые экспериментальные зависимости позволяют определять только сжимающие напряжения. При работе катка в зоне контакта вальца с поверхностью материала возникают также и касательные напряжения, которые влияют на процесс уплотнения за счет перемещения частиц материала в горизонтальной плоскости. Для ведомого вальца катка статического действия силовым параметром является масса вальца и часть массы рамы катка, приходящаяся на валец, а также толкающее усилие от рамы катка на валец. При взаимодействии ведущего вальца с материалом необходимо также учитывать величину крутящего момента, приложенного к вальцу. Расчетные схемы, моделирующие процесс взаимодействия вальцов катка с материалом, представлены на рис. 8.1.

Экспериментально установлено, что при уплотнении дорожных покрытий по всей его ширине расчет контактных напряжений по дуге контакта вальца с материалом можно вести как для плоской задачи.

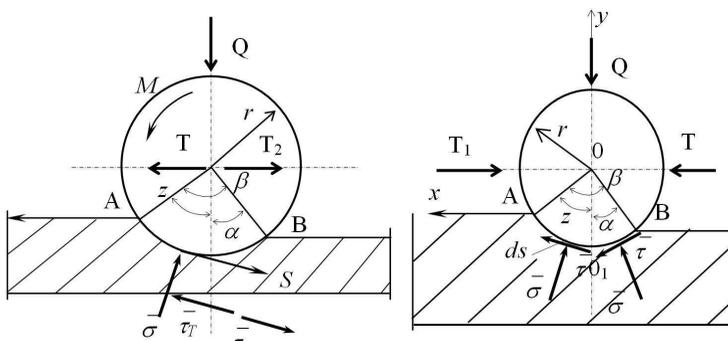


Рис. 8.1. Схема взаимодействия вальцов катка с уплотняемым материалом:

Q – масса вальца и передаваемая на него нагрузка от рамы катка;
 T – толкающее усилие, передаваемое от рамы на валец; β – угол контакта вальца катка с уплотняемым материалом; α – угол, характеризующий упругую деформацию материала; z – угол, характеризующий полную деформацию материала под вальцом; dS – единичная площадка поверхности вальца катка;
 $\bar{\sigma}$, $\bar{\tau}$ – нормальные и касательные напряжения в уплотняемом материале контакта вальца; r – радиус вальца; T_1 – сила сопротивления движению вальца катка со стороны уплотняемого материала; M – крутящий момент, кН·м

В общем виде напряженное состояние частицы в зоне контакта вальца с материалом будет определяться:

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_x + \tau_y + \tau_x + \sigma_s + \tau_s, \text{ МПа}, \quad (8.1)$$

где σ_y , σ_x , τ_y , τ_x , σ_s , τ_s – составляющие общего напряжения частицы от действия вертикальных и горизонтальных силовых факторов.

Исходя из условия равновесия напряженного состояния материала в зоне контакта вальца, с учетом начальных и граничных условий, взаимодействие вальцов с материалом можно представить системой уравнений:

– для ведомого вальца:

$$\sum x = 0;$$

$$-\int_0^z Br\sigma \sin(z - \phi) d\phi + \int_0^z Br\tau \cos(z - \phi) d\phi + \int_z^\beta Br\sigma \sin(\phi - z) d\phi + \int_z^\beta Br\tau \cos(\phi - z) d\phi + T = 0;$$

$$\sum y = 0 ;$$

$$\int_0^z Br\sigma \cos(z-\phi)d\phi + \int_0^z Br\tau \sin(z-\phi)d\phi + \int_z^\beta Br\sigma \cos(\phi-z)d\phi - \\ - \int_z^\beta Br\tau \sin(\phi-z)d\phi - Q = 0 ;$$

(8.2)

– для ведущего вальца:

$$\sum x = 0 ;$$

$$- \int_0^z \sigma \sin(z-\phi)rBd\phi + \int_0^z Br\tau_\tau \cos(z-\phi)d\phi - \int_0^z Br\tau_S \cos(z-\phi)d\phi + \\ + \int_z^\beta \sigma \sin(\phi-z)Brd\phi - \int_z^\beta Br\tau_\tau \cos(\phi-z)d\phi - \\ - \int_z^\beta Br\tau_S \cos(\phi-z)d\phi + T - S_x = 0 ;$$

$$\sum y = 0 ;$$

$$\int_0^z Br\sigma \cos(z-\phi)d\phi + \int_0^z Br \sin(z-\phi)d\phi - \int_0^z Br\tau_S \sin(z-\phi)d\phi + \\ + \int_z^\beta Br \cos(\phi-z)d\phi - \int_z^\beta Br\tau_\tau \sin(\phi-z)d\phi + \\ + \int_z^\beta Br\tau_S \sin(\phi-z)d\phi - Q - S_y = 0 ;$$

$$\sum M = 0 ;$$

$$- \int_0^z Br^2\tau_S d\phi = M .$$

(8.3)

Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{при } \phi = 0 &\rightarrow \sigma_x = \sigma_y = \tau_{y\tau} = \tau_{x\tau} = \tau_{xs} = \tau_{ys} = 0; \\ \phi = \beta &\rightarrow \sigma_x = \tau_{y\tau} = \sigma_y = \tau_{x\tau} = \tau_{xs} = \tau_{ys} = 0. \end{aligned} \quad (8.4)$$

Граничные условия можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \text{при } \phi = z &\rightarrow \frac{d\tau_y}{d\phi} = 0; \quad \frac{d\tau_{x\tau}}{d\phi} = 0; \quad \frac{d\tau_{xs}}{d\phi} = 0; \quad \sigma_x = \tau_{y\tau} = \tau_{ys} = 0; \\ \phi = z &\rightarrow \frac{d\sigma_y}{d\phi} = \frac{d\tau_x}{d\phi} = 0; \quad y_1 = 1; \quad y_2 = 2z; \quad y_3 = 3z^2; \quad y_4 = 4z^3; \\ \phi = z &\rightarrow \sigma_x = \tau_y = 0; \quad y_1 = z; \quad y_2 = z^2; \quad y_3 = z^3; \quad y_4 = z^4. \end{aligned} \quad (8.5)$$

В представленной системе уравнений приняты τ_τ и τ_s – касательные напряжения в зоне контакта вальца от действия сил T и S ; S_x и S_y – проекции силы S на оси x и y . Из уравнения моментов видно, что сила S возникает за счет приложенного к оси вальца катка момента M , является величиной постоянной по всей дуге контакта вальца катка с материалом и численное значение определяется из выражения:

$$S = \int_0^\beta \tau_s d\phi Br = M / r. \quad (8.6)$$

Из уравнений видно, что в случае $\phi < Z$ интегралы, входящие в системы уравнений, позволяют определить распределение напряжений вдоль дуги контакта вальца в зоне полной деформации уплотняемого материала. При $\phi > Z$ оставшаяся часть интегралов позволяет определить распределение напряжений в зоне упругой деформации. В конечном виде решение системы уравнений имеет вид:

– для ведомого вальца:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= (A_1\phi + A_2\phi^2 + A_3\phi^3 + A_4\phi^4) / \Delta; \\ \tau_y &= (D_1\phi + D_2\phi^2 + D_3\phi^3 + D_4\phi^4) / \Delta; \\ \sigma_x &= (B_1\phi + B_2\phi^2 + B_3\phi^3 + B_4\phi^4) / \Delta; \\ \tau_x &= (\Phi_1\phi + \Phi_2\phi^2 + \Phi_3\phi^3 + \Phi_4\phi^4) / \Delta; \end{aligned} \quad (8.7)$$

– для ведущего вальца:

$$\begin{aligned}
 \sigma_y &= (A_1\phi + A_2\phi^2 + A_3\phi^3 + A_4\phi^4) / \Delta; \\
 \tau_x &= (\Phi_1\phi + \Phi_2\phi^2 + \Phi_3\phi^3 + \Phi_4\phi^4) / \Delta; \\
 \sigma_x &= (B_1\phi + B_2\phi^2 + B_3\phi^3 + B_4\phi^4) / \Delta; \\
 s_x &= (z_1\phi + z_2\phi^2 + z_3\phi^3 + z_4\phi^4) / \Delta; \\
 \tau_y &= (D_1\phi + D_2\phi^2 + D_3\phi^3 + D_4\phi^4) / \Delta; \\
 s_y &= (O_1\phi + O_2\phi^2 + O_3\phi^3 + O_4\phi^4) / \Delta,
 \end{aligned} \tag{8.8}$$

где ϕ – угол, характеризующий рассматриваемую точку на дуге контакта вальца с материалом; $A_i, B_i, D_i, \Phi_i, Z_i, O_i$ – коэффициенты системы уравнений, зависящие от параметров машины и свойств материала. Численное значение коэффициентов определяется из выражений:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= R\beta^2[\beta y_2(C - \beta N) + y_3(\beta^2 M - C) + y_4(N - \beta M)]; \\
 B_1 &= R\beta^2\mu[\beta y_2(E - \beta W) + y_3(\beta^2 V - E) + y_4(W - \beta V)]; \\
 O_1 &= R\beta^2\mu_1[\beta y_2(\beta W - E) + y_3(E - \beta^2 V) + y_4(\beta V - W)]; \\
 D_1 &= F\beta^2[\beta y_2(\beta W - E) + y_3(E - \beta^2 V) + y_4(\beta V - W)]; \\
 \Phi_1 &= F\beta^2\mu[\beta y_2(C - \beta N) + y_3(\beta^2 M - C) + y_4(N - \beta M)]; \\
 S_1 &= F\beta^2\mu_1[\beta y_2(\beta N - C) + y_3(C - \beta^2 M) + y_4(\beta M - N)]; \\
 A_2 &= R\beta[\beta^2 y_1(\beta N - C) + y_3(C - \beta^3 K) + y_4(\beta^2 K - N)]; \\
 B_2 &= R\beta\mu[\beta^2 y_1(\beta W - E) + y_3(E - \beta^3 U) + y_4(\beta^2 U - W)]; \\
 O_2 &= R\beta\mu_1[\beta^2 y_1(E - \beta W) + y_3(\beta^3 U - E) + y_4(W - \beta^2 U)]; \\
 D_2 &= F\beta[\beta^2 y_1(E - \beta W) + y_3(\beta^3 U - E) + y_4(W - \beta^2 U)]; \\
 \Phi_2 &= F\beta\mu[\beta^2 y_1(\beta N - C) + y_3(C - \beta^3 K) + y_4(\beta^2 K - N)]; \\
 S_2 &= F\beta\mu_1[\beta^2 y_1(C - \beta N) + y_3(\beta^3 K - C) + y_4(N - \beta^2 K)]; \\
 A_3 &= R\beta[\beta y_1(C - \beta^2 M) + y_2(\beta^3 K - C) + y_4(M - \beta K)]; \\
 B_3 &= R\beta\mu[\beta y_1(E - \beta^2 V) + y_2(\beta^3 U - E) + y_4(V - \beta U)]; \\
 O_3 &= R\beta\mu_1[\beta y_1(\beta^2 V - E) + y_2(E - \beta^3 U) + y_4(\beta U - V)]; \\
 D_3 &= F\beta[\beta y_1(\beta V - E) + y_2(E - \beta^3 U) + y_4(\beta U - V)]; \\
 \Phi_3 &= F\beta\mu[\beta y_1(C - \beta M) + y_2(\beta^3 K - C) + y_4(M - \beta K)];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_3 &= F\beta\mu_1[\beta y_1(\beta^2 M - C) + y_2(C - \beta^3 K) + y_4(\beta K - M)]; \\
A_4 &= R\beta[\beta y_1(\beta M - N) + y_2(N - \beta^2 K) + y_3(\beta K - M)]; \\
B_4 &= R\beta\mu_1[\beta y_1(\beta V - W) + y_2(W - \beta^2 U) + y_3(\beta U - V)]; \\
O_4 &= R\beta\mu_1[\beta y_1(W - \beta V) + y_2(\beta^2 U - W) + y_3(V - \beta U)]; \\
D_4 &= F\beta[\beta y_1(W - \beta V) + y_2(\beta U - W) + y_3(V - \beta U)]; \\
\Phi_4 &= F\beta\mu_1[\beta y_1(\beta M - N) + y_2(N - \beta K) + y_3(\beta K - M)]; \\
S_4 &= F\beta\mu_1[\beta y_1(N - \beta M) + y_2(\beta K - N) + y_3(M - \beta K)],
\end{aligned} \tag{8.9}$$

где R и F – силы, действующие на валец, значение которых определяется из выражений $R = R_1 + R_2$; $F = F_1 - F_2$, где $F_1 = T$; $F_2 = S\cos(z - \varphi)$; $R_1 = Q$; $R_2 = S\sin(z - \varphi)$; K, U, M, V, N, W, C, E – коэффициенты, зависящие от свойств материала; Δ – определитель системы уравнений, значение которого определяется из выражения

$$\begin{aligned}
\Delta &= \beta[y_2(l_3 l_8 - l_4 l_7) + y_3(l_1 l_6 - l_2 l_8) + y_4(l_2 l_7 - l_3 l_6)] - \\
&- \beta^2[y_1(l_2 l_8 - l_4 l_6) + y_3(l_4 l_5 - l_1 l_8) + y_4(l_1 l_6 - l_2 l_5)] + \\
&+ \beta^3[y_1(l_2 l_8 - l_4 l_6) + y_2(l_4 l_5 - l_1 l_8) + y_4(l_1 l_6 - l_2 l_5)] + \\
&+ \beta^4[y_1(l_2 l_7 - l_3 l_6) + y_2(l_3 l_5 - l_1 l_7) + y_3(l_1 l_6 - l_2 l_5)],
\end{aligned} \tag{8.10}$$

где

$$\begin{aligned}
l_1 &= K + \mu U - \mu_1 U; \quad l_2 = M + \mu V - \mu_1 V; \quad l_3 = N + \mu W - \mu_1 W; \\
l_4 &= C + \mu E - \mu_1 E; \quad l_5 = U - \mu K + \mu_1 K; \quad l_6 = V - \mu M + \mu_1 M; \\
l_7 &= W - \mu N + \mu_1 N; \quad l_8 = E - \mu C + \mu_1 C;
\end{aligned}$$

μ и μ_1 – коэффициенты сопротивления движению и сцепления вальца с уплотняемым материалом.

Численные значения коэффициентов K, U, M, V, N, W, C, E определяется по формулам:

$$\begin{aligned}
K &= -\beta\cos(\beta - z) + \sin(\beta - z) + \sin z; \\
U &= \beta\sin(\beta - z) + \cos(\beta - z) - \cos z; \\
M &= -\beta^2\cos(\beta - z) + 2U; \quad V = \beta^2\sin(\beta - z) - 2K; \\
N &= -\beta^3\cos(\beta - z) + 3V; \quad W = \beta^3\sin(\beta - z) - 3M; \\
C &= -\beta^4\cos(\beta - z) + 4W; \quad E = \beta^4\sin(\beta - z) - 4N.
\end{aligned} \tag{8.11}$$

Анализ уравнения показывает, что при отсутствии крутящего момента ($\mu_1 = 0$) распределение напряжений в зоне контакта вальца имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_{\kappa} = & (A_1 + B_1 + D_1 + \Phi_1)\varphi / \Delta + (A_2 + B_2 + D_2 + \Phi_2)\varphi^2 / \Delta + \\ & + (A_3 + B_3 + D_3 + \Phi_3)\varphi^3 / \Delta + (A_4 + B_4 + D_4 + \Phi_4)\varphi^4 / \Delta. \end{aligned} \quad (8.12)$$

При этом условии уравнение распределения контактных напряжений по дуге контакта ведущего вальца соответствует уравнению для ведомого вальца. При уплотнении материала с малым углом внутреннего трения, когда условно можно считать $\mu = 0$, уравнение имеет вид

$$\sigma_{\kappa} = (A_1 + D_1)\varphi / \Delta + (A_2 + D_2)\varphi^2 / \Delta + (A_3 + D_3)\varphi^3 / \Delta + (A_4 + D_4)\varphi^4 / \Delta. \quad (8.13)$$

При отсутствии тягового усилия, то есть при $F = 0$ и $\mu_1 = \mu = 0$, напряжения под вальцом будут определяться из выражения

$$\sigma_{\kappa} = A_1\varphi / \Delta + A_2\varphi^2 / \Delta + A_3\varphi^3 / \Delta + A_4\varphi^3 / \Delta. \quad (8.14)$$

При условии $\varphi = 0$ и $\varphi = \beta$ составляющие общего напряжения равны нулю. Полученное решение системы уравнений соответствует частным случаям контакта ведущего вальца катка с уплотняемым материалом на всех режимах его работы. Из полученных уравнений видно, что контактные напряжения под вальцом катка зависят от силовых характеристик уплотняющих машин (R, F) и параметров контактной поверхности, зависящих от свойств уплотняемого материала.

Следовательно, полученные зависимости позволяют определять величину контактных напряжений (сжимающих и сдвигающих) в любой точке контакта вальца катка с учетом свойств материалов и его параметров. На рисунке 8.2 представлена блок-схема алгоритма расчета напряжений под вальцом катка [23].

8.3. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ВАЛЬЦОМ КАТКА

Анализ полученных зависимостей распределения напряжений в зоне контакта под вальцами катка позволяет сделать вывод, что величина нормальных напряжений зависит от передаваемой вальцами вертикальной нагрузки и площади контакта вальца с материалом. Величина сдвигающих напряжений зависит от приложенных к вальцу горизонтальных сил и направления их действия с учетом свойств уплотняемого материала.

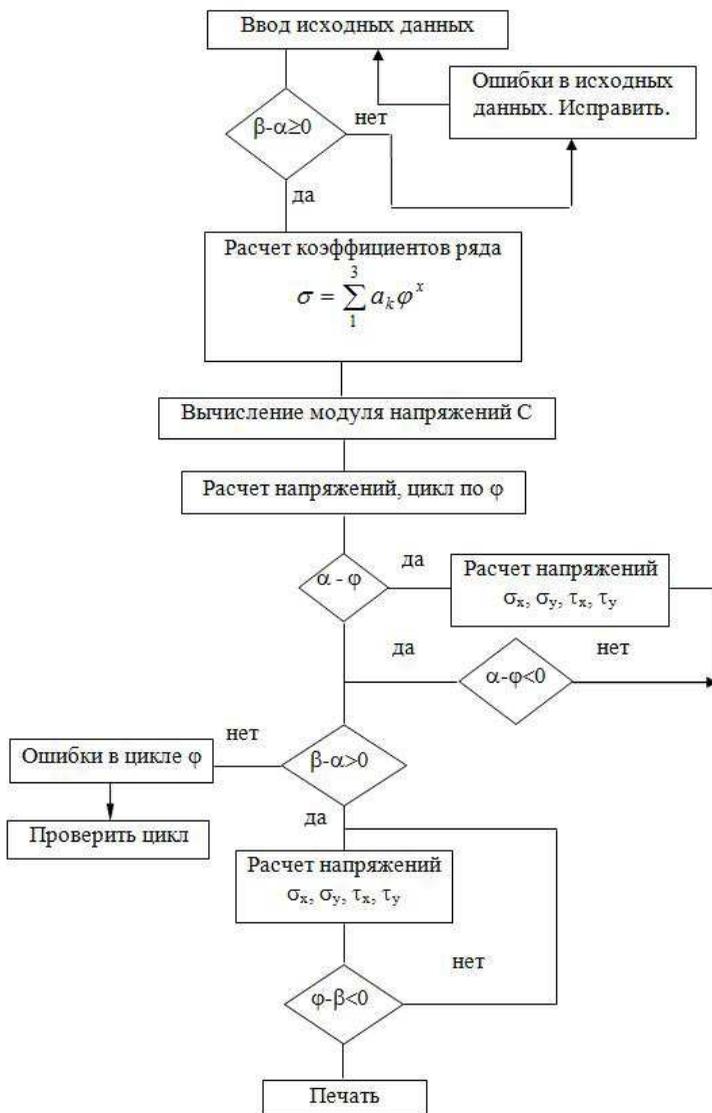


Рис. 8.2. Блок-схема алгоритма расчета напряжений под валцом катка

В таблицах 8.1, 8.2 представлены результаты расчетов контактных напряжений под валцом катка при работе катка в статическом режиме и разных модулях деформации уплотняемого материала.

8.1. Распределение контактных напряжений под ведомым вальцом катка ДУ-47Б (асфальтобетон мелкозернистый, модуль деформации 20 МПа)

Угол контак-та	σ_{Qy}	σ_{Qx}	τ_{Fx}	τ_{Fy}	τ_{xx}	τ_{yy}	$\sigma_{Qy} + \tau_{Fx} + \tau_{xx}$	$\sigma_{Qx} + \tau_{Fy} + \tau_{yy}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2,19	1,67	-0,83	-1,09	0,5	-0,66	1,85	-3,42
2	6,81	-1,79	-0,89	-3,42	0,54	-2,05	6,48	-7,26
3	10,3	-0,84	-0,42	-5,15	0,25	-3,09	10,13	-9,08
4	10,65	0,58	0,29	-5,32	-0,17	3,19	10,77	-7,94
5	7,71	1,77	0,88	-3,86	-0,53	-2,31	8,07	-4,40
6	3,06	1,89	0,94	-1,53	-0,57	-0,92	3,44	-0,56
7	0	0	0	0	0	0	0	0

8.2. Результаты расчета контактных напряжений под ведущим вальцом при уплотнении мелкозернистой асфальтобетонной смеси катком ДУ-47Б и модуле деформации 20 МПа

Угол контакта	σ_{0y}	σ_{0x}	τ_{Fy}	τ_{Fx}	$\sigma_{Qy} + \tau_{Fx}$	$\sigma_{Qx} + \tau_{Fy}$
0	0	0	0	0	0	0
1	0,45	-0,47	0,24	0,22	0,68	0,25
2	2,29	-0,69	0,35	1,14	2,64	0,45
3	4,49	-0,68	0,34	2,24	4,83	1,56
4	6,28	-0,47	0,23	3,14	6,51	2,67
5	7,17	-0,12	0,06	3,58	7,23	3,46
6	6,94	0,38	-0,14	3,47	6,80	3,75
7	5,65	0,64	-0,32	2,82	5,33	3,46
8	3,61	0,82	-0,41	1,81	3,21	2,62
9	1,44	0,66	-0,33	0,72	1,11	1,38
10	0	0	0	0	0	0

Из представленных данных видно, что суммарная величина сжимающих напряжений зависит, в основном, от вертикальной нагрузки, передаваемой на валец. Составляющие сжимающих напряжений от горизонтальных усилий представляют незначительную величину и составляют около 5% от общей суммы сжимающих напряжений.

На основании полученных данных на рис. 8.3 представлено распределение составляющих сжимающих и сдвигающих контактных напряжений под ведущим вальцом катка.

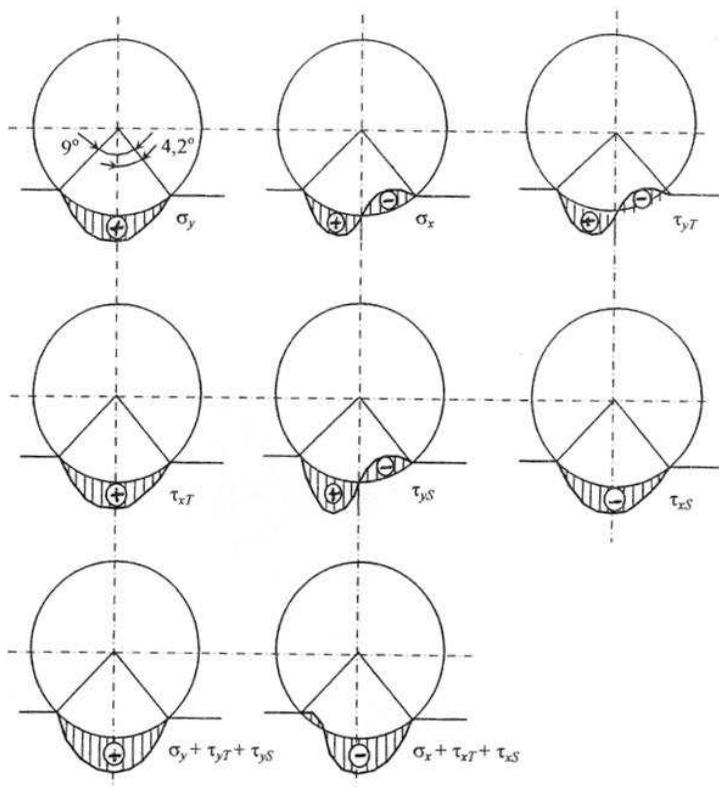


Рис. 8.3. Распределение напряжений под ведомым вальцом катка:

- a* – σ_{Qy} – эпюра вертикальных составляющих нормальных напряжений;
- б* – σ_{Qx} – эпюра горизонтальных составляющих нормальных напряжений;
- в* – τ_{Fy} – эпюра вертикальных составляющих касательных напряжений;
- г* – τ_{Fx} – эпюра горизонтальных составляющих касательных напряжений;
- д* – совмещенная эпюра вертикальных напряжений;
- е* – совмещенная эпюра горизонтальных напряжений

Из представленных результатов видно, что эпюра вертикальной составляющей нормальных напряжений не симметрична относительно оси движения вальца, а ее максимальная величина совпадает с осью движения вальца. Совмещение эпюр составляющих напряжения под ведущим вальцом катка показывает, что имеет место смещение максимальных значений от оси вальца катка. На величину смещения оказывает влияние вертикальная составляющая касательных напряжений. Следует отметить, что величина максимального значения нормальных напряжений под вальцом катка в основном зависит от массы вальца и передаваемой на него нагрузки от рамы машины, а также характеристик уплотняемого материала.

Наибольшее смещение равнодействующей нормальных напряжений наблюдается при первых проходах вальца катка. По мере повышения деформативной способности материала смещение эпюры от оси вальца катка уменьшается.

Для повышения ровности покрытия при строительстве дорог существующими рекомендациями предусматриваются первые проходы катка после укладки смеси производить ведущим вальцом [43, 46, 49]. Полученное уравнение распределения напряжений в зоне контакта вальца катка при уплотнении дорожных одежд позволяет уточнить физику процесса волнообразования на поверхности покрытия в зависимости от параметров уплотняющих машин и свойств материала.

В зависимости от приложения сил к вальцу (ведомый или ведущий) наблюдается различие в совмещенных эпюрах горизонтальных напряжений. Совмещенная эпюра горизонтальных напряжений под ведомым вальцом катка смещена в сторону движения катка и при превышении горизонтальными напряжениями предела прочности материала на сдвиг происходит смещение материала перед вальцом катка, что приводит к образованию неровностей на поверхности уплотняемого материала при движении вальца. В начальный момент контакта ведомого вальца катка результирующая напряжений направлена к поверхности уплотняемого слоя, что способствует перемещению материала перед вальцом и образованию валика на поверхности дорожной одежды. С увеличением угла контакта вальца с уплотняемым материалом результирующая напряжений направлена под меньшим углом к поверхности слоя в сторону движения катка, что способствует перемещению материала перед вальцом. При достижении горизонтальными напряжениями величины, превышающей предел прочности материала на сдвиг, наблюдается перемещение материала перед вальцом, т.е. происходит процесс волнообразования. При взаимодействии ведущего вальца с материалом суммарные горизонтальные напряжения в зоне контакта имеют направление против движения вальца, что спо-

способствует перемещению частиц уплотняемого материала в зону действия сжимающих сил.

Следует отметить, что и при работе ведущего вальца, но не соответствии силовых параметров катка деформативной способности материала, возникают горизонтальные напряжения, направление действия которых соответствует направлению перемещения вальца катка и тем самым способствуют смещению материала перед вальцом, что подтверждается экспериментальными исследованиями. Величина угла, характеризующего смещение материала перед ведущим вальцом катка, зависит от соответствия параметров уплотняющей машины свойствам уплотняемого материала и увеличивается с ростом полной деформации материала.

В таблице 8.3 приведены данные, соответствующие взаимодействию ведущего вальца катка при незначительной деформативной способности уплотняемого материала.

**8.3. Распределение контактных напряжений
под ведущим вальцом катка ДУ-47Б
(мелкозернистый асфальтобетон, толщина слоя 0,08 м)**

Угол контакта	σ_y	σ_x	τ_y	τ_x	σ_s	τ_s	$\sigma_y + \tau_x + \sigma_s$	$\sigma_x + \tau_y + \tau_s$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-1,55	0,18	0,09	0,78	-0,05	0,47	-1,52	1,42
2	-0,94	0,09	0,04	0,47	-0,03	0,28	-0,92	0,84
3	1,03	-0,09	-0,05	-0,51	0,03	-0,31	1,01	-0,92
4	3,61	-0,24	-0,12	-1,8	0,07	-1,08	3,56	-3,12
5	6,14	-0,27	-0,14	-3,7	0,08	-1,84	6,08	-5,18
6	8,02	-1,18	-0,09	-4,01	0,06	-2,41	7,99	-6,6
7	8,75	0,0	0,0	-4,38	0,0	-2,63	8,75	-7,0
8	7,89	0,19	0,1	-3,94	-0,06	-2,37	7,93	-6,2
9	5,07	0,26	0,13	-2,53	-0,08	-1,52	5,12	-3,8
10	0	0	0	0	0	0	0	0

При взаимодействии ведущего вальца катка результирующая контактных напряжений направлена против движения катка и способствует перемещению частиц материала в зону действия вальца и прижимает частицу материала к слою материала, имеющую более высокий модуль деформации. Распределение контактных напряжений под ведомым и ведущим вальцами катка представлено на рис. 8.4.

Анализ результатов расчета контактных напряжений под ведущим вальцом катка позволяет сделать вывод что, при несоответствии силовых параметров катка деформативной способности материала, в начале контакта вальца возникают напряжения, направленные в сторону движения вальца. Это способствует перемещению материала из зоны контакта вальца в сторону движения, что приводит к образованию неровностей на уплотняемой поверхности. Характер распределения контактных напряжений под вальцами катков представлен на рис. 8.5.

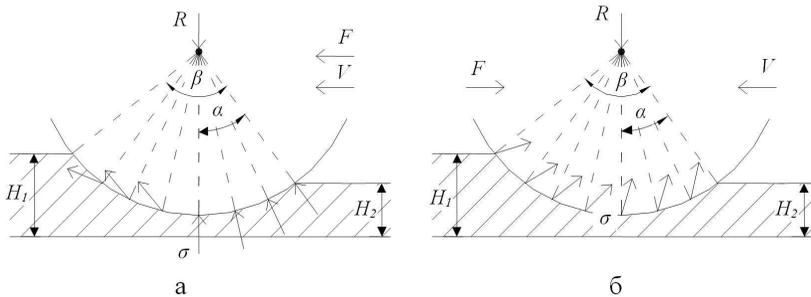


Рис. 8.4. Распределение касательных напряжений под вальцами катка при соотношении $\alpha / \beta = 0,48$:
a – ведомый; *б* – ведущий

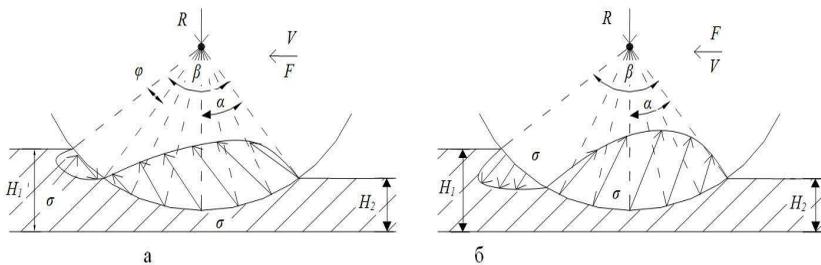


Рис. 8.5. Распределение напряжений под вальцами катков при соотношении $\alpha / \beta = 0,2...0,4$:
a – ведомый; *б* – ведущий

Представленные результаты расчетов показывают, что несоответствие параметров уплотняющих машин свойствам материала приводит к образованию неровностей на поверхности покрытия даже при работе катков с ведущими вальцами. Из опыта строительства дорожных одежд известно, что для обеспечения требуемых показателей качества уплотнения каток должен выполнить заданное количество проходов по одному следу при условии соответствия его параметров свойствам уплотняемого материала.

На рисунке 8.6 представлены зависимости контактных напряжений под вальцом катка от числа его проходов при уплотнении разных материалов. Из представленных данных видно, что с увеличением числа проходов, за счет повышения деформативной способности материала и уменьшения контактной поверхности, напряжения под вальцом катка увеличиваются. С увеличением числа проходов и достижения постоянной площади контакта, величина контактных напряжений стабилизируется.

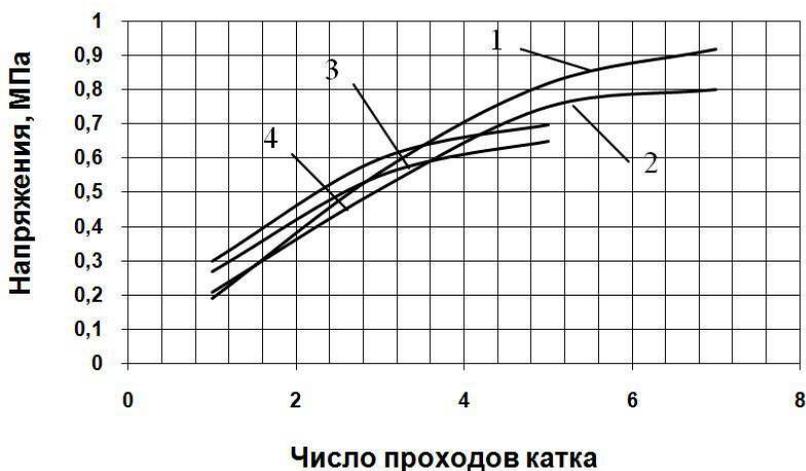


Рис. 8.6. Изменение контактных напряжений в зависимости от числа проходов катка:

- 1 – экспериментальные значения по данным А. К. Бируля (грунт – тяжелый чернозем, линейное давление вальца 58 кг/см, радиус вальца 0,8 м);
- 2 – расчетные напряжения по предлагаемой зависимости;
- 3 – по данным эксперимента (мелкозернистый асфальтобетон, линейное давление вальца 9,6 кг/см, радиус вальца 0,365 м);
- 4 – расчетные значения



Рис. 8.7. Зависимость контактных напряжений под ведущим вальцом катка от силового параметра q/r

(q – линейное давление, кН/м; r – радиус вальца, м):
 1 – напряжения сжатия; 2 – касательные напряжения

Полученные результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными и доказывают, что для достижения требуемых показателей уплотнения необходимо применять катки с разными силовыми факторами. Влияние силового фактора на величину контактных напряжений под вальцом катка представлено на рис. 8.7.

Из рисунка видно, что между силовым воздействием вальца на уплотняемый материал и развиваемыми контактными напряжениями существует линейная зависимость. Это еще раз доказывает, что выбор параметров катков необходимо производить с учетом прочностных свойств уплотняемого материала. Анализ получаемых результатов расчета по предлагаемым зависимостям показывает хорошую сходимость с результатами производственных и лабораторных исследований.

8.4. ВЫБОР ЗВЕНА УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ УПЛОТНЕНИЯ

Анализ применяемых технологий для устройства покрытий показал, что в звено уплотняющих машин назначают катки, отличающиеся как по массе, так и принципу воздействия на уплотняемый материал. С увеличением плотности материала необходимо повышать нагрузку на валец, что является основанием для увеличения массы катка для последующего этапа уплотнения покрытия.

Обеспечение прочностных параметров покрытия достигается в определенных температурных интервалах смеси, которыми определяется продолжительность уплотнения. Учитывая, что продолжитель-

ность работы катка определенного типа в установленных температурных интервалах незначительна, стали уменьшать количество полос укатки за счет увеличения ширины вальца. Ширина вальца при одной и той же массе катка бывает разной, поэтому в качестве критерия иногда принимают линейное давление вальца.

Площадь контакта вальца при одной и той же массе катка и ширине вальца зависит от диаметра. С увеличением диаметра поверхность контакта вальца возрастает, что уменьшает силовое воздействие на уплотняемый материал, а, следовательно, на достигаемую плотность асфальтобетона. По величине контактных напряжений, в первом приближении, сравнивают параметры катков. Такой сравнительный анализ параметров катков можно применять при одинаковом методе уплотнения. При назначении катков с разными методами уплотнения сравнение параметров необходимо проводить по необратимой деформации материала, величина которой характеризует не только силовое воздействие вальца, но и время действия нагрузки.

Вибрационный каток по уплотняющему эффекту заменяет более тяжелый каток статического действия. Известно, что характер колебаний вальца не влияет на качество уплотнения. С увеличением вынуждающей силы ходовые качества катка снижаются. Поэтому величина относительной вынуждающей силы в самоходных вибрационных катках ограничена.

Эффективность работы катка зависит от скорости передвижения. Увеличение рабочей скорости приводит к снижению достигаемой плотности покрытия и требует увеличения проходов по одному следу. Время действия нагрузки на частицу материала за один проход катка в статическом режиме при разных скоростях укатки составляет 0,2... 0,4 с. Время действия нагрузки при работе вибрационного катка зависит также от относительной вынуждающей силы и частоты колебаний. Объективным показателем, позволяющим сравнивать параметры катков между собой при укатке, является величина необратимой деформации, которая достигается при одинаковом напряженном состоянии материала.

Установлено, что время контакта вальца вибрационного катка с материалом зависит от параметров вибрации и определяется в зависимости от относительной вынуждающей силы из выражения

$$t_{\text{к}}^{\text{в}} = t_{\text{к}} e^{-0,084(P/Q)}, \quad (8.15)$$

где $t_{\text{к}}^{\text{в}}$ – время контакта вальца катка вибрационного действия, с; $t_{\text{к}}$ – время контакта вальца катка при статическом режиме уплотнения, с; P/Q – величина относительной вынуждающей силы.

Свойства горячей асфальтобетонной смеси зависят от температуры. С понижением температуры увеличиваются прочностные характеристики асфальтобетона. Увеличение же вязкости битума способствует усилению связей между частицами материала и образованию монолитного слоя, обладающего большей распределяющей способностью. Это приводит к снижению эффективности работы всех уплотняющих машин.

На рисунке 8.8 представлены зависимости изменения остаточной деформации смеси от ее температуры при равных контактных давлениях.

Из представленных зависимостей видно, что с понижением температуры смеси эффективность уплотнения снижается, независимо от способа уплотнения.

Величина относительной деформации материала от параметров вибрации катка и температуры смеси определяется из выражения

$$\varepsilon_{\text{общ}} = 0,67e^{0,0007t + 0,0026\omega - 0,0756(P/Q)}, \quad (8.16)$$

где t – температура смеси, °C; ω – частота колебаний вальца, Гц; P/Q – относительная вынуждающая сила.

При одинаковых контактных напряжениях под вальцами катков статического и вибрационного действия, соотношение между параметрами катков имеет вид

$$\sqrt{q_1 E_1 / R_1} = \varepsilon_{\text{отн}} K_1 \sqrt{q_2 E_2 / R_2}, \text{ МПа}, \quad (8.17)$$

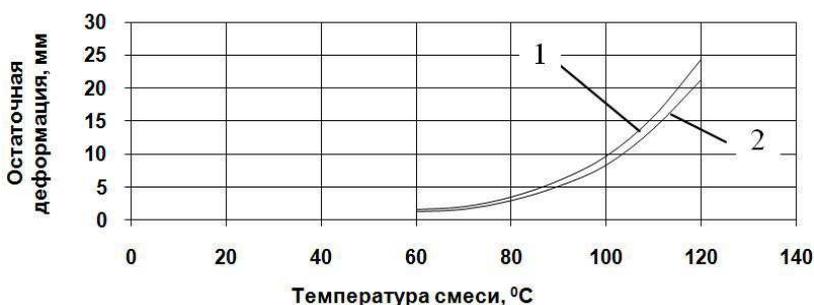


Рис. 8.8. Влияние температуры смеси на остаточную деформацию материала:
 1 – каток статического действия; 2 – каток вибрационного действия
 (при относительной вынуждающей силе равной 2 и частоте колебаний вальца 50 Гц)

где q_1, q_2 – линейные давления, Кн/м; R_1, R_2 – радиусы вальцов статического и вибрационного катков соответственно, м; E_1, E_2 – модули деформации уплотняемых материалов, МПа; K_1 – коэффициент, зависящий от относительной вынуждающей силы, определяемый из выражения

$$K_1 = \varepsilon_{\text{отн}} [1,67 + 1,31 \ln(P / Q)], \quad (8.18)$$

где $\varepsilon_{\text{отн}}$ – относительная деформация материала.

При работе на захватках с одинаковым модулем деформации уплотняемого материала и равных диаметрах вальцов, соотношение имеет вид

$$q_1 = K_2 q_2, \quad (8.19)$$

где K_2 – безразмерная величина, зависящая от параметров вибрации, определяется из выражения:

$$K_2 = \varepsilon_{\text{отн}}^2 [1,67 + 1,31 \ln(P / Q)]^2. \quad (8.20)$$

Для определения соотношений по массе катков вибрационного и статического действия, при равном модуле деформации, зависимость имеет вид

$$Q_1 = Q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 B_1 R_1 / B_2 R_2, \quad (8.21)$$

где B_1, B_2, Q_1, Q_2 – ширина вальцов и масса катков.

При одинаковой ширине уплотняемой полосы и разных линейных давлениях зависимость имеет вид

$$q_1 = q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 R_1 / R_2. \quad (8.22)$$

В качестве силового фактора, влияющего на величину напряжений под вальцом катка, принимается отношение линейного давления вальца к его радиусу. В этом случае сравнение параметров катков можно осуществлять по формуле

$$q_1 / R_1 = q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 / R_2. \quad (8.23)$$

Для существующих параметров катков статического действия отношение линейного давления к радиусу вальца находится в пределах от 0,22 до 1,7, у вибрационных катков это отношение принимается в пределах от 0,29 до 0,65.

На рисунке 8.9 представлены зависимости коэффициента эффективности вибрационного катка от относительной вынуждающей силы при разных критериях сравнения параметров катков.

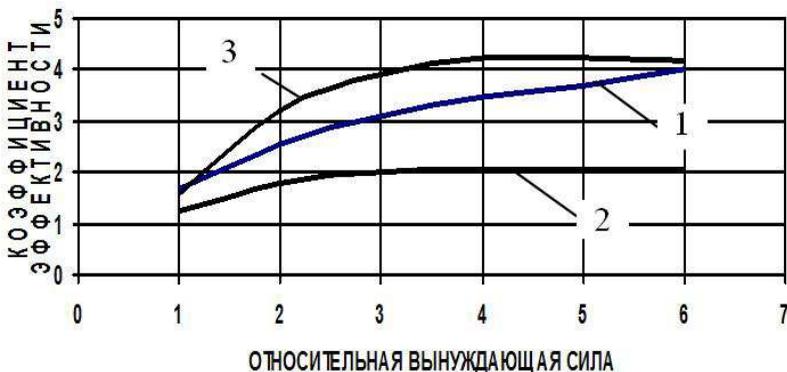


Рис. 8.9. Зависимость коэффициента эффективности вибрационного катка от относительной вынуждающей силы:

1 – по контактным напряжениям; 2 – с учетом деформаций при равных радиусах и ширине валцов – ($K_1 \epsilon_{отн}$); 3 – по уплотняющей способности катков при условии равной ширины укатываемой полосы ($K_1^2 \epsilon_{отн}^2$)

Из представленных зависимостей видно, что эффективность вибрационных катков по отношению к каткам статического действия при уплотнении материала с одинаковой деформативной способностью зависит от величины относительной вынуждающей силы. Интенсивный рост напряжений под вибрационным валцом наблюдается при увеличении относительной силы до трех, затем темп роста уменьшается. При одинаковых статических параметрах катков (радиус и ширина вальца) и деформативной способности материала коэффициент эффективности интенсивно увеличивается до относительной силы, равной трем, затем практически стабилизируется на величине коэффициента, равного двум. При применении катков с разными силовыми параметрами коэффициент эффективности вибрационного катка увеличивается до относительной силы, равной четырем, а затем происходит снижение эффективности, что объясняется уменьшением времени воздействия вальца на уплотняемый материал.

Таким образом, зная относительную вынуждающую силу и параметры вибрационного вальца катка, можно определить эквивалентный каток статического действия.

Установлено, что эквивалент вибрационного катка зависит от относительной возмущающей силы и при постоянной частоте колебаний находится в интервале от 1,6 до 4.

9. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КАЧЕСТВО РЕМОНТА ВЫБОИН ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Технологические свойства дорожно-строительных материалов с применением битумных материалов зависят от температуры при укладке и уплотнении. Температурные режимы зависят от теплофизических свойств асфальтобетонных смесей, которые влияют на тепловые процессы, происходящие в асфальтобетоне как при производстве работ по устройству дорожных покрытий, так и при выполнении ремонтных работ.

В отличие от технологии устройства дорожных покрытий нежесткого типа производство ремонтных работ по устранению выбоин на асфальтобетонных покрытиях связано с использованием небольших объемов горячей смеси. Качество выполнения таких работ, особенно при пониженных температурах окружающего воздуха, зависит от характера распределения температуры в уложенном объеме горячего материала и влияет как на достижение эксплуатационных параметров на ремонтном участке, так и на срок службы дорожного покрытия в целом. Установлено, что процесс охлаждения слоя горячей смеси относится к нестационарным тепловым процессам и расчет температурных режимов укладки и уплотнения дорожных покрытий необходимо производить по средней температуре слоя смеси, за которую принята температура смеси на глубине одной третьей толщины укладываемого слоя от поверхности покрытия.

9.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Устранение дефектов дорожных покрытий в виде выбоин предусматривает укладку и уплотнение небольших объемов горячей асфальтобетонной смеси, где тепловые потоки от уложенного объема горячей смеси перемещаются не только в окружающую среду и основание выбоины, но и в направлениях боковых стенок выбоины. Продолжительность охлаждения уложенного слоя горячей асфальтобетонной смеси определяется темпом охлаждения и зависит от объема уложенной горячей смеси, геометрических размеров выбоины, теплофизических свойств смеси и погодных условий производства ремонтных работ.

Анализ процессов охлаждения асфальтобетонной смеси при устройстве покрытия и при выполнении ремонтных работ показал, что существуют различия в процессах охлаждения горячей смеси, при этом характер охлаждения по толщине уложенного слоя подчиняется общей закономерности. После укладки и распределения горячей смеси в выбоине часть тепла отдается в окружающую среду, зависящую от скорости воздушного потока, что приводит к интенсивному охлаждению смеси на поверхности слоя. За счет разности температуры горячей смеси и нижнего слоя покрытия часть тепла передается основанию выбоины, причем интенсивность охлаждения уложенного слоя смеси зависит от коэффициента теплопередачи на границе слоев горячей смеси и основания выбоины. Из-за разницы температуры поверхности покрытия и горячей смеси в выбоине тепло передается через боковые поверхности выбоины дорожному покрытию, что способствует понижению температуры горячей смеси в зоне стыка выбоина – покрытие. Потери тепла в контактных зонах выбоины и дорожного покрытия восполняются за счет передачи тепла из средней части слоя горячей смеси, что способствует общему снижению температуры всего объема уложенной горячей смеси.

Моделирование процесса охлаждения горячей смеси осуществлялось с помощью специальной программы, разработанной для решения трехмерной задачи теплопроводности [25]. Данная программа позволяет моделировать тепловые процессы при ремонте выбоин дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей и определять температуру смеси в любой точке уложенного объема материала, интерфейс программы приведен на рис. 9.1.

Характер распределения температуры горячей смеси в выбоине дорожного покрытия представлен на рис. 9.2. Установлено, что время остывания слоя асфальтобетонной смеси зависит от толщины слоя, температуры смеси при укладке, температуры воздуха и основания, теплофизических свойств смесей и теплообмена на поверхности слоя, зависящего от скорости ветра.

Из представленных данных видно, что при укладке горячей смеси происходит ее охлаждение при одновременном нагреве нижележащего слоя покрытия. При укладке горячей смеси в выбоину за счет небольшого объема горячей смеси процесс охлаждения происходит более интенсивно, что способствует уменьшению продолжительности ремонтных работ по отношению к устройству дорожного покрытия с учетом температурных режимов асфальтобетонной смеси.

Для сравнения на рис. 9.3 представлен характер охлаждения горячей смеси при равной толщине укладываемого слоя смеси, температуре воздуха и горячей смеси.

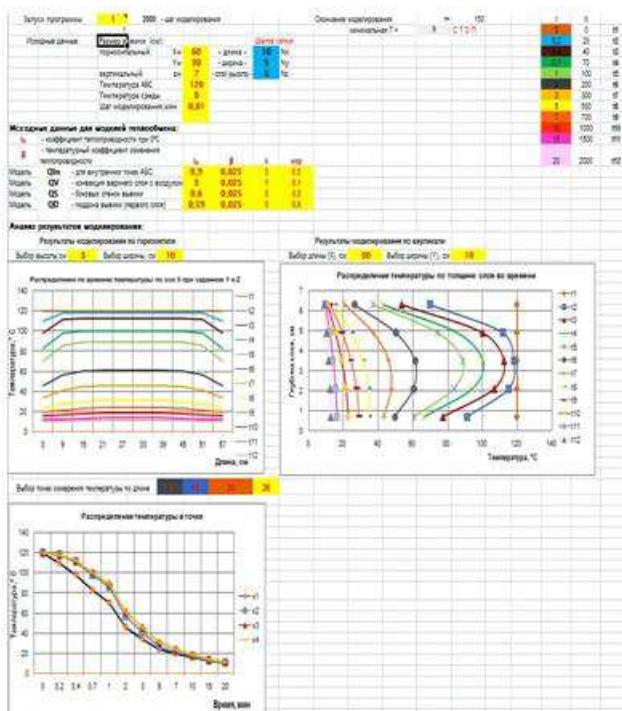


Рис. 9.1. Интерфейс программы для расчета температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси при производстве ремонтных работ дорожного покрытия

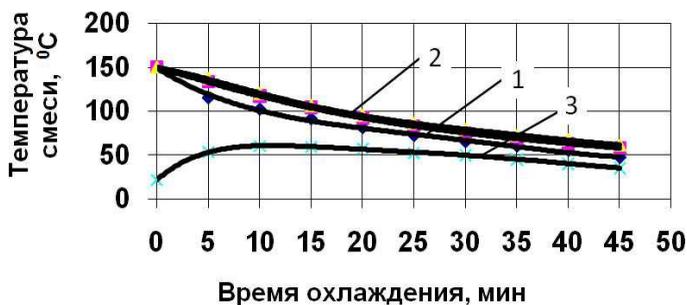


Рис. 9.2. Характер охлаждения асфальтобетонной смеси в слое покрытия при толщине слоя 0,05 м и температуре воздуха 0 °С:
 1 – на поверхности слоя; 2 – на глубине 1,5 см от поверхности;
 3 – температура основания

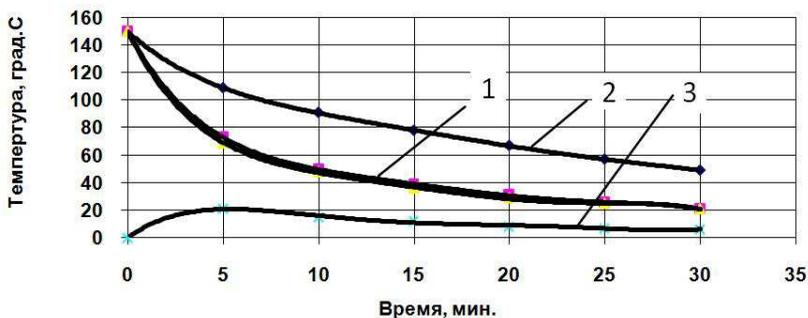


Рис. 9.3. Характер охлаждения асфальтобетонной смеси в выбоине дорожного покрытия:

1 – на поверхности слоя; *2* – на глубине 1,5 см от поверхности; *3* – температура основания

Анализ характера охлаждения горячей смеси при устройстве покрытия и при ремонте выбоины по толщине уложенного слоя показал, что они аналогичны между собою. В тоже время темп охлаждения горячей смеси в выбоине покрытия значительно выше, что влияет на время выполнения работ по устранению дефекта покрытия.

9.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕМОНТНЫХ РАБОТ

Согласно [40] для устройства верхнего слоя покрытия используют высокоплотные и плотные асфальтобетонные смеси марки I, характеризующиеся высокими прочностными показателями и большой устойчивостью при эксплуатации дорог к воздействию погодно-климатических факторов. При устройстве покрытия в два слоя с разными типами смесей применяется раздельная укладка каждого слоя и в этом случае свойства материала регламентированы нормативными документами и зависят от категории дороги (табл. 9.1).

В нижние слои покрытия укладывают крупнозернистые смеси, в верхние – мелкозернистые или песчаные смеси.

Для обеспечения качественного ремонта дорожных покрытий нежесткого типа необходимо, чтобы применяемый материал для устранения дефектов покрытия по своей структуре и свойствам соответствовал основному материалу, который применялся при строительстве дорожного покрытия. В зависимости от дорожно-климатической зоны расположения дорожного покрытия, категории дороги и нормативной нагрузки от транспортных средств рекомендуются горячие асфальтобетонные смеси типа А, Б, В, Г.

9.1. Материал слоя покрытия при раздельной укладке покрытия

Категория дороги	Материал слоя покрытия	
	Верхнего	Нижнего
I, II	Горячие смеси для плотного асфальтобетона типов А, Б, В и Г, марки I	Горячие смеси для пористого асфальтобетона марки I
III	Горячие смеси для плотного асфальтобетона типов А, Б, В, Г и Д, марки II. Песчаные смеси марки I	Горячие смеси для пористого асфальтобетона марки II. Горячие смеси для высокопористого асфальтобетона марки I
IV	Горячие смеси для плотного асфальтобетона типов Б, В, Г и Д марки III	Горячие смеси для пористых асфальтобетона марки II. Каменные материалы, обработанные органическим вяжущим. Горячие смеси для высокопористого асфальтобетона марки I
IV и первая стадия двухстадийного строительства дорог III категории	Каменные материалы, обработанные органическими вяжущими методами смешения в установке, пропитки, смешения на дороге, поверхностной обработки (слоя износа)	–

Примечания:

1. Асфальтобетонные смеси должны отвечать требованиям ГОСТ 9128.

2. Для однослойных покрытий применяются материалы, указанные для верхнего слоя покрытия.

3. В районах I дорожно-климатической зоны не следует предусматривать устройство покрытий из холодных асфальтобетонных смесей.

В районах I и V дорожно-климатических зон не следует предусматривать устройство покрытий из дегтебетонных смесей.

Установлено, что для I дорожно-климатической зоны необходимо применять плотные и высокоплотные горячие асфальтобетонные смеси типов А, Б, В и Г. В качестве вяжущего материала рекомендуется применять битум марок БНД 90/130, БНД 130/200 и БНД 200/300.

Для II и III дорожно-климатических зон рекомендуются плотные и высокоплотные асфальтобетоны типов А, Б, В, Г и Д, приготовленные на битумах марок БНД 60/90, БНД 90/130 и БНД 130/200.

Для IV и V дорожно-климатических зон рекомендуются высокоплотные асфальтобетоны типов А, Б, В, Г и Д, приготовленные на битумах марок БНД 40/60, БНД 60/90.

9.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ РЕМОНТЕ ВЫБОИН НА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Производство работ по ремонту выбоин на дорожных покрытиях с применением горячих асфальтобетонных смесей должно производиться при температуре окружающего воздуха не ниже +5 °С, при этом поверхность выбоины должна быть сухой, за исключением применения в качестве вяжущего материала битумных эмульсий или других материалов на их основе. Однако для обеспечения безопасности движения транспортных средств выполнять срочный аварийный ремонт покрытия приходится независимо от погодных условий в течение всего года.

Известно, что нарушение технологии при ямочном ремонте снижает срок службы отремонтированной поверхности. Основным фактором, влияющим на качество ремонта, является нарушение температурного режима при укладке и уплотнении горячей асфальтобетонной смеси.

Для установления закономерностей влияния разных факторов на распределение температуры горячей смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия проведены исследования в лабораторных и производственных условиях, в процессе которых определялся характер распределения температуры в зависимости от формы выемки и температуры горячей смеси. В качестве объектов исследования приняты выбоины с разными размерами и поверхностями соприкосновения с дорожным покрытием (прямой угол, прямая линия и криволинейная поверхность) при производстве ремонтных работ. Температура воздуха находилась в интервале от +10 до -2 °С, применялась асфальтобетонная смесь типа Б с битумом марки БНД 60/90 и температура смеси при укладке 140... 120 °С. Измерение температуры производилось с помощью датчиков измерения температуры и тепловизионной камеры testo 880.

На рисунке 9.4 представлены результаты измерения температуры горячей асфальтобетонной смеси после укладки в выбоину (температура смеси 120 °С, температура воздуха +10 °С, размеры выбоины в плане 0,27 × 0,27 м, глубина 0,06 м).

Из представленных данных видно, что охлаждение смеси в выбоине происходит за сравнительно короткий промежуток времени. Это способствует быстрому охлаждению смеси в выбоине покрытия и уменьшению продолжительности ремонтных работ с учетом температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси.

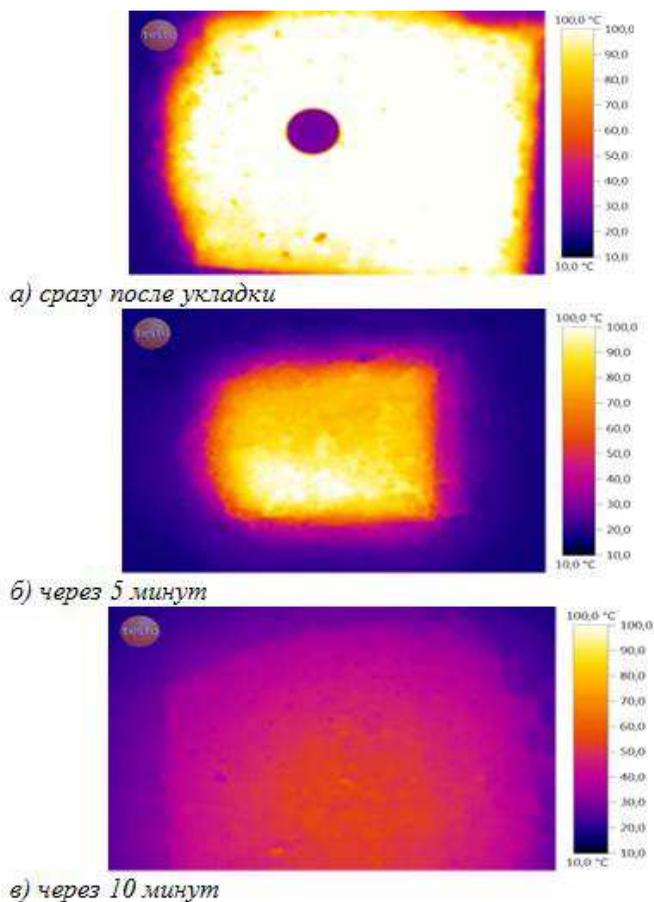
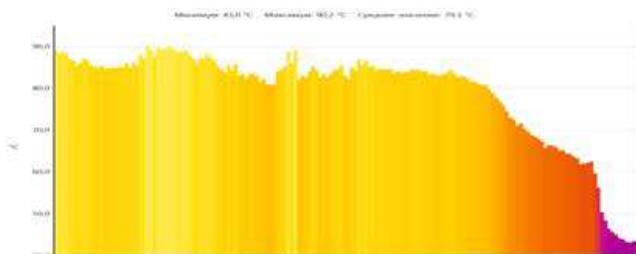


Рис. 9.4. Распределение температуры горячей смеси в выбоине дорожного покрытия во времени

На рисунке 9.5 представлено распределение температуры горячей смеси от центра выбоины до точки соприкосновения с ранее уложенным асфальтобетоном с учетом поверхности контакта.

Из представленных данных видно, что независимо от формы выемки температура смеси в зоне контакта горячей смеси с покрытием резко снижается.

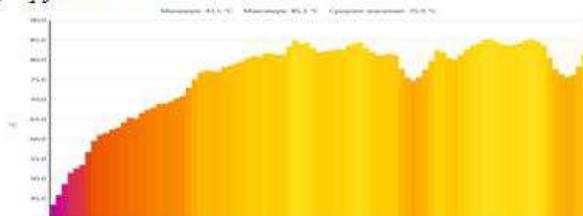
Установлено, что характер охлаждения горячей смеси подчиняется экспоненциальной зависимости и наиболее интенсивно смесь охлаждается в течение нескольких минут сразу после ее укладки. Если на



а) от центра выемки по прямой до границы выемки



б) от центра выемки по прямой до границ выемки, выполненной в виде полукруглости



в) от центра выемки до границы выемки, выполненной в виде прямого угла

Рис. 9.5. Изменение температуры горячей асфальтобетонной смеси от центра выбоины до границы дорожного покрытия в зависимости от формы поверхности контакта смеси с покрытием

начальном этапе после укладки смеси на поверхности выбоины наблюдается незначительная зона материала с пониженной температурой, то через несколько минут зона материала с пониженной температурой значительно увеличивается и зависит от формы сечения выемки.

Следовательно, объем смеси с пониженной температурой в зоне контакта горячей смеси с боковой поверхностью выбоины зависит от формы сечения выемки, увеличивается во времени и составляет по периметру от 4 до 5 см (рис. 9.6).

Установлено, что наиболее интенсивно охлаждение горячей смеси происходит вблизи прямого угла сопряжения выбоины с дорожным покрытием, что объясняется более интенсивной отдачей тепла в двух плоскостях, разница температуры по отношению к центру выбоины может достигать 40...50 °С.

В меньшей степени отдача тепла от горячей асфальтобетонной смеси наблюдается при передаче тепла перпендикулярно к поверхности выбоины, так как в этом случае тепло передается в одной плоскости.

При сопряжении поверхности выбоины с дорожным покрытием в виде дуги интенсивность передачи тепла от горячей смеси к поверхности выбоины занимает промежуточное значение (рис. 9.7).

Из представленных данных видно, что распределение температуры по объему уложенной горячей смеси неравномерно. На определенной площади горячей смеси, уложенной в выбоину, наблюдается резкое падение температуры, которое в зависимости от размеров выбоины и объема уложенной смеси может значительно отличаться от температуры в центре выбоины.

На рисунке 9.8 показано распределение температуры горячей смеси через 5 мин после укладки в выбоину дорожного покрытия при производстве ремонтных работ в г.Тамбове.

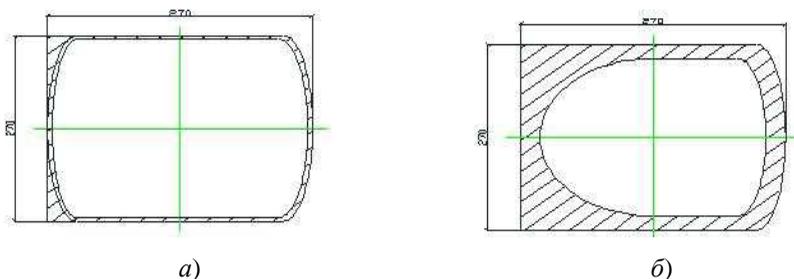


Рис. 9.6. Изменение зоны выбоины с пониженной температурой смеси во времени:
а – после укладки смеси; *б* – через 10 мин

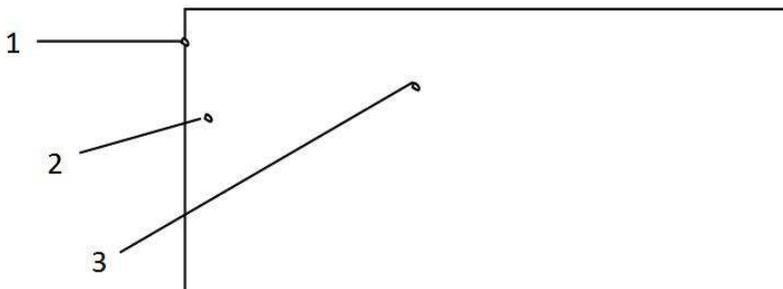
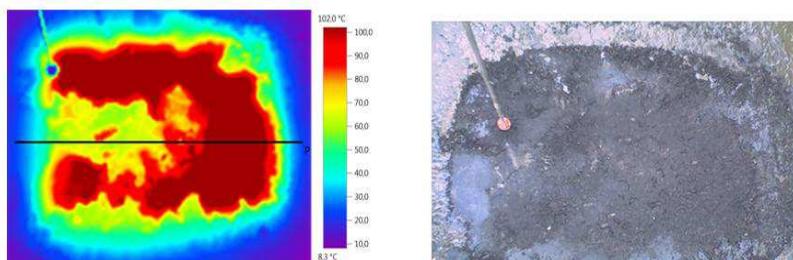


Рис. 9.7. Распределение температуры в горячей смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия:

1 – прямой угол, температура смеси 59 °С; 2 – прямая линия, 48 °С;
3 – центр выбоины, 100 °С



Минимум: 26,1 °С Максимум: 101,9 °С Среднее значение: 67,6 °С

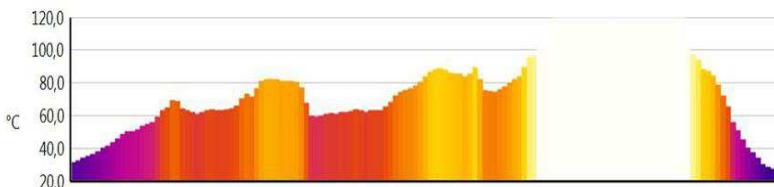


Рис. 9.8. Распределение температуры горячей асфальтобетонной смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия:

температура смеси при укладке 150 °С, температура воздуха –2°С,
время замера температуры 5 мин после укладки

Известно, что обеспечение требуемых характеристик асфальтобетона при уплотнении зависит от температуры асфальтобетонной смеси. Такое изменение температуры смеси по площади выбоины приводит к разным коэффициентам уплотнения, водонепроницаемости и плотности асфальтобетона (рис. 9.9).

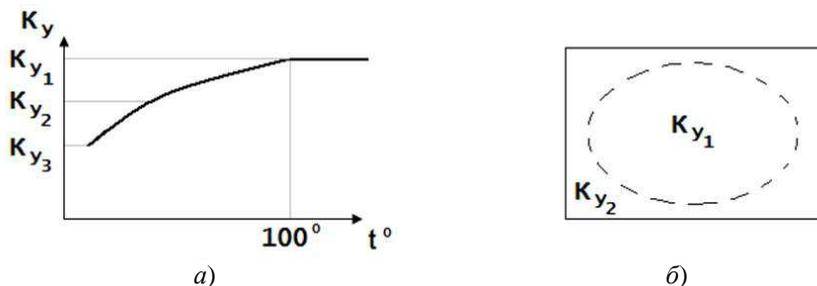


Рис. 9.9. Распределение коэффициента уплотнения горячей асфальтобетонной смеси по площади выбоины покрытия



Рис. 9.10. Разрушение асфальтобетона в выбоине в зоне контакта с покрытием

Следовательно, на тех участках выбоины, где характеристики асфальтобетона не соответствуют нормативным требованиям, в процессе эксплуатации покрытия происходит разрушение материала и снова образуется выбоина (рис. 9.10).

На основании представленных результатов можно сделать вывод, что нарушение температурных режимов при укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей, независимо от применяемых машин для уплотнения, влияет на качество выполненных работ по ремонту выбоин.

Следовательно, для обеспечения требуемого качества работ по ремонту выбоин с применением горячих асфальтобетонных смесей необходимо обеспечить соблюдение температурных режимов с учетом условий производства работ.

9.4. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОУНТНЫХ РАБОТ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ В ВЫБОИНЕ ПОКРЫТИЯ

С учетом непрерывного движения транспортных средств возникает необходимость в проведении качественного ремонта дорожных покрытий в любое время года, независимо от погодных условий, что предъявляет повышенные требования к технологиям ремонта дорожных покрытий. Существующие технологии ремонта рассчитаны в основном на их применение при положительных температурах окружающего воздуха. Однако на практике возникает необходимость проводить такие работы и при отрицательных температурах.

Применение в качестве вяжущего материала дорожных нефтяных битумов накладывает специфические требования к технологии строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа. Зависимость свойств битумных материалов от температуры требует соблюдения температурных режимов на всех этапах строительства и производства ремонтных работ.

Установлено, что ямочный ремонт, выполненный с нарушениями технологии, снижает срок службы отремонтированной поверхности дорожного покрытия в 2 – 4 раза. Применение материала для ремонта выбоин, отличающегося по структуре от уложенного ранее в дорожное покрытие, влияет на прочностные и теплофизические характеристики дорожного покрытия. Применение горячих смесей с использованием битума разных марок, а также разные толщины укладываемого слоя материала влияют на прочностные характеристики и температурные режимы смесей при производстве ремонта покрытий и предъявляют повышенные требования к их укладке и уплотнению. Поэтому все технологические режимы и параметры механизированного звена машин должны быть взаимосвязаны между собой.

9.4.1. Влияние температуры окружающего воздуха на распределение температуры смеси в выбоине дорожного покрытия

Производство работ с применением горячих асфальтобетонных смесей зависит от температуры окружающего воздуха. Допускается выполнять работы по ремонту выбоин на дорожных покрытиях для обеспечения безопасности движения при температуре окружающего воздуха до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6, 42].

Требования к технологии выполнения работ зависят от температуры воздуха.

1. При температуре воздуха не ниже 0 °С:

- основание выбоины должно быть подготовлено до начала производства работ и коэффициент уплотнения должен соответствовать проектным данным;

- автотранспорт должен быть оснащен специальным оборудованием для хранения и перевозки горячей смеси.

2. При температуре воздуха –10 °С:

- толщина укладываемого слоя не менее 0,05 м;
- применение ПАВ и повышение температуры смеси для ее подвижности;

- повышение интенсивности уплотнения смеси;
- уплотнение смеси в выбоине должно производиться при температуре, зависящей от температурных режимов применяемой смеси;
- выбор уплотняющих машин с учетом конкретных условий производства работ.

Продолжительность выполнения работ с горячими с асфальтобетонными смесями при понижении температуры воздуха от +5 до –10 °С приводит к уменьшению продолжительности работ на 20...22% независимо от толщины слоя [15].

В связи с этим для увеличения продолжительности работ и обеспечения температурных режимов горячих смесей необходимо применять смеси с температурой, выше допустимой для вяжущего материала. Такой способ увеличения продолжительности ремонтных работ приводит к необратимым структурным изменениям и свойствам битума, которые происходят в результате термоокислительных процессов при высоких температурах, что способствует ухудшению качества смеси.

Температура окружающего воздуха влияет на темп охлаждения горячей смеси, особенно в зоне границы контакта с уложенным ранее слоем смеси в покрытие. Это способствует тому, что в пограничной зоне выбоины с покрытием темп охлаждения горячей смеси возрастает за счет передачи тепла боковым граням выбоины, что приводит к образованию зоны материала с пониженной температурой смеси по отношению к объему уложенного горячего материала. Такая зона возникает по всему периметру выбоины с поверхностью покрытия, которую можно охарактеризовать шириной зоны.

Образование зоны асфальтобетонной смеси с пониженной температурой смеси по периметру выбоины в процессе уплотнения способствует образованию объемов смеси с низкими эксплуатационными параметрами.

Проведенными исследованиями установлено, что температура воздуха влияет на общий темп охлаждения горячей смеси и особенно в зоне контакта смеси с боковой поверхностью выбоины. Это способствует повышению темпа охлаждения горячей смеси в пограничной зоне, за счет чего образуется зона горячей смеси с пониженной температурой по отношению к общему объему уложенного горячего материала, которую можно охарактеризовать шириной зоны смеси с пониженной температурой.

В таблице 9.2 приведены результаты измерения ширины зоны с пониженной температурой смеси при температуре 120 °С в момент укладки в выбоину и ее понижения до температуры 80 °С.

Из представленных в таблице 9.2 данных видно, что распределение температуры горячей смеси симметрично относительно центра выбоины, ширина зоны пониженной температуры смеси зависит от температуры воздуха, зона понижения температуры горячей смеси наблюдается даже при температуре окружающего воздуха до +40 °С.

С целью уточнения данного вывода были взяты образцы асфальтобетона при выполнении ямочного ремонта на дорогах г. Тамбова, выполненных при температуре окружающего воздуха +25 °С. Результаты испытания образцов в выбоине показали, что коэффициент уплотнения распределяется неравномерно по площади выбоины. В центре выбоины коэффициент уплотнения асфальтобетона равен 0,99, а на границе с покрытием равен 0,97.

Максимальные параметры выбоины определены размерами 0,6 × 0,3 × 0,05 м. С целью уточнения влияния объема горячей смеси в выбоине на зону материала с пониженной температурой смеси была принята выбоина глубиной 0,05 м при разной ее длине и постоянных параметрах смеси (тип смеси В на битуме марки БНД 90/130; температура смеси при укладке 140 °С; скорость ветра 0 м/с; температура окончания работ 80 °С и температура воздуха –10 °С).

9.2. Распределение температуры асфальтобетона по длине выбоины

Температура смеси, °С	59	93	101	102	102	102	102	101	93	59
Ширина зоны, см	1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5

На основании полученных результатов установлено, что ширина зоны с пониженной температурой горячей смеси симметрична по ширине и длине выбоины относительно центра и ее величина зависит от условий производства ремонтных работ и теплофизических характеристик материала. Следовательно, ширина зоны зависит от температуры воздуха и температуры укладываемой смеси и не зависит от размеров выбоины в плане.

Как показывает практика содержания и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа, глубина выбоин является величиной переменной и на небольшой протяженности покрытия встречаются выбоины с разными размерами. Изменение глубины выбоины способствует при одних размерах в горизонтальной плоскости разным объемам укладываемой смеси.

Известно, что изменение объема укладываемого слоя горячей смеси влияет на характер распределения температуры по толщине слоя и, тем самым, на температурные режимы уплотнения смеси в выбоине (рис. 9.11).

На основании представленных данных можно сделать вывод, что с увеличением объема укладываемой горячей смеси за счет увеличения толщины ее слоя зона с пониженной температурой материала на стыке выбоины и дорожного покрытия уменьшается. Данная закономерность изменения температурных режимов уложенной горячей смеси наблюдается и при строительстве асфальтобетонных покрытий с повышенной толщиной слоя [15].

На рисунке 9.12 представлены размеры зоны с пониженной температурой смеси в выбоине при температуре воздуха $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре горячей асфальтобетонной смеси при укладке $+119\text{ }^{\circ}\text{C}$.

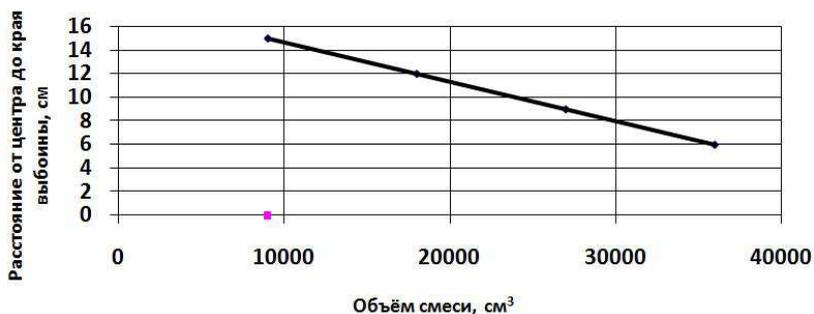


Рис. 9.11. Влияние объема горячей асфальтобетонной смеси на ширину зоны смеси с пониженной температурой при постоянных размерах проекции выбоины

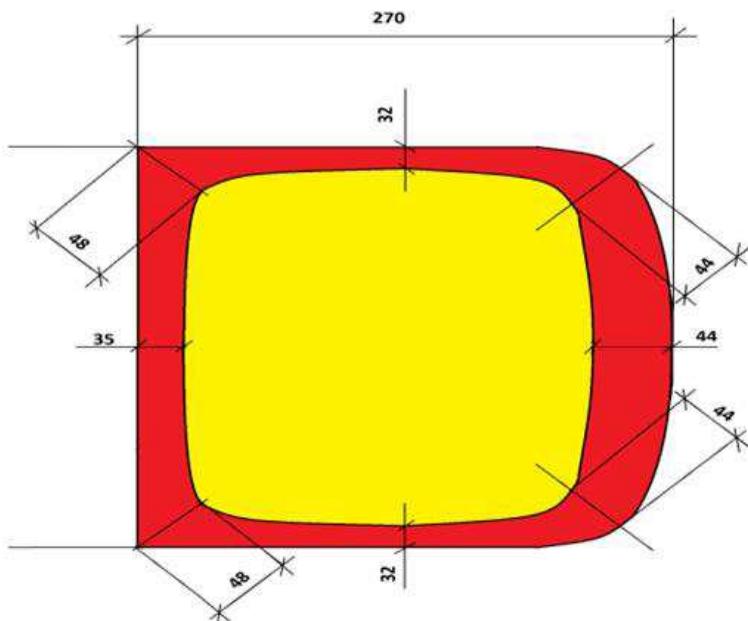


Рис. 9.12. Зона с пониженной температурой смеси по периметру выбоины

В таблице 9.3 представлены результаты измерения ширины зоны с температурой асфальтобетонной смеси ниже $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, уложенной при температуре $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует температурным режимам укладки и уплотнения горячей смеси типа В с битумом марки БНД 90/130. Из представленных данных видно, что ширина зоны материала с пониженной температурой смеси зависит от температуры воздуха. С понижением температуры горячей смеси при укладке увеличивается зона асфальтобетонной смеси, не соответствующая технологическим режимам укладки и уплотнения для данного типа смеси. Применение горячей смеси с низкой температурой не позволяет достичь высокого качества ремонтных работ даже при высокой температуре окружающего воздуха.

Следовательно, при производстве ремонтных работ, что особенно важно при низких температурах окружающего воздуха, необходимо постоянно контролировать температуру горячей смеси при ее укладке в выбоину. На основании полученных данных можно сделать вывод, что с учетом температуры воздуха в зависимости от типа смеси и марки битума имеется определенная температурная граница, ниже которой применение горячей смеси не допускается.

9.3. Влияние температуры воздуха и смеси при ее укладке на ширину зоны с температурой горячего асфальтобетона ниже допустимой

Температура воздуха, °С \ Температура смеси, °С	-20	-10	0	10	20	30	40	50
150	3,0	1,8	1,5	1,4	1,2	0,5	0	0
140	3,0	2,2	1,6	1,5	1,4	1,0	0	0
130	3,1	3,0	2,2	1,6	1,5	1,4	0	0
120	3,7	3,2	3,1	3,0	2,2	1,5	1,0	0,5
110	4,5	3,8	3,3	3,2	3,0	2,8	1,5	1,0
100	6,0	5,7	4,4	4,2	4,0	3,3	3,0	1,8
90	Вся зона пониженных температур		10,0	6,5	6,0		5,0	4,5
80	Вся зона пониженных температур							

Для горячей смеси типа В с битумом марки БНД 90/130 такой граничной температурой при температуре воздуха от -20 до 0 °С является температура смеси 90 °С. Применение горячей смеси с такой температурой при положительной температуре окружающего воздуха способствует образованию зоны материала с пониженными эксплуатационными параметрами асфальтобетона в выбоине.

На рисунке 9.13 представлена зависимость минимального значения температуры асфальтобетонной смеси в зависимости температуры окружающего воздуха, ниже которой ее применение не допускается.

Существующими документами [40, 46] допускается для приготовления горячей асфальтобетонной смеси использовать разные марки битумов в зависимости от дорожно-климатической зоны района строительства дорожных покрытий. Это связано с тем, что в зависимости от марки битума будут разные температурные режимы приготовления,

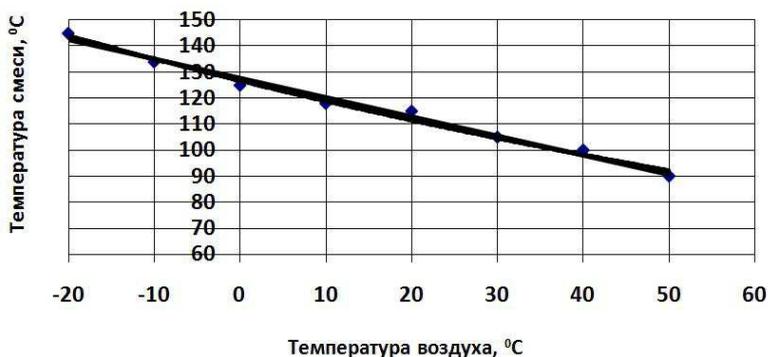


Рис. 9.13. Влияние температуры воздуха на температуру смеси, ниже которой эффективного уплотнения не обеспечивается
(тип смеси А, битум марки БНД 90/130, скорость ветра 0 м/с, температура окончания работ +80 °С)

укладки и окончания процесса эффективного уплотнения смеси, что практически не учитывается при производстве ремонтных работ с применением горячих асфальтобетонных смесей. Для этих целей установлено влияние температуры воздуха и марки битума на ширину зоны пониженных температур горячей смеси в выбоине при производстве ремонтных работ покрытий нежесткого типа для разных типов смеси. Численные значения ширины зоны материала с пониженной температурой смеси представлены в табл. 9.4.

9.4. Влияние температуры воздуха и марки битума на ширину зоны (см) пониженной температуры в выбоине

Температура воздуха, °С \ Марка битума	-20	-10	0	10	20	30	40	50
	<i>Тип смеси А</i>							
БНД 40/60	3,9	3,7	3,2	3,2	2,8	2,2	1,6	1,5
БНД 60/90	3,7	3,3	2,9	2,7	2,3	1,7	1,4	0,8
БНД 90/130	3,2	3,0	2,5	2,2	1,5	1,3	0,8	0,4
БНД 130/200	3,1	3,0	2,6	2,3	1,3	1,0	0,5	0
БНД 200/300	2,7	2,2	1,5	1,3	0	0	0	0

Продолжение табл. 9.4

Температура воздуха, °С	Марка битума							
	-20	-10	0	10	20	30	40	50
<i>Тип смеси Б</i>								
БНД 40/60	3,7	3,3	2,9	2,7	2,3	1,7	1,5	0,8
БНД 60/90	3,2	3,0	2,5	2,2	1,5	1,3	0,8	0,4
БНД 90/130	3,0	2,8	2,0	1,5	1,0	0,7	0	0
БНД 130/200	2,8	2,4	2,2	1,5	0,8	0,5	0	0
БНД 200/300	2,0	1,5	1,0	0,7	0	0	0	0
<i>Тип смеси В</i>								
БНД 40/60	3,2	3,0	2,8	2,6	2,2	2,0	1,5	1,0
БНД 60/90	3,0	2,8	2,5	2,0	1,8	1,5	0,7	0
БНД 90/130	2,8	2,2	2,0	1,7	1,5	1,3	0,5	0
БНД 130/200	1,8	1,7	1,5	0,8	0	0	0	0
БНД 200/300	1,5	1,3	1,0	0,5	0	0	0	0
<i>Тип смеси Г</i>								
БНД 40/60	3,7	3,3	2,9	2,7	2,3	1,7	1,5	0,8
БНД 60/90	3,2	3,0	2,5	2,2	1,5	1,3	0,8	0,4
БНД 90/130	3,0	2,8	2,0	1,5	1,0	0,7	0	0
БНД 130/200	2,8	2,4	2,2	1,5	0,8	0,5	0	0
БНД 200/300	2,0	1,5	1,0	0,7	0	0	0	0

Из представленных в таблицах данных видно, что образование зоны материала с пониженной температурой горячей смеси в выбоине зависит от применяемой марки битума для приготовления асфальтобетонной смеси.

9.4.2. Влияние скорости ветра на охлаждение горячей смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия

При выполнении работ по устройству дорожных покрытий и ремонту небольших участков покрытия, а также при выполнении ремонта выбоин с использованием горячих асфальтобетонных смесей, температурные режимы горячих смесей и продолжительность выполнения работ зависят от скорости ветра.

Согласно рекомендациям [6] существуют ограничения на производство работ с горячими асфальтобетонными смесями в зависимости от скорости ветра. При понижении температуры воздуха разрешается укладывать горячую асфальтобетонную смесь на подготовленное основание при условии, что скорость ветра не превышает пределов, указанных в табл. 9.5.

Ограничение производства работ, в зависимости от скорости ветра связано с отдачей тепла в окружающую среду при распределении горячей смеси небольшим слоем на значительной поверхности покрытия, что способствует повышению темпа охлаждения смеси и снижению продолжительности устройства покрытия.

При выполнении ремонтных работ дорожных покрытий нежесткого типа ввиду небольших объемов укладываемых горячих асфальтобетонных смесей, скорость ветра также оказывает влияние на темп охлаждения горячей смеси (рис. 9.14).

Численные значения температуры горячей смеси с учетом влияния скорости ветра в зависимости от ее температуры при укладке представлены в табл. 9.6. Температура горячей смеси определялась через 5 мин после ее укладки при толщине слоя 0,05 м на глубине 1/3 от толщины слоя смеси.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что независимо от температуры окружающего воздуха и температуры смеси при ее распределении существует зависимость скорости охлаждения горячей смеси от перемещения воздушных масс.

9.5. Допускаемая предельная скорость ветра при укладке горячей смеси при пониженных температурах окружающего воздуха

Температура воздуха, °С	+10...0	0...–5	–5...–10
Скорость ветра, м/с	7	5	3

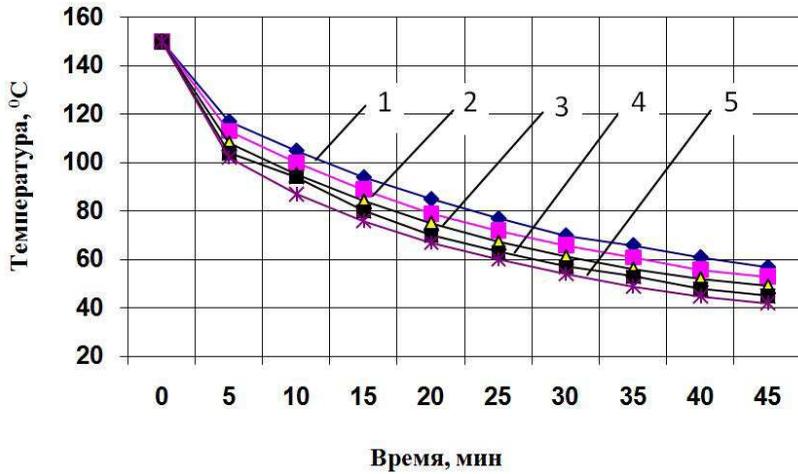


Рис. 9.14. Зависимость изменения температуры горячей смеси во времени
 (температура: воздуха +10 °С, смеси +150 °С; окончания укладки смеси +80 °С; глубина выбоины 1 см):
 1 – 5 – скорости ветра 0, 2, 4, 6, 8 м/с соответственно

9.6. Влияние скорости ветра с учетом температуры воздуха на температуру горячей смеси

Скорость, м/с \ Температура при укладке, °С	0	2	4	6	8
<i>Температура воздуха –20 °С</i>					
160	135	134	131	128	127
140	120	117	114	112	111
120	102	100	98	96	95
100	85	83	81	79	78
80	67	62	64	63	62
<i>Температура воздуха –10 °С</i>					
160	137	136	133	131	128
140	120	119	117	114	112

Продолжение табл. 9.6

Скорость, м/с Температура при укладке, °С	0	2	4	6	8
<i>Температура воздуха -10 °С</i>					
120	103	102	100	98	96
100	86	85	83	81	80
80	68	67	66	65	63
<i>Температура воздуха 0 °С</i>					
160	139	136	134	131	129
140	121	119	117	115	113
120	104	102	100	98	96
100	87	85	83	82	81
80	69	68	66	63	61
<i>Температура воздуха +10 °С</i>					
160	140	138	137	134	132
140	123	121	120	118	116
120	106	104	103	101	100
100	88	87	86	85	83
80	71	70	69	68	67
<i>Температура воздуха +20 °С</i>					
160	142	139	138	136	134
140	124	122	121	119	118
120	107	105	104	103	101
100	90	88	87	86	85
80	72	71	71	70	69

На рисунке 9.15 представлена зависимость изменения температуры горячей смеси в выбоине на глубине 0,015 м от поверхности слоя от скорости ветра через 5 мин после укладки.

Технологией работ по устранению выбоин и просадок на поверхности дорожного покрытия предусматривается сразу после распределения горячей смеси ее уплотнение ввиду одиночного их расположения. Поэтому процесс укладки и уплотнения горячей смеси в зависимости от размеров дефектной поверхности составляет незначительный промежуток времени.

Исходя из закономерностей протекания процесса охлаждения горячей смеси при устройстве покрытия, можно сделать вывод, что температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси при производстве ремонтных работ соответствуют нестационарным тепловым процессам, продолжительность которых составляет от 5 до 10 мин в зависимости от объема уложенного материала.

На основании полученных данных можно сделать выводы, что независимо от температуры воздуха и температуры смеси при ее укладке скорость ветра влияет на общий характер охлаждения смеси, который подчиняется экспоненциальной зависимости. Величиной, характеризующей процесс охлаждения, независимо от свойств и толщины слоя горячей смеси, является темп охлаждения.

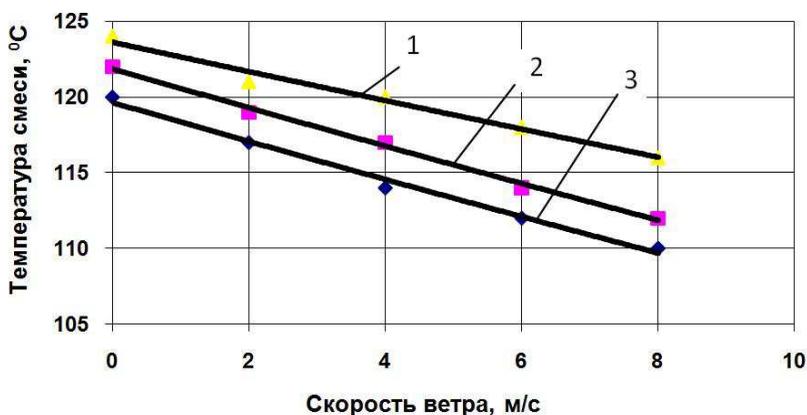


Рис. 9.15. Влияние скорости ветра на температуру горячей смеси в зависимости от температура воздуха:

1 – +10 °C; 2 – -10 °C; 3 – -20 °C (температура смеси при укладке +140 °C; толщина слоя 0,05 м; измерение температуры на глубине 0,015 м от поверхности слоя)

Используя данные, представленные в табл. 9.6, установлено распределение температуры горячей смеси по поверхности выбоины в зависимости от температуры воздуха на глубине 0,01 м от поверхности уложенной горячей смеси (табл. 9.7).

9.7. Распределение температуры смеси по поверхности выбоины

Скорость, м/с	Расстояние от границы выбоины, см									
	1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
<i>Температура воздуха +10 °С</i>										
0	78	95	101	102	102	102	102	101	95	78
2	64	91	98	99	99	99	99	98	91	64
4	63	89	94	95	95	95	95	94	89	63
6	61	86	91	92	92	92	92	91	86	61
8	58	80	87	88	88	88	88	87	80	58
<i>Температура воздуха 0 °С</i>										
0	62	93	100	101	101	101	101	100	93	62
2	59	87	94	95	95	95	95	94	87	59
4	58	85	91	91	91	91	91	91	85	58
6	54	80	86	87	87	87	87	86	80	54
8	51	77	83	84	84	84	84	83	77	51
<i>Температура воздуха -5 °С</i>										
0	58	89	96	97	97	97	97	96	89	58
2	57	87	93	94	94	94	94	93	87	57
4	53	84	89	89	89	89	89	89	84	53
6	51	82	87	89	89	89	89	87	82	51
8	48	79	80	81	81	81	81	80	79	48

Скорость, м/с	Расстояние от границы выбоины, см									
	1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
<i>Температура воздуха –10 °С</i>										
0	54	86	94	95	95	95	95	94	86	54
2	52	83	90	91	91	91	91	90	83	52
4	50	79	86	87	87	87	87	86	79	50
6	48	76	82	83	83	83	83	82	76	48
8	25	30	50	55	55	55	55	50	30	25

Из представленных в табл. 9.7 данных видно, что ширина зоны материала с пониженной температурой зависит от скорости ветра. В таблице 9.8 представлено распределение температуры в асфальтобетоне типа В, приготовленном на битуме марки БНД 90/130 при укладке в выбоину дорожного покрытия.

Из представленных данных видно, что с увеличением скорости ветра возрастает общий темп охлаждения горячей смеси, что влияет на снижение температуры смеси в зоне контакта выбоины с дорожным покрытием.

**9.8. Распределение температуры в асфальтобетоне
в зависимости от скорости ветра**
(температура воздуха +10 °С; глубина измерения – 1 см)

Скорость ветра, м/с	Ширина зоны, см									
	1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5
0	67	95	101	102	102	102	102	102	95	67
2	64	91	98	99	99	99	99	98	91	64
4	63	89	94	95	95	95	95	94	89	63
6	61	86	91	92	92	92	92	91	85	61
8	58	81	87	88	89	89	88	87	81	58

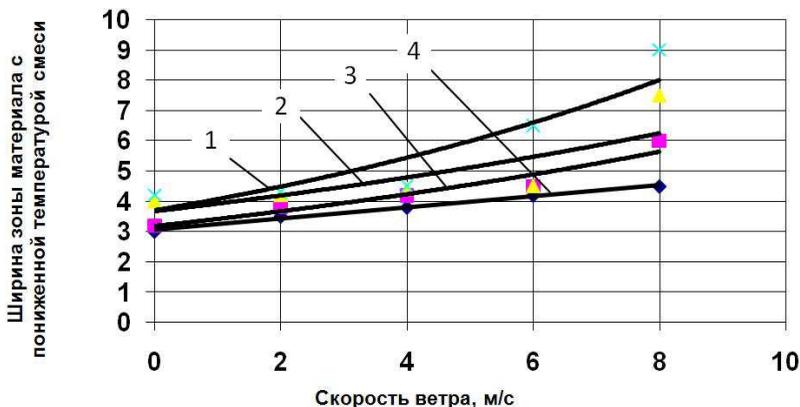


Рис. 9.16. Зависимость ширины зоны материала с пониженной температурой от скорости ветра в зависимости от температуры воздуха:
 1 – 10 °C; 2 – –5 °C; 3 – 0 °C; 4 – +10 °C
 (температура смеси при укладке +150 °C;
 температура смеси при окончании работы +80 °C)

На рисунке 9.16 представлены зависимости ширины зоны материала с пониженной температурой смеси с учетом скорости ветра при разных температурах окружающего воздуха.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что скорость ветра влияет на темп охлаждения горячей смеси, а, следовательно, оказывает влияние на образование зоны материала с температурой.

Используя рекомендации [7, 11, 15] по температурным режимам горячих асфальтобетонных смесей при их укладке и уплотнении, получены предельные значения скорости ветра, выше которых достичь требуемых эксплуатационных параметров асфальтобетона практически невозможно. Результаты расчетов представлены в табл. 9.9.

Отличительной особенностью производства ремонтных работ по устранению выбоин и просадок на дорожных покрытиях является укладка и уплотнение небольших объемов горячей асфальтобетонной смеси, что характеризуется интенсивным охлаждением уложенной смеси и незначительным временем нахождения смеси в заданном температурном интервале.

В таблице 9.10 представлены данные по времени нахождения горячей асфальтобетонной смеси в интервале температур 150...90 °C для смеси типа Б с битумом марки БНД 60/90.

Из представленных данных видно, что в отличие от процесса устройства дорожного покрытия из горячих асфальтобетонных смесей,

9.9. Значения допустимых скоростей ветра, обеспечивающих достижение требуемых эксплуатационных параметров асфальтобетона при производстве ремонтных работ дорожных покрытий

Марка битума	Температура воздуха, °С			
	+10	0	-5	-10
<i>Тип смеси А</i>				
40/60	0	0	0	–
60/90	4	2	0	0
90/130	6	4	2	2
130/200	6	4	3	3
200/300	10	8	8	8
<i>Тип смеси Б</i>				
40/60	4	2	2	2
60/90	6	4	4	4
90/130	8	6	6	4
130/200	9	6	5	5
200/300	10	8	8	8
<i>Тип смеси В</i>				
40/60	7	4	2	2
60/90	8	6	6	4
90/130	8	8	8	6
130/200	10	8	8	8
200/300	10	9	9	9
<i>Тип смеси Г</i>				
40/60	3	2	2	1
60/90	5	3	3	3
90/130	7	5	5	4
130/200	8	5	4	4
200/300	9	7	7	6

**9.10. Время нахождения горячей смеси типа Б
с битумом марки БНД 60/90 в интервале температур
150...90 °С при укладке в выбоину**

Температура воздуха, °С	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40	+50
Время, мин	12,0	12,5	13,0	15,0	16,0	17,5	20,0	22,0

когда смесь находится в заданных температурных интервалах до 50... 60 мин, то при производстве работ по устранению выбоин и просадок на поверхности дорожного покрытия, время нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале для слоя толщиной 0,05 м в зависимости от температуры окружающего воздуха составляет от 12 до 22 мин. Объясняется это тем, что температурные режимы уложенной горячей смеси в выбоину покрытия соответствуют нестационарным процессам, происходящим на стадии ее укладки в покрытие, которые характеризуются незначительными интервалами времени и зависят от тех же факторов, что и при ремонте покрытия. С учетом небольшого объема укладываемой горячей смеси время нахождения в заданном температурном интервале незначительно.

В результате моделирования тепловых процессов горячих асфальтобетонных смесей при укладке в выбоину дорожного покрытия установлено, что ширина зоны горячей смеси зависит от температуры смеси при укладке. Результаты расчетов представлены в табл. 9.11.

9.11. Влияние температуры смеси на ширину зоны асфальтобетона с пониженной температурой смеси

Температура смеси, °С	150	140	130	120	110	100	90
<i>Температура воздуха -20 °С</i>							
Ширина зоны асфальтобетона с пониженной температурой смеси, см	2,0	2,5	3,0	4,0	4,3	10,5	Вся зона
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	12,5	12,0	10,5	10,0	7,5	5,0	1,0

Продолжение табл. 9.11

Температура смеси, °С	150	140	130	120	110	100	
<i>Температура воздуха –10 °С</i>							
Ширина зоны асфальтобетона с пониженной температурой смеси, см	2,2	3,0	3,5	4,0	4,5	Вся зона	
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	12,0	11,0	10,0	9,0	7,0	5,0	
Температура смеси, °С	150	140	130	120	110	100	90
<i>Температура воздуха 0 °С</i>							
Ширина зоны асфальтобетона с пониженной температурой смеси, см	0,8	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	Вся зона
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	19	17	15	13	10,5	8,5	–
<i>Температура воздуха +10 °С</i>							
Ширина зоны асфальтобетона с пониженной температурой смеси, см	2,0	2,2	2,5	3,2	4,0	6,0	Вся зона
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	17,0	13,5	13,0	10	9	7,0	–
<i>Температура воздуха +20 °С</i>							
Ширина зоны асфальтобетона с пониженной температурой смеси, см	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	7,5	Вся зона
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	15	13,5	12	10,5	7,0	5,0	–

Температура смеси, °С	150	140	130	120	110	100	90
<i>Температура воздуха +30 °С</i>							
Ширина зоны асфальтобетона с пониженной температурой смеси, см	1,5	2,0	2,5	2,0	4,0	6,0	Вся зона
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	17,5	16,0	14,0	12,0	10,0	7,0	–

При расчете приняты следующие исходные данные: смесь типа Б, битум марки БНД 60/90, толщина слоя смеси 0,05 м, скорость ветра 0 м/с, нижняя температурная граница уплотнения смеси 85 °С, температура основания равна температуре воздуха.

Из представленных в таблицах данных видно, что независимо от температуры воздуха и смеси при ее укладке в выбоину на границе покрытия и свежеложенной асфальтобетонной смеси возникают зоны с пониженной температурой асфальтобетонной смеси, влияющие на эксплуатационные показатели асфальтобетона. Величина ширины образующейся зоны с пониженной температурой горячей смеси зависит от разности температур покрытия и горячей смеси. При укладке горячих смесей с высокой температурой при интенсивной передаче тепла от смеси боковым поверхностям выбоины происходит их нагрев за счет отдачи тепла от горячей смеси. При понижении разницы температуры укладываемой смеси и покрытия интенсивность передачи тепла снижается, и передача тепла боковым граням выбоины происходит за счет теплового потока из объема уложенной смеси, что приводит к увеличению зоны асфальтобетона с пониженной температурой.

На рисунке 9.17 представлена зависимость изменения ширины зоны с пониженной температурой от температуры укладываемой смеси.

Из представленных в табл. 9.11 данных видно, что при укладке горячих смесей с пониженными температурами при выполнении ремонтных работ весь объем уложенной смеси не соответствует температурным режимам горячих смесей, что приводит к быстрому разрушению уложенного материала в выбоине и малому сроку службы отремонтированного покрытия.

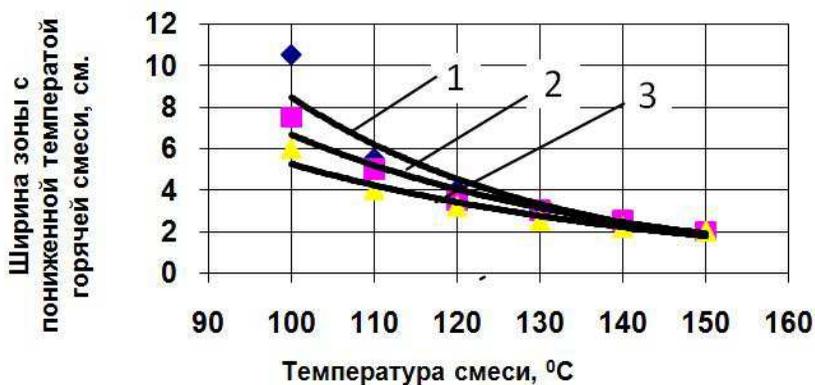


Рис. 9.17. Зависимость изменения ширины зоны с пониженной температурой от температуры укладываемой смеси и температуры воздуха:

1 – -10 °C; 2 – 0 °C; 3 – +10 °C (тип смеси Б, битум марки БНД 60/90, толщина слоя 0,05 м)

По результатам проведенных исследований установлены температурные границы горячих асфальтобетонных смесей в зависимости от типа смеси и марки битума, ниже которых весь уложенный объем горячей смеси не соответствует температурным режимам их укладки и уплотнения, что способствует некачественной работе (табл. 9.12).

9.12. Минимальная температура горячей смеси при производстве ремонта покрытия, ниже которой весь объем материала не соответствует технологическим режимам укладки и уплотнения

Марка битума	Тип смеси	Температура воздуха, °C							
		-20	-10	0	10	20	30	40	50
40/60	А	120	116	115	113	112	111	110	109
	Б	114	112	109	108	107	106	105	104
	В	108	106	104	103	101	100	99	98
	Г	114	112	109	108	107	106	105	104

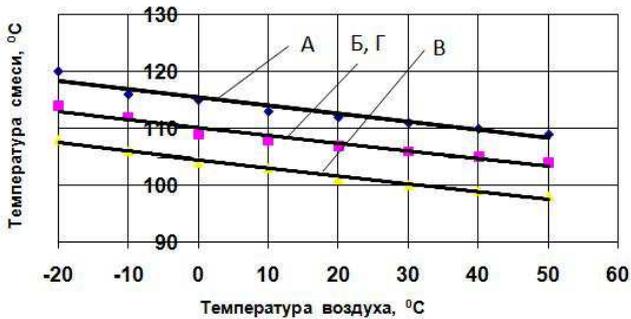
Продолжение табл. 9.12

Марка битума	Тип смеси	Температура воздуха, °С							
		-20	-10	0	10	20	30	40	50
60/90	А	114	112	109	108	107	106	105	104
	Б	108	106	104	103	101	100	99	98
	В	101	100	98	97	95	94	93	92
	Г	108	106	104	103	101	100	99	98
90/130	А	108	106	104	103	101	100	99	98
	Б	101	100	98	96	95	94	93	92
	В	96	94	92	90	88	87	86	85
	Г	101	100	98	96	95	94	93	92
130/200	А	96	94	92	90	88	87	86	85
	Б	90	88	86	84	83	82	81	80
	В	84	82	81	79	78	76	75	74
	Г	90	88	86	84	83	82	81	80
200/300	А	84	82	81	79	78	76	75	74
	Б	78	76	75	73	72	70	69	68
	В	72	70	68	66	64	63	62	61
	Г	78	76	75	73	72	70	69	68

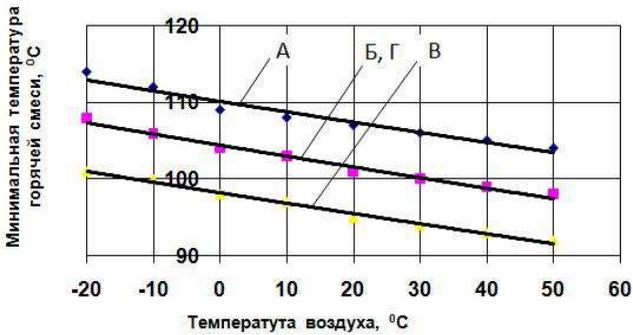
Из представленных данных можно сделать выводы, что с повышением температуры окружающего воздуха минимальное значение температуры горячей асфальтобетонной смеси независимо от марки битума понижается. С понижением вязкости битума минимальная температура смеси при укладке в выбоину также понижается. Независимо от марки битума и типа смеси наблюдается общий характер изменения минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси.

Представим данные табл. 9.12 в виде рис. 9.18.

а) битум марки БНД 40/60



б) битум марки БНД 60/90, температура смеси при укладке +150 °C



в) битум марки БНД 90/130, температура смеси при укладке +150 °C

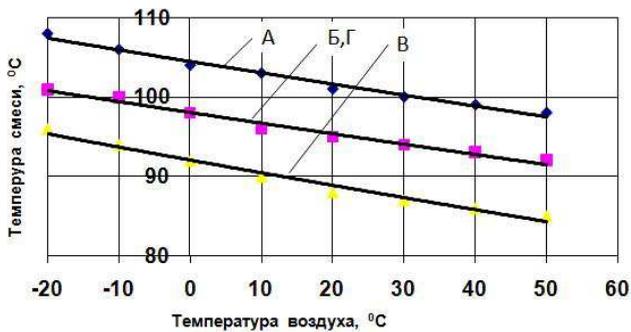
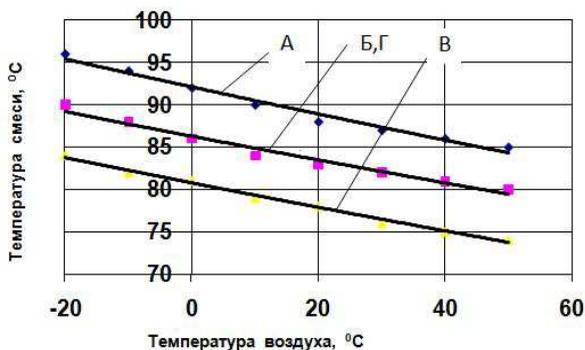


Рис. 9.18. Зависимость минимальной температуры смеси от марки битума при укладке в выбоину дорожного покрытия, ниже которой весь объем уложенной смеси имеет температуру ниже рекомендованной

г) битум марки БНД 130/200, температура смеси при укладке +140°C



д) битум марки БНД 200/300, температура смеси при укладке 130°C

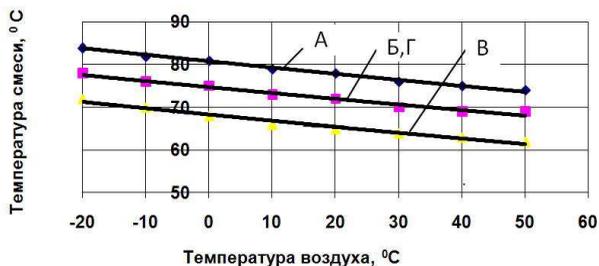


Рис. 9.18. Продолжение

9.4.3. Влияние температуры основания на температурные режимы горячей смеси при укладке в выбоину покрытия

Вопрос влияния температуры основания дорожного покрытия на технологию укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей при строительстве дорожных покрытий рассмотрен в работах [11, 15, 33]. В данных работах влияние нагрева основания на технологию устройства дорожного покрытия учитывается за счет введения коэффициента влияния температуры основания на процесс охлаждения горячих смесей.

Опыт строительства асфальтобетонных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей показал, что повышение температуры основания за счет передачи тепла от горячей смеси зависит от температуры смеси при укладке и толщины укладываемого слоя. Так, при укладке слоя толщиной 0,04 м и температуры смеси при укладке +160 °C, температура основания нагревается до температуры +40... 43 °C. При увеличении толщины слоя до 0,1 м нижележащий слой про-

гревается до температуры $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает лучшее сцепление слоев между собой. Однако такой способ повышения температуры основания приводит к общему понижению температуры укладываемой горячей асфальтобетонной смеси, а, следовательно, не обеспечивает соблюдения температурных режимов смеси при ее уплотнении и способствует снижению качества ремонтных работ.

В условиях пониженных температур окружающего воздуха при устройстве дорожных покрытий нежесткого типа допускается укладывать верхний слой на свежеложенный нижний слой при его температуре $+20\text{...}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре воздуха ниже $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]. Наличие нижнего слоя покрытия с более высокой температурой по отношению к температуре окружающего воздуха способствует уменьшению отдачи тепла основанию слоем горячей смеси, что приводит к увеличению времени устройства верхнего слоя покрытия в заданных температурных интервалах асфальтобетонной смеси. Увеличение температуры основания до $30\text{...}40\text{ }^{\circ}\text{C}$, при температуре окружающего воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, способствует увеличению продолжительности устройства покрытия в интервале температур смеси $+160\text{...}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $25\text{...}35\%$, аналогично увеличивается и возможная продолжительность процесса уплотнения. На продолжительность распределения смеси температура основания оказывает незначительное влияние.

Как отмечалось ранее, производство ремонтных работ имеет некоторые особенности по отношению к устройству дорожных покрытий. Небольшой объем укладываемого горячего материала в выбоину или просадку на поверхности дорожного покрытия способствует его интенсивному охлаждению. Поэтому технологические приемы, применяемые при устройстве асфальтобетонных покрытий, не соответствуют технологии ремонтных работ.

Применяемый на практике метод прогрева основания выбоины открытым пламенем при нагреве поверхности выбоины приводит к выжиганию составляющих компонентов битума, что ухудшает качество асфальтобетона на стыке покрытия с уложенным асфальтобетоном.

Более эффективным для этих целей является применение инфракрасного излучения, при котором не происходит выгорания компонентов битума. Однако до настоящего времени не изучен вопрос влияния нагрева поверхности выбоины на тепловые процессы в уложенном объеме горячего материала при производстве ремонтных работ, не определены численные значения температуры нагрева для обеспечения качественного ремонта дорожных покрытий нежесткого типа. Поэтому ниже показано влияние температуры основания на процесс охлаждения слоя, получено численное значение температуры нагрева

поверхностей выбоины или просадки для качественного ремонта покрытия с учетом свойств применяемого материала в зависимости от конкретных условий производства работ.

На рисунке 9.19 представлено распределение температуры по поверхности выбоины на глубине слоя 0,01 м при температуре смеси при укладке +120 °С, температуре воздуха –10 °С, скорости ветра 0 м/с и разных температурах основания.

Из представленных данных видно, что температура основания влияет не только на температуру в зоне контакта материала с покрытием, но и на распределение температуры по поверхности выбоины.

В таблице 9.13 представлены значения ширины зоны материала с температурой смеси ниже допустимой и продолжительность охлаждения слоя смеси в выбоине в зависимости от температуры основания.

Температура основания -10°С

60	93	100	102	102	102	100	100	93	60
1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5

Температура основания 0°С

63	94	101	103	103	103	103	101	94	63
1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5

Температура основания +10°С

67	96	102	104	104	104	104	102	96	67
1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5

Рис. 9.19. Влияние температуры основания на распределение температуры по горизонтальной поверхности выбоины

9.13. Влияние температуры прогрева основания на ширину зоны с пониженной температурой

(толщина слоя 5 см, скорость ветра 0 м/с, температура воздуха –10 °С, температура окончания уплотнения смеси +80 °С)

Температура основания, °С	-10	0	10	30	50
<i>Температура смеси +130 °С</i>					
Ширина зоны пониженной температуры, см	3,8	2,8	2,2	1,5	0
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	10,0	12	17	20	23

Продолжение табл. 9.13

Температура основания, °С	-10	0	10	30	45			
<i>Температура смеси +140 °С</i>								
Ширина зоны пониженной температуры, см	2,4	2,2	1,5	1,0	0			
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	12	14	15	17,5	20			
Температура основания, °С	-10	0	10	30	35			
<i>Температура смеси +150 °С</i>								
Ширина зоны пониженной температуры, см	2,0	1,7	1,5	0,5	0			
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	15	16	17,5	18	22			
Температура основания, °С	-10	0	10	30	50	65		
<i>Температура смеси +120 °С</i>								
Ширина зоны пониженной температуры, см	3,5	3,3	3,2	1,8	1,0	0		
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	12	14	15	16	17,5	20		
Температура основания, °С	-10	0	10	30	50	65	75	
<i>Температура смеси +100 °С</i>								
Ширина зоны пониженной температуры, см	6	5,2	4,5	4,0	3,0	1,5	0	
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	6	7	7,2	7,5	10,0	17,5	30	
Температура основания, °С	-10	0	10	30	50	70	80	90
<i>Температура смеси +90 °С</i>								
Ширина зоны пониженной температуры, см	Весь объем материала			7,5	4,5	1,0	0	
Время охлаждения смеси до минимального значения, мин	-	-	-	-	4	7,5	30	30



Рис. 9.20. Влияние температуры нагрева основания от ширины зоны асфальтобетона пониженной температурой

(асфальтобетон типа В; битум марки БНД 90/130; температура смеси при укладке +120 °С; температура воздуха 0 °С; скорость ветра 0 м/с)

На основании данных, представленных в табл. 9.13, установлена зависимость между шириной зоны асфальтобетона с пониженной температурой от температуры поверхности выбоины, которая представлена на рис. 9.20.

Из данных на рисунке видно, что с понижением температуры основания за счет разницы температур горячей смеси и поверхности выбоины зона асфальтобетона с пониженной температурой увеличивается. Следовательно, нагрев поверхности выбоины позволит устранить такой дефект при укладке горячей смеси в выбоину.

На рисунке 9.21 представлено распределение температуры в асфальтобетоне при нагреве боковых поверхностей выбоины до +80 °С при температуре горячей смеси при укладке +80 °С.

По результатам [53] моделирования тепловых процессов при укладке в выбоину дорожного покрытия горячих асфальтобетонных смесей установлено, что температура нагрева поверхности выбоины для исключения образования в выбоине асфальтобетона зоны с пониженными температурами зависит от температуры воздуха и температуры смеси при доставке к месту производства работ.

На рисунке 9.22 представлена зависимость между температурой окружающего воздуха и температурой нагрева поверхности выбоины при заданной температуре поставляемой горячей асфальтобетонной смеси к месту производства ремонтных работ (температура смеси при укладке +130 °С, толщина слоя 5 см, скорость ветра 0 м/с).

На основании установленной связи между температурой воздуха и температурой нагрева поверхности выбоины можно сделать вывод, что для каждого типа смеси и марки битума существуют зависимости,



Рис. 9.21. Влияние температуры нагрева основания на температуру горячей смеси:

1 – температура смеси при укладке; 2 – 8 – разница температуры смеси с градацией через 5 мин (температура воздуха +10 °С, толщина слоя 5 см, температура основания +10°С, скорость ветра 0 м/с, температура окончания укладки смеси +80 °С)

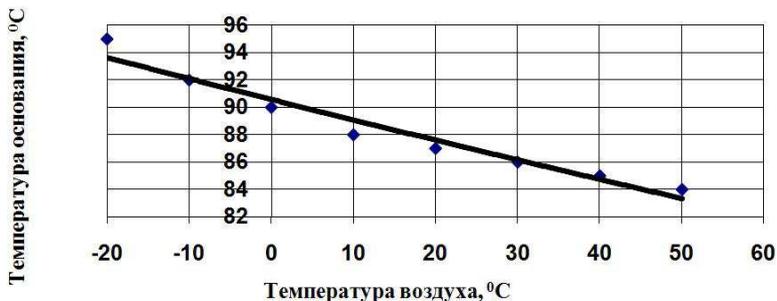


Рис. 9.22. Зависимость температуры нагрева основания от температуры воздуха

позволяющие производить качественный ремонт покрытия при условии обеспечения заданной температуры горячей асфальтобетонной смеси при ее доставке к месту производства ремонтных работ.

Производство работ по устранению выбоин на дорожных покрытиях связано с ремонтом отдельных участков, требующих мобильности при выполнении работ по устранению дефектов покрытия. Это приводит к тому, что если температура окружающего воздуха остается в течение определенного периода времени постоянной, то температура горячей асфальтобетонной смеси со временем меняется.

По результатам исследований установлена зависимость между температурой горячей асфальтобетонной смеси и температурой нагрева поверхности выбоины, исключая образование объемов материала в выбоине с пониженной температурой горячей смеси, которая представлена на рис. 9.23.

Из представленной зависимости видно, что с понижением температуры горячей смеси необходимо увеличивать температуру нагрева поверхности выбоины.

Исследованиями установлено, что для устранения образования объема горячей смеси с пониженной температурой при выполнении ремонта выбоин на дорожном покрытии и обеспечении температурных режимов при укладке и уплотнении горячих смесей, для каждого типа смеси и марки битума имеется связь между температурой горячей смеси, поставляемой к месту производства работ, температурой окружающего воздуха и температурой поверхности выбоины.

На рисунке 9.24 приведены такие зависимости для смеси типа Б, приготовленной на битуме марки БНД 90/130.

На основании полученных результатов следует, что уменьшение температуры горячей смеси при доставке к месту выполнения ремонтных работ способствует росту объема асфальтобетона в зоне контакта с покрытием выбоины с температурой ниже допустимой. С понижением температуры горячей смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия необходимо увеличивать температуру нагрева поверхности выбоины. Нагрев поверхности выбоины перед распределением горячей смеси обеспечивает температурные режимы смеси при производстве ремонтных работ даже при условии ее доставки с температурой, ниже минимально допустимой. Нагрев боковых поверхностей выбоины

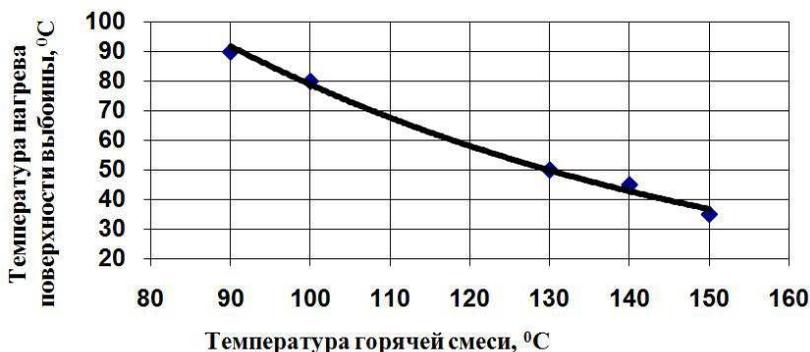


Рис. 9.23. Зависимость температуры нагрева основания от температуры укладки горячей смеси

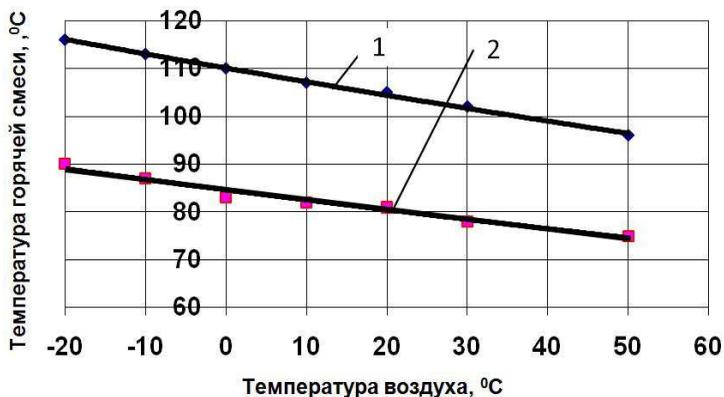


Рис. 9.24. Зависимость между температурой воздуха, температурой смеси, поставляемой к месту выполнения ремонтных работ, и температурой нагрева поверхности выбоины:

- 1 – минимальная температура смеси при укладке в выбоину;
- 2 – температура основания, при соответствующей температуре воздуха

позволяет уменьшить зону асфальтобетона с пониженной температурой при одновременном увеличении продолжительности работ по ремонту выбоин с обеспечением температурных режимов горячей смеси.

10. ОБОСНОВАНИЕ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Качество работ по ремонту дорожных покрытий нежесткого типа зависит не только от свойств используемого материала, но и от эффективности применяемых механизмов при производстве работ. При образовании выбоины на поверхности покрытия и несвоевременном ее ремонте под действием нагрузок от транспортных средств по контуру образовавшей выбоины происходит разрушение материала покрытия, возникают трещины и микротрещины, что способствует снижению прочностных характеристик асфальтобетона и прогрессивное разрушение дорожного покрытия.

Для устранения развития трещин и микротрещин на покрытиях технологией работ предусматривается обрубка кромок выбоины с приданием ей любой конфигурации с прямолинейным очертанием. Для выполнения работ по обработке кромок применяют фрезерные машины, дисковые пилы или перфораторы. Установлено, что применение перфораторов для обработки кромок выбоины способствует образованию микротрещин в асфальтобетоне. Поэтому такой способ обработки кромок выбоины не рекомендуется.

С целью обеспечения сцепления укладываемого материала в выбоину и дорожного покрытия производят ее очистку от асфальтобетонного лома и грязи, подгрунтовку дна и кромок вязким битумом. В качестве ремонтного материала преимущественно используют горячие асфальтобетонные смеси, для уплотнения которых применяют малогабаритные гладковальцовые катки или вибрационные плиты. При повышенном увлажнении выбоины ее просушивают сжатым воздухом (горячим или холодным). Для этой цели в некоторых случаях применяют тепловое воздействие на материал выбоины.

Анализ технологий по ремонту выбоин на покрытиях нежесткого типа с применением горячих смесей показал, что основными недостатками, способствующими низкому качеству ремонтных работ, является нарушение требований по подготовке основания покрытия, несоблюдение температурных режимов горячих смесей при укладке и уплотнении и неэффективное применение уплотняющих механизмов.

10.1. ВЫБОР УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Установлено, что характеристики асфальтобетона при уплотнении зависят от температурных режимов укладки и уплотнения, времени действия уплотняющей нагрузки на материал и метода уплотнения [16, 27, 49].

Выбор параметров уплотняющих средств зависит от свойств применяемого материала и способа его укладки.

При распределении горячей смеси ручным способом коэффициент предварительного уплотнения горячего асфальтобетона находится в пределах 0,7...0,75. За счет низкой деформативной способности горячего материала на начальной стадии уплотнения необходимо применять механизмы с малыми контактными напряжениями, соответствующие прочностным характеристикам материала.

С повышением плотности материала силовые параметры уплотняющих машин должны увеличиваться. Выполнение этого условия возможно только при применении уплотняющих машин динамического действия с переменными силовыми параметрами. К таким машинам относятся вибрационные катки и вибрационные плиты. При незначительной площади ремонтируемой поверхности применение серийных дорожных катков нецелесообразно. Поэтому, на практике, при производстве ремонтных работ по устранению выбоин на поверхности дорожного покрытия применяют ручные катки статического или вибрационного действия.

Анализ параметров катков, применяемых для этих целей, показал, что они не в состоянии обеспечить требуемые характеристики укладываемого в выбоину асфальтобетона. Известно, что для обеспечения качественного уплотнения необходимо, чтобы контактные напряжения под рабочим органом машины были близки к пределу прочности уплотняемого материала.

При строительстве асфальтобетонных покрытий дорожные катки в зависимости от места назначения в технологическом процессе имеют линейные давления в пределах от 40 до 100 кН/п.м. Линейное давление ручного катка статического действия соответствует 0,05...0,1 кН/п.м. Следовательно, обеспечить требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетона при использовании такой технологии практически невозможно. Применение вибрационных ручных катков не устраняет данный недостаток, хотя его воздействие на горячую асфальтобетонную смесь более эффективно за счет дополнительного динамического фактора. В то же время малая масса вибрационного

катка при значительной вынуждающей силе не обеспечивает требуемой плотности материала по толщине слоя, что приводит к неравномерности уплотнения по толщине. Более эффективным для этих целей является применение вибрационных плит, которые в настоящее время получили широкое применение при производстве ремонтных работ на покрытиях нежесткого типа.

С целью уточнения возможности обеспечения качества уплотнения горячих асфальтобетонных смесей при применении вибрационных плит и сравнения с традиционными технологиями устройства покрытия, были проведены экспериментальные исследования при реконструкции автомобильной дороги «Москва – Волгоград» на участке 423...431 км [27].

В качестве базовой технологии для устройства асфальтобетонного покрытия с применением горячей смеси типа Б, приготовленной на битуме марки БНД 60/90, принято звено машин, состоящее из асфальтоукладчика (с трамбующим брусом и выглаживающей вибрационной плитой) и звеном дорожных катков в составе среднего и тяжелого типов. Температура горячей смеси при укладке и уплотнении соответствовала существующим рекомендациям по устройству дорожных покрытий [6, 42]. В процессе уплотнения температура смеси менялась в пределах от 130 до 85 °С. После укладки горячей смеси асфальтоукладчиком коэффициент предварительного уплотнения асфальтобетона составлял 0,935 (измерение коэффициента уплотнения производилось плотномером ПАБ-1).

В качестве сравниваемой технологии принято звено машин из асфальтоукладчика и вибрационной плиты массой 110 кг с контактной поверхностью 1800 см². Величина вынуждающей силы соответствовала 25 кН.

Полученные результаты измерения коэффициента уплотнения в зависимости от числа проходов по одному следу представлены на рис. 10.1.

Из представленных данных видно, что применение вибрационных плит для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей позволяет обеспечить более высокие показатели уплотнения. При уплотнении вибрационной плитой рост коэффициента уплотнения происходит интенсивнее, чем при уплотнении дорожными катками. Достижимая величина коэффициента уплотнения выше, чем при работе звена дорожных катков. Полученный эффект при уплотнении горячего асфальтобетона вибрационной плитой объясняется тем, что остаточная деформация уплотняемого материала зависит не только от силового воздействия рабочего органа на материал, но и времени его действия. При одинаковой рабочей скорости перемещения уплотняющей машины время действия на уплотняемый материал у вибрационной плиты

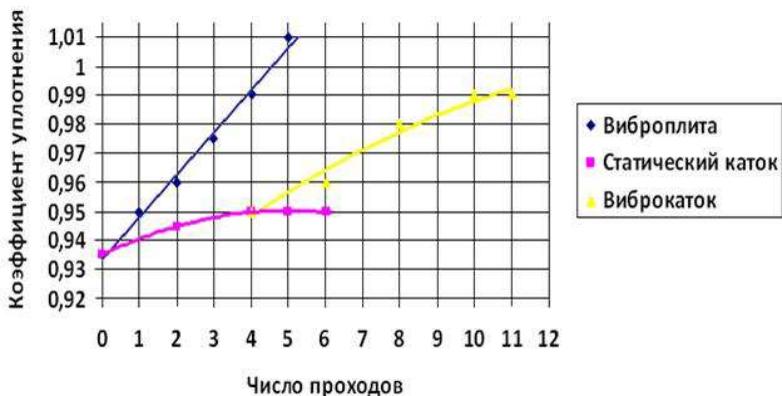


Рис. 10.1. Зависимость коэффициента уплотнения асфальтобетона от числа проходов:

- ◆ – комбинированный каток статического действия;
- – вибрационный каток, тандем WB151-AD;
- ◆ – вибрационная плита

значительно больше. Если при укатке катком время действия нагрузки за один проход на частицу материала составляет 0,2...0,4 с, то при работе катка на пневматических шинах 0,4...0,6 с, а при уплотнении вибрационной плитой время действия составляет 0,8...1,6 с.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при определенных условиях производства ремонтных работ применение технологии уплотнения горячих асфальтобетонных смесей вибрационными плитами при соответствующих их параметрах эффективнее, чем дорожными катками.

10.2. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ВЫБОИН ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ СМЕСЕЙ

Как отмечалось ранее, в зависимости от дорожно-климатической зоны расположения автомобильной дороги, ее категории для слоев дорожного покрытия рекомендуются асфальтобетоны определенных типов и марок битумов.

Для устройства верхнего слоя покрытия рекомендуются мелкозернистые или песчаные высокоплотные и плотные асфальтобетонные смеси марки 1, которые характеризуются высокими прочностными характеристиками. В нижние слои покрытия рекомендуется уклады-

вать крупнозернистые асфальтобетонные смеси. Для обеспечения безопасности движения транспортных средств в верхние слои покрытия укладывают смеси типов А или Б. Минимальная толщина верхнего слоя покрытия зависит от категории дороги и составляет для дорог I и II категории – 0,05 м, III и IV – 0,03 м.

Для обеспечения одинаковых физико-механических и теплофизических параметров при производстве ремонтных работ дорожных покрытий необходимо, чтобы применяемый материал для устранения дефектов покрытия, по своей структуре и свойствам соответствовал материалу дорожного покрытия. Установлено, что каждая марка битума горячей асфальтобетонной смеси имеет эффективные температурные режимы укладки и уплотнения, при которых обеспечиваются требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетона [11, 15, 28].

Обеспечение требуемых эксплуатационных показателей асфальтобетона (плотность, пористость, водонепроницаемость, прочность) при укладке в выбоину горячей смеси достигается в процессе уплотнения. Выбор параметров уплотняющих машин зависит от характеристик горячей смеси, свойства которой определяются ее температурой. Продолжительность выполнения ремонтных работ определяется временем соответствия температуры горячей асфальтобетонной смеси заданным температурным интервалам в зависимости от свойств вяжущего материала и температуры воздуха (табл. 10.1).

10.1. Продолжительность укладки и уплотнения горячей асфальтобетонной смеси при производстве ремонтных работ выбоин дорожного покрытия (мин)

Тип смеси	Марка битума	Температура воздуха, °С						
		-20	-10	0	10	20	30	40
А	40/60	10,0	11,0	12,0	12,5	13,0	13,5	15,0
	60/90	11,5	12,5	13,0	14,0	14,5	15,0	17,5
	90/130	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	130/200	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	17,5	20,0
	200/300	14,0	15,0	16,0	17,5	20,0	22,5	25,0

Продолжение табл. 10.1

Тип смеси	Марка битума	Температура воздуха, °С						
		-20	-10	0	10	20	30	40
Б	40/60	11,5	12,5	13,0	14,0	14,5	15,0	17,5
	60/90	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	90/130	13,5	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	21,0
	130/200	13,0	13,5	14,0	16,0	17,5	20,0	22,5
	200/300	15,0	17,0	18,0	20,0	21,5	25,0	30,0
В	40/60	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	60/90	13,5	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	21,0
	90/130	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	20,0	24,0
	130/200	14,0	15,0	16,0	17,5	20,0	22,5	25,0
	200/300	19,0	17,5	19,0	21,0	24,0	27,5	32,0
Г	40/60	11,5	12,5	13,0	14,0	14,5	15,0	17,5
	60/90	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	90/130	13,5	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	21,0
	130/200	13,0	13,5	14,0	16,0	17,5	20,0	22,5
	200/300	15,0	17,0	18,0	20,0	21,5	25,0	30,0
Д	40/60	9,0	10,0	11,0	12,0	12,5	14,0	15,0
	60/90	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	17,5
	90/130	12,0	12,5	13,0	14,0	15,0	147,5	20,0
	130/200	14,0	15,0	16,0	17,5	20,0	225,5	25,0
	200/300	16,0	17,5	19,0	21,0	25,0	27,0	32,0

С учетом температурных режимов горячей смеси установлены граничные значения температуры при ее укладке, при которых весь объем укладываемого материала смеси не соответствует температурным режимам (табл. 10.2).

10.2. Минимальная температура горячей смеси при производстве ремонтных работ покрытия, ниже которой весь объем материала не соответствует технологическим режимам горячей асфальтобетонной смеси

Марка битума	Тип смеси	Температура воздуха, °С							
		-20	-10	0	10	20	30	40	50
40/60	А	120	116	115	113	112	111	110	109
	Б	114	112	109	108	107	106	105	104
	В	108	106	104	103	101	100	99	98
	Г	114	112	109	108	107	106	105	104
60/90	А	114	112	109	108	107	106	105	104
	Б	108	106	104	103	101	100	99	98
	В	101	100	98	97	95	94	93	92
	Г	108	106	104	103	101	100	99	98
90/130	А	108	106	104	103	101	100	99	98
	Б	101	100	98	96	95	94	93	92
	В	96	94	92	90	88	87	86	85
	Г	101	100	98	96	95	94	93	92
130/200	А	96	94	92	90	88	87	86	85
	Б	90	88	86	84	83	82	81	80
	В	84	82	81	79	78	76	75	74
	Г	90	88	86	84	83	82	81	80

Марка битума	Тип смеси	Температура воздуха, °С							
		-20	-10	0	10	20	30	40	50
200/300	А	84	82	81	79	78	76	75	74
	Б	78	76	75	73	72	70	69	68
	В	72	70	68	66	64	63	62	61
	Г	78	76	75	73	72	70	69	68

Из представленных данных таблицы можно сделать выводы, что с повышением температуры воздуха минимальное значение температуры горячей асфальтобетонной смеси независимо от марки битума понижается. С понижением вязкости битума с учетом дорожно-климатического районирования минимальное значение горячей смеси уменьшается. Независимо от марки битума и типа смеси наблюдается общий характер изменения минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси.

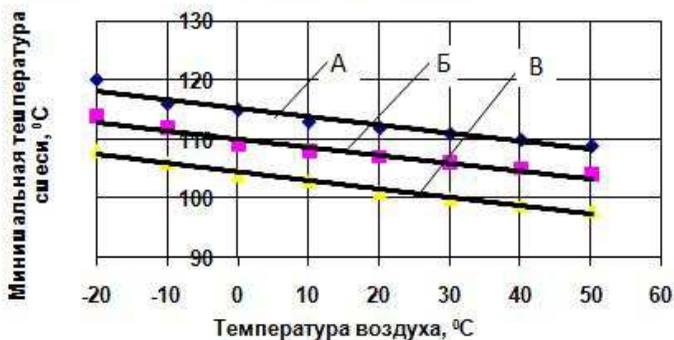
Данные таблицы 10.2 в зависимости от марки битума, представлены на рис. 10.2.

В процессе укладки горячей асфальтобетонной смеси в выбоину в зависимости от разности температур смеси и основания на границе покрытия и свежееуложенной смеси при ее температуре выше минимальной образуется некоторый объем материала с пониженной температурой, что способствует образованию по периметру выбоины объема асфальтобетона с пониженными эксплуатационными параметрами.

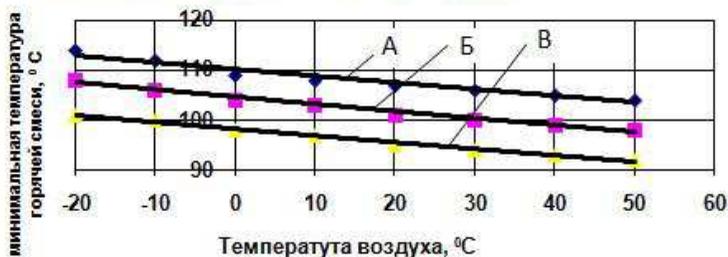
Зависимости ширины зоны материала с пониженной температурой смеси от температуры воздуха для конкретного типа смеси и марки битума представлены на рис. 10.3.

Из представленных зависимостей видно, что ширина зоны материала с пониженной температурой горячей смеси в выбоине, ниже допустимой, зависит от температуры окружающего воздуха и с учетом типа смеси и марки битума находится в интервале от 0 до 4,0 см по периметру выбоины. Образование такой зоны способствует при выполнении ремонтных работ достижению низкого коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси с высоким водонасыщением, что приводит при эксплуатации дороги к разрушению асфальтобетона в выбоине.

а) битум марки 40/60, А, Б, В – тип смеси



б) битум марки 60/90, А, Б, В – тип смеси



в) битум марки 90/130, А, Б, В – тип смеси

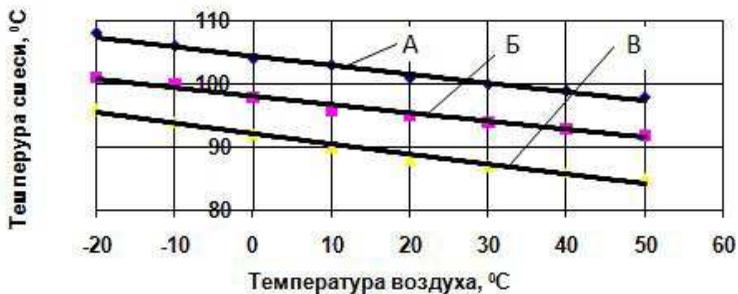


Рис. 10.2. Зависимость минимальной температуры горячей смеси от температуры воздуха в зависимости от марки битума и типа смеси

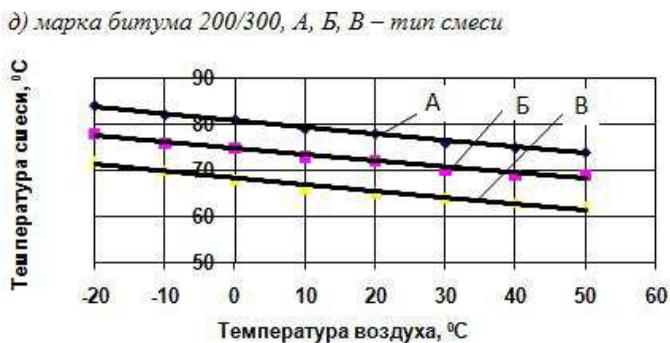
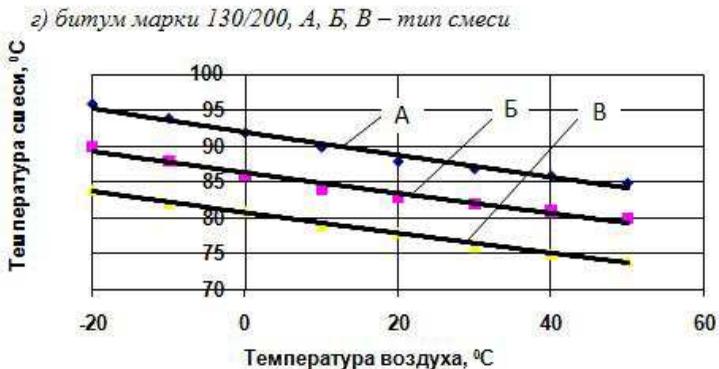


Рис. 10.2. Продолжение

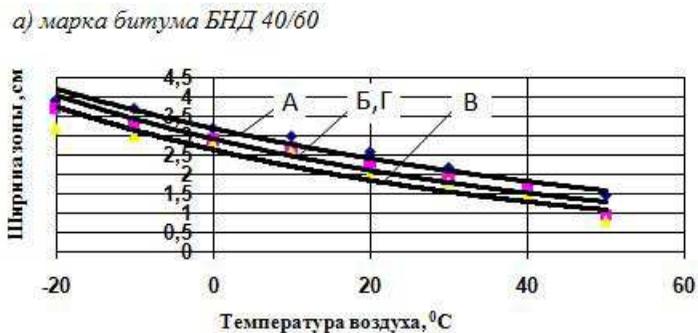
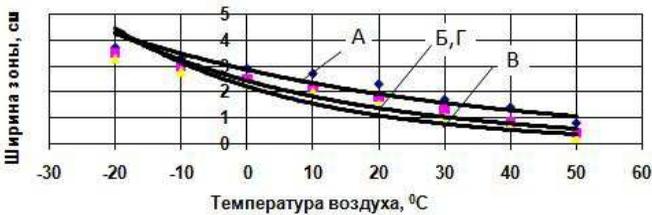


Рис. 10.3. Зависимость ширины зоны материала с температурой смеси ниже минимально предельной для конкретного типа смеси и марки битума

б) марка битума БНД 60/90



в) марка битума БНД 90/130

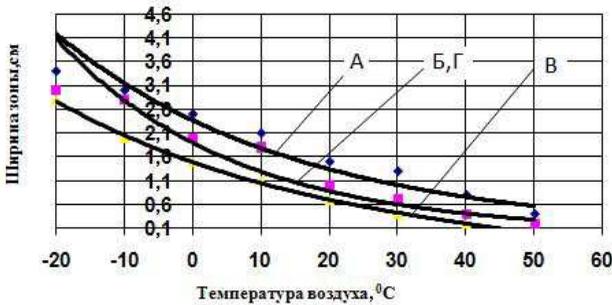


Рис. 10.3. Продолжение

При работе с горячими асфальтобетонными смесями температурные режимы и продолжительность выполнения работ зависят от скорости ветра. В зависимости от скорости ветра имеются ограничения на производство работ с горячими асфальтобетонными смесями. При понижении температуры воздуха разрешается укладывать горячую асфальтобетонную смесь на подготовленное основание при условии, что скорость ветра не превышает пределов, указанных в табл. 9.5 [6]. Введенное ограничение связано с интенсивной отдачей тепла в окружающую среду при укладке горячей смеси небольшим слоем на значительной поверхности покрытия, что способствует повышению темпа охлаждения горячей смеси и снижению продолжительности устройства покрытия.

При выполнении работ по устранению выбоин на дорожных покрытиях ввиду небольших объемов укладываемых асфальтобетонных смесей, скорость ветра влияет на темп охлаждения горячей смеси, но в меньшей степени, чем при устройстве дорожных покрытий.

В таблице 10.3 представлены допустимые скорости ветра при производстве ремонтных работ в зависимости от типа смеси и марки битума, полученные по результатам моделирования тепловых процессов в горячих смесях при укладке их в выбоину.

10.3. Значения допустимых скоростей ветра, обеспечивающих достижение требуемых эксплуатационных параметров асфальтобетона при производстве ремонтных работ дорожных покрытий

Марка битума	Температура воздуха, °С			
	+10	0	-5	-10
<i>Тип смеси А</i>				
40/60	7	4	2	2
60/90	8	6	6	4
90/130	8	8	8	6
130/200	10	8	6	4
200/300	10	10	8	8
<i>Тип смеси Б</i>				
40/60	0	0	0	-
60/90	4	2	0	0
90/130	6	4	2	2
130/200	7	4	3	2
200/300	10	8	6	7
<i>Тип смеси В</i>				
40/60	3	2	2	1
60/90	5	3	3	3
90/130	7	5	5	4
130/200	8	5	4	4
200/300	9	7	7	6
<i>Тип смеси Г</i>				
40/60	4	2	2	2
60/90	6	4	4	4
90/130	8	6	6	4
130/200	10	6	5	5
200/300	10	8	5	6

На основании полученных результатов моделирования тепловых процессов в уложенной горячей асфальтобетонной смеси в выбоину дорожного покрытия можно сделать вывод, что в зависимости от типа смеси и марки битума, производство ремонтных работ можно выполнять при более высоких скоростях перемещения воздушных масс.

Установлено, что для устранения образующихся зон горячего асфальтобетона с пониженной температурой смеси после укладки в выбоину необходимо осуществлять прогрев поверхности выбоины покрытия перед укладкой смеси. Включение в технологию ремонтных работ такой операции позволит снизить температуру поставляемой горячей смеси к месту производства работ, а также обеспечивает требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетона в выбоине при правильном подборе уплотняющих машин. Численное значение температуры нагрева поверхности выбоины дорожного покрытия в зависимости от температуры смеси при доставке к месту производства ремонтных работ и температуры окружающего воздуха представлено в табл. 10.4.

10.4. Зависимость нагрева поверхности выбоины от температуры смеси и температуры воздуха

Тип смеси	Марка битума	Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания	Допустимая продолжительность работ, мин
А	40/60	$t_{\text{осн}} = 361,43e^{-0,0113t_{\text{см}}-0,0024t_{\text{возд}}}$	$t = 11,63e^{0,0064t_{\text{возд}}}$
	60/90	$t_{\text{осн}} = 609,03e^{-0,0165t_{\text{см}}-0,004t_{\text{возд}}}$	$t = 13,16e^{0,0068t_{\text{возд}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 488,57e^{-0,019t_{\text{см}}}$	$t = 13,285e^{0,0094t_{\text{возд}}}$
	200/300	$t_{\text{осн}} = 1675,9e^{-0,0359t_{\text{см}}}$	$t = 16,484e^{0,0099t_{\text{возд}}}$
Б	40/60	$t_{\text{осн}} = 619,81e^{-0,0166t_{\text{см}}-0,004t_{\text{возд}}}$	$t = 13,16e^{0,0068t_{\text{возд}}}$
	60/90	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026t_{\text{см}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092t_{\text{см}}}$
	200/300	$t_{\text{осн}} = -139,01\ln(t_{\text{см}}) + 675,91$	$t_{\text{осн}} = 18,423e^{0,0112t_{\text{см}}}$

Тип смеси	Марка битума	Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания	Допустимая продолжительность работ, мин
В	40/60	$t_{\text{осн}} = 875,03e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,0044t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 14,05e^{0,0073t_{\text{см}}}$
	60/90	$t_{\text{осн}} = 1407,35e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1676,92e^{-0,0275t_{\text{см}}-0,0063t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 16,289e^{0,0088t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 1196,3e^{-0,033t_{\text{см}}}$	$t_{\text{осн}} = 16,484e^{0,0099t_{\text{см}}}$
	200/300	$t_{\text{осн}} = -116,46\ln(t_{\text{см}}) + 560,25$	$t_{\text{осн}} = 19,146e^{0,0122t_{\text{см}}}$
Г	40/60	$t_{\text{осн}} = 619,81e^{-0,0166t_{\text{см}}-0,004t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 13,16e^{0,0068t_{\text{см}}}$
	60/90	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 14,05e^{0,0073t_{\text{см}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026t_{\text{см}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092t_{\text{см}}}$
	200/300	$t_{\text{осн}} = -139,01\ln(t_{\text{см}}) + 675,91$	$t_{\text{осн}} = 18,372e^{0,0109t_{\text{см}}}$

Технологические режимы производства работ с использованием горячих смесей различаются режимами укладки и уплотнения для одного и того же типа смеси.

Установлено, что для I дорожно-климатической зоны необходимо применять плотные и высокоплотные горячие асфальтобетонные смеси типов А, Б, В и Г. В качестве вяжущего материала рекомендуется применять битум марок БНД 90/130, БНД 130/200 и БНД 200/300.

Для II и III дорожно-климатических зон рекомендуются плотные и высокоплотные асфальтобетоны типов А, Б, В, Г и Д, приготовленные на битумах марок БНД 60/90, БНД 90/130 и БНД 130/200.

Для IV и V дорожно-климатических зон рекомендуются высокоплотные асфальтобетоны типов А, Б, В, Г и Д, приготовленные на битумах марок БНД 40/60, БНД 60/90.

I дорожно-климатическая зона. При производстве ремонтных работ по устранению выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа минимальная температура доставляемой горячей смеси, в зависимости от ее типа и марки битума, при доставке к месту производства работ

должна быть выше, чем указанные значения температуры на рис. 10.4. Использование горячих асфальтобетонных смесей с более низкой температурой (без подогрева поверхности выбоины) не обеспечивает требуемых эксплуатационных показателей асфальтобетона в выбоине.

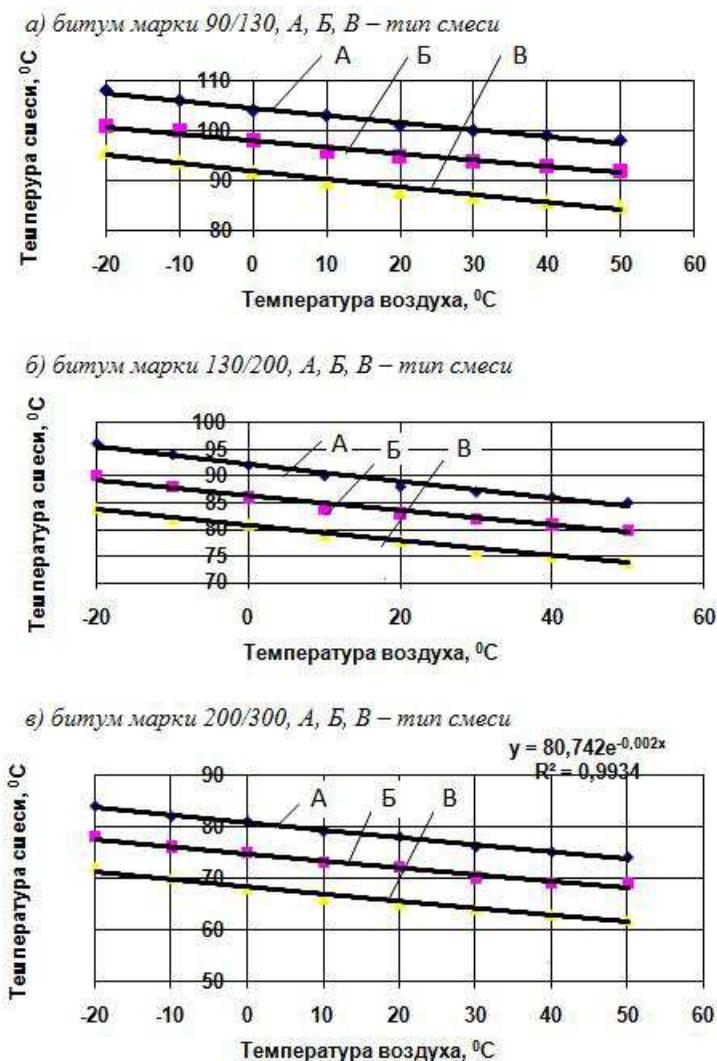
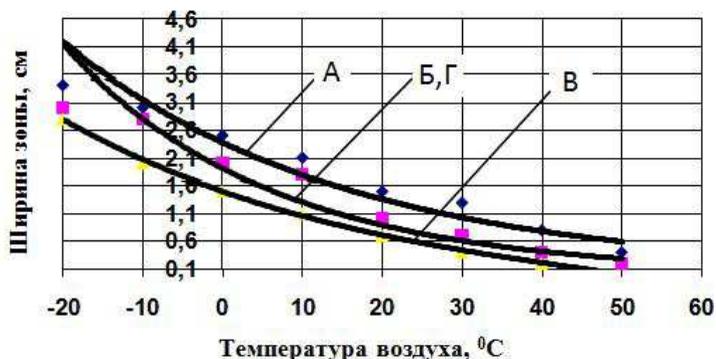


Рис. 10.4. Зависимость минимальной температуры горячей смеси от температуры воздуха в зависимости от марки битума и типа смеси

Применение горячих асфальтобетонных смесей с температурой выше минимально допустимой способствует образованию на контакте выбоины и поверхности покрытия смеси с пониженной температурой. Ширина зоны по периметру выемки с пониженной температурой смеси зависит от температуры воздуха и температуры укладываемой горячей смеси.

На рисунке 10.5 представлены зависимости ширины зоны с пониженной температурой смеси в выбоине при ее укладке с учетом марки битума.

а) марка битума БНД 90/130



б) марка битума 130/200

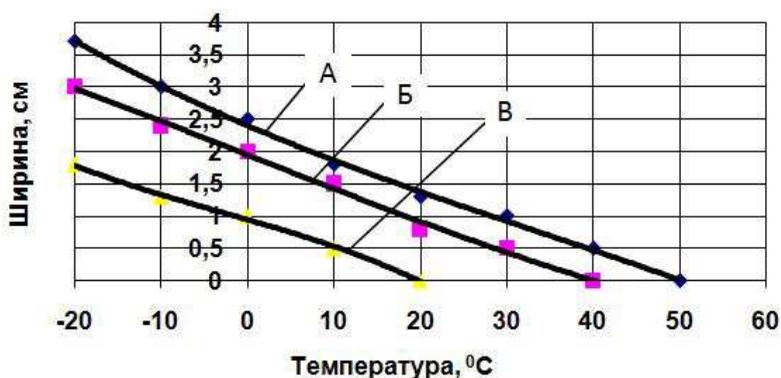


Рис. 10.5. Ширины зоны с пониженной температурой смеси от температуры воздуха в зависимости от типа смеси и марки битума

в) марка битума 200/300

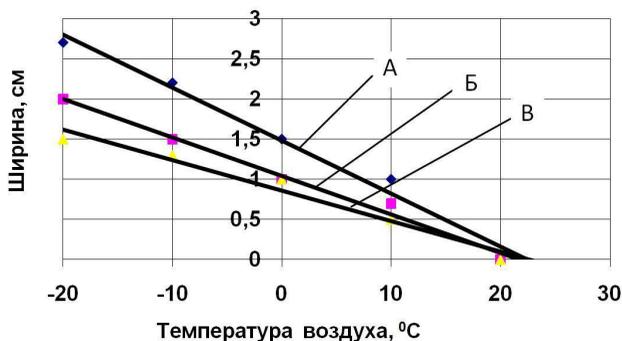


Рис. 10.5. Продолжение

Для обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении горячей смеси в выбоине продолжительность работ не должна превышать времени, указанного в табл. 10.5. При начале производства работ по укладке и уплотнению горячей асфальтобетонной смеси за пределом указанного в таблице времени ширина зоны материала с пониженной температурой смеси возрастает.

Выполнение работ с применением горячих асфальтобетонных смесей допускается при скорости ветра, обеспечивающей соблюдение температурных режимов при их укладке и уплотнении (табл. 10.6).

10.5. Продолжительность укладки и уплотнения горячей асфальтобетонной смеси при производстве ремонтных работ выбоин дорожного покрытия (мин)

Тип смеси	Марка битума	Температура воздуха, °C						
		-20	-10	0	10	20	30	40
А	90/130	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	130/200	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	17,5	20,0
	200/300	14,0	15,0	16,0	17,5	20,0	22,5	25,0
Б	90/130	13,5	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	21,0
	130/200	13,0	13,5	14,0	16,0	17,5	20,0	22,5
	200/300	15,0	17,0	18,0	20,0	21,5	25,0	30,0

Продолжение табл. 10.5

Тип смеси	Марка битума	Температура воздуха, °С						
		-20	-10	0	10	20	30	40
В	90/130	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	20,0	24,0
	130/200	14,0	15,0	16,0	17,5	20,0	22,5	25,0
	200/300	19,0	17,5	19,0	21,0	24,0	27,5	32,0
Г	90/130	12,0	12,5	13,0	14,0	15,0	147,5	20,0
	130/200	14,0	15,0	16,0	17,5	20,0	225,5	25,0
	200/300	16,0	17,5	19,0	21,0	25,0	27,0	32,0

10.6. Значения допускаемых скоростей ветра при производстве ремонтных работ выбоин дорожного покрытия

Марка битума	Температура воздуха, °С			
	+10	0	-5	-10
<i>Тип смеси А</i>				
90/130	8	7	6	5
130/200	9	6	5	4
200/300	9	8	7	6
<i>Тип смеси Б</i>				
90/130	8	6	6	4
130/200	9	6	5	5
200/300	9	8	5	4
<i>Тип смеси В</i>				
90/130	6	4	2	2
130/200	7	4	3	2
200/300	8	7	6	5

Марка битума	Температура воздуха, °С			
	+10	0	-5	-10
<i>Тип смеси Г</i>				
90/130	8	6	6	4
130/200	9	6	5	5
200/300	9	8	5	4

При выполнении ремонтных работ выбоин дорожного покрытия с прогревом температура нагрева поверхности выбоины покрытия определяется по зависимостям, приведенным в табл. 10.7.

10.7. Зависимости для определения нагрева поверхности выбоины в зависимости от температуры поставляемой горячей смеси к месту производства работ и температуры окружающего воздуха

Тип смеси	Марка битума	Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания	Допустимая продолжительность работ, мин
А	60/90	$t_{\text{осн}} = 609,03e^{-0,0165t_{\text{см}}-0,004t_{\text{возд}}}$	$t = 13,16e^{0,0068t_{\text{возд}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 488,57e^{-0,019t_{\text{см}}}$	$t = 13,285e^{0,0094t_{\text{возд}}}$
Б	60/90	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026t_{\text{см}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092t_{\text{см}}}$
В	60/90	$t_{\text{осн}} = 1407,35e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1676,92e^{-0,0275t_{\text{см}}-0,0063t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 16,289e^{0,0088t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 1196,3e^{-0,033t_{\text{см}}}$	$t_{\text{осн}} = 16,484e^{0,0099t_{\text{см}}}$

Тип смеси	Марка битума	Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания	Допустимая продолжительность работ, мин
Г	60/90	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026t_{\text{см}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092t_{\text{см}}}$

Ц, Ш дорожно-климатические зоны. Для ремонтных работ дорожных покрытий нежесткого типа используются горячие асфальтобетонные смеси, приготовленные на битумах марок БНД 60/90, 90/130 и 130/200. С учетом погодных условий для этих климатических зон при приготвлении горячих асфальтобетонных смесей широкое применение получили битумы марки БНД 60/90.

На рисунке 10.6 представлены зависимости минимальной температуры поставляемой горячей смеси к месту производства работ для разных типов смеси с учетом марки битума и температуры окружающего воздуха, ниже которой применение асфальтобетонной смеси без нагрева поверхности выбоины, не допускается.

При использовании горячих асфальтобетонных смесей без прогрева поверхности выбоины с температурой выше минимально допустимой в зоне контакта выбоины и поверхности покрытия возникает

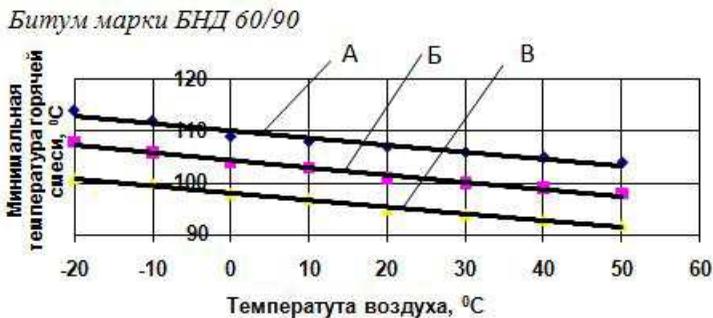


Рис. 10.6. Зависимость минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси от температуры воздуха с учетом марки битума и типа смеси

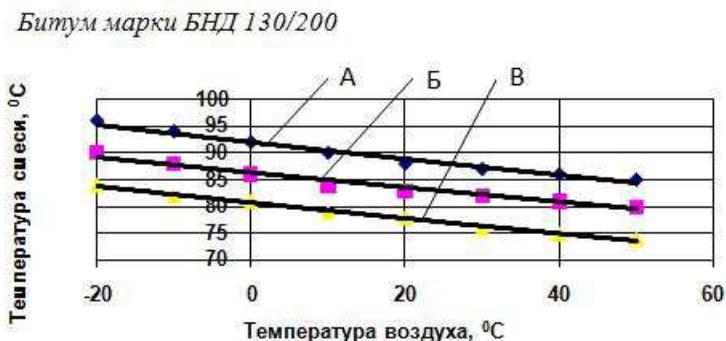
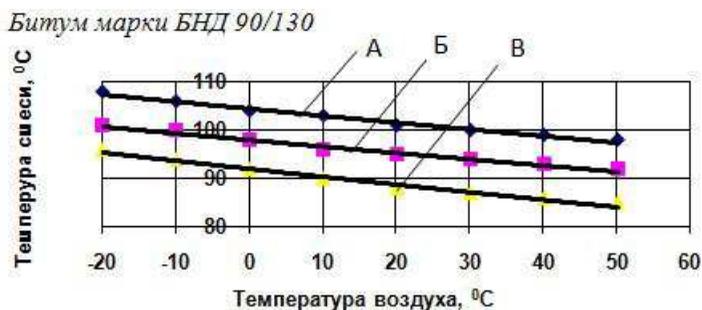


Рис. 10.6. Продолжение

зона с пониженной температурой смеси. Ширина такой зоны зависит от температуры воздуха и температуры укладываемой горячей смеси.

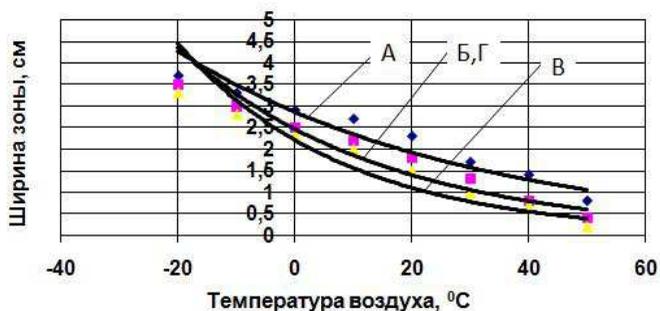
На рисунке 10.7 представлены зависимости ширины зоны с пониженной температурой смеси в выбоине при ее укладке с учетом марки битума и в соответствии с требованиями нормативных документов.

В зависимости от погодных условий продолжительность ремонтных работ для данной дорожно-климатической зоны находится в пределах от 11,5 до 22,5 мин. Продолжительность работ в зависимости от погодных условий, типа смеси и марки битума можно определить на основе данных табл. 10.8.

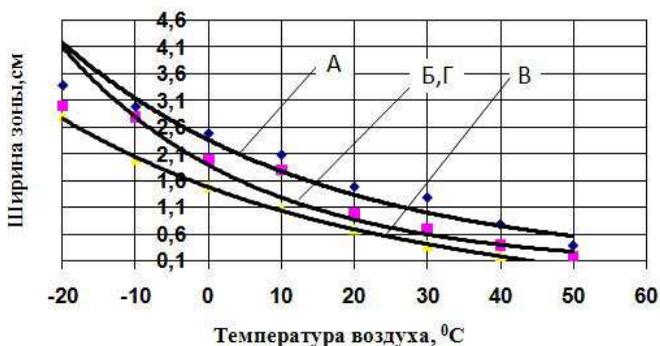
Значения допустимых скоростей ветра, обеспечивающих достижение требуемых температурных режимов горячей смеси при укладке и уплотнении в выбоине дорожного покрытия представлено в табл. 10.9.

При выполнении ремонтных работ выбоин с прогревом поверхности покрытия температура нагрева поверхности выбоины определяется по зависимостям, представленным в табл. 10.10.

Марка битума БНД 60/90



Марка битума БНД 90/130



Марка битума 130/200

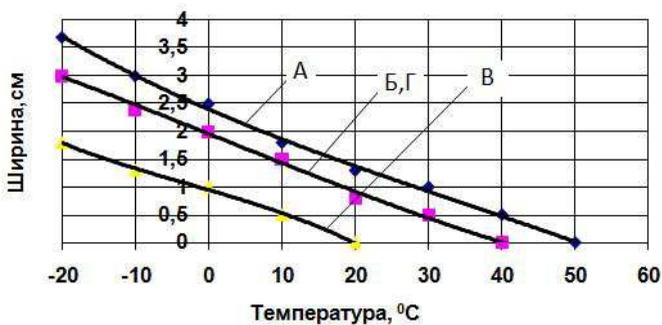


Рис. 10.7. Зависимость ширины зоны с пониженной температурой смеси ниже предельно допустимой (А, Б, В и Г – тип смеси)

10.8. Продолжительность укладки и уплотнения горячей асфальтобетонной смеси при производстве ремонтных работ выбоин дорожного покрытия (мин)

Тип смеси	Марка битума	Температура воздуха, °С						
		-20	-10	0	10	20	30	40
А	60/90	11,5	12,5	13,0	14,0	14,5	15,0	17,5
	90/130	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	130/200	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	17,5	20,0
Б	60/90	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	90/130	13,5	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	21,0
	130/200	13,0	13,5	14,0	16,0	17,5	20,0	22,5
В	60/90	13,5	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	21,0
	90/130	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	20,0	24,0
	130/200	14,0	15,0	16,0	17,5	20,0	22,5	25,0
Г	60/90	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	90/130	13,5	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	21,0
	130/200	13,0	13,5	14,0	16,0	17,5	20,0	22,5

10.9. Значения допустимых скоростей ветра при ремонте выбоин дорожного покрытия

Марка битума	Температура воздуха, °С			
	+10	0	-5	-10
<i>Тип смеси А</i>				
60/90	4	2	0	0
90/130	6	4	2	2
130/200	7	4	3	2

Продолжение табл. 10.9

Марка битума	Температура воздуха, °С			
	+10	0	-5	-10
<i>Тип смеси Б</i>				
60/90	8	6	6	4
90/130	8	8	8	6
130/200	10	8	6	4
<i>Тип смеси В</i>				
60/90	6	4	4	4
90/130	8	6	6	4
130/200	10	6	5	5
<i>Тип смеси Г</i>				
60/90	6	4	4	4
90/130	8	6	6	4
130/200	10	6	5	5

10.10. Зависимости для определения нагрева поверхности выбоины в зависимости от температуры поставляемой горячей смеси к месту производства работ и температуры окружающего воздуха

Тип смеси	Марка битума	Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания	Допустимая продолжительность работ, мин
А	60/90	$t_{\text{осн}} = 609,03e^{-0,0165t_{\text{см}} - 0,004t_{\text{возд}}}$	$t = 13,16e^{0,0068t_{\text{возд}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}} - 0,044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 488,57e^{-0,019t_{\text{см}}}$	$t = 13,285e^{0,0094t_{\text{возд}}}$

Продолжение табл. 10.10

Тип смеси	Марка битума	Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания	Допустимая продолжительность работ, мин
Б	60/90	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026t_{\text{см}}}$	$t = 15,036e^{0,0092t_{\text{см}}}$
В	60/90	$t_{\text{осн}} = 1407,35e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1676,92e^{-0,0275t_{\text{см}}-0,0063t_{\text{возд}}}$	$t = 16,289e^{0,0088t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 1196,3e^{-0,033t_{\text{см}}}$	$t = 16,484e^{0,0099t_{\text{см}}}$
Г	60/90	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
	90/130	$t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
	130/200	$t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026t_{\text{см}}}$	$t = 15,036e^{0,0092t_{\text{см}}}$

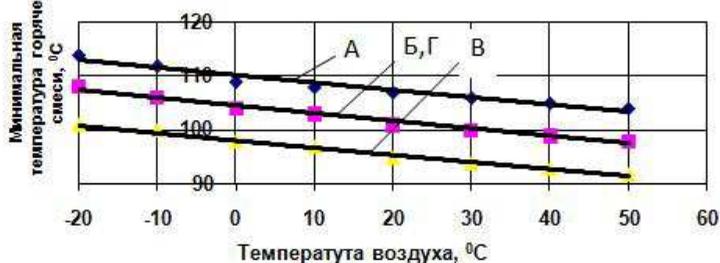
IV, V дорожно-климатические зоны. Эти дорожно-климатические зоны характеризуются высокими температурами окружающего воздуха, что предъявляет определенные требования к применяемым битумам для приготовления горячих асфальтобетонных смесей. Для таких зон рекомендуются битумы марок БНД 40/60 и БНД 60/90, характеризующиеся высокой вязкостью.

На рисунке 10.8 представлены значения минимальных температур горячей смеси при доставке к месту производства работ.

Применение асфальтобетонных смесей при производстве ремонтных работ с температурой выше минимально допустимой без прогрева поверхности выбоины способствует возникновению в зоне контакта выбоины и поверхности покрытия зоны с пониженной температурой смеси. Ширина такой зоны зависит от температуры воздуха и температуры укладываемой горячей смеси.

На рисунке 10.9 представлены зависимости ширины зоны с пониженной температурой смеси в выбоине при укладке горячей смеси с учетом марки битума и типа смеси.

а) битум марки БНД 40/60, А,Б,В,Г – тип асфальтобетонной смеси



б) битум марки БНД 60/90, А,Б,В,Г – тип асфальтобетонной смеси

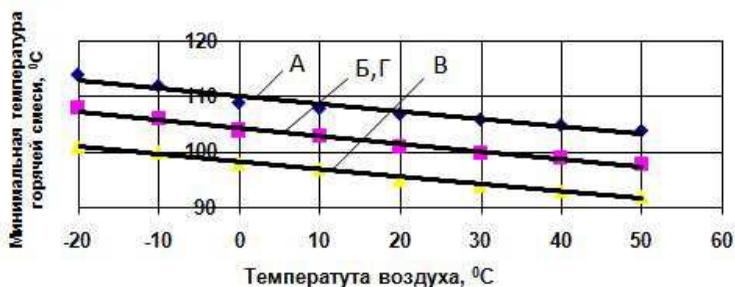


Рис. 10.8. Зависимость минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси от температуры воздуха, марки и типа смеси

а) марка битума БНД 40/60, А,Б,В,Г – тип асфальтобетонной смеси

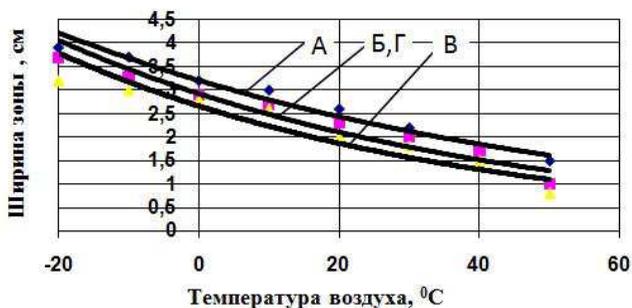


Рис. 10.9. Зависимость ширины зоны с пониженной температурой смеси от температуры воздуха, марки битума и типа смеси

б) марка битума БНД 60/90, А,Б,В,Г – тип асфальтобетонной смеси

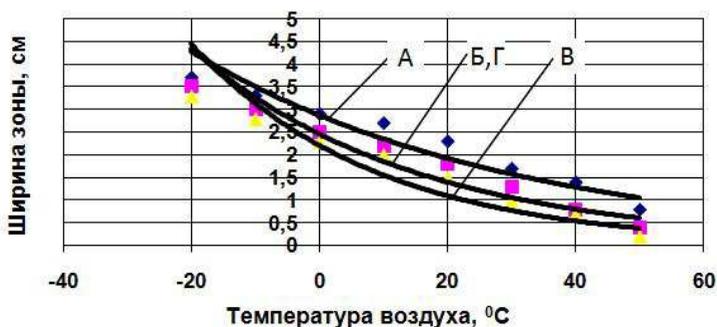


Рис. 10.9. Продолжение

С учетом погодных условий продолжительность ремонтных работ для данной дорожно-климатической зоны находится в пределах от 10 до 21 мин в зависимости от типа смеси и марки битума. Продолжительность работ в зависимости от погодных условий, типа смеси и марки битума, можно определить на основе данных табл. 10.11.

10.11. Продолжительность укладки и уплотнения горячей асфальтобетонной смеси при производстве ремонтных работ выбоин дорожного покрытия (мин)

Тип смеси	Марка битума	Температура воздуха, °C						
		-20	-10	0	10	20	30	40
А	40/60	10,0	11,0	12,0	12,5	13,0	13,5	15,0
	60/90	11,5	12,5	13,0	14,0	14,5	15,0	17,5
Б	40/60	11,5	12,5	13,0	14,0	14,5	15,0	17,5
	60/90	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
В	40/60	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0
	60/90	13,5	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	21,0
Г	40/60	11,5	12,5	13,0	14,0	14,5	15,0	17,5
	60/90	12,5	13,0	13,5	15,0	16,5	17,5	19,0

С учетом высокой вязкости вяжущего материала и высокой температуры смеси при производстве работ большое влияние на процесс охлаждения смеси оказывает скорость ветра. Значения допустимых скоростей ветра, обеспечивающих достижение требуемых температурных режимов горячей смеси при укладке и уплотнении в выбоине дорожного покрытия, представлены в табл. 10.12.

Соблюдение температурных режимов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей позволяет обеспечить требуемые показатели качества работы, как при устройстве, так и при ремонте дорожных покрытий нежесткого типа. Установлено, что при укладке горячей смеси в выбоину дорожного покрытия за счет разницы температуры горячей смеси и покрытия, несмотря на высокую температуру окружающего воздуха, возникает зона с пониженной температурой смеси, что влияет на эксплуатационные показатели асфальтобетона в зоне контакта выбоины с дорожным покрытием. Для обеспечения температурных режимов при ремонте выбоин на дорожном покрытии при

10.12. Значения допустимых скоростей ветра, обеспечивающих достижение требуемых температурных режимов горячей смеси при производстве ремонтных работ дорожных покрытий

Марка битума	Температура воздуха, °С			
	+10	0	-5	-10
<i>Тип смеси А</i>				
40/60	0	0	0	–
60/90	4	2	0	0
<i>Тип смеси Б</i>				
40/60	4	2	2	2
60/90	6	4	4	4
<i>Тип смеси В</i>				
40/60	7	4	2	2
60/90	8	6	6	4
<i>Тип смеси Г</i>				
40/60	4	2	2	2
60/90	6	4	4	4

температуре окружающего воздуха до +25 °С, необходимо осуществлять прогрев поверхности выбоины.

В таблице 10.13 представлены зависимости, позволяющие определить температуру нагрева поверхности выбоины.

10.13. Зависимости для определения нагрева поверхности выбоины в зависимости от температуры поставляемой горячей смеси к месту производства работ и температуры окружающего воздуха

Тип смеси	Марка битума	Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания	Допустимая продолжительность работ, мин
А	40/60	$t_{\text{осн}} = 361,43e^{-0,0113t_{\text{см}}-0,0024t_{\text{возд}}}$	$t = 11,63e^{0,0064t_{\text{возд}}}$
	60/90	$t_{\text{осн}} = 609,03e^{-0,0165t_{\text{см}}-0,004t_{\text{возд}}}$	$t = 13,16e^{0,0068t_{\text{возд}}}$
Б	40/60	$t_{\text{осн}} = 619,81e^{-0,0166t_{\text{см}}-0,004t_{\text{возд}}}$	$t = 13,16e^{0,0068t_{\text{возд}}}$
	60/90	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{возд}}}$
В	40/60	$t_{\text{осн}} = 875,03e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,0044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{см}}}$
	60/90	$t_{\text{осн}} = 1407,35e^{-0,0262t_{\text{см}}-0,006t_{\text{возд}}}$	$t = 15,204e^{0,0075t_{\text{см}}}$
Г	40/60	$t_{\text{осн}} = 619,81e^{-0,0166t_{\text{см}}-0,004t_{\text{возд}}}$	$t = 13,16e^{0,0068t_{\text{см}}}$
	60/90	$t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207t_{\text{см}}-0,044t_{\text{возд}}}$	$t = 14,05e^{0,0073t_{\text{см}}}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение требований к качеству строительства автомобильных дорог предъявляют высокие требования к производству работ по укладке и уплотнению дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей. Добиться требуемого качества строительства покрытий возможно при соблюдении технологических режимов производства работ, правильном выборе применяемого оборудования и материалов. Обеспечение требуемых температурных режимов при укладке и уплотнении горячих смесей с учетом их свойств и соответствии им силовых параметров уплотняющих машин позволяет повысить качество строительства дорожных покрытий.

Предложенная методика разработки технологических процессов строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей позволяет учитывать свойства применяемых смесей и с их учетом выбирать параметры уплотняющих машин. Возможность определения продолжительности строительства дорожных покрытий и определение длительности операций по укладке и уплотнению смесей с учетом влияния разных факторов позволяет организовать во времени производственный процесс.

Широкое применение при ремонте выбоин на дорожных покрытиях дорог получил метод ремонта с применением горячих асфальтобетонных смесей, позволяющий достичь требуемых эксплуатационных параметров асфальтобетона и обеспечить заданный срок службы покрытия. Анализ применяемых технологий с использованием горячих асфальтобетонных смесей показал, что низкому качеству работ способствуют несоблюдение температурных режимов при укладке и уплотнении применяемых смесей, условий производства работ и недостаточное их уплотнение.

Полученные результаты могут быть использованы как при проектировании технологии устройства покрытий из горячих смесей, так и при их строительстве и ремонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алиев, А. М.** Асфальтобетон в условиях жаркого климата. – Баку, 1980. – 112 с.
2. **Артемьев, К. А.** Дорожные машины. Машины для устройства дорожных покрытий. – М. : Машиностроение, 1982. – 349 с.
3. **Бадалов, В. В.** Изменение температуры асфальтобетона в процессе уплотнения / В. В. Бадалов, А. Ф. Зубков // Автомобильные дороги. – 1973. – № 9.
4. **Богословский В. Н.** Строительная теплофизика. – М. : Высшая школа, 1970. – С. 197.
5. **Варганов, С. А.** Теоретические и экспериментальные исследования динамики вибрационных катков // Труды ВНИИ СтройДОРМАШ. – 1962. – № 28.
6. **Васильев, А. П.** Строительство и реконструкция автомобильных дорог. СЭД. Т. I / под ред. А. П. Васильева. – М. : Информавтодор, 2005. – С. 207.
7. **Васильев, А. П.** Ремонт и содержание автомобильных дорог. Т. II / под ред. А. П. Васильева. – М. : Информавтодор, 2004. – 505 с.
8. **Горельшев, Н. Г.** Технология и организация строительства автомобильных дорог / под ред. Н. Г. Горельшева. – М. : Интеграл, 2013. – 551 с.
9. **Гиясов, Б. И.** Расчет температуры асфальтобетона при устройстве стыков многополосных дорожных покрытий нежесткого типа / Б. И. Гиясов, Р. В. Куприянов, К. А. Андрианов, А. Ф. Зубков // Вестник МГСУ. – 2015. – № 3. – С. 17 – 28.
10. **Гиясов, Б. И.** Определение температуры нагрева поверхности выбоины дорожного покрытия при производстве работ с применением горячих асфальтобетонных смесей / Б. И. Гиясов, Р. В. Куприянов, К. А. Андрианов, А. Ф. Зубков // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 118 – 127.
11. **Дорожный асфальтобетон** / Л. Б. Гезенцвей, Н. В. Горельшев, А. М. Богуславский, И. В. Королев ; под ред. Л. Б. Гезенцвея. – М. : Транспорт, 1976. – С. 32.
12. **Емельянов, Р. Т.** Исследование процесса уплотнения асфальтобетонной смеси по ширине укладки / Р. Т. Емельянов, А. П. Прокопьев, А. С. Климов // СДМ. – 2009. – № 7. – С. 1 – 5.
13. **Иноземцев, А. А.** Битуминозные материалы. – Л. : Изд-во литературы по строительству, 1972. – С. 94.
14. **Ищенко, И. С.** Технология устройства и ремонта асфальтобетонных покрытий / И. С. Ищенко, Т. Н. Калашникова, Д. А. Семенов. – М. : Аир-Арт, 2001.
15. **Зубков, А. Ф.** Технология устройства дорожных покрытий с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2006. – 151 с.
16. **Зубков, А. Ф.** Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. – М. : Машиностроение, 2009. – 223 с.
17. **Зубков, А. Ф.** Моделирование и расчет температурных режимов дорожных одежд нежесткого типа в нестационарных условиях : св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613129. – М., 2006.

18. **Зубков, А. Ф.** Влияние условий производства работ на длину полосы укладки асфальтобетонных смесей при устройстве многополосных дорожных покрытий / А. Ф. Зубков, К. А. Андрианов, Р. В. Куприянов // Строительство и архитектура. – 2016. – № 3(43). – С. 43 – 55.
19. **Зубков, А. Ф.** Моделирование процесса строительства покрытий и выбор параметров машин для укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей : св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610903 / А. Ф. Зубков, Вл. П. Подольский, В. П. Берестов. – М., 2007.
20. **Зубков, А. Ф.** О нестационарной теплопередаче в процессах строительства дорожных покрытий нежесткого типа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2007. – Т. 13, № 2. – С. 589 – 597.
21. **Зубков, А. Ф.** Методика разработки технологических процессов строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей (реферат препринта № 18) // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2007. – Т. 13, № 1. – С. 194 – 196.
22. **Зубков, А. Ф.** Устройство покрытий при пониженных температурах воздуха // Жилищное строительство. – 2007. – № 1. – С. 30 – 32.
23. **Зубков, А. Ф.** Моделирование взаимодействия жесткого вальца с уплотняемым материалом и расчет напряжений в зоне контакта : св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610827. – М., 2007.
24. **Зубков, А. Ф.** Расчет параметров инфракрасных разогревателей для асфальтобетонного покрытия : св-во о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2015616928 / А. Ф. Зубков, Р. В. Куприянов. – М., 2015.
25. **Зубков, А. Ф.** Расчет температуры горячего асфальтобетона в ограниченном объеме выемки дорожного покрытия : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661215/ А. Ф. Зубков, О. А. Хребтова, В. Н. Матвеев, Е. Ю. Евсеев. – М., 2013.
26. **Ереско, С. П.** Технология ремонта асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / С. П. Ереско, С. Ф. Зяблов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 28 – 30.
27. **Евсеев, Е. Ю.** Влияние технологии работ на эксплуатационные показатели асфальтобетонного покрытия // Механизация строительства. – 2011. – № 1. – С. 25–26.
28. **Ложечко, В. П.** Уплотняющие машины / В. П. Ложечко, А. А. Шестопалов, В. П. Окунев, Р. Д. Окулов. – Рыбинск : Рыбинский дом печати, 2004. – 78 с.
29. **Локшин, Е. С.** Выбор рациональных режимов работы и областей применения комплекса самоходных катков при строительстве асфальтобетонных покрытий. – М. : МАДИ, 1984.
30. **Крони, Д.** Растрескивание покрытий из битумоминеральных смесей на укрепленных цементом основаниях и нижних слоях основания. – Кроутори, Англия, 1969. Перевод СоюздорНИИ, № 594. – М., 1970.
31. **Куприянов, Р. В.** Моделирование процесса охлаждения асфальтобетонной смеси при устройстве многополосных покрытий нежесткого типа : св-во о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2014660637. – М., 2014.

32. **Маслов, А. Г.** Исследование параметров вибрационного оборудования для уплотнения асфальтобетонных смесей : автореф. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1973.
33. **Прочность** и долговечность асфальтобетона / под ред. Б. И. Ладыгина. – Минск : Изд-во Наука и техника, 1972. – С. 187.
34. **Пермяков, В. Б.** Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Строительные материалы. – 2005. – № 10. – С. 8–9.
35. **Протодяконов, М. М.** Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протодяконов, Р. И. Тедер. – М. : Наука, 1970.
36. **Подольский, Вл. П.** Технология и организация строительства автомобильных дорог. Т. 2. Дорожные покрытия / под ред. Вл. П. Подольского. – М. : Академия, 2012. – 297 с.
37. **Ушаков, В. В.** Строительство автомобильных дорог / В. В. Ушаков, В. М. Ольховиков. – М., 2013. – 576 с.
38. **Хархута, Н. Я.** Дорожные машины / Н. Я. Хархута, М. И. Капустин, В. П. Семенов, И. Э. Эвентов ; под ред. Н. Я. Хархута. – Л. : Машиностроение, 1976.
39. **Якунин, О. А.** Исследование процесса охлаждения слоев асфальтобетонных смеси : сб. науч. трудов СоюздорНИИ / О. А. Якунин, Н. В. Горелышев. – М., 1972. – 132 с.
40. **ГОСТ 9128.** Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромы и асфальтобетон. Технические условия.
41. **ГОСТ Р 50597.** Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения.
42. **Государственная служба** дорожного хозяйства министерства транспорта РФ : руководство по производству работ дорожным мастером (при содержании и ремонте автомобильных дорог). – М., 2001. – 48 с.
43. **Департамент** строительства : инструкция по строительству дорожных асфальтобетонных покрытий. ВСН 14-95. – М, 1995. – 42 с.
44. **ОДМД.** Методические рекомендации по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования. Утв. Минтранспорта РФ от 17.03.2004 г. № ОС-28/1270 ИС. – М., 2004. – 131 с.
45. **СП 34.13330.2011.** Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02–85.
46. **СП 78.13330.2012.** Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.03.06.85 Автомобильные дороги.
47. **СП 42.13330.2016.** Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01–89.
48. **СНиП 3.03.06.85.** Автомобильные дороги.
49. **Технические рекомендации** по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона. ТР 103-00 М ГУП НИИ Мосстрой 2000, 43 с.
50. **Compaction** at the Longitudinal Construction Joint in Asphalt Pavements / L. John Fleckenstein, David L. Allen, David B. Schultz. – Kentucky Transportation Center, May 2002.

51. **Density** Evaluation of the Longitudinal Construction Joint of Hot-mix Asphalt Pavements / Cindy K. Estakhri, Thomas J. Freeman, and Clifford H. Spiegelman. – Texas Transportation Institute, August 2000.
52. **Loos H.**, Paulmann G. Bituminöser Strassenbau in Winter // Strasse und Autobahn. – 1967. – 18. – № 9.
53. **Зубков, А. Ф.** Расчет температурных режимов укладки горячей асфальтобетонной смеси в дорожное покрытие при проведении «ямочного» ремонта : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611954 / А. Ф. Зубков, К. А. Андрианов, А. М. Макаров, А. С. Егоров. – М., 2016.
54. **Сазонов, Э. В.** Экологические проблемы современного градостроительства / Э. В. Сазонов, В. И. Леденев, Г. Л. Леденева // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2016. – № 4(62). – С. 53 – 60.
55. **Зубков, А. Ф.** Определение возможной продолжительности уплотнения покрытий нежесткого типа при строительстве автомобильных дорог // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 3–2. – С. 806 – 817.
56. **Зубков, А. Ф.** Анализ методов разработки технологических процессов уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4-2. – С. 1158 – 1161.
57. **The effect** of modifying additives on the consistency and properties of bitumen binders / A. Plewa, P. S. Belyaev, K. A. Andrianov, A. F. Zubkov, V. A. Frolov // Advanced Materials and Technologies. – 2016. – № 4. – С. 35 – 40.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Выбор материала для дорожного покрытия с учетом требований к эксплуатационным показателям автомобильной дороги	5
1.1. Требования нормативных документов к транспортно-эксплуатационному состоянию автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа	9
1.2. Влияние технологии устройства дорожных покрытий на выбор машин для укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей	11
1.3. Влияние свойств материала на параметры контакта вальца катка с уплотняемым материалом	20
2. Влияние температуры асфальтобетонных смесей на качество строительства при их укладке и уплотнении в дорожное покрытие	28
2.1. Влияние температуры на технологию строительства покрытий нежесткого типа с применением асфальтобетонных смесей	28
2.2. Влияние температуры на деформационно-прочностные характеристики асфальтобетонных смесей	37
3. Влияние технологии и климатических факторов на продолжительность устройства дорожных покрытий нежесткого типа	43
3.1. Влияние технологии на процесс охлаждения горячих асфальтобетонных смесей	43
3.2. Моделирование тепловых процессов при устройстве покрытий нежесткого типа	45
3.3. Обоснование применения закона нестационарной теплопередачи к процессу строительства и ремонта покрытий нежесткого типа с применением горячих асфальтобетонных смесей	50
4. Определение продолжительности строительства дорожных покрытий нежесткого типа с применением горячих асфальтобетонных смесей	62
5. Особенности распределения температуры асфальтобетонной смеси после укладки на основание дороги	78
5.1. Влияние условий производства работ и свойств горячих смесей на продолжительность работ по распределению слоя покрытия	82
5.2. Анализ технологических схем укладки горячих асфальтобетонных смесей при устройстве дорожного покрытия	83

5.3. Определение температуры горячей асфальтобетонной смеси по ширине полосы покрытия	94
5.4. Моделирование распределения температуры асфальтобетона по ширине полосы покрытия	96
5.5. Экспериментальные исследования определения распределения температуры по ширине полосы покрытия	100
6. Технология строительства полосы покрытия нежесткого типа с увеличенной шириной одним асфальтоукладчиком	102
6.1. Расчет продолжительности укладки	104
6.2. Технология устройства дорожного покрытия отдельными полосами	116
6.3. Экспериментальные исследования по определению температуры в зоне стыка полос за счет температуры горячей смеси сопряженного слоя покрытия	126
6.4. Применение закона нестационарной теплопередачи к устройству многополосных дорожных покрытий нежесткого типа . . .	131
6.5. Экспериментальные исследования определения ширины полосы покрытия при укладке горячей асфальтобетонной смеси с пониженной температурой	133
6.6. Разработка технологии укладки асфальтобетонной смеси одним асфальтоукладчиком со смещением полос покрытия при укладке	142
6.7. Определение температурных режимов по устройству дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей при совместной работе двух и более асфальтоукладчиков	162
7. Расчет продолжительности уплотнения дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей	167
7.1. Экспериментальные исследования по определению технологических режимов щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей	181
7.2. Определение температуры эффективного окончания процесса уплотнения ЦМА	183
7.3. Влияние температуры горячей смеси на прочностные характеристики асфальтобетона	184
7.4. Особенности строительства дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей при пониженных температурах воздуха	187
7.5. Рекомендации по разработке технологических процессов строительства дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей	200
7.6. Особенности уплотнения асфальтобетонного покрытия в зоне стыка сопряженных полос	215

8. Выбор параметров уплотняющих машин при строительстве асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог	217
8.1. Анализ параметров катков с металлическим вальцом при уплотнении дорожных покрытий нежесткого типа	217
8.2. Расчет контактных напряжений под жестким вальцом дорожного катка	219
8.3. Анализ распределения контактных напряжений под вальцом катка	225
8.4. Выбор звена уплотняющих машин при разных методах уплотнения	233
9. Влияние температуры на качество ремонта выбоин дорожных покрытий нежесткого типа	238
9.1. Моделирование тепловых процессов при производстве ремонтных работ покрытий нежесткого типа	238
9.2. Рекомендации по выбору асфальтобетонной смеси при производстве ремонтных работ	241
9.3. Экспериментальные исследования по определению температуры горячей асфальтобетонной смеси при ремонте выбоин на дорожных покрытиях	243
9.4. Влияние условий производства ремонтных работ на температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси в выбоине покрытия	249
9.4.1. Влияние температуры окружающего воздуха на распределение температуры смеси в выбоине дорожного покрытия	249
9.4.2. Влияние скорости ветра на охлаждение горячей смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия	257
9.4.3. Влияние температуры основания на температурные режимы горячей смеси при укладке в выбоину покрытия	271
10. Обоснование средств механизации и разработка технологии ямочного ремонта дорожных покрытий нежесткого типа	279
10.1. Выбор уплотняющих машин при производстве ямочного ремонта дорожных покрытий нежесткого типа	280
10.2. Разработка рекомендаций по технологии ремонта выбоин дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей с учетом температурных режимов смесей	282
Заключение	308
Список литературы	309

Научное издание

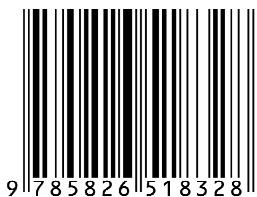
**Зубков Анатолий Федорович
Анрианов Константин Анатольевич
Антонов Александр Иванович
Однолько Валерий Григорьевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И
РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ
НЕЖЕСТКОГО ТИПА С УЧЕТОМ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Монография

Редактирование Е. С. Мордасовой
Компьютерное макетирование М. А. Евсейчевой

ISBN 978-5-8265-1832-8



Подписано в печать 20.12.2017.
Формат 60 × 84 / 16. 18,37 усл. печ. л.
Тираж 300 экз. Заказ № 401

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Телефон 8(4752)63-81-08
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru