

**А.Ф. Зубков
В.Г. Однолько
Е.Ю. Евсеев**

**ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА
ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**



Москва, 2013

УДК 625:691.168
ББК 0311-08
3913

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Воронежский ГАСУ»
В.П. Подольский

Доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
В.В. Леденев

3913 **Зубков А.Ф., Однолько В.Г., Евсеев Е.Ю.**
Технология ремонта дорожных покрытий автомобильных
дорог с применением горячих асфальтобетонных смесей. – М.:
Издательский дом «Спектр», 2013. – 180 с. – 400 экз.
ISBN 978-5-4442-0043-8

Рассмотрены вопросы технологии ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с применением горячих асфальтобетонных смесей. Представлен анализ применяемых технологий для ремонта дорожных покрытий с использованием разных материалов. На основе экспериментальных исследований установлено распределение температуры горячей асфальтобетонной смеси при ее укладке в выбоину дорожно-го покрытия.

По результатам проведенных исследований предложены зависимости, устанавливающие связь между температурой поверхности выбоины и температурой горячей смеси при укладке при разных температурах окружающего воздуха с учетом типа смеси и марки битума. Предложена методика выбора технологических режимов при производстве работ с применением горячих асфальтобетонных смесей по ремонту выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа. Разработаны рекомендации по технологии ремонта выбоин на асфальтобетонных покрытиях.

Предназначена для работников дорожных организаций, преподавателей, аспирантов, магистров и студентов дорожно-строительных специальностей.

УДК 625:691.168
ББК 0311-08

ISBN 978-5-4442-0043-8

© Зубков А.Ф., Однолько В.Г.,
Евсеев Е.Ю., 2013

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение требуемых транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог достигается в процессе строительства и зависит от качества применяемого материала и технологии строительства. В настоящее время при строительстве, ремонте и реконструкции покрытий нежесткого типа автомобильных дорог наибольшее применение находят асфальтобетонные покрытия, доля которых составляет свыше 96% от общей протяженности дорог с твердым покрытием. 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 земляного полотна 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. Производство работ с применением битумных материалов, в зависимости от времени года, производится при температуре окружающего воздуха не ниже +5 °С и поверхность выбоины должна быть сухой, за исключением применения в качестве вяжущего материала битумных эмульсий или на их основе других применяемых вяжущих материалов. В то же время для обеспечения безопасности движения транспортных средств, независимо от погодных условий и времени года, возникает необходимость выполнять работы по ямочному ремонту покрытия и при низких температурах окружающего воздуха (срочный аварийный ремонт).

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

Глава 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РЕМОНТА ВЫБОИН НА ПОКРЫТИЯХ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

1.1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПОКРЫТИЯМИ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Ежегодное увеличение транспортных средств, при недостаточно высоких темпах строительства автомобильных дорог, приводит к повышению интенсивности движения и возрастанию грузового потока на всех направлениях страны при одновременном увеличении грузоподъемности транспортных средств. Ежегодно парк транспортных средств в стране увеличивается более чем на 4...5% при одновременном росте их грузоподъемности. Увеличение грузоподъемности способствует снижению расходов на транспортные операции, но характеризуется повышением осевой нагрузки на дорожные одежды автомобильных дорог. Превышение осевой нагрузки выше допустимой, что характерно для современных транспортных средств, способствует изменению транспортно-эксплуатационных характеристик дороги и приводит к ухудшению состояния автомобильной дороги. Поэтому для обеспечения безопасности движения транспортных средств необходимы дополнительные затраты на содержание дороги с учетом требований нормативных документов. Понижение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги в процессе эксплуатации может происходить и по другим причинам, зависящим от качества применяемого материала при строительстве земляного полотна и дорожных одежд, а также допускаемых нарушений технологий при выполнении работ. Под действием осевых нагрузок от транспортных средств и влияния погодных условий на дорожных покрытиях возникают пластические деформации и разрушения в виде выбоин, просадок, трещин и волнообразования, что приводит к снижению скоростных режимов транспортных средств, увеличению нагрузок на трансмиссии машин и часто являются причиной дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Для обеспечения транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог, согласно требованиям нормативных документов, дорожные организации выполняют большой объем работ по их ремонту и содержанию, обеспечивающий безопасность дорожного движения.

С этой целью из бюджета страны выделяются значительные денежные средства. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 23 августа 2007 г. № 539 «О нормативах денежных затрат на содержание и ремонт автомобильных дорог федерального значения и правилах их расчета» (с изменениями от 10 марта 2009 г. и 15 мая 2010 г.) на проведение ремонтных работ и их содержание установлены нормативы, которые составляют 2540 и 695 тыс. р. на 1 км дороги. Однако для обеспечения транспортно-эксплуатационного состояния дорог в соответствии с существующими нормативными требованиями, характеризующими безопасность движения транспортных средств, выделяемых средств недостаточно. Выделяемые объемы денежных средств позволяют только сохранить существующую сеть дорог от дальнейшего разрушения. Ежегодно в России подлежат ремонту около 30 тыс. км автомобильных дорог при увеличении расходов на эти цели на 20...30%. Указанные объемы работ позволяют сохранить существующую сеть дорог от разрушения, но с учетом состояния дорог, их явно недостаточно для приведения в соответствие с требованиями нормативных документов. Для решения данной задачи необходимо увеличить объемы работ по ремонту и содержанию автомобильных дорог в 1,5–2 раза и более.

Состояние автомобильных дорог федерального значения Российской Федерации на настоящий момент охарактеризовано в ряде работ [31 – 33], согласно которым общая протяженность федеральных автодорог составляет 54 000 км, из которых около 30% перегружены. Более половины всех федеральных дорог не отвечают нормативным требованиям по транспортно-эксплуатационным показателям, предъявляемым к автомобильным дорогам. Свыше 67% от общей протяженности дорог имеют недостаточную прочность дорожных одежд и более 37% имеют неудовлетворительную ровность дорожных покрытий. Превышение допустимой нагрузки от транспортных средств на дорожные одежды (53%) способствует быстрому износу дорожных конструкций, что приводит к значительному сокращению сроков службы автомобильных дорог (в 1,5 раза). В результате, свыше 35% автомобильных дорог федерального значения требуют реконструкции и модернизации для обеспечения пропускной способности современных транспортных средств.

Анализ научных исследований и практических мероприятий по повышению работоспособности и долговечности асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог показал, что широкое применение в настоящее время находят модифицированные асфальтобетоны, которые имеют пониженную температурную чувствительность вяжущего и

эластичность дорожного материала, что обеспечивает повышенную теплоустойчивость в летний период, более высокую способность к возникновению температурных трещин зимой и образованию усталостных трещин в процессе эксплуатации покрытия дороги. В то же время применение модифицированных битумов приводит к удорожанию строительства асфальтобетонных покрытий.

Одним из основных направлений в увеличении срока службы и повышении работоспособности покрытий нежесткого типа является проведение дорожно-ремонтных работ. Потребность в проведении таких работ возникает и в более ранние сроки эксплуатации дороги, что предусматривается существующими нормативными документами. Задержки с проведением работ приводят к ухудшению состояния дорог и требуют в дальнейшем дополнительных затрат для их приведения в нормативное состояние. Установлено, что проведение более позднего ремонта дороги требует применения более толстых слоев усиления дорожной одежды и при задержках в течение трех лет требуются удвоенные затраты на проведение ремонта покрытия [3]. В то же время проведение своевременных ремонтов обеспечивает безопасность дорожного движения и продлевает срок службы дорожного покрытия автомобильных дорог.

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

Статистический анализ ДТП, проведенный ГИБДД, показал, что неблагоприятные дорожные условия, способствующие их возникновению, до 2000 г. не превышали 12% от общего количества ДТП. Однако с 2000 г. наметилась тенденция к росту ДТП, связанных с несоответствием параметров дорог нормам на проектирование. Так, если количество ДТП по дорожным условиям в 1998 г. составляло 5,8%, то в 2002 г. это количество составляет 17% [8]. Такая тенденция сохраняется до настоящего времени, и по данным Центра стратегических исследований (ЦСИ) «Росгосстраха», свыше 20% автомобильных аварий в России происходит из-за плохого качества дорожного полотна. Так, за 2010 г. в Российской Федерации было зарегистрировано 199 431 ДТП (42 000 случилось из-за некачественных дорог), а в 2009 г. было на 10% меньше [33].

По транспортно-эксплуатационным характеристикам автомобильные дороги разделены в три группы [34]:

- 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;

- 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;

- 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 СНиП 2.07.01–89* [35]. Эксплуатационное состояние автомобильных дорог определено требованиями ГОСТ Р 50597–93. Предельно допустимые повреждения покрытия, а также сроки их ликвидации приведены в табл. 1.1.

Ровность покрытия проезжей части должна соответствовать требованиям, приведенным в табл. 1.2 [34]. Коэффициент сцепления покрытия должен обеспечивать безопасные условия движения с разрешенной скоростью и быть не менее 0,3 при его измерении шиной без рисунка протектора и 0,4 – шиной, имеющей рисунок протектора.

1.1. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения [34]

| 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 указаны для строительного сезона, определяемого погодными-климатическими условиями, приведенными в СНиП 3.06.03 по конкретным видам работ.

1.2. Требования к ровности дорожного покрытия

| Группа дорог и улиц по транспортно-эксплуатационным характеристикам | Показатель ровности по прибору ПКРС-2, см/км, не более | Число просветов под 3-метровой рейкой, %, не более |
|---|--|--|
| А | 660 | 7 |
| Б | 860 | 9 |
| В | 1200 | 14 |

Основными параметрами и характеристиками, определяющими транспортно-эксплуатационное состояние дороги, являются:

- геометрические параметры дороги, к которым относится ширина проезжей части, краевой укрепленной и остановочной полос обочин, продольные уклоны, радиусы кривых в плане и профиле, уклоны виражей и расстояние видимости;
- прочность дорожной одежды проезжей части, краевой укрепительной и остановочной полос обочин;
- ровность и сцепные свойства покрытия проезжей части, краевой укрепительной и остановочной (укрепленной связным материалом) полос обочин;
- прочность и устойчивость земляного полотна и его элементов;
- целостность и работоспособность водоотводных и дренажных сооружений;
- наличие и требуемое состояние элементов инженерного оборудования и обустройства дороги.

В процессе эксплуатации автомобильной дороги на дорожном покрытии за счет воздействия погодных условий и нагрузки от транспортных средств возникает колеиность, влияющая на безопасность движения. Этим же документом установлены допустимые пределы глубины колеи, которые представлены в табл. 1.3. При выполнении ремонтных работ по устранению колеи, в первую очередь, работы выполняют на участках дорог, где глубина колеи больше предельно допустимых значений. Не рекомендуется иметь колеи в местах сопряжения с проезжей частью дороги и иметь отметку ниже ее уровня более чем на 3 см при интенсивности движения выше 6000 автомобилей, приведенных к легковому автомобилю, и более чем на 4 см при меньшей интенсивности.

1.3. Пределы допустимой глубины колен

| Расчетная скорость движения, км/ч | Глубина колес, мм | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------|---|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | измерения по упрощенной методике | | измерения по способу вертикальных отметок | | | |
| | | | относительно правого выпора | | относительно левого выпора | |
| | допустимая | предельно допустимая | допустимая | предельно допустимая | допустимая | предельно допустимая |
| Более 120 | 4 | 20 | не допускается | 4 | 9 | 20 |
| 120 | 7 | 20 | 3 | 5 | 16 | 25 |
| 100 | 12 | 20 | 6 | 9 | 27 | 40 |
| 80 | 25 | 20 | 15 | 18 | 50 | 50 |
| 60 и меньше | 30 | 35 | 50 | 50 | 50 | 50 |

Состояние дорожного покрытия проезжей части дороги должно обеспечивать требуемую величину сцепления колеса с покрытием, принимаемую не менее 0,3 при измерении его шиной без рисунка протектора и 0,4 шиной, имеющей рисунок протектора. Разница коэффициента сцепления по ширине проезжей части допускается не более 0,1. Разница между коэффициентом сцепления покрытия проезжей части и укрепленной обочиной – 0,15. 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. Деформации и разрушения на дорожных покрытиях устраняются в соответствии с нормативными документами.

1.3. ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Качество работ по устранению дефектов на дорожных покрытиях нежесткого типа зависит не только от применяемой технологии ремонта и используемого оборудования, но также и от свойств применяемого материала. В зависимости от конкретных условий эксплуатации автомобильной дороги для устранения дефектов покрытия применяют разные материалы, которые характеризуются физико-механическими, теплофизическими и технологическими параметрами.

1.4. Допустимые значения дефектов в конструкциях 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 |
| <i>Проезжая часть (включая используемые съезды)</i> | | | | | |
| Повреждения (выбоины) размером не более 15×60×5 см, площадью, м ² на 1000 м ² покрытия: | | | | | |
| а) летом; | 0,3 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| б) весной; | 1,5 | 3,0 | 4,5 | 6,0 | 7,0 |
| в) зимой | 1,5 | 3,0 | 4,5 | 6,0 | 7,0 |
| Отдельные раскрытые необработанные трещины на покрытии шириной > 5 мм, п.м./ на 1000 м ² | 10 | 20 | 30 | 40 | 40 |
| 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 |

Наиболее интенсивно образование дефектов на дорожном покрытии происходит в весенний и осенний периоды эксплуатации автомобильных дорог, когда под действием проникающей влаги в дорожные одежды и температуры окружающего воздуха происходит понижение

прочностных параметров дорожных слоев материала, способствующих возникновению на покрытиях дорог дефектов в виде выбоин. Для их устранения производят ямочный ремонт, при котором, в зависимости от температуры воздуха и свойств применяемых материалов, используют разные технологии.

Широкое применение при производстве ямочного ремонта получили холодные асфальтобетонные смеси, которые в меньшей степени зависят от температурных режимов укладки и уплотнения. К холодным смесям относятся смеси всех типов (за исключением типа А), приготовленные на жидком или разбавленном битуме марок СГ 70/130 или МГ 70/130[1,11]. Холодная асфальтобетонная смесь бывает нескольких видов:

- смесь на эмульсии немедленного применения;
- холодные эмульсионно-минеральные асфальтобетонные смеси;
- холодная складированная (пакетируемая) органоминеральная смесь и другие виды смесей.

Холодные асфальтобетонные смеси по своей структуре представляют традиционный асфальт, который готовится по специальной технологии с применением модифицированных добавок или модифицированного битума (битум составляет от 4,2 до 4,5% от веса щебня, а добавки – от 15 до 25% от веса битума). Технология ремонта асфальтобетонных покрытий с применением таких смесей позволяет выполнять работы по ямочному ремонту дорожных покрытий в сухую погоду при среднесуточной температуре воздуха до -10°C . В процессе приготовления смесей, за счет их охлаждения, на поверхности минеральных зерен битум теряет свою липкость и смесь, при хранении в течение определенного периода времени, не слеживается. После укладки в выбоину покрытия, для образования монолитного слоя, такая смесь должна прогреваться за счет температуры окружающего воздуха с одновременным уплотнением катками и транспортом в течение 2–3 недель. Такая технология ремонта дорожных покрытий эффективна при положительных температурах окружающего воздуха с интенсивностью движения транспортных средств не более 1000...3000 авт./сут на дорогах третьей–четвертой технических категорий. Технология ремонта и выполняемые операции аналогичны ямочному ремонту покрытий с применением горячих смесей. При такой технологии отсутствует ограничение на время укладки и уплотнение уложенной смеси, которое присутствует при применении горячей технологии из-за быстрого охлаждения смеси и снижения ее уплотняемости. Анализ применения технологий для строительства дорожных покрытий с использованием холодных смесей на маловязких и жидких битумах показал, что в некоторых зарубежных странах (Швеция, Финляндия Норвегия и др.)

ограничивают область применения и допускается их применять на дорогах с интенсивностью движения до 1000...1500 авт./сут. При использовании маловязких или жидких битумов асфальтобетонные смеси приготавливают и укладывают в дорожные покрытия по обычной горячей технологии.

Широкое применение для ямочного ремонта получили холодные асфальтобетонные смеси, приготовленные с использованием эмульсий на основе вязких битумов. Такие смеси называют эмульсионно-минеральными (ЭМС). В зависимости от категории дороги и прочности материала в покрытии производят выбор типа эмульсии по вязкости используемого битума, необходимые минеральные материалы и на их основе приготавливают холодные смеси, которые можно складировать и хранить. Такая технология ремонта дорожных покрытий также эффективна при положительных температурах окружающего воздуха.

При выборе холодной технологии для производства ремонтных работ на покрытиях дорог третьей и ниже категорий применяют также влажную органоминеральную смесь (ВОМС). Этот материал пластичен, устойчив к трещинообразованию и рекомендуется в 1–2 климатических зонах, при этом толщина укладываемого слоя материала должна быть не менее 3 см. При неблагоприятных погодных условиях и необходимости проведения аварийного ямочного ремонта, ремонтные работы могут проводиться с применением такого материала. Состав и технологии приготовления и применения разработаны в РосдорНИИ. ВОМС состоит из известнякового или доломитового щебня фракции 5...20 мм (до 40%), песка с модулем крупности не менее 1,0, минерального порошка (6...12%), вяжущего (гудрон, жидкий или разжиженный вязкий битум) в количестве 6...7% и воды. Вместо щебня допускается применение отсевов дробления, ПГС, дробленого шлака. Приготовление таких смесей производится в холодном виде в смесительных установках асфальтобетонных заводов, дооборудованных системой подачи и дозировки воды в мешалку. После перемешивания готовую смесь при температуре 25...40 °С подают на склад, где она хранится в штабеле в течение нескольких месяцев. Применение таких смесей допускается при глубине выбоины не менее 3...4 см. Достоинством является то, что она может использоваться при температуре воздуха до –10 °С и не зависит от влажности поверхности выбоины. К недостаткам следует отнести то, что в зимний период и ранней весной формирование прочной структуры ВОМС происходит медленно из-за частых переходов температуры воздуха через 0 °С. Наибольшую прочность материал приобретает после полного высыхания, но эта прочность в 1,5–2 раза ниже прочности холодного и в 2,5–3 раза ниже прочности горячего асфальтобетона.

Для проведения ямочного ремонта дорожных покрытий нежесткого типа в СоюздорНИИ разработаны складированные асфальтобетонные смеси (САС) на основе вязких битумов с добавками специальных пластификаторов [11]. Такой материал можно хранить, укладывать и уплотнять в холодном виде. Однако широкого применения при производстве ремонтных работ этот материал не получил.

При проведении ямочного ремонта вместо вязкого битума применяют катионную битумную эмульсию (эмульсионно-щебеночная обработка), что позволяет продлить строительный сезон (работы можно проводить на влажном покрытии и при температуре воздуха не ниже +5 °С). Рекомендуемый тип используемой эмульсии – ЭБК-1 при концентрации – 65...70%. При работах используют мытый щебень кубовидной формы. Его расход для фракций 5...10 мм и 10...15 мм составляет, соответственно, 0,008...0,009 $\text{дм}^3/\text{м}^2$ и 0,011...0,013 $\text{дм}^3/\text{м}^2$. Норма дозирования остаточного вяжущего (эмульсионного битума) – ориентировочно, 1,0...1,3 $\text{л}/\text{м}^2$.

При выборе технологии ремонта асфальтобетонных покрытий необходимо учитывать, что прочность и водостойкость холодного асфальтобетона, приготовленного на жидком или разжиженном битуме в 2–3 раза ниже, чем горячего. Поэтому его используют для устройства и ремонта покрытий дорог третьей–четвертой категорий. Горячие асфальтобетонные смеси и литой асфальт применяют при ремонте покрытий дорог первой–второй категорий [20].

При производстве ремонтных работ на дорогах с интенсивным движением и значительной осевой нагрузкой от транспортных средств применяют горячую битумощебеночную смесь с содержанием щебня от 50 до 85%, которая по составу аналогична горячей асфальтобетонной смеси типа А. В последнее время для этих целей используют щебеночно-мастичные смеси, которые характеризуются повышенными показателями водо-, морозостойчивости и усталостной стойкостью в дорожном покрытии. Применение таких смесей характеризуется более высоким темпом охлаждения, что способствует уменьшению времени на процессы укладки и уплотнения. Кроме того, использование таких смесей представляет определенные сложности при производстве работ, так как они характеризуются повышенной жесткостью при укладке, имеют более высокую температуру приготовления и укладки. За счет высокой жесткости этих смесей необходимо применять при производстве работ уплотняющие машины с повышенными силовыми параметрами и строгом соблюдении температурных режимов укладки и уплотнения.

С целью устранения отмеченных недостатков при производстве работ по устранению выбоин применяют вибролитую асфальтобетон-

ную смесь (ВЛА), которая содержит щебень с содержанием частиц крупнее 5 мм (50...55%) и 10...12% битума и частиц минерального порошка. Для приготовления ВЛА используют вязкие битумы, которые характеризуются высокими температурами при укладке в выбоину (190...200 °С). Устройство ремонтного слоя покрытия завершается распределением и втапливанием черного щебня из расчета 5...6 кг/м². К недостаткам данного материала следует отнести высокие технологические режимы приготовления и укладки горячей смеси. Опыт применения такой технологии ремонтных работ показал, что из-за высокого содержания битума в процессе эксплуатации покрытия, при высоких температурах окружающего воздуха, наблюдается выделение битума на поверхности покрытия, что ухудшает сцепные качества дорожного покрытия.

Применение литого асфальтобетона для производства ремонтных работ позволяет производить работы практически в течение всего года. К достоинствам этого метода следует отнести высокую долговечность ремонтируемого участка, отсутствие водонасыщения и набухания асфальта, не требуется техника для уплотнения уложенной смеси. В то же время применение этого метода характеризуется сравнительно высокой стоимостью материала за счет повышенного содержания битума и минерального порошка, а также сравнительно большого энергопотребления в процессе приготовления горячей литой смеси. Содержание битума в таких смесях может достигать до 13% и минерального порошка до 30...35%. Применение высоковязкого битума в процессе приготовления асфальта требует более высоких температур, что приводит к высоким энергетическим затратам в процессе его производства (220...250 °С). Применение литого асфальтобетона требует наличия специальных транспортных средств для доставки материала к месту производства работ. Существенным недостатком, с точки зрения транспортно-эксплуатационных показателей, являются низкие сцепные показатели, что приводит к проведению дополнительной операции по повышению шероховатости (вдавливанию мелкого щебня в уложенный слой горячего асфальтобетона).

В некоторых случаях, с целью экономии материальных ресурсов, для восстановления покрытия применяют способ термопрофилирования, при котором в старый асфальтобетонный материал после фрезерования добавляют новую асфальтобетонную смесь (20...50 кг/м²). Такой способ использования старого асфальтобетона позволяет не только уменьшить материальные ресурсы, но и корректировать состав восстанавливаемого покрытия в соответствии с ранее применяемой структурой асфальтобетонного покрытия с одновременным устранением последствий старения битума в покрытиях.

При строительстве дорожных покрытий нежесткого типа, независимо от дорожно-климатической зоны, в качестве основного материала применяют плотный и высокоплотный асфальтобетон марки I с высоким содержанием щебня [60]. Однако на практике, при производстве ремонтных работ, ввиду того что смеси типа А обладают более высокой жесткостью из-за высокого содержания щебня, предпочтение отдадут смесям типа Б, В и Г. Для приготовления горячих смесей могут быть использованы разные марки битума, в зависимости от климатической зоны расположения автомобильной дороги. Температура смесей при приготовлении и начале уплотнения регламентированы нормативными документами [37]. Следует заметить, что температура окончания процесса уплотнения горячих асфальтобетонных смесей этими документами не установлена. Известно, что для обеспечения качества уплотнения горячих смесей необходимо определенное время действия нагрузки на материал, что и определяет требуемое число проходов уплотняющей машины по одному следу. Эффективность работы уплотняющей машины зависит от температурных режимов горячей смеси, определяемых типом смеси и маркой битума. Вопрос установления нижней границы эффективного уплотнения горячей смеси рассмотрен в работе [10]. На основании предложенных температурных режимов уплотнения горячей смеси можно установить продолжительность выполнения операции уплотнения горячей смеси при производстве ремонтных работ дорожного покрытия в зависимости от объема укладываемой смеси.

Наиболее распространенным методом ремонта дорожных покрытий нежесткого типа является метод ремонта с использованием горячих асфальтобетонных смесей, который позволяет обеспечить требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетона в выбоине, заданный срок службы ремонтируемого участка покрытия и обеспечивает высокое качество ремонтных работ при условии соблюдения технологии. Однако качество ремонтных работ при этом методе в значительной степени зависит от погодных условий производства работ, точности выполнения требований технологии, обеспечения температурных режимов укладки и уплотнения горячей смеси при соответствующих параметрах уплотняющих машин.

1.4. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Образование дефектов на асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог связано с комплексным воздействием различных факторов в процессе эксплуатации автомобильных дорог.

В процессе строительства дороги, из-за нарушений технологии укладки и уплотнения слоев материала, имеет место недоуплотнение уложенного материала, что в дальнейшем способствует образованию дефектов в виде выбоин. Экспериментально доказано, что при недостаточном коэффициенте уплотнения земляного полотна ($K_y = 0,9 \dots 0,92$) на дорожном покрытии образуются выбоины [20]. Одновременно с этим на дорожных покрытиях нежесткого типа наблюдается просадка покрытия, т.е. вертикальная просадка покрытия без образования трещин за счет деформаций грунтов земляного полотна и материалов конструктивных слоев дорожных одежд, что также влияет на качество дорожных покрытий.

При устройстве асфальтобетонных покрытий за счет температурной сегрегации и гранулометрической неоднородности укладываемого материала наблюдаются участки покрытия с разными физико-механическими характеристиками и водонепроницаемостью, что в процессе эксплуатации способствует образованию дефектов на покрытиях дороги в виде отслоения частиц материала из покрытия и появлению в дальнейшем выбоин.

Эксплуатация автомобильных дорог в осенне-весенний период года и сопутствующие им изменения температур окружающего воздуха приводят к разрушительным процессам в конструкциях автомобильных дорог, связанных с промерзанием и оттаиванием конструктивных элементов автомобильных дорог. Наличие повышенной влажности в конструктивных слоях автомобильной дороги при низких температурах окружающего воздуха приводит к переходу влаги из жидкого состояния в кристаллообразное, что связано с увеличением ее объема, а следовательно, возникновению сил, под действием которых происходит разрушение структуры материала и разуплотнение материала земляного полотна и дорожных одежд.

Под воздействием осевой нагрузки от транспортных средств и неблагоприятных климатических условиях ухудшаются основные эксплуатационные показатели дороги – водонепроницаемость, прочность, ровность и сцепные свойства покрытия проезжей части автомобильной дороги. Ухудшение транспортно-эксплуатационных параметров дороги приводит к понижению несущей способности конструктивных элементов дороги, что проявляется в виде образования выбоин, просадок, проломов, трещин, волн, сдвигов и колеиности на поверхности покрытия. Изменение температурных режимов при эксплуатации автомобильных дорог приводит к образованию сквозных трещин на асфальтобетонных покрытиях, которые со временем все больше раскрываются и способствуют снижению прочности дорожной конструкции, выкрашиванию частиц материала покрытия и, в конечном итоге, образо-

ванию выбоин. Возникающие на поверхности дорожного покрытия выбоины приводят к снижению скоростных режимов транспортных средств, увеличивают динамические нагрузки на трансмиссии машин и влияют на безопасность дорожного движения.

Разрушение дорожных покрытий нежесткого типа автомобильных дорог происходит за счет процессов старения и износа асфальтобетонных покрытий, усталостного разрушения и накопления остаточных деформаций в процессе эксплуатации автомобильных дорог.

Следовательно, комплексное воздействие на автомобильную дорогу отмеченных факторов приводит к появлению дефектов на покрытии дороги, которые проявляются в виде трещин, просадок, проломов и выбоин (рис. 1.1).

С повышением интенсивности движения и грузоподъемности транспортных средств происходит интенсивное накопление остаточных деформаций в покрытиях дорожных одежд нежесткого типа. Изменение свойств вяжущего в процессе эксплуатации дороги приводит к снижению трещиностойкости асфальтобетона и усталостному разрушению материала, на поверхности покрытия появляются трещины, что приводит к водонасыщению асфальтобетона и в дальнейшем является причиной образования сквозных трещин. Образование сквозных



Рис. 1.1. Разрушение дорожного покрытия за счет недоуплотнения основания покрытия

трещин приводит к снижению прочностных характеристик дорожных одежд и, как следствие, образуются просадки на дорожном покрытии. Появление просадок, а также образование продольных трещин на покрытиях нежесткого типа возможно при недостаточной плотности нижележащих слоев материала дорожной одежды. За счет действия осевой нагрузки от транспортных средств на дорожные покрытия, а также влияния погодных условий при эксплуатации дорог на прочностные характеристики материала покрытия, на поверхности покрытия образуются неровности, влияющие на безопасность дорожного движения. Для безопасности движения транспортных средств наибольшую опасность представляют проломы и выбоины на поверхности покрытия, приводящие к снижению скоростных режимов движения транспортных средств, поломкам трансмиссий и некоторых случаях являются причиной ДТП. Образование выбоин происходит за счет локальных разрушений дорожных покрытий в виде углублений разной формы с резко выраженными краями. Причиной образования выбоин могут служить разные факторы, в том числе трещины, нарушения технологии при строительстве дорожных одежд и покрытия, недостаточная прочность применяемого материала.

Следует заметить, что причины образования дефектов на поверхности покрытия нежесткого типа известны, разработаны методы и рекомендации по их снижению или предотвращению, которые постоянно совершенствуются. Однако, как показывает практика эксплуатации автомобильных дорог, до настоящего времени происходят разрушения дорожных покрытий.

В значительной степени на качество строительства асфальтобетонных покрытий, в том числе и образование выбоин в процессе эксплуатации, влияет применение некачественных материалов и нарушение технологии строительства. Нарушение температурных режимов при устройстве покрытия, неоднородность смеси по структуре при укладке, отсутствие контроля за расходом охлаждающей жидкости для смачивания вальца катка при укатке горячей смеси способствуют снижению эксплуатационных характеристик асфальтобетона, а также образованию на поверхности микротрещин, что в дальнейшем ведет к образованию выбоин на дорожном покрытии.

1.5. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕМОНТА ВЫБОИН НА ПОКРЫТИЯХ ДОРОГ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Воздействие погодно-климатических факторов и превышение осевой нагрузки от транспортных средств по отношению к нормативной нагрузке способствует интенсивному износу и разрушению до-

рожных покрытий, что приводит к снижению транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог и требует привлечения дополнительных инвестиций для их приведения в нормативное состояние. Для обеспечения безопасности движения транспортных средств необходим постоянный контроль за состоянием дорожного покрытия и приведение их параметров в соответствие с нормативными документами, что возможно только при проведении необходимых работ по содержанию и ремонту автомобильных дорог.

В настоящий момент времени для содержания и ремонта дорожного покрытия автомобильных дорог применяются разные материалы и технологии. Главная задача таких работ – обеспечение безопасного движения автомобильного транспорта с установленным скоростным режимом. Выбор конкретной технологии определяется конструктивными параметрами дороги, материалом покрытия, погодными условиями, объемами работ и видами дефектов.

Нормативными документами установлено, что производство ремонтных работ на покрытиях нежесткого типа должно выполняться с наступлением устойчивой теплой и сухой погоды при температуре окружающего воздуха не ниже +5 °С. Однако на практике возникает потребность в проведении срочного внепланового или аварийного ремонта практически в любое время года и при любых погодных условиях. При выборе технологии для ремонта дорожных покрытий необходимо учитывать следующие критерии: достижение высокого качества работы с обеспечением требуемых показателей плотности, прочности, водонепроницаемости, ровности и шероховатости по отношению к основной части покрытия; обеспечения заданного срока службы отремонтированного участка покрытия; наличия требуемых материалов и механизмов по выбранной технологии; возможность реализации принятой технологии ремонта с учетом погодных условиях; оперативность открытия движения транспорта по месту ремонта; высокая экономичность ремонтных работ. Совместное решение по обеспечению указанных критериев определяет эффективность применяемой технологии для ремонтных работ. Следует заметить, что ямочный ремонт, выполненный без тщательной подготовки места к производству работ и соблюдения требований технологии к выполнению ремонтных работ, снижает срок службы отремонтированной поверхности покрытия в 2 – 4 раза. Принято считать, что ремонтные работы дорожных покрытий нежесткого типа относятся к сезонным работам, зависимым от температуры воздуха и влажности дорожного покрытия. Поэтому актуальной задачей в настоящее время является разработка такой технологии ремонта асфальтобетонных дорожных покрытий, которая позволяет проводить эти работы в любое время года с обеспечением тре-

буемого срока службы и качества. Из применяемых технологий ремонта дорожных покрытий нежесткого типа наибольшее распространение получили технологии с применением горячих асфальтобетонных смесей, литого асфальтобетона, струйно-инъекционного метода и холодного асфальтобетона с использованием битумных эмульсий и гелеобразных битумов. Каждый метод проведения ремонтных работ имеет свои особенности, достоинства и недостатки. Поэтому выбор конкретной технологии зависит от многих факторов, которые необходимо учитывать при подготовке и производстве ремонтных работ.

Вопрос сравнительной эффективности применения разных методов ремонта дорожных покрытий рассмотрен в работе [14]. На основе проведенного анализа разных применяемых технологий ремонта дорожных покрытий и их экономических показателей по пятибалльной системе получен график эффективности разных технологий в течение года, который представлен на рис. 1.2.

Из представленных на рисунке данных видно, что наиболее эффективными технологиями, позволяющими осуществлять ремонт покрытий в течение года, являются технологии с применением горячего и литого асфальтобетона. Применение технологий, в которых используются битумные эмульсии и эмульсионно-минеральные смеси, неэф-

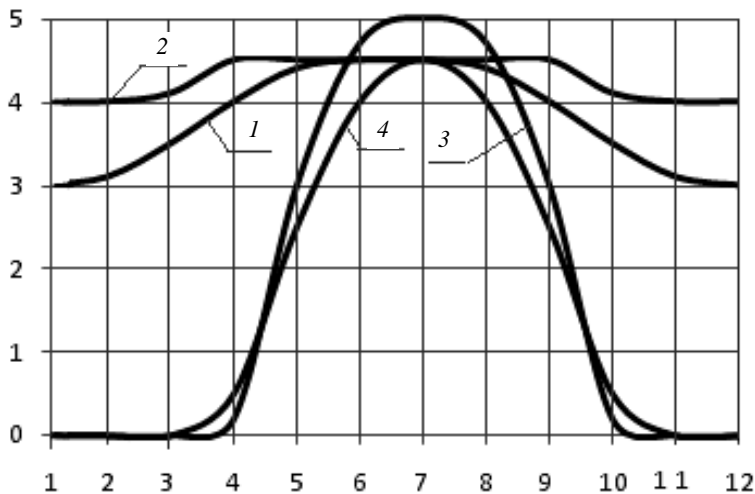


Рис. 1.2. Сравнительная эффективность технологий для ремонта дорожных покрытий в течение года:

1 – горячий асфальтобетон; 2 – литой асфальтобетон;
3 – локальная терморегенерация; 4 – струйно-инъекционный метод

фективны при низких температурах окружающего воздуха из-за наличия в битумных эмульсиях воды.

Применение холодных битумосодержащих смесей и материалов на основе жидких или разжиженных битумов позволяет уменьшить влияние погодных условий на производство ремонтных работ. Охлажденные и затвердевшие на минеральных зернах тонкие слои и пленки битума теряют свою липкость. Однако для формирования структуры смеси после укладки она должна прогреваться для испарения легких фракций битума с одновременным уплотнением в течение 2–3 недель. Поэтому такой ямочный ремонт предпочтительнее проводить при положительной температуре воздуха на дорогах третьей–четвертой категорий при незначительной интенсивности движения транспортных средств. Технология в этом случае аналогична ямочному ремонту покрытий горячими смесями. Такие технологии ремонта получили широкое применение во многих странах благодаря простоте, увеличению продолжительности сезонности работ и меньшей строгости требований нормативных документов к погодным условиям.

Производство работ по устранению выбоин на поврежденном участке покрытия может выполняться одним из следующих способов:

- с разделкой покрытия и удалением старого материала;
- без разделки покрытия.

При выполнении работ по ямочному ремонту с разделкой покрытия и удалением старого материала соблюдают следующую технологическую последовательность:

- организация дорожного движения на ремонтном участке дороги;
- очистка поверхности ремонтируемого покрытия от снега и наледи, пыли и грязи;
- разметка мест ремонта единичных выбоин и выбоин, объединенных в карту;
- нарезка контуров ремонтируемых выбоин и карт;
- очистка стенок и дна ремонтируемых карт;
- разогрев стенок и дна карты газовой горелкой пропан;
- обработка стенок и дна ремонтируемой выбоины органическим вяжущим;
- кладка, разравнивание и уплотнение холодной складываемой органоминеральной смеси;
- уход за поверхностью отремонтированного участка покрытия;
- погрузка отходов в автомобиль самосвал;
- снятие технических средств организации дорожного движения.

Состав работ без разделки покрытия включает аналогичные операции, за исключением разметки мест ремонта выбоин, нарезки контуров выбоин и отгрузки отходов в транспортные средства.

Способ ремонта с применением холодной складываемой органо-минеральной смеси предусматривает промывку выбоины водой, заделку ее смесью из увлажненного минерального материала подобранный состава и жидкого органического вяжущего (гудрона или разжиженного битума) и ее уплотнение. Смесью можно готовить в обычных асфальтобетонных установках, дооборудованных системой подачи и дозировки воды. К преимуществам такой технологии можно отнести: возможность использования в течение длительного срока хранения; простоту выполнения технологии работ; ввод в эксплуатацию отремонтированного асфальтобетонного покрытия сразу после завершения ремонтных работ. Существенным недостатком данной технологии является высокая цена материала, малая сопротивляемость сдвигу материала под действием касательных сил, что исключает их применение при ремонте покрытий в местах торможения, на перекрестках и автобусных остановках.

В некоторых зарубежных странах (Швеция, Финляндия, Норвегия и др.) асфальтобетонные смеси приготавливают на маловязких и жидких битумах, а также на специальном нефтяном вяжущем (смесь в этом случае называют нефтегравием) и используют для устройства дорожных покрытий с интенсивностью движения до 1000...1500 авт./сут. При использовании таких материалов его готовят и укладывают в покрытие по обычной горячей технологии.

Ремонт выбоин с использованием катионной эмульсии (*инъекционный метод*) выполняют с применением прицепного специального оборудования, например, пломбировщика марки БЦМ-24, УДМ-1. Очистку выбоины под ремонт осуществляют струей сжатого воздуха или методом всасывания, подгрунтовку – подогретой до 60...75 °С эмульсией, заполнение – черненным в процессе инъектирования щебнем. При этом методе ремонта обрубку кромок не производят. Движение открывают через 10...15 мин. Работы выполняют при температуре воздуха не ниже +5 °С как на сухом, так и на влажном покрытии.

При возникновении на поверхности дорожного покрытия выбоин, влияющих на безопасность дорожного движения и создающих аварийные ситуации для транспортных средств, допускается применять любые методы ремонта, материалы и средства, которые способны обеспечить временную (не менее 2–3 месяцев) безаварийную эксплуатацию дороги. Аварийный ремонт выполняется в любое время года и при неблагоприятных условиях отражается на качестве работы. Такие некачественно отремонтированные места с наступлением теплой и сухой погоды подлежат повторному ремонту, но с соблюдением всех требований и правил выполнения качественной заделки выбоин. Это приводит к дополнительным затратам и при небольших объемах ре-

монтажных работ экономически допустимо. При аварийном ремонте выбоин используются такие способы, которые не требуют дополнительной подготовки выбоин, за исключением очистки от грязи, влаги, снега и льда. Основным требованием такого ремонта является обеспечение прочной связи применяемого материала с поверхностью выбоины и чтобы частицы укладываемого материала имели достаточно прочные контакты между собой за счет механического распора или склеивающих прослоек.

Устранение выбоины возможно способом втрамбовывания холодного щебня с последующей его обработкой битумной эмульсией путем распределения эмульсии по поверхности выбоины. В итоге получается заделка выбоины щебнем, пропитанным битумной эмульсией.

Метод пропитки щебня в выбоине битумом, разжиженным и горячим, практикуется дорожниками разных стран для ликвидации аварийных выбоин. Отличие от метода пропитки эмульсией заключается в том, что сама пропитка выполняется до трамбования щебня. При этом битум нагревают до температуры не ниже 170...180 °С.

В практике ремонтных работ применяется метод обратной пропитки, в котором нагретый битум 170...180 °С, попадая на оставшуюся на дне и стенках выбоин влагу и на сырой щебень, вспенивается с кратностью до 4 – 6 и покрывает тонким слоем поверхность выбоины и частиц щебня. Проникновение битума между частицами и зёрнами щебня идет снизу вверх, поэтому этот технологический прием ремонта получил название «метод обратной пропитки». Его эффективность ограничена температурой воздуха +5...+10 °С. При более низких температурах битум плохо и трудно вспенивается. В некоторых случаях вместо битума используют полимерные материалы. Например, при ремонте полимербетоном выбоина заполняется щебнем, который затем пропитывается жидкотекучим составом на основе полиуретановой, акриловой или другой смолы, при трамбовании материала остаточная вода отжимается из лунки наверх. Такой ремонт возможен при температуре воздуха от –30 до +50 °С. Движение транспорта открывается через 30 мин. При неблагоприятных погодных условиях (сырость, холод) аварийный ямочный ремонт может быть также выполнен влажной органоминеральной смесью (ВОМС), состав и технологию приготовления и использования которой разработали в РосдорНИИ [11]. Такой смесью ремонтируют выбоины глубиной не менее 3...4 см. Преимущество применения ВОМС состоит в том, что она используется уже в готовом виде по холодной технологии, на сухом или сыром покрытии и при температуре воздуха до –10 °С. Однако следует иметь в виду, что зимой и ранней весной формирование прочной структуры ВОМС в покрытии происходит медленно и трудно из-за частых пере-

ходов температуры воздуха через 0 °С. Наибольшую прочность этот материал приобретает после полного высыхания, однако эта прочность в 1,5–2 раза ниже прочности холодного и в 2,5–3 раза ниже прочности горячего асфальтобетона. Поэтому такую технологию можно применять для аварийного ремонта покрытий.

Для проведения ямочного ремонта покрытий нежесткого типа в СоюздорНИИ разработали складываемые асфальтобетонные смеси (САС) на вязких битумах, которые можно хранить, укладывать и уплотнять в холодном виде. Их готовят на вязких битумах с повышенными тиксотронными свойствами, что достигается путем ввода в них специальных пластификаторов (летнее автотракторное дизельное топливо ЛТД и нефтяное сырье СБ для производства вязких дорожных битумов). Но положение с практическим использованием и внедрением САС остается пока таким же, как и с ВОМС, т.е. не очень удовлетворительным.

В последнее время для ремонта выбоин и просадок применяют инжекторную или струйно-инъекционную холодную технологию. Суть ее состоит в том, что все необходимые операции выполняются рабочим органом одной машины (установки) самоходного или прицепного типа. Подготовка выбоины к ремонту сводится фактически к ее очистке от пыли, мусора и влаги путем продувки высокоскоростной струей воздуха и обработке поверхности выбоины битумной эмульсией. Операции обрезки, разлома или фрезерования асфальтобетона вокруг выбоины в этой технологии может не производиться. Заделка выбоины осуществляется посредством ее заполнения мелким щебнем, предварительно обработанным битумной эмульсией в камере смешения машины. За счет вовлечения и подачи щебня воздушной струей его укладка в выбоину происходит с высокой скоростью, что обеспечивает хорошую его упаковку (уплотнение), исключая необходимость в уплотнении. Для ямочного ремонта по этой технологии рекомендуется использовать чистый мелкий щебень фракции 5...10(15) мм и быстрораспадающуюся катионную (для кислых каменных пород) или анионную (для основных каменных пород) битумную эмульсию 60%-ной концентрации. Струйно-инъекционный метод заделки выбоин можно использовать почти круглый год. Практика его применения показывает, что фактически крепкую и долговечную заделку выбоины можно обеспечить даже при температуре воздуха до –10...15 °С. Не рекомендуется проводить ремонтные работы таким способом при дожде и снегопаде, когда затруднена или даже исключена очистка выбоины от влаги, пыли и мусора и ее подгрунтовка битумной эмульсией.

При выборе между горячей и холодной технологиями ремонта асфальтобетонных покрытий следует обязательно учитывать, что

прочность и водостойкость холодного асфальтобетона, приготовленного на жидком или разжиженном битуме, в 2–3 раза ниже, чем горячего. Поэтому его используют, в основном, для устройства и ремонта покрытий дорог третьей–четвертой категорий. Холодные смеси на эмульсиях, полученных из высокосортных битумов или полимербитумов, хорошо себя показали на ямочном ремонте покрытий всех категорий дорог. Горячие асфальтобетонные смеси и литой асфальт применяют, как правило, преимущественно при ремонте покрытий дорог первой–второй категорий [20].

В последнее время для ремонта выбоин используется литой асфальт. Применение этого метода характеризуется сравнительно высокой стоимостью асфальтобетонной смеси за счет повышенного содержания битума и минерального порошка, а также сравнительно большого энергопотребления при приготовлении горячей литой смеси. Применение высоковязкого битума в процессе приготовления асфальта требует более высоких температур, что приводит к высоким энергетическим затратам в процессе его производства (220...250 °С). К месту работ смесь доставляют специальными машинами с обогреваемой емкостью и выливают в подготовленную карту. После остывания смеси до 50...60 °С по отремонтированному участку открывают движение. Существенным недостатком, с точки зрения транспортно-эксплуатационных показателей покрытия, являются низкие сцепные показатели, что требует дополнительной операции по повышению шероховатости (вдавливание мелкого щебня в уложенный слой горячего асфальтобетона). Подготовку карт (обрубку кромок) для ремонта осуществляют как при традиционном способе. Вязкую массу заливают в подготовленные ямы. Остывая, смесь уплотняется сама собой, без обработки катком. Такая технология обеспечивает высокие адгезионные свойства при морозах и повышенной влажности. Однако в летний период времени, нагреваясь на солнце до +60 °С, на покрытиях образуются пластические деформации, что приводит к образованию колеи, дорога продавливается колесами транспорта, в результате, образуется колея.

Наиболее распространенным методом ремонта дорожных покрытий нежесткого типа является метод ремонта с использованием горячих асфальтобетонных смесей, который позволяет обеспечить заданный срок службы ремонтируемого участка покрытия и обеспечивает высокое качество ремонтных работ при условии соблюдения технологии. Однако качество ремонтных работ при этом методе в значительной степени зависит от погодных условий, точности выполнения требований технологии по подготовке рабочего места производства работ и обеспечения температурных режимов укладки и уплотнения горячей смеси.

Технология ремонта выбоин на дорожных покрытиях заключается в выполнении следующих операций: очистка поверхности покрытия дороги от пыли и грязи; разметка границ ремонта выбоины прямыми линиями вдоль и поперек оси дороги; устранение грязи и воды в выбоине; вырезка материала по границе выбоины на глубину выбоины; удаление старого материала покрытия; обработка места стыка старого материала покрытия с новым материалом горячим вяжущим или эмульсией; укладка горячей асфальтобетонной смеси; выравнивание и уплотнение смеси. При определении размеров ямочного ремонта учитывают, что разрушение нижележащего слоя происходит на большую площадь, чем разрушенная площадь покрытия. Поэтому граница обрабатываемой поверхности покрытия должна превышать разрушенную зону не менее чем на 5 см. Вырезка покрытия в месте ремонта производится фрезой методом холодного или горячего фрезерования. При небольших объемах работ возможно применение нарезчика швов. Поверхность под ремонт покрытия может иметь любую форму, но без острых углов. Установлено, что использование перфораторов для отбора материала по границе зоны деформированного покрытия способствует образованию микротрещин, что приводит в дальнейшем к снижению срока службы отремонтированного покрытия. Удаление материала старого покрытия при отсутствии фрезерной машины производят ручным способом. Для обеспечения требуемого сцепления уложенного асфальтобетона со старым покрытием границы выбоины обрабатывают вяжущим материалом. После этого в подготовленную карту укладывается горячая асфальтобетонная смесь и уплотняется катками ручного типа или вибрационными плитами. Для обеспечения однородности структуры покрытия при восстановлении стараются использовать материал, свойства которого близки по прочности, деформативности и шероховатости составу материала, применяемому ранее при строительстве дорожных покрытий автомобильных дорог. Чаще всего при ремонте для этих целей применяют мелкозернистые и среднезернистые асфальтобетонные смеси типов Б и В. Жесткие и прочные крупнозернистые и многощелебнистые смеси типа А из-за своих технологических характеристик применяются редко. В некоторых странах (Германия, Голландия и др.) нормативными документами определено в обязательном порядке при производстве ремонтных работ применение теплоизолированных контейнеров, так как применение асфальтобетонных смесей при температуре ниже 110...120 °С не допускается и считается браком. При отсутствии возможности приготовления горячей асфальтобетонной смеси на заводе рекомендуется применять технологию рециклинга, позволяющую готовить горячую смесь путем вторичной переработки асфальтобетонного материала непосредствен-

но на месте производства работы. Наиболее эффективно рециклер работает, если в него загружается мелкая асфальтобетонная крошка, полученная путем холодного фрезерования покрытия. При этом для улучшения свойств смеси рекомендуется при загрузке крошки или кускового лома добавлять твердый битум в количестве 1...2% по весу. Применение такой технологии позволяет снизить затраты на ремонт дорожного покрытия на 50...60% с учетом доставки горячей смеси с завода.

Анализ технологий ремонтных работ с применением горячих смесей показывает, что основными недостатками, способствующими невысокому качеству работ, является нарушение требований по подготовке участка покрытия к производству работ, несоблюдение температурных режимов укладки и уплотнения горячих смесей, недостаточное уплотнение уложенной асфальтобетонной смеси, укладка горячей смеси на мокрую поверхность. При подготовке основания выбоины необходимо осуществлять контроль за плотностью основания выбоины и при необходимости производить доуплотнение нижележащего слоя основания.

Укладка горячей смеси на подготовленное место выбоины производится вручную или, если площадь выбоины сравнительно большая, непосредственно с автотранспорта. Дорожные катки, применяемые при строительстве асфальтобетонных покрытий, в зависимости от места назначения в технологическом процессе, имеют линейные давления в пределах от 40 кН/п.м до 100 кН/п.м. Линейное давление ручного катка статического действия соответствует 0,05...0,1 кН/п.м. Поэтому 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 способствует низкому качеству работ. Более эффективным для этих целей является применение вибрационных плит [15].

Глава 2

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Технологические свойства дорожно-строительных материалов с применением битумных материалов зависят от температуры и регламентированы нормативными документами. 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 [16].

2.1. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ НА КАЧЕСТВО РАБОТ ПО РЕМОНТУ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Анализ технологий ремонта покрытий из горячих асфальтобетонных смесей показал, что в зависимости от конкретных условий производства работ и применяемого материала используются разные технологические схемы производства работ. Качество работ по устройству дорожных покрытий из горячих смесей зависит от многих факторов, каждый из которых влияет на технологию производства работ, выбор технологических параметров и режимов работы применяемых машин.

Установлено, что достигаемая плотность асфальтобетона при уплотнении, независимо от типа смеси, зависит от температуры начала

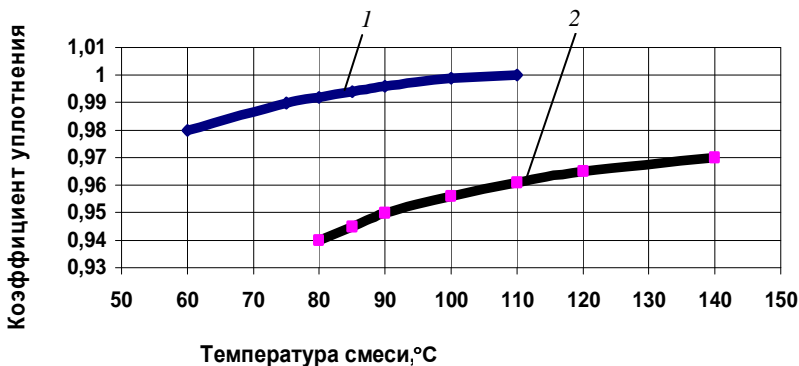


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента уплотнения от температуры начала уплотнения асфальтобетонной смеси при одинаковой массе катков:
 1 – вибративный каток, ДУ-47Б; 2 – каток статического действия

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 вибративного действия) [26].

Из представленных данных видно, что эффективность работы машины зависит от температуры начала уплотнения горячей смеси независимо от применяемого метода и в то же время конечный результат зависит от применяемого метода уплотнения. При динамическом режиме уплотнения максимальная величина коэффициента уплотнения достигается при более низких температурах смеси начала уплотнения, что подтверждается результатами исследований других авторов [6, 26]. Следует заметить, что температуры смеси начала уплотнения влияет также на прочность асфальтобетона [22].

Установлено, что температура смеси влияет на прочностные характеристики и деформативную способность во всем интервале температур. Изменение температуры горячего асфальтобетона от 150 до 50 °C приводит к увеличению предела прочности в 2,0–2,5 раза и модуля деформации материала в 4 раза [29]. Наибольший эффект уплотнения достигается при высокой температуре смеси, когда битум, а следовательно, и смесь, имеют наименьшую вязкость и имеют малую способность сопротивляться внешней нагрузке. С понижения температуры смеси увеличивается вязкость битума. За счет этого образовав-

шиеся связи между частицами материала усиливаются, что приводит к повышению предела прочности и модуля деформации смеси. Поэтому для обеспечения требуемого качества уплотнения необходимо увеличивать нагрузку на рабочий орган машины.

Эффективность работы уплотняющих машин зависит от температурных режимов смеси. Установлено, что каждому типу уплотняющей машины соответствует оптимальный температурный интервал смеси. Вязкость битума и температура начала уплотнения смеси влияет на получаемую плотность асфальтобетонного покрытия. Чем больше вязкость битума, тем в большей степени влияет температура начала уплотнения смеси на плотность асфальтобетона. Установлено, 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 происходит снижение получаемой плотности. Это связано с разрушением структуры битума. При высокой температуре смеси частицы материала сжимаются под действием вальца катка, вытесняя битум в зонах контакта. 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 сжатии частиц материала и ухудшению уплотняемости смеси при действии постоянной нагрузки [39, 40]. Экспериментальными исследованиями установлено, что асфальтобетонная смесь, независимо от марки битума, лучшим образом уплотняется в диапазоне вязкостей битумов от 10 до 25 Па·с, что позволяет определять температурные границы эффективного уплотнения горячих смесей при использовании разных марок битумов [10]. На основании данных экспериментов сделан вывод о том, вибрационные машины способны уплотнять асфальтобетонные смеси при более низких температурах. Экспериментальными исследованиями доказано, что вибрационный каток массой 4 т обеспечивает коэффициент уплотнения 0,98...0,99 при температуре начала уплотнения смесей 60 °С, чего достичь катками статического действия практически невозможно [26]. Такой эффект объясняется тем, что под действием циклической нагрузки происходит разжижение битумной пленки, уменьшается ее вязкость, что позволяет получить более высокую плотность покрытия. Температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси влияют на организацию и продолжительность работ. Продолжительность работ определяется темпом охлаждения смеси и зависит от разных факторов. Влияние температуры

на свойства материала и характер охлаждения смеси в зависимости от метеорологических условий при строительстве покрытий рассмотрены в работе А.А. Инземцева [12]. Установлено, что охлаждение горячей асфальтобетонной смеси, независимо от ее состава, температуры воздуха и скорости ветра, подчиняется экспоненциальному закону, 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 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 в 1/ч, которая определяется выражением

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

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

Данная зависимость описывает характер охлаждения поверхности слоя смеси на заключительной стадии уплотнения. При температуре окружающего воздуха выше 20 °С предложенная зависимость имеет значительные погрешности с результатами измерения температуры слоя асфальтобетона. Такое различие между расчетными значениями и экспериментальными данными объясняется тем, что предложенная зависимость не учитывает влияния нагрева основания, которое влияет на характер распределения температуры внутри слоя горячей смеси. Работами В.Н. Богословского, Г.Ф. Мучника, М.А. Михеева установлено, что скорость охлаждения (темпа охлаждения) в регулярных нестационарных теплопередачах не зависит от времени и начального распределения температуры [5, 27, 28]. Величина скорости охлаждения зависит от размеров тела, его теплофизических характеристик и условиями теплообмена на поверхности тела. Установлено, что скорость охлаждения плоского тела зависит от характеристики неравномерности распределения температуры в сечении тела и определяется выражением

$$\Psi = t_{\text{п}} - t_{\text{в}} / t_{\text{с}} - t_{\text{в}}, \quad (2.3)$$

где Ψ – коэффициент неравномерности распределения температуры по сечению тела, безразмерная величина; $t_{\text{п}}$ – температура поверхности тела, °С; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; $t_{\text{с}}$ – средняя температура по сечению тела, °С.

Для определения темпа охлаждения тела предложена зависимость [27]

$$m = 2\alpha\Psi / \gamma ch, \quad 1/\text{ч}. \quad (2.4)$$

Анализ зависимостей для определения темпа охлаждения показывает, что при коэффициенте неравномерности распределения температуры по толщине слоя, равного единице, зависимости (2.2) и (2.3) одинаковы. Следовательно, в предложенной зависимости (2.2) величина Ψ равна единице, что соответствует охлаждению слоя на заключительной стадии строительства покрытия.

В работах Б.И. Ладыгина и Н.В. Горельшева влияние нагрева нижележащего слоя дорожной одежды учитывается за счет коэффициента влияния температуры основания [10, 24]. По данным исследований Б.И. Ладыгина учитывать влияние нагрева основания необходимо при температуре воздуха 40...45 °С. При равной температуре основания и окружающего воздуха коэффициент равен единице. По данным Н.В. Горельшева, численное значение коэффициента принимается единице при равенстве температур основания и воздуха, а с повышением температуры воздуха выше 25 °С значение коэффициента принимается 1,25 [10]. В результате моделирования тепловых процессов в слое горячей асфальтобетонной смеси при устройстве дорожного покрытия установлено, что температура основания влияет на температурные режимы слоя смеси, закономерность носит общий характер и численное значение коэффициента зависит от разницы температур основания и воздуха [17]. Следует заметить, что до настоящего времени не выяснен вопрос влияния температуры основания на характер распределения температуры смеси при ее укладке в выбоину. Поэтому необходимо уточнить влияние температуры основания на процесс охлаждения горячей смеси при производстве ремонтных работ.

Горячая асфальтобетонная смесь доставляется к месту производства работы с температурой, зависящей от марки битума и типа смеси. За счет разницы в температурах смеси и основания, а также окружающего воздуха, происходят тепловые процессы, влияющие на качество работ. Понижение температуры смеси способствует изменению теплофизических и деформационно-прочностных характеристик, что необходимо учитывать при производстве работ с применением горячих асфальтобетонных смесей.

2.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Темп охлаждения слоя покрытия зависит от теплофизических характеристик горячей смеси, к которым относятся удельная теплоемкость (c), коэффициент теплоотдачи (α) и коэффициент теплопроводности смеси (λ). Установлено, что удельная теплоемкость смеси зависит от температуры. Исследованиями Л.Б. Гезенцева, Н.В. Горельше-

ва, А.М. Богуславского и И.В. Королева установлено, что удельная теплоемкость каменных материалов в два раза ниже удельной теплоемкости битума [10]. Численные значения удельной теплоемкости битума приведены в табл. 2.1 и на рис. 2.2.

В результате обработки представленных данных установлено, что между температурой и удельной теплоемкостью битума существует зависимость, которая имеет вид

$$C_6 = 1,1333e^{00036t}, \text{ кДж/кг·град}, \quad (2.5)$$

где C_6 – удельная теплоемкость битума, кДж/кг·град; t – температура битума, °С.

В соответствии с нормативными документами горячие асфальтобетонные смеси, в зависимости от процентного содержания минеральных материалов, делятся на типы. Процентное содержание каменного материала, в зависимости от типа смеси, разное, что влияет на удельную теплоемкость смесей. Поэтому количество тепла, соответствующее определенному объему горячей смеси, зависит от типа смеси,

2.1. Зависимость удельной теплоемкости битума от температуры

| Температура битума, °С | -20...0 | 1...20 | 30...60 | 60...100 | 100...150 | 150...180 |
|---|---------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Удельная теплоемкость битума, кДж/кг·град | 1,05 | 1,1...1,25 | 1,25...1,45 | 1,45...1,65 | 1,65...1,85 | 1,85...2,2 |

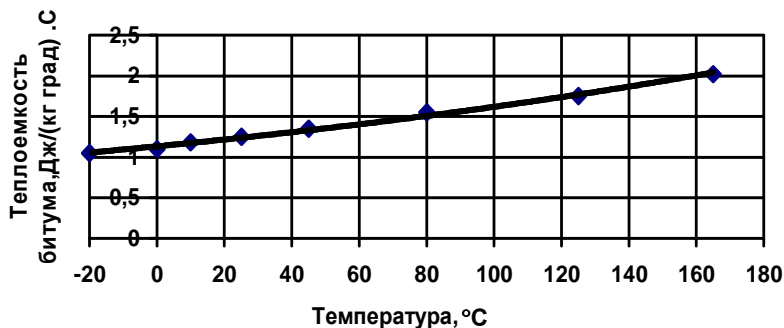


Рис. 2.2. Зависимость теплоемкости битума от температуры

что влияет на тепловые процессы при производстве ремонтных работ. Численное значение удельной теплоемкости смеси можно определить по формуле [25]

$$C_{см} = 0,01[(100 - z)c_6 + zc_{агр}], \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}, \quad (2.6)$$

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

Используя данную зависимость, определены численные значения удельной теплоемкости смесей при разных температурах с учетом процентного содержания агрегатов (табл. 2.2). Из представленных данных видно, что с повышением температуры, независимо от типа смеси, удельная теплоемкость увеличивается. В то же время, с увеличением процентного содержания минеральных агрегатов, удельная теплоемкость смеси снижается.

Известно, что удельная теплоемкость влияет на продолжительность охлаждения смеси. В таблице 2.3 представлено расчетное время в зависимости от теплоемкости смеси при разных температурах укладки в покрытие. Из представленных данных видно, что с увеличением удельной теплоемкости продолжительность охлаждения слоя увеличивается независимо от температуры смеси при укладке

Для установления общей закономерности продолжительности охлаждения горячей смеси в зависимости от ее удельной теплоемкости, при разных температурах укладки горячей смеси, условно принимаем

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

| Содержание агрегатов, % | Температура смеси, °C | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| 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 | 1,01 | 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 |

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

| Температура смеси, °С | Удельная теплоемкость смеси, кДж/кг·град | | | | | | | |
|-----------------------|--|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| | 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 | 64 |
| 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 |

продолжительность охлаждения смеси при удельной теплоемкости, равной 1,65 кДж/кг·град за единицу и представим данные в относительных величинах. Анализ полученных данных показал, что величина удельной теплоемкости смеси влияет на продолжительность охлаждения смеси и не зависит от температуры смеси при укладке.

Величиной, характеризующей перераспределение тепла внутри слоя смеси и передачу тепла боковым стенкам выбоины, является коэффициент теплопроводности (λ), который зависит от плотности материала (табл. 2.4) [17].

Из представленных данных видно, что с увеличением плотности материала коэффициент теплопроводности увеличивается, что способствует уменьшению времени на выполнение работ с горячей смесью.

2.4. Влияние плотности материала на теплофизические характеристики асфальтобетона

| Материал | Объемная масса, кг/м ³ | Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С | Удельная теплоемкость, КДж/кг·°С |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Асфальтобетон крупнозернистый | 2400 | 1,00 | 0,40 |
| Асфальтобетон среднезернистый | 2350 | 0,90 | 0,40 |
| Асфальтобетон мелкозернистый | 2300 | 0,80 | 0,40 |
| Битумоминеральная смесь | 2300 | 0,85 | 0,40 |

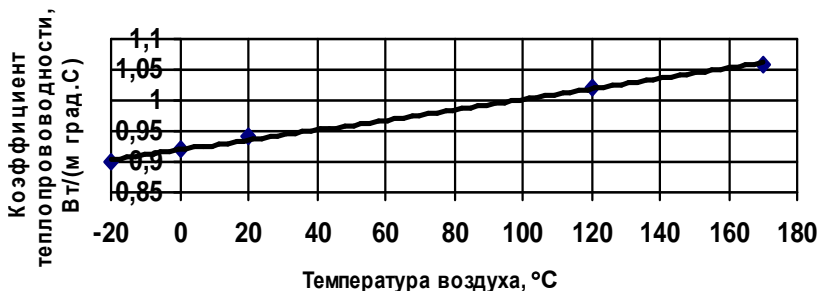


Рис. 2.3. Влияние температуры смеси на величину коэффициента теплопроводности

Выполнение работ по устройству дорожных покрытий производится с применением горячих асфальтобетонных смесей. При производстве ремонтных работ, особенно при пониженных температурах воздуха, горячая смесь укладывается в выбоину, где температура боковых поверхностей и основания выбоины покрытия, как правило, равняется температуре воздуха. Известно, что коэффициент теплопередачи зависит также от температуры смеси [17]. В результате обработки экспериментальных данных, представленных в работе [2], получена зависимость коэффициента теплопроводности асфальтобетона от температуры воздуха в интервале температур от -20 до $+170$ °C, которая представлена на рис. 2.3.

Численное значение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры воздуха можно определить из выражения

$$\lambda = 0,92e^{0,0008t}, \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}, \quad (2.7)$$

где t – температура смеси. Коэффициент корреляции равен 0,997.

Следовательно, задаваясь типом смеси и температурными режимами с учетом марки битума, по данным зависимостям можно определить теплофизические характеристики смесей, влияющие на температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси в выбоине дорожно-покрытия.

2.3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Выбор технологии уплотнения асфальтобетонных смесей позволяет регулировать процесс формирования макроструктуры дорожного покрытия в процессе производства ремонтных работ. Обеспечить качество уплотнения дорожного материала возможно при соблюдении

определенного соотношения между развивающимися контактными напряжениями под рабочим органом машины и прочностными характеристиками уплотняемого материала, которые имеют вид [30]

$$\sigma_k = (0,9 \dots 1,0) [\sigma], \quad (2.8)$$

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

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, для качественного уплотнения покрытий должно быть обеспечено соответствие параметров уплотняющих машин деформативным и прочностным показателям уплотняемого материала, которые меняются по мере уплотнения. Известно, что предел прочности горячего асфальтобетона зависит от температуры, типа смеси, степени уплотнения и толщины уплотняемого слоя [17, 23]. В общем виде зависимость предела прочности горячей асфальтобетонной смеси от перечисленных факторов можно представить в виде зависимости

$$[\sigma]_{\text{пр}} = f(t_{\text{см}}^{\circ}; K_y; h/d), \quad (2.9)$$

где $t_{\text{см}}^{\circ}$ – температура смеси, °С; K_y – коэффициент уплотнения; h/d – отношение толщины слоя к дуге контакта вальца катка с материалом.

Вопрос влияния температуры смеси на предел прочности рассматривался многими исследователями [10, 17, 26, 29]. Установлено, что с увеличением содержания щебня в смеси предел прочности повышается в среднем на 14...17%. С понижением температуры увеличивается предел прочности смеси. На рисунке 2.4 представлена зависимость предела прочности разных типов смеси от температуры, полученная на основании данных, представленных в работах [22, 26, 29].

Как видно из представленных данных, зависимость предела прочности смеси от температуры на протяжении всего процесса уплотнения носит нелинейный характер и может быть аппроксимирована уравнением

$$[\sigma] = 14,24 e^{-0,0255t_{\text{см}}}, \quad (2.10)$$

где $t_{\text{см}}$ – температура смеси, °С; e – основание натурального логарифма. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,97.

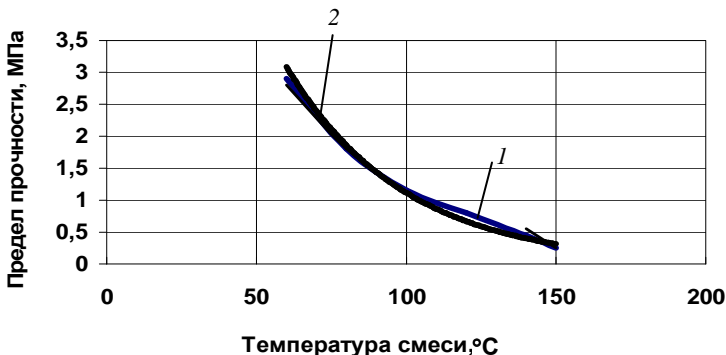


Рис. 2.4. Влияние температуры смеси на предел прочности асфальтобетона:
 1 – по данным исследований В.Б. Пермякова, В.П. Ложечко, Т.Н. Сергеевой;
 2 – аппроксимированная зависимость

Исследованиями установлено, что при уплотнении асфальтобетонных смесей между пределом прочности смеси и коэффициентом уплотнения существует зависимость. Учитывая, что в результате работы уплотняющих машин необходимо обеспечить требуемый коэффициент уплотнения, принимаем значения предела прочности смеси при температуре окончания процесса уплотнения за единицу. Тогда в относительных величинах напряжения, выраженные в долях от предела прочности смеси, с учетом коэффициента уплотнения, можно определить по формуле

$$\sigma_k / [\sigma] = 0,0028 e^{5,878K_y}, \quad (2.11)$$

где σ_k – контактные напряжения под вальцом катка; $[\sigma]$ – предел прочности смеси при температуре окончания уплотнения, зависящей от типа смеси; K_y – коэффициент уплотнения. Коэффициент корреляции равен 0,99.

На рисунке 2.5 представлена зависимость в относительной величине напряжения от коэффициента уплотнения для смесей типа А и В, полученной по данным В.Б. Пермякова и А.В. Захаренко [23]. Из представленных данных видно, что независимо от типа смеси, в относительных величинах между контактными напряжениями и достигаемым коэффициентом уплотнения существует зависимость, аналогичная уплотнению грунтов.

При значительной глубине выбоины укладка смеси, как правило, осуществляется на всю толщину слоя. Известно, что предел прочности

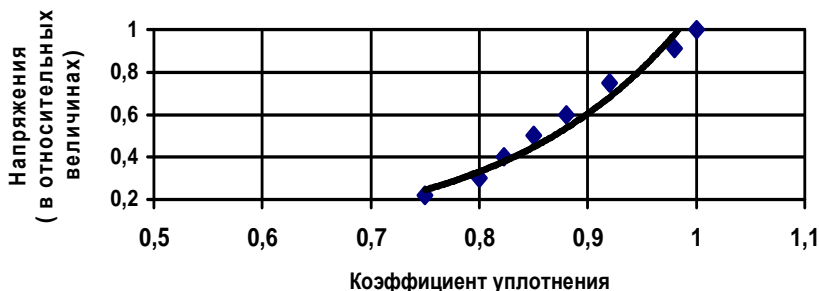


Рис. 2.5. Зависимость между относительной величиной напряжения и коэффициентом уплотнения смеси

материала меняется с толщиной укладываемого слоя материала [29]. В зависимости от конструктивных параметров дорожной одежды толщина укладываемого слоя материала может быть разной. Для уточнения влияния толщины уплотняемого слоя материала на предел прочности асфальтобетона на сжатие были изготовлены образцы с разной высотой (рис. 2.6).

Высота кернов асфальтобетона принималась в пределах 0,25–1,5 стандартной высоты керна. За единицу принято значение предела прочности стандартного керна (диаметр равен высоте образца). Результаты испытания представлены на рис. 2.7.

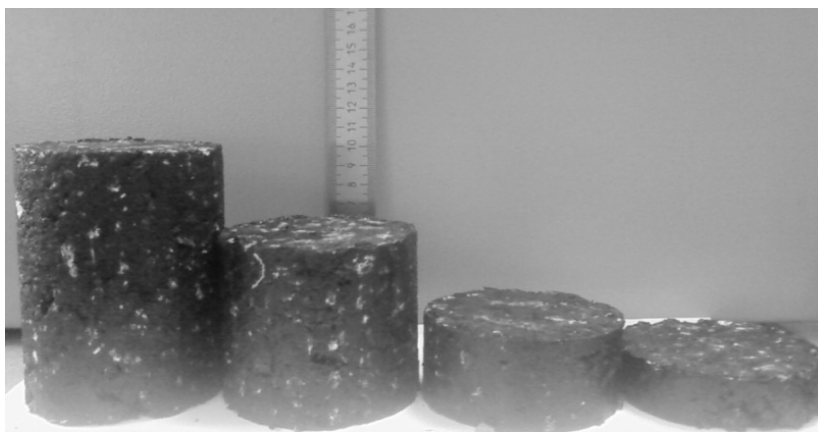


Рис. 2.6. Образцы асфальтобетона для определения влияния толщины слоя одежды на прочностные параметры

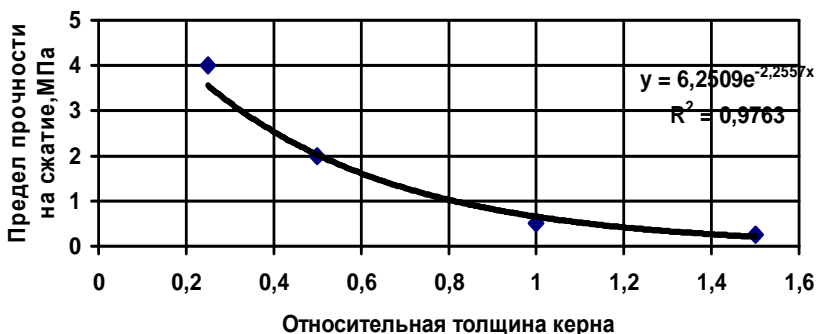


Рис. 2.7. Зависимость предела прочности на сжатие от относительной толщины слоя при температуре 80 °С

Из представленных данных видно, что в зависимости от толщины укладываемого слоя смеси его прочностные характеристики меняются в широких пределах, что оказывает влияние на достижение требуемого качества уплотнения. Максимальная толщина слоя, при которой основание оказывает влияние на прочностные характеристики слоя смеси, равно двум диаметрам штампа. С увеличением плотности материала увеличивается предел прочности материала.

Установлено, что при устройстве дорожного покрытия существенное влияние на прочностные характеристики слоя горячей смеси оказывает способ распределения и предварительного уплотнения асфальтобетонной смеси. При производстве ремонтных работ укладка горячей смеси в выбоину зависит от размеров выбоины и может осуществляться вручную или механизированным способом, что влияет на предварительное уплотнение укладываемого слоя смеси. В таблице 2.5 представлены численные значения коэффициента предварительного уплотнения смеси с учетом способа укладки и распределения смеси в выбоину [20].

2.5. Влияние способа укладки горячей асфальтобетонной смеси на коэффициент предварительного уплотнения

| Способ укладки и предварительного уплотнения горячей смеси | Вручную | Автогрейдер или укладчик без уплотнения | Укладчик с трамбующим брусом, без виброплиты |
|--|-------------|---|--|
| Коэффициент предварительного уплотнения | 0,70...0,75 | 0,75...0,80 | 0,85...0,87 |

С учетом отмеченных факторов можно использовать зависимость для определения предела прочности горячей асфальтобетонной смеси, применяемую при устройстве дорожных покрытий нежесткого типа, которая имеет вид

$$\sigma_{\text{пр}} = 0,08 e^{[5,876K_y - 0,697(h/d) - 0,025t_{\text{см}}]}, \quad (2.12)$$

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.

2.4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ УПЛОТНЕНИЯ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ВИБРАЦИОННЫМИ ПЛИТАМИ

Анализ применяемых технологий по ямочному ремонту асфальтобетонных покрытий с применением горячих смесей показал, что основными недостатками, способствующими низкому качеству ремонтных работ, являются нарушение требований по подготовке основания покрытия, несоблюдение температурных режимов укладки и уплотнения горячих смесей и недостаточное уплотнение асфальтобетона. В случае распределения горячей смеси ручным способом коэффициент предварительного уплотнения горячего асфальтобетона находится в пределах 0,7...0,75. Ввиду незначительной площади дефектной поверхности, применение дорожных катков нецелесообразно. В этом случае применяют ручные катки. Анализ силовых параметров ручных катков, применяемых для этих целей, показал, что они не в состоянии обеспечить требуемые параметры укладываемого асфальтобетона. Для обеспечения качественного уплотнения необходимо, чтобы контактные напряжения под рабочим органом машины были близки к пределу прочности уплотняемого асфальтобетона. С учетом малого значения отношения h/d (h – толщина уплотняемого слоя материала, d – минимальный размер поддона вибрационной плиты) предел прочности горячей смеси имеет более высокое значение, чем при укладке в дорожное покрытие. Поэтому необходимо применять машины со значительными силовыми параметрами. Дорожные катки, применяемые при строительстве асфальтобетонных покрытий, в зависимости от места назначения в технологическом процессе устройства асфальтобетонного покрытия, имеют линейные давления в пределах от 40...100 кН/п.м. Линейное давление ручного катка статического действия соответствует 0,05...0,1 кН/п.м, поэтому 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 способствует низкому качеству работ. Более эффективным для этих целей является применение вибрационных плит. Практика применения вибрационных плит, в зависимости от области их применения, показывает, что их параметры меняются в широком интервале значений.

Известно, что величина необратимой деформации уплотняемого материала зависит от соответствия контактных напряжений под рабочим органом уплотняющей машины пределу прочности уплотняемого материала, времени действия нагрузки и скорости изменения напряженного состояния уплотняемого материала.

На основании экспериментальных исследований установлено, что время действия нагрузки при воздействии вальца катка при уплотнении горячей смеси находится в пределах 0,2...0,4 с, поэтому для достижения максимальной деформации уплотняемого материала требуется определенное количество проходов катка. При уплотнении вибрационными плитами время действия нагрузки значительно больше и зависит от длины поддона плиты и при одинаковой скорости передвижения позволяет уменьшить число проходов для достижения требуемой плотности материала в заданных температурных интервалах уплотняемой горячей смеси.

Экспериментально установлено, что после прохода вальца катка способность уплотняемой горячей смеси действию внешней нагрузки резко снижается. Это можно объяснить тем, что под действием нагрузки от вальца катка нарушаются связи между частицами горячей смеси, обусловленные вязкостью вяжущего материала. Через незначительный промежуток времени связи между частицами материала смеси восстанавливаются, что приводит к повышению способности материала сопротивляться внешней нагрузке. При работе вибрационных плит, за счет длительного воздействия нагрузки и снижения способности материала сопротивляться внешней нагрузке, достигается большая величина необратимой деформации материала, что позволяет достичь более высокой плотности материала при меньших внешних нагрузках.

Практика применения вибрационных плит для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей показывает, что в настоящий момент они применяются без учета влияния массы машины на ее уплотняющую способность, а также без учета свойств применяемого материала

и конструктивных параметров покрытия. Существующие зависимости для определения величины контактных напряжений под вибрационной плитой получены на основании экспериментальных исследований при уплотнении грунтового полупространства без учета влияния жесткости основания. Отсутствие аналитических зависимостей для расчета контактных напряжений под вибрационной плитой не позволяет обоснованно подходить к выбору параметров машин с учетом конструктивных особенностей вибрационных плит и прочностных характеристик уплотняемого материала.

Известно, что для устранения явления налипания частиц горячей смеси к рабочей поверхности плиты необходимо осуществлять прогрев контактной поверхности плиты. У существующих вибрационных плит этот фактор не учитывается и требует дополнительных конструктивных решений с учетом области их применения. Опыт применения вибрационных плит для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, а также проведенные экспериментальные исследования по определению эффективности плит по отношению к каткам показали, что применение вибрационных плит для ремонта асфальтобетонных покрытий является более эффективным при условии правильного выбора их параметров и требует дальнейших исследований.

Глава 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕМОНТНЫХ РАБОТ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

В данной главе представлена математическая модель распределения температуры в заданном объеме горячей асфальтобетонной смеси и рассмотрено распределение температуры смеси при ее укладке в выбоину дорожного покрытия. Существующие математические модели, позволяющие моделировать тепловые процессы в дорожных покрытиях нежесткого типа, рассчитаны на определение температуры смеси в одной плоскости как при устройстве дорожных покрытий, так и содержании автомобильных дорог. 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. Поэтому математическая модель должна решать задачу в трехмерном пространстве и иметь возможность определять температуру смеси в любой точке объема материала. Асфальтобетонная смесь состоит из выбранного состава минеральных материалов и вяжущего, теплофизические свойства которых зависят от температурных режимов при устройстве дорожных покрытий. Продолжительность охлаждения уложенного слоя горячей асфальтобетонной смеси определяется темпом охлаждения и зависит от геометрических размеров выбоины, теплофизических свойств смеси и погодных условий производства ремонтных работ. Анализ процесса охлаждения слоя горячей асфальтобетонной смеси при устройстве покрытия и производстве ремонтных работ показал, что имеются различия в процессе охлаждения горячей смеси, при этом характер охлаждения по толщине уложенного слоя подчиняется общей закономерности. В начальный момент времени при укладке горячей смеси температура по глубине уложенного слоя имеет одинаковую температуру. 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. За счет разницы температуры поверхности дорожного покрытия и укладываемой горячей смеси тепло передается через боковые поверхности выбоины дорожному покрытию, что способствует резкому понижению температуры горячей смеси в зоне выбоина–покрытие. Потери тепла в контактных зонах контакта 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.

3.1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

При разработке математической модели, описывающей процесс охлаждения горячей смеси в выбоине дорожного покрытия, приняты следующие допущения:

- температурные режимы укладки и уплотнения горячей смеси при производстве ремонтных работ дорожного покрытия нежесткого типа зависят от типа смеси, марки битума и ограничены во времени температурным интервалом 160...50 °С;
- толщина укладываемого слоя горячей смеси зависит глубины выбоины или просадки дорожного покрытия и находится в пределах 0,01...0,3 м;
- в начальный момент времени распределения смеси температура 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 и через боковые поверхности выбоины за счет теплопроводности материала;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярно к поверхности слоя;
- 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.

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

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

$$\lambda_1 \partial t / \partial y \Big|_{h=0} = \alpha [t(0; \tau) - t_B]; \quad (3.1)$$

– условие равенства тепловых потоков на границах слоев горячей смеси и слоя покрытия имеет вид

$$\lambda_i \partial t_i / \partial y_i \Big|_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \partial t_{i+1} / \partial y_{i+1} \Big|_{y_i=y_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad (3.2)$$

– условие на бесконечность, ограничивающее температуру в полупространстве, имеет вид

$$t_4 \Big|_{\tau=0}^{y=h_4=\infty} < \infty (t_{\text{очн}}), \quad (3.3)$$

здесь h_i – толщины слоев дорожной конструкции, м; τ – время, с; t_B – температура воздуха, °С; $t_{\text{очн}}$ – температура грунта на заданной глубине, °С; $t(0; \tau)$ – температура смеси в момент укладки, °С; α – суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_{\text{изл}},$$

где $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи смеси за счет теплового излучения, величина которого зависит от температуры воздуха и смеси, Вт/м²·К. Численное значение $\alpha_{\text{изл}}$ может быть определено по формуле

$$\alpha_{\text{изл}} = \{\xi c_0 [(t/100)^4 - (t_B/100)^4]\} / (t - t_B), \quad (3.4)$$

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

Коэффициент теплоотдачи за счет конвективного обмена с окружающей средой зависит от скорости ветра, и его расчетное значение может быть определено на основе эмпирических зависимостей [43]

$$\alpha = 4,23V^{1,6} + 3,25eXp(-1,28V), \quad (3.5)$$

где V – скорость ветра, м/с; Вт/м·град;

Аналитическая модель основана на уравнении теплопроводности для изотропной неоднородной среды, имеющей вид

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_V T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F, \quad (3.6)$$

где ρ – плотность среды; c_V – теплоемкость среды при постоянном объеме; t – время; x, y, z – координаты; $T = T(x, y, z, t)$ – температура, которая вычисляется при помощи уравнения теплопроводности; λ – коэффициент теплопроводности; $F = F(x, y, z, t)$ – заданная плотность тепловых источников.

В основе аналитической модели теплопроводности используется модель теплового потока, определяемая уравнением Био–Фурье

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (3.7)$$

где q – поверхностная плотность теплового потока, проходящего через плоскость, перпендикулярную тепловому потоку, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град); T – температура, изменяющаяся вдоль оси x , °С; $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры, °С/м.

Известно, что коэффициент теплопроводности зависит от плотности материала. Для асфальтобетона зависимость коэффициента теплопроводности от плотности при температуре 120 °С имеет вид [17]

$$\lambda = (0,649\gamma - 0,229), \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}. \quad (3.8)$$

Производство работ с применением горячих асфальтобетонных смесей осуществляется в заданных температурных интервалах, зависящих от типа смеси и марки битума, погодных условий и производства работ, что влияет на величину коэффициента теплопроводности. Доказано, что влияние температуры на величину коэффициента теплопроводности смеси можно выразить через коэффициент, зависящий от температуры смеси, величина которого определяется из выражения

$$K_T = 0,895e^{0,0898(t/100)}, \quad (3.9)$$

где t – температура смеси. Коэффициент корреляции равен 0,997.

Тогда в общем виде зависимость коэффициента теплопроводности от плотности и температуры смеси имеет вид

$$\lambda = K_T (0,649\gamma - 0,229). \quad (3.10)$$

Передача теплоты конвекцией основывается на законе Ньютона–Рихмана, согласно которому тепловой поток от поверхности горячей смеси выбоины к воздуху пропорционален поверхности теплообмена и разности температур между температурой твердой стенки T_c и темпе-

ратурой воздуха T_B . При разработке модели использована эмпирическая зависимость, основанная на том, что охлаждение горячей асфальтобетонной смеси в тонком слое, независимо от ее состава, температуры воздуха и скорости ветра подчиняется экспоненциальному закону [12]

$$\ln\left(\frac{T_0 - T_B}{T_p - T_B}\right) = m\tau = \frac{2\lambda}{\gamma ch} t, \quad (3.11)$$

где t – время, ч; T_0 – температура смеси в начальный момент времени, °С; T_B – температура воздуха, °С; T_p – температура смеси в расчетный момент времени, °С; m – скорость охлаждения, (град)⁻¹; λ – коэффициент теплоотдачи смеси, Вт/(м·град); c – теплоемкость смеси, Дж/(кг·град); γ – объемная масса смеси, кг/м³; h – толщина слоя смеси, м.

Построение имитационной модели производилось на основе сеточной модели, включающей в себя семь горизонтальных слоев (рис. 3.1) с разбивкой каждого слоя на однородные прямоугольные параллелепипеды (рис. 3.2), между которыми осуществлялся теплообмен через боковые грани в вертикальной \overline{OZ} и горизонтальной \overline{OXY} плоскостях в соответствии с формулами (1) – (4) с использованием метода Монте-Карло.

Верхний слой ($Z = 6$) является воздушным слоем, расположенным непосредственно над дорожной одеждой, где производятся работы. Нижний слой ($Z = 0$) – грунт. Остальные слои – укладываемая

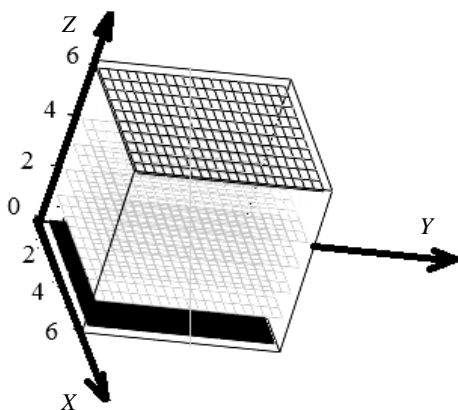


Рис. 3.1. Топология сеточной модели

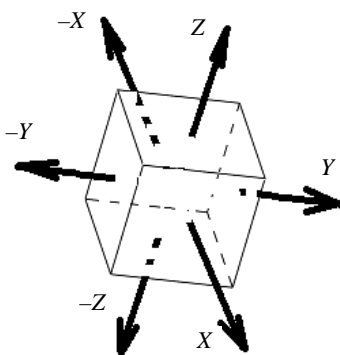


Рис. 3.2. Элемент модели

асфальтобетонная смесь. Однородность параллелепипедов подразумевает их одинаковые массовые и, следовательно, теплоэнергетические характеристики при незначительных изменениях (до 25%) по высоте.

Построение модели осуществлялось в среде EXCEL, что позволяет значительно увеличить скорость вычислений при переходе к многопроцессорной вычислительной технике, а также дает наглядное представление о процессах теплообмена, происходящих в любом сечении.

Имитационная модель включает: стохастическую модель коэффициентов теплопроводности, задание граничных условий (матрицу распределения температуры подножного грунта перед непосредственной засыпкой асфальтобетонной смеси и матрицу горизонтального распределения температуры по поверхности асфальтобетонной смеси после ее засыпки), стохастическую модель теплообмена. Шаг моделирования определяется длительностью процесса производства работ и составляет примерно 1% данного времени (1 мин).

Стохастическое моделирование коэффициентов теплопроводности λ состояло в имитации на каждом шаге моделирования коэффициентов теплопроводности для каждой из шести граней прямоугольного параллелепипеда (рис. 3.3) сеточной модели, сгруппированных в виде трех матриц:

- матрица коэффициентов конвенционного теплообмена воздушных масс (рис. 3.3, а) в верхнем слое сеточной модели, где $\lambda_0 = 0,022...0,026$ Вт/(м·град);

- матрица коэффициентов диффузионного теплообмена (рис. 3.3, б) для всех средних слоев сеточной модели, где $\lambda_0 = 0,70...0,75$ Вт/(м·град);

- матрица коэффициентов диффузионного теплообмена (рис. 3.3, в) для нижнего слоя сеточной модели, где $\lambda_0 = 0,70...0,8$ Вт/(м·град).

Следует заметить, что элемент модели для каждого слоя укладываемой смеси (рис. 3.3, 3.4, 3.7, 3.8) имеет координаты: $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 0\} \times \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 0\}$, а если одна из координат – нулевая, то это пограничный слой старого покрытия по отношению к укладываемому.

В результате моделирования оценивалось математическое ожидание $M\{\lambda\}$ и дисперсия разброса СКО $\{\lambda\}$ параметра λ для всех слоев сеточной модели, а также для коэффициентов λ , расположенных по периметру каждого слоя в целях оценки адекватности моделирования параметра λ .

Начальное задание распределения температуры подножного грунта и поверхности уложенной смеси получено за счет оцифровки изображения тепловизора (рис. 3.4).

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
|---|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|
| 0 | 0 | 0.9 | 0.1 | 0 | 1 | 0.4 | 0.1 |
| 1 | 0.6 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | 0.8 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | 0.4 |
| 0 | 0.9 | 0.9 | 1 | 0.6 | 1 | 1 | 0.8 |

$$M[\lambda] = 0,024899$$

a)

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 1 | 0.6 | 1 | 0.85 | 0.9 | 0.84 | 0.78 |
| 1 | 0.29 | 0.75 | 0.94 | 0.99 | 0.3 | 0.37 | 1 |
| 2 | 0.95 | 0.94 | 0.92 | 0.96 | 0.98 | 0.94 | 1 |
| 3 | 0.72 | 0.94 | 0.94 | 1 | 1 | 0.92 | 0.7 |
| 4 | 0.67 | 0.83 | 1 | 1 | 1 | 0.32 | 0.96 |
| 5 | 0.95 | 0.35 | 0.58 | 0.48 | 0.94 | 0.27 | 0.61 |
| 0 | 1 | 1 | 0.98 | 0.95 | 0.95 | 0.88 | 0.29 |

$$M[\lambda] = 0,7869$$

$$M[\lambda] = 0,8112$$

б)

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 1 | 0.83 | 0.49 | 0.51 | 1 | 0.93 | 0.98 |
| 1 | 0.33 | 0.6 | 1 | 1 | 0.31 | 0.92 | 0.11 |
| 2 | 0.16 | 0.97 | 0.42 | 1 | 0.99 | 0.67 | 1 |
| 3 | 0.83 | 0.4 | 0.63 | 0.75 | 0.54 | 0.87 | 0.96 |
| 4 | 0.79 | 0.99 | 0.42 | 0.47 | 0.95 | 0.85 | 0.21 |
| 5 | 0.98 | 0.94 | 0.49 | 1 | 0.97 | 0.63 | 1 |
| 0 | 0.38 | 0.56 | 0.99 | 1 | 0.31 | 0.93 | 0.67 |

$$M[\lambda] = 0,751$$

$$M[\lambda] = 0,707$$

в)

Рис. 3.3. Моделирование коэффициентов теплопроводности:

a – конвекционный теплообмен верхнего слоя; б – диффузионный теплообмен внутренних слоев; в – диффузионный теплообмен основания выбоины

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 245 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |
| 1 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |
| 2 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |
| 3 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |
| 4 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |
| 5 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 2039 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|------|
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |
| 1 | 15 | 10 | 60 | 99 | 90 | 9 | 15 | |
| 2 | 15 | ## | 70 | 80 | 60 | 19 | 15 | |
| 3 | 15 | 40 | 50 | ## | 90 | 16 | 15 | |
| 4 | 15 | 50 | 30 | 30 | 60 | 18 | 15 | |
| 5 | 15 | 18 | 40 | 60 | 50 | 20 | 15 | |
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |

a)

б)

Рис. 3.4. Граничные условия модели:

a – температура подножного грунта;

б – температура верхнего слоя засыпанной смеси; l – суммарная теплота слоя

| 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Рис. 3.5. Шкала градаций температур

На рис. 3.3, 3.4, 3.7, 3.8 поле температур привязано к единой шкале градаций температур, приведенной на рис. 3.5.

Стохастическая модель теплообмена основана на том, что каждый конечный элемент модели в виде прямоугольного параллелепипеда (см. рис. 3.2) разбивается на шесть подэлементов в виде пирамид, каждая из которых имеет в качестве основания соответствующую грань прямоугольного параллелепипеда и общую для всех вершину – центр данного параллелепипеда (рис. 3.6).

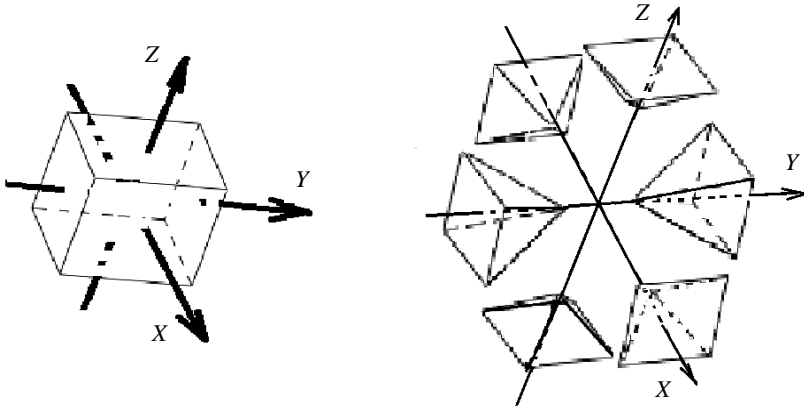


Рис. 3.6. Структура модели теплообмена

Модель теплообмена основывается на формуле (3.6). При этом, для каждого слоя i асфальтобетонной смеси рассчитываются две матрицы: матрица T_{ij} – распределение температуры слоя i на шаге итерации j и матрица $T_{i,j+1}$ – распределение температуры слоя i на шаге итерации $j+1$. При этом задействуются однородные по принципу вычисления процедуры, включающие шесть операций суммирования, обеспечивающие определение температуры каждого сеточного элемента модели (рис. 3.6) на основе сопоставления температур его шести подэлементов с их соответствующими подэлементом-соседями. Используя формулу (3.6) и данные, приведенные на рис. 3.4, несложно получить матрицу $T_{i,j+1}$, исходя из матрицы T_{ij} .

На рисунках 3.7 и 3.8 приведены результаты распределения температур для первого и $j=10$ шагов моделирования соответственно для первого, третьего и последнего слоя асфальтобетонной смеси.

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 1 | 15 | 10 | 60 | 99 | 90 | 9 | 15 |
| 2 | 15 | 70 | 80 | 60 | 19 | 15 | 15 |
| 3 | 15 | 40 | 50 | 90 | 18 | 15 | 15 |
| 4 | 15 | 50 | 30 | 30 | 60 | 18 | 15 |
| 5 | 15 | 18 | 40 | 60 | 50 | 20 | 15 |
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 1 | 15 | 10 | 60 | 99 | 90 | 9 | 15 |
| 2 | 15 | 70 | 80 | 60 | 19 | 15 | 15 |
| 3 | 15 | 40 | 50 | 90 | 18 | 15 | 15 |
| 4 | 15 | 50 | 30 | 30 | 60 | 18 | 15 |
| 5 | 15 | 18 | 40 | 60 | 50 | 20 | 15 |
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 1 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 2 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 3 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 4 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 5 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 0 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |

Рис. 3.7. Начальное межслоевое распределение температуры

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
| 0 | 13 | 22 | 17 | 15 | 18 | 20 | 19 |
| 1 | 18 | 20 | 15 | 30 | 45 | 20 | 16 |
| 2 | 22 | 30 | 60 | 90 | 70 | 25 | 22 |
| 3 | 19 | 22 | 40 | 70 | 80 | 50 | 29 |
| 4 | 18 | 33 | 40 | 29 | 20 | 35 | 17 |
| 5 | 22 | 29 | 32 | 17 | 21 | 20 | 14 |
| 0 | 19 | 23 | 17 | 25 | 28 | 17 | 21 |

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
| 0 | 12 | 16 | 16 | 15 | 16 | 14 | 10 |
| 1 | 15 | 20 | 15 | 30 | 45 | 20 | 10 |
| 2 | 16 | 30 | 60 | 90 | 40 | 25 | 20 |
| 3 | 18 | 22 | 40 | 60 | 30 | 50 | 22 |
| 4 | 16 | 29 | 40 | 29 | 27 | 35 | 20 |
| 5 | 22 | 26 | 32 | 17 | 21 | 20 | 19 |
| 0 | 16 | 23 | 15 | 25 | 21 | 14 | 23 |

| | | | | | | | |
|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 |
| 0 | 12 | 16 | 16 | 15 | 15 | 14 | 12 |
| 1 | 15 | 20 | 15 | 30 | 45 | 20 | 10 |
| 2 | 16 | 20 | 60 | 75 | 20 | 25 | 20 |
| 3 | 18 | 22 | 40 | 40 | 30 | 20 | 22 |
| 4 | 16 | 29 | 25 | 29 | 26 | 30 | 20 |
| 5 | 16 | 26 | 32 | 17 | 21 | 20 | 19 |
| 0 | 12 | 17 | 15 | 14 | 17 | 12 | 10 |

Рис. 3.8. Распределение температуры после десяти шагов моделирования

В модели натурального эксперимента предлагается оценить адекватность построенной модели и данных, полученных с помощью тепловизионной камеры. Получено распределение уменьшения тепловой энергии (рис. 3.9).

Установлено, что численное значение суммарного коэффициента теплоотдачи асфальтобетонной смеси находится в пределах 15,6...20,4 Вт/м-град и повышение скорости ветра на 1 м/с увеличивает значение коэффициента на 2,236 Вт/м-град [19]. С целью уточнения теплофизических характеристик горячих асфальтобетонных смесей были использованы экспериментальные данные по охлаждению смеси в процессе укладки и уплотнения, полученные в процессе производства работ при ремонте выбоин на дорожном покрытии при разных температурах окружающего воздуха. Моделирование процесса охлаждения горячей смеси осуществлялось с помощью специальной программы, разработанной на кафедре «Городское строительство и автомобильные

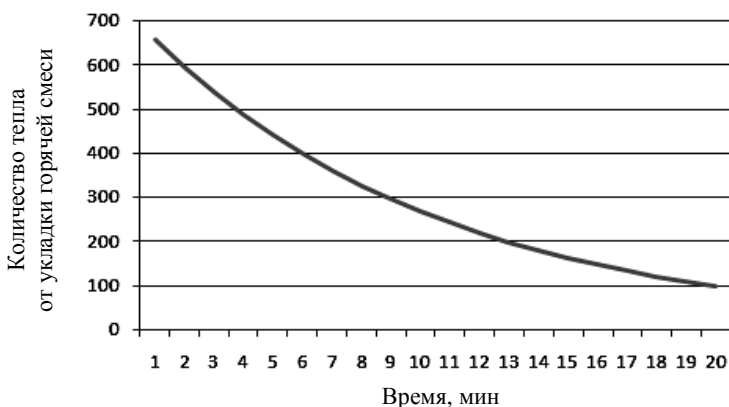


Рис. 3.9. График потерь тепловой энергии в зависимости от времени

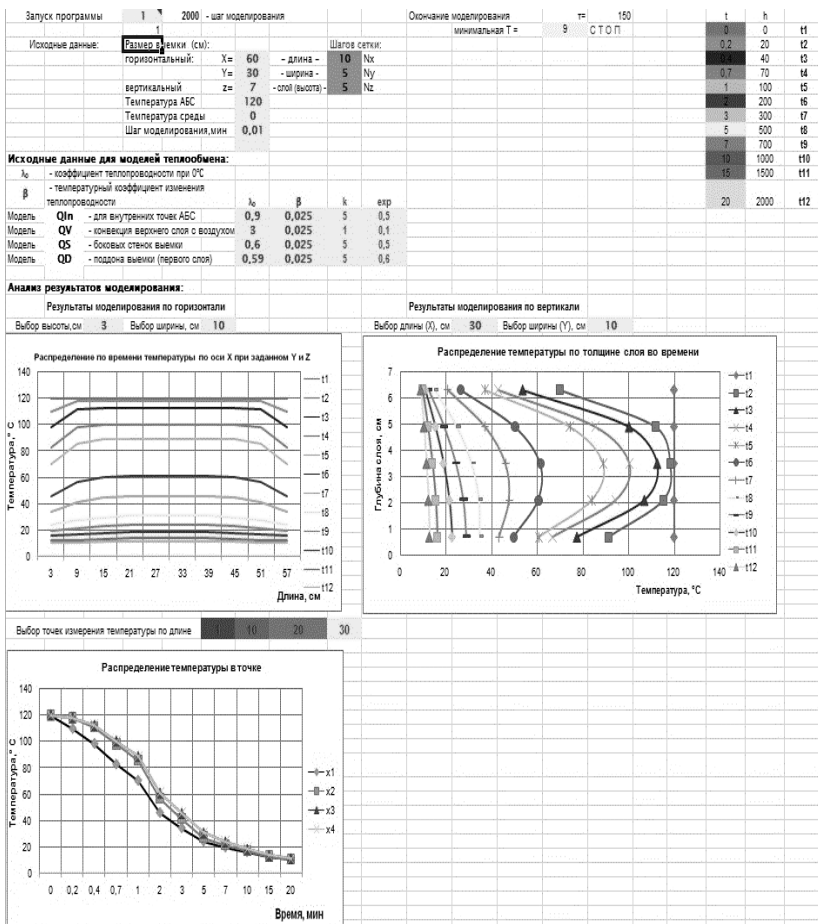


Рис. 3.10. Интерфейс программы для расчета температурных режимов горячей смеси при производстве ремонтных работ дорожного покрытия

дороги» ФГБОУ ВПО «ТГТУ» для решения трехмерной задачи теплопроводности (рис. 3.10) [19]. Данная программа позволяет с использованием экспериментальных данных моделировать тепловые процессы при ремонте выбоин с применением горячих смесей и определять температуру горячей смеси в любой точке уложенного объема материала.

Характер распределения температуры горячей смеси при укладке в дорожное покрытие во времени представлен на рис. 3.11. Установлено, что время остывания слоя асфальтобетонной смеси зависит от

толщины слоя, температур смеси, 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 охлаждение горячей смеси 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 устройства дорожного покрытия с учетом температурных режимов асфальтобетонной смеси.

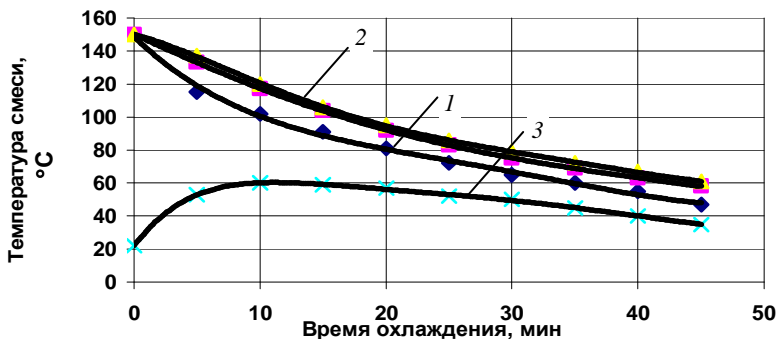


Рис. 3.11. Характер охлаждения асфальтобетонной смеси во времени при толщине слоя 0,05 м и температуре воздуха 0 °С:

1 – на поверхности слоя; 2 – на глубине 1,5 см от поверхности;
3 – температура основания

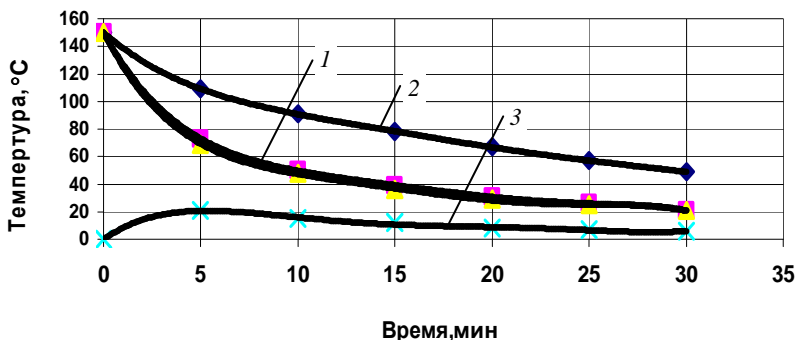


Рис. 3.12. Характер охлаждения асфальтобетонной смеси в выбоине дорожного покрытия:

1 – на поверхности слоя; 2 – на глубине 1,5 см от поверхности;
3 – температура основания

Для сравнения на рис. 3.12 представлен характер охлаждения горячей смеси при равной толщине укладываемого слоя смеси, температуре воздуха и горячей смеси.

Анализ характера охлаждения горячей смеси при устройстве покрытия и при ремонте выбоины по толщине уложенного слоя показал, что они аналогичны между собой. В то же время анализ численных данных, представленных на рис. 3.11 и 3.12, показывает, что время на производство работ по ремонту выбоин, в отличие от времени при устройстве покрытия, с учетом температурных режимов смеси, составляет значительно меньший промежуток времени. Следовательно, для обеспечения качества ремонтных работ необходимо применять прогрессивные методы организации и технологии ремонтных работ, позволяющие за малый промежуток времени выполнить ремонтные работы по устранению дефекта на покрытии дороги.

3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ РЕМОНТЕ ВЫБОИН ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

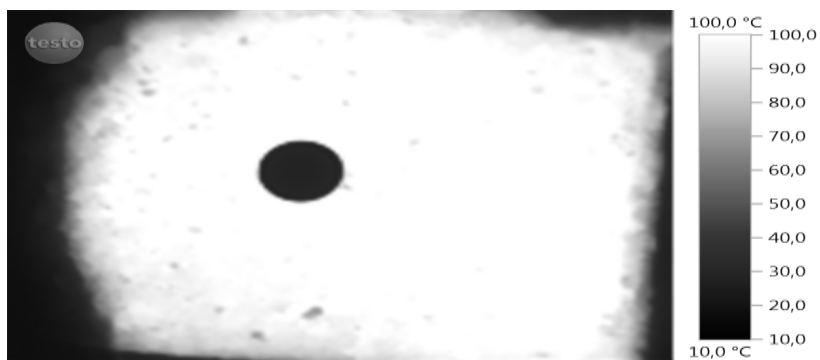
Производство работ по ремонту дорожных покрытий нежесткого типа с применением горячих асфальтобетонных смесей в соответствии с нормативными документами должно производиться при температуре окружающего воздуха не ниже $+5^{\circ}\text{C}$, и при этом поверхность выбоины должна быть сухой, за исключением применения в качестве вяжущего материала битумных эмульсий или на их основе других применяемых материалов. На практике для обеспечения безопасности движения транспортных средств в течение круглого года приходится выполнять работы по ямочному ремонту покрытия и при других погодных условиях (срочный аварийный ремонт). Известно, что ямочный ремонт, выполненный без тщательной подготовки места к производству работ и соблюдения требований к технологии выполнения ремонтных работ, снижает срок службы отремонтированной поверхности. Одним из основных факторов, влияющим на качество ремонта выбоин, является температурный режим при укладке и уплотнении горячей асфальтобетонной смеси.

С целью определения распределения температуры горячей смеси при укладке и уплотнении ее в выбоину при ямочном ремонте дорожного покрытия проведены лабораторные и производственные исследования, в результате 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 произ-

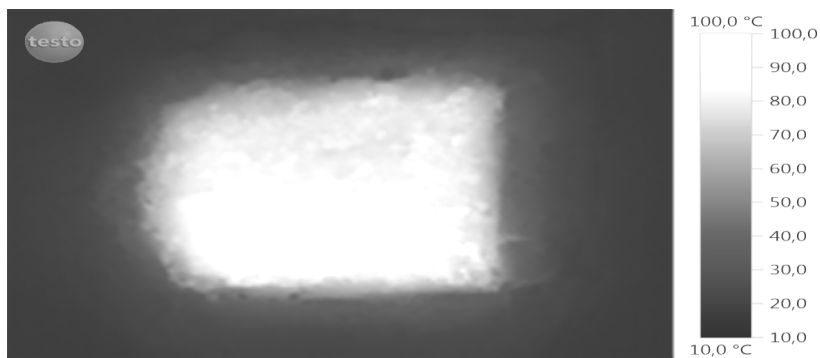
водстве ремонтных работ в Тамбове. Температура воздуха находилась в интервале от +10 до -2 °С.

Для устранения дефекта на покрытии дороги использовалась горячая асфальтобетонная смесь типа Б с температурой укладки 140...120 °С. Измерение температуры проводилось по площади выбоины и по толщине укладываемого слоя смеси с помощью датчиков измерения температуры и тепловизионной камеры (testo 880).

На рисунке 3.13 представлены результаты съемки температуры горячей смеси после укладки смеси в выбоину при температуре смеси 120 °С, температуре воздуха +10 °С при размере выбоины покрытия в плане 0,27 на 0,27 м и глубиной 0,06 м.



a)



б)

Рис. 3.13. Распределение температуры горячей смеси в выбоине дорожного покрытия во времени:

a – сразу после укладки; *б* – через 5 мин; *в* – через 10 мин

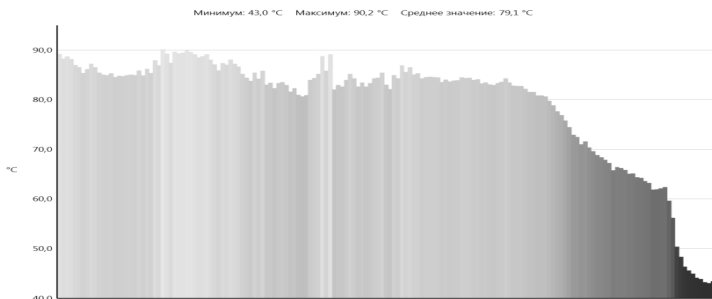


б)

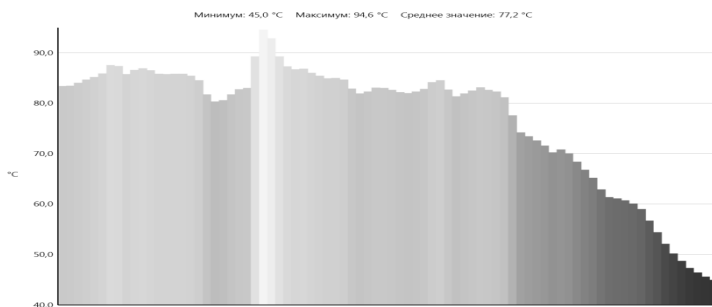
Рис. 3.13. Окончание

Из представленных данных видно, что распределение температуры в горизонтальной плоскости выемки с течением времени меняется. С учетом небольших объемов укладываемой горячей смеси темп охлаждения смеси выше, чем при устройстве дорожного покрытия, что способствует быстрому охлаждению смеси в выбоине покрытия и уменьшению продолжительности ремонтных работ с учетом температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси. На рисунке 3.14 представлено распределение температуры горячей смеси от центра выбоины до точки соприкосновения с ранее уложенным асфальтобетоном покрытия с учетом поверхности контакта. Из данных видно, что независимо от формы выемки температура смеси в зоне контакта горячей смеси с покрытием резко понижается. Установлено, что характер охлаждения горячей смеси подчиняется экспоненциальной зависимости, и наиболее интенсивно смесь охлаждается в течение нескольких минут сразу после укладки. Если на начальном этапе после укладки горячей смеси на поверхности выбоины наблюдается незначительная зона материала с пониженной температурой смеси, то через несколько минут зона материала с пониженной температурой значительно увеличивается. Участок асфальтобетонной смеси с пониженной температурой зависит от формы сечения выемки.

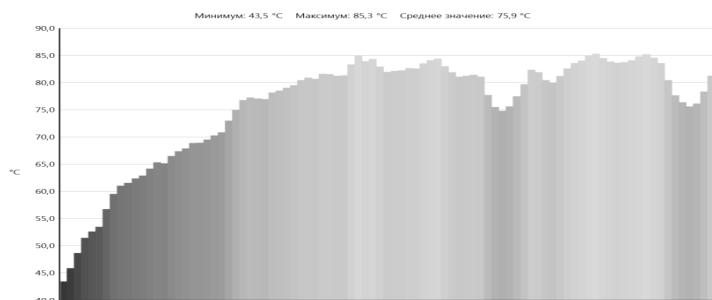
Объем смеси с пониженной температурой зависит от формы сечения выемки, увеличивается со временем и составляет по периметру 4...5 см (рис. 3.15).



а)



б)



в)

Рис. 3.14. Изменение температуры горячей смеси от центра выбоины до границы дорожного покрытия в зависимости от формы поверхности контакта смеси с покрытием:

а – от центра выемки по прямой до границы выемки; *б* – от центра выемки по прямой до границ выемки, выполненной в виде полуокружности;

в – от центра выемки до границы выемки, выполненной в виде прямого угла

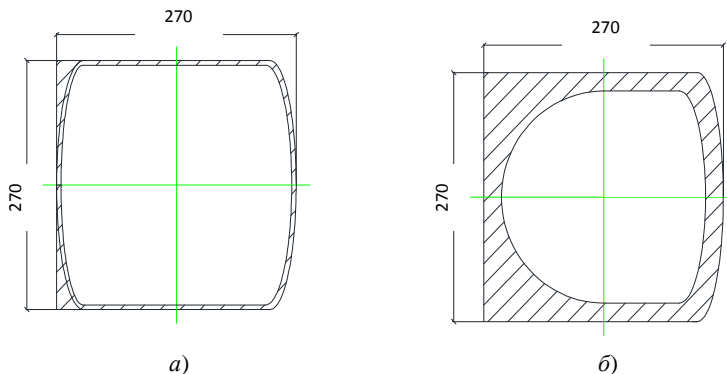


Рис. 3.15. Изменение зоны выбоины с пониженной температурой смеси во времени:

a – после укладки смеси; *б* – через 10 мин

Установлено, что наиболее интенсивно процесс охлаждения происходит вблизи прямого угла выемки и характеризуется максимальной зоной охлажденного материала. Другие формы выемки починяются общим закономерностям процесса охлаждения горячей смеси и незначительно отличаются между собой по формированию зон с пониженной температурой смеси (рис. 3.16). 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.

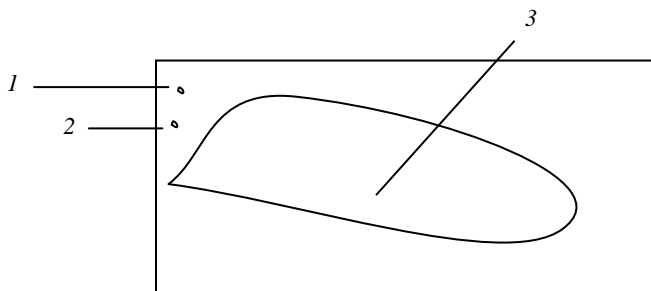


Рис. 3.16. Распределение температуры в горячей смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия:

1 – прямой угол, температура смеси 59 °С; *2* – прямая линия, 48 °С; центр выбоины – 100 °С

На рисунке 3.17 показано распределение температуры горячей смеси через 5 мин после укладки в выбоину дорожного покрытия при производстве ремонтных работ в Тамбове.

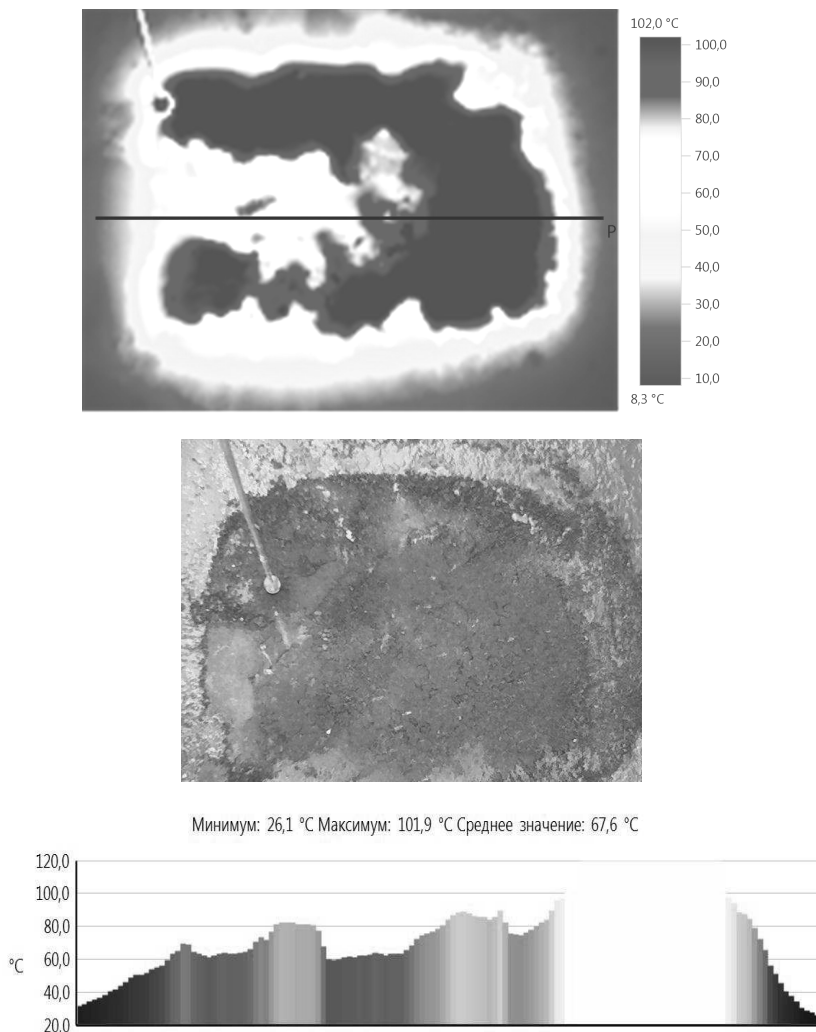


Рис. 3.17. Распределение температуры горячей асфальтобетонной смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия:

температура смеси при укладке – 150 °С; температура воздуха – 2 °С;
время замера температуры – 5 мин после укладки

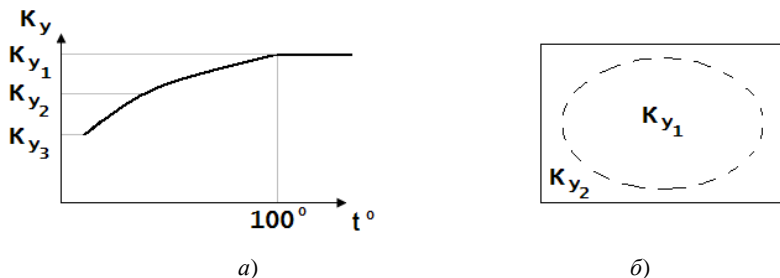


Рис. 3.18. Распределение коэффициента уплотнения горячей асфальтобетонной смеси по площади выбоины покрытия

Известно, что обеспечение эксплуатационных показателей асфальтобетона зависит от температуры смеси при уплотнении [7]. Такое изменение температуры горячей смеси по площади выбоины приводит к разным коэффициентам уплотнения, водонепроницаемости и плотности асфальтобетона (рис. 3.18).

Следовательно, на тех участках выбоины, где эксплуатационные параметры асфальтобетона не соответствуют требованиям, в процессе эксплуатации покрытия происходит разрушение материала и снова будет образовываться выбоина (рис. 3.19).



Рис. 3.19. Разрушение асфальтобетона в выбоине в зоне контакта с покрытием

На основании представленных результатов исследований можно сделать вывод, что несоблюдение температурных режимов при производстве ремонтных работ, независимо от качества приготовления горячей асфальтобетонной смеси и применяемых машин для уплотнения, качество ремонта выбоин будет невысоким. Для достижения требуемого качества ремонта выбоины с применением горячей асфальтобетонной смеси необходимо обеспечить, особенно при пониженных температурах окружающего воздуха соблюдение температурных режимов при укладке и уплотнении горячей смеси в выбоину. Это обеспечивает равномерное распределение температуры по всему объему уложенной смеси и увеличить продолжительность работ по уплотнению горячей смеси.

3.3. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

3.3.1. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СМЕСИ В ВЫБОИНЕ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Производство работ с применением горячих асфальтобетонных смесей зависит от температуры окружающего воздуха. Нормативными документами допускается производство работ при температуре окружающего воздуха весной и осенью не ниже $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, летом не менее $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [36]. В то же время оговаривается, что при исключительных случаях, для обеспечения безопасности движения, допускается производство работ при температуре воздуха до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]. В зависимости от температуры воздуха, с учетом температурных режимов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, отличаются и требования к технологии выполнения работ.

При температуре воздуха не ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:

- основание выбоины должно быть подготовлено до начала производства работ и коэффициент уплотнения должен соответствовать проекту;
- автотранспорт должен быть оснащен специальным оборудованием для хранения горячей смеси.

В некоторых случаях допускается устройство покрытия из горячих асфальтобетонных смесей при температуре воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ при следующих условиях:

- толщина укладываемого слоя не менее $0,05\text{ м}$;

- применение ПАВ и повышение температуры смеси для подвижности смеси;
- повышение интенсивности уплотнения смеси;
- уплотнение смеси в выбоине должно производиться при температуре, зависящей от температурных режимов применяемой смеси.
- выбор уплотняющих машин необходимо осуществлять с учетом конкретных условий производства работ.

При пониженных температурах воздуха увеличивается темп охлаждения горячей смеси за счет отдачи тепла в окружающую среду и основание, а также за счет контакта поверхности слоя с рабочими органами уплотняющих машин.

Установлено, что продолжительность выполнения работ с горячими асфальтобетонными смесями при понижении температуры воздуха от +5 до –10 °С приводит к уменьшению продолжительности работ на 20...22% независимо от толщины слоя [18]. Поэтому на практике для увеличения продолжительности работ и обеспечения температурных режимов горячих смесей при производстве работ применяют 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.

По результатам проведенных исследований установлено, что температура окружающего воздуха влияет на темп охлаждения горячей смеси, особенно в зоне границы контакта с уложенным ранее асфальтобетоном в покрытие. Это способствует тому, что в пограничной зоне темп охлаждения горячей смеси возрастает за счет передачи тепла боковым граням выбоины, что приводит к образованию зоны материала с пониженной температурой по отношению к общему объему уложенного горячего материала, которую можно охарактеризовать шириной зоны. В таблице 3.1 представлены результаты измерения ширины зоны с пониженной температурой смеси при укладке горячей смеси типа В с температурой 160 °С и ее понижения до температуры 80 °С.

3.1. Влияние температуры воздуха на ширину зоны смеси с пониженной температурой

| | | | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| Температура воздуха, °С | –20 | –10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Ширина зоны, см | 6,0 | 5,5 | 3,5 | 3,0 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0 |

Из представленных в таблице данных видно, что зона понижения температуры горячей смеси в зоне контакта с дорожным покрытием наблюдается даже при температуре окружающего воздуха до +40 °С, причем ширина зоны зависит от температуры воздуха. Это объясняется тем, что при укладке смеси с высокой температурой, за счет разницы температуры дорожного покрытия и горячей смеси, в зоне контакта происходит интенсивная передача тепла от горячей смеси к покрытию, которая имеет более низкую температуру.

На основании этого можно сделать вывод, что при производстве ремонтных работ покрытия нежесткого типа с применением горячих асфальтобетонных смесей на границе выбоины и уложенного ранее асфальтобетона в дорожное покрытие, существуют объемы асфальтобетона, уплотняемые при температуре смеси, которые не позволяют достичь высокого коэффициента уплотнения по всей поверхности выбоины или просадки покрытия. С целью уточнения данного вывода были взяты образцы асфальтобетона при производстве ямочного ремонта на дорогах Тамбова, выполненные в летний период года при температуре окружающего воздуха +25 °С. Результаты испытания взятых образцов показали, что если в центре выбоины коэффициент уплотнения асфальтобетона равен 0,99, то на границе выбоины он равен 0,98.

В таблице 3.2 представлены результаты измерения ширины зоны с пониженной температурой асфальтобетонной смеси ниже 80 °С, уложенной при температуре 160 °С, что соответствует температурным режимам укладки и уплотнения горячей смеси типа В с битумом марки БНД 90/130.

3.2. Влияние температуры воздуха на ширину зоны выбоины с температурой горячего асфальтобетона ниже допустимой с учетом влияния температуры смеси при укладке

| Температура смеси, °С | Температура воздуха, °С | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 160 | 5,0 | 5,5 | 3,5 | 3,0 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0 |
| 150 | 7,5 | 5,0 | 4,0 | 3,5 | 3,0 | 2,0 | 1,5 | 0 |
| 140 | 15,0 | 10,5 | 6,0 | 4,0 | 3,2 | 2,0 | 1,5 | 1,0 |
| 130 | – | – | 7,5 | 5,0 | 3,5 | 2,5 | 1,0 | 0,5 |
| 120 | – | – | – | 9,0 | 6,0 | 4,5 | 3,0 | 2,0 |
| 110 | – | – | – | – | – | 7,5 | 5,0 | 3,0 |
| 100 | – | – | – | – | – | – | – | 4,5 |
| 90 | – | – | – | – | – | – | – | – |

Из представленных данных видно, что величина ширины зоны уложенного слоя горячей асфальтобетонной смеси в выбоину зависит от температуры окружающего воздуха и температуры смеси при укладке. Следовательно, при производстве ремонтных работ и укладке горячей асфальтобетонной смеси в выбоину практически всегда имеется объем асфальтобетонной смеси с пониженной температурой, независимо от температуры окружающего воздуха. В то же время величина ширины зоны с пониженной температурой зависит от температуры смеси при укладке.

3.3.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СМЕСИ ПРИ УКЛАДКЕ В ВЫБОИНУ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАБОТ ПО РЕМОНТУ ВЫБОИН

При производстве работ с использованием горячих асфальтобетонных смесей основным параметром, определяющим начало выполнения работ, принята температура с учетом типа смеси [36, 37]. Отмечалось, что рекомендуемые температурные интервалы для разных типов смесей не учитывают марки вяжущего, которые имеют разные температурные границы эффективного уплотнения для одного и того же типа смеси [11, 17]. К тому же выбор параметров уплотняющих машин по этому параметру не учитывает прочностные характеристики асфальтобетонных смесей, зависящих не только от температуры смеси, но и конструктивных параметров объекта работ.

В отличие от строительства дорожных покрытий нежесткого типа, когда толщина укладываемого слоя горячей смеси имеет заданную величину, при производстве ремонтных работ толщина слоя укладываемого материала зависит от параметров образовавшегося дефекта на поверхности покрытия, что влияет на тепловые процессы в уложенном материале. Доказано, что интенсивность охлаждения слоя смеси при укладке и уплотнении протекает по законам нестационарных теплопередач и зависит от различных факторов [16]. Исследованиями других авторов показано, что продолжительность процессов укладки и их уплотнения горячих асфальтобетонных смесей при строительстве дорожных покрытий зависит от свойств смеси, применяемого оборудования, производственных и погодных условий и может значительно отличаться между собой, что требует учета при выполнении работ [13, 38, 39].

Температура материала, доставляемого к месту производства работ, зависит от свойств смеси, дальности перемещения и скорости движения транспортных средств, температуры воздуха и использования специальных устройств для сохранения температуры при транс-

портировке смеси. Температура смеси влияет как на величину коэффициента уплотнения, так и прочность асфальтобетона [38]. Установлено, что температура смеси на момент доставки к месту производства работ может быть определена по формуле [12]

$$t_p = t_{\text{вых}} - t_b / e^{m\tau} + t_b, \quad (3.12)$$

где $t_{\text{вых}}$ – температура смеси при загрузке в транспорт, °С; t_b – температура воздуха, °С; τ – время доставки, ч; \ln – основание натурального логарифма; m – скорость охлаждения в 1/ч, которая может быть определена по формуле

$$m = 2\alpha/\gamma ch, \quad 1/\text{ч}, \quad (3.13)$$

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.

Температура смеси при отгрузке потребителю зависит от марки битума и регламентирована ГОСТ 9128–2009. Температура укладки смеси регламентируется СНиП 3.06.03–85.

Продолжительность транспортировки асфальтобетонных смесей без использования специальных устройств устанавливается из условия обеспечения минимально допустимой 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 специальных устройств. Для приготовления смеси любого типа могут быть использованы разные марки битума БН и БНД, свойства которых зависят от температуры, а следовательно, имеют разные температуры окончания работ [10, 17, 18, 21].

Повышение температуры окончания эффективного уплотнения смесей способствует повышению качества уплотнения и одновременно приводит к уменьшению времени работы уплотняющих машин, что требует тщательной проработки технологии ремонтных работ и постоянного контроля температуры применяемой смеси.

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 3.3 представлены данные по времени нахождения горячей асфальтобетонной смеси в интервале температур 160...80 °С для смеси типа В с битумом марки БНД 90/130.

3.3. Время нахождения горячей смеси при укладке в выбоину

| | | | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Температура воздуха, °С | -20 | -10 | 0 | +10 | +20 | +30 | +40 | +50 |
| Время, мин | 5 | 7 | 7,5 | 7,5 | 8 | 10 | 12 | 12,5 |

Из представленных данных видно, что в отличие от процесса устройства дорожного покрытия из горячих асфальтобетонных смесей, когда смесь находится в заданных температурных интервалах до 50...60 мин, 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 5...12 мин. Это можно объяснить тем, что температурные режимы уложенной горячей смеси в выбоину покрытия соответствуют нестационарным процессам, происходящим на стадии укладки горячей смеси 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.

3.4. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЯЧЕЙ СМЕСИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЫБОИНЕ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

При устройстве дорожного покрытия толщина укладываемого слоя покрытия находится в заданных значениях, определяемых при проектировании дорожных одежд с учетом нагрузки от транспортных средств и интенсивности движения. В соответствии с этим при разработке технологических процессов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, а также определения температурных режимов исходят из условий, что распределение температуры в смеси происходит в одной плоскости. Отдача тепла горячей смесью происходит в окружающую среду (воздух) и нижележащий слой дорожной одежды. Установлено, что в этом случае увеличение толщины слоя горячей смеси значительно влияет на температурные режимы смеси и продолжительность операций по укладке и уплотнению слоя покрытия. Доказано, что повышение толщины слоя покрытия, особенно при пониженных температурах окружающего воздуха, является более эффективным методом повышения времени на устройства асфальтобетонного покрытия с заданным качеством работы по отношению к методу повы-

шения температуры приготовления, укладки и уплотнения горячих смесей. С повышением толщины слоя горячей смеси основание прогревается до более высокой температуры (50...60 °С), что сказывается на качестве уплотнения. При одной и той же относительной толщине укладываемого слоя смеси допустимое время на процесс уплотнения зависит от типа смеси. С увеличением крупности фракций минерального материала допустимая продолжительность работы уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением крупности фракций минерального материала возрастает коэффициент теплопроводности материала, что способствует более интенсивной передаче тепла в нижележащие слои дорожной одежды. На рисунке 3.20 представлены данные по продолжительности охлаждения горячей смеси в зависимости от крупности заполнителя при разной толщине укладываемого слоя асфальтобетона. Если при увеличении толщины слоя из песчаной асфальтобетонной смеси в 2 раза время на ее уплотнение увеличивается в 3 раза, то для среднезернистых смесей время возрастает в 2,5 раза, а для крупнозернистых – в 2 раза [28].

Нормативными документами максимальные параметры выбоины определены размерами 0,6×0,3×0,05 м. С целью уточнения влияния размеров выбоины на зону материала с пониженной температурой



Рис. 3.20. Влияние относительной толщины уплотняемого слоя на продолжительность работ по устройству покрытия из горячей смеси:

1 – крупнозернистая асфальтобетонная смесь (по данным Н.В. Горелышева);

2 – мелкозернистая смесь (по данным К. Нижбойера);

3 – песчаная смесь (по данным А.Ф. Зубкова)

смеси при производстве работ была принята выбоина глубиной 0,05 м при разной ее длине и постоянных параметрах смеси: тип смеси В, приготовленной 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. На основании полученных результатов установлено, что зона понижения температуры горячей смеси симметрична по ширине и длине выбоины относительно центра и ее величина зависит от условий производства ремонтных работ и теплофизических характеристик материала. Установлено также, что наиболее интенсивно охлаждение горячей смеси происходит около прямого угла сопряжения выбоины с дорожным покрытием, что объясняется более интенсивной отдачей тепла в двух плоскостях и 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, поскольку 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. Величина зоны выбоины с пониженной температурой горячей смеси зависит от температуры смеси при укладке, температуры воздуха и геометрических параметров выбоины.

Следовательно, при укладке горячей асфальтобетонной смеси в выбоину по периметру возникает зона горячей смеси с пониженной температурой, причем ширина зоны зависит от температуры воздуха и 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, зависящими от разных факторов. Изменение глубины выбоины способствует, при одних размерах в горизонтальной плоскости, разным объемам укладываемой смеси. Известно, что изменение толщины укладываемого слоя горячей смеси влияет на характер распределения температуры по толщине слоя и, тем самым, на температурные режимы уплотнения смеси в выбоине. На рисунке 3.21 представлены результаты моделирования тепловых процессов при укладке горячей смеси в выбоину при разной глубине.

На основании представленных данных можно сделать вывод, что с увеличением объема укладываемого материала, за счет увеличения толщины слоя горячей смеси, зона пониженной температуры материала на стыке выбоины и дорожного покрытия уменьшается. Данная за-

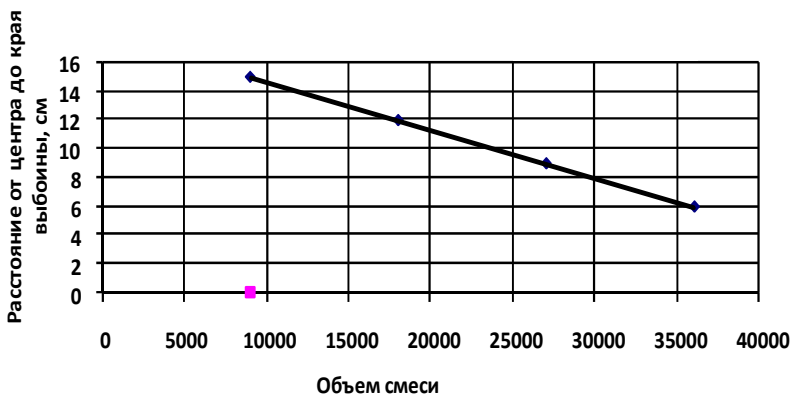


Рис. 3.21. Влияние объема горячей смеси на ширину зоны смеси с пониженной температурой (при постоянных размерах проекции выбоины)

кономерность изменения температурных режимов уложенной горячей смеси наблюдается и при строительстве асфальтобетонных покрытий с повышенной толщиной слоя материала [17].

3.4.1. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ТЕМП ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Ранее показано, что качество работ с применением горячих асфальтобетонных смесей зависит от температуры смеси при выполнении технологических операций по устройству и ремонту дорожных покрытий. Температура смеси в начале и окончания работ влияет на продолжительность выполнения технологических операций, в результате которых обеспечиваются требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетона.

Одним из факторов, влияющим на процесс охлаждения горячей смеси при устройстве дорожных покрытий, является скорость перемещения воздушных масс. Температура смеси при сравнительно небольшой толщине укладываемого слоя горячей смеси на нижележащий слой и большой поверхности покрытия в значительной степени зависит от скорости перемещения воздушных масс. Поэтому при устройстве дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей в нормативных документах введены ограничения на производство работ в зависимости от скорости ветра [7].

С целью уточнения влияния скорости ветра на процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси при производстве работ по устройству дорожного покрытия и при ремонте выбоин были проведены

исследования, в результате которых установлены закономерности влияния скорости ветра на охлаждение горячей смеси. Для моделирования процесса охлаждения горячей асфальтобетонной смеси применялась программа, разработанная на кафедре «Городское строительство и автомобильные дороги» ФГБОУ ВПО «ТГТУ» [19]. На рисунках 3.22 и 3.23 представлены зависимости охлаждения горячей смеси при устройстве дорожного покрытия и при ремонте выбоины на дорожном покрытии при равных условиях производства работ (температура воздуха 0 °С; температура горячей смеси 150 °С; толщина слоя 0,05 м).

Из представленных на рисунке данных по охлаждению смесей в дорожном покрытии и выбоине видно, что процессы охлаждения смесей протекают по одним и тем же законам. Различие заключается в

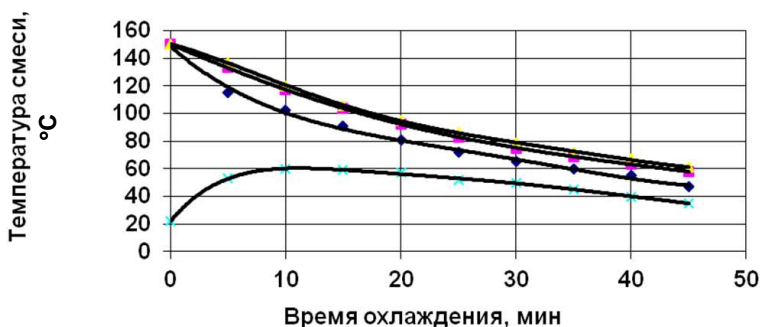


Рис. 3.22. Зависимость температуры смеси от времени при устройстве дорожного покрытия

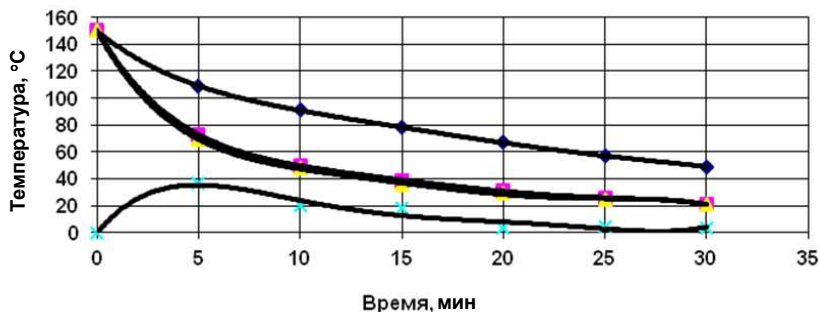


Рис. 3.23. Зависимость температуры смеси от времени при укладке в выбоину

том, что процессы охлаждения смеси в выбоине происходят более интенсивно, и это приводит к уменьшению времени нахождения горячей смеси в заданном интервале температур. Максимальная интенсивность охлаждения горячей смеси соответствует процессу укладки горячей смеси, и если при устройстве дорожного покрытия горячая смесь находится в заданном интервале температур в течение 20 мин, то при укладке в выбоину – в пределах 5 мин. Такое сокращение времени нахождения горячей смеси в заданном интервале температур предъявляет повышенные требования к организации и производству работ по ремонту выбоин с применением горячих асфальтобетонных смесей. В таблицах 3.4 и 3.5 представлены результаты моделирования процесса охлаждения горячей асфальтобетонной смеси при разных температурах и скоростях воздуха.

3.4. Изменение температуры горячей смеси во времени в зависимости от скорости воздуха. Температура воздуха –20 °С

| Скорость, м/с | Время, мин | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----|-----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 0 | 160 | 136 | 114 | 96 | 80 | 69 | 59 | 51 | 44 |
| 2 | 160 | 133 | 110 | 91 | 76 | 63 | 54 | 46 | 39 |
| 4 | 160 | 130 | 106 | 86 | 71 | 59 | 49 | 41 | 35 |
| 6 | 160 | 128 | 102 | 82 | 66 | 54 | 45 | 37 | 31 |
| 8 | 160 | 125 | 99 | 78 | 63 | 51 | 41 | 34 | 28 |

3.5. Изменение температуры горячей смеси во времени в зависимости от скорости воздуха. Температура воздуха –0 °С

| Скорость, м/с | Время, мин | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----|-----|-----|----|----|----|------|----|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 0 | 160 | 139 | 120 | 103 | 89 | 79 | 70 | 63 | 57 |
| 2 | 160 | 136 | 116 | 99 | 85 | 74 | 66 | 59 | 53 |
| 4 | 160 | 137 | 112 | 95 | 81 | 70 | 61 | 54 | 49 |
| 6 | 160 | 131 | 109 | 91 | 77 | 66 | 57 | 51 | 45 |
| 8 | 160 | 129 | 106 | 88 | 74 | 63 | 59 | 3448 | 43 |

Из представленных результатов моделирования тепловых процессов при устройстве дорожного покрытия, а также экспериментальных данных, можно сделать вывод, что наиболее интенсивно охлаждение горячей смеси происходит в пределах 5...10 мин, где влияние скорости ветра на процесс охлаждения проявляется в меньшей степени, чем при дальнейшем охлаждении горячей смеси. При производстве ремонтных работ ввиду небольшой поверхности выбоины, сразу после укладки горячей смеси производят ее уплотнение.

Исследованиями А.А. Иноземцева установлено, что независимо от состава смеси, температуры воздуха и скорости ветра, процесс охлаждения подчиняется экспоненциальному закону. Скорость охлаждения горячей смеси зависит от коэффициента теплоотдачи смеси, теплоемкости смеси, объемной массы смеси и толщины укладываемого слоя [12]. Следовательно, скорость охлаждения горячей смеси, при постоянной толщине слоя и теплоемкости материала определяется коэффициентом теплоотдачи, зависящим от скорости перемещения воздушных масс. Следовательно, можно предположить, что между скоростью ветра и темпом охлаждения горячей смеси существует зависимость. На рисунке 3.24 представлена зависимость изменения температуры уложенной горячей смеси в выбоину на глубине 0,015 м от поверхности слоя с учетом скорости ветра через 5 мин после укладки.

Используя зависимость для определения температуры горячей смеси при ее транспортировке от места загрузки транспортных средств до ее укладки, рассчитан темп охлаждения горячей асфальтобетонной смеси при разных температурах окружающего воздуха. Результаты расчетов представлены на рис. 3.25.

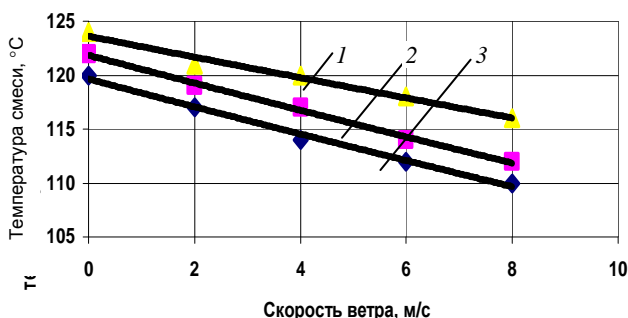


Рис. 3.24. Влияние скорости ветра на температуру горячей смеси: температура смеси при укладке 140 °C; толщина слоя 0,05 м; измерение температуры на глубине 0,015 м от поверхности слоя; температура воздуха: 1 – +10 °C; 2 – –10 °C; 3 – –20 °C

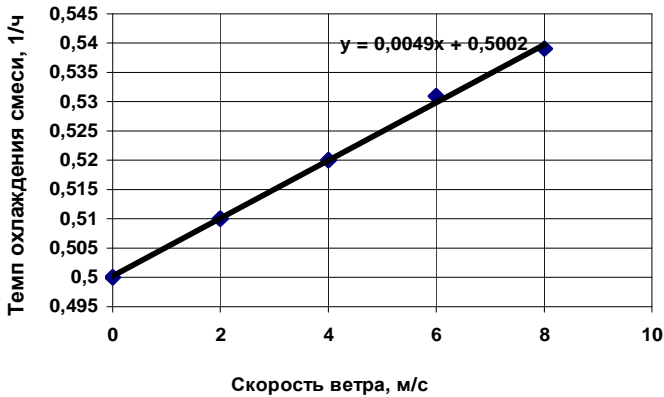


Рис. 3.25. Зависимость темпа охлаждения горячей смеси от скорости ветра (температура воздуха $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Охлаждение горячей смеси при устройстве дорожного покрытия и при укладке в выбоину дорожного покрытия при производстве ремонтных работ подчиняется одинаковым закономерностям.

2. Независимо от температуры воздуха и температуры смеси при укладке между темпом охлаждения горячей смеси и скоростью ветра существует связь, которая подчиняется экспоненциальной зависимости.

3. Темп охлаждения горячей смеси зависит от разницы температур воздуха и горячей смеси.

Глава 4

ОБОСНОВАНИЕ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ВЫБОИН ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Качество работ по ремонту дорожных покрытий нежесткого типа зависит не только от свойств применяемого материала, но и от эффективности применяемых механизмов при производстве работ. При образовании выбоины на поверхности покрытия и несвоевременном 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 прогрессивному разрушению 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 выбоины вязким битумом. В качестве ремонтного материала преимущественно используют горячие асфальтобетонные смеси, для уплотнения которых применяют малогабаритные гладковальцевые 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.

4.1. ВЫБОР УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Установлено, что эксплуатационные параметры асфальтобетона зависят от качества уплотнения, которое зависит от температурных режимов укладки и уплотнения, времени действия уплотняющей нагрузки на материал и метода уплотнения [18, 21, 23 и др.]. Выбор параметров уплотняющих средств зависит от физико-механических характеристик применяемого материала и способа его укладки. При распределении горячей смеси ручным способом, что происходит довольно часто при производстве ремонтных работ, коэффициент предварительного уплотнения горячего асфальтобетона находится в пределах 0,7...0,75 [20]. За счет низкого коэффициента предварительного уплотнения и незначительной 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 40...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 неравно-

мерности уплотнения по толщине уплотняемого слоя материала. 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 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 [15]. В качестве базовой технологии для устройства асфальтобетонного покрытия с применением горячей смеси типа А, приготовленной на битуме марки БНД 60/90, принято звено машин, состоящее из асфальтоукладчика (с трамбуемым брусом и выглаживающей вибрационной плитой) и звеном дорожных катков в составе среднего и тяжелого типов. Температура горячей смеси при укладке и уплотнении измерялась на глубине одной трети от толщины уложенного слоя и соответствовала существующим рекомендациям по устройству дорожных покрытий. 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. 4.1.

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 значительно больше. Если при укатке катком время действия нагрузки за один проход на частицу материала составляет 0,2...0,4 с, при работе катка на пневматических шинах 0,4...0,6 с, то при уплотнении вибрационной плитой время действия составляет 0,8...1,6 с.

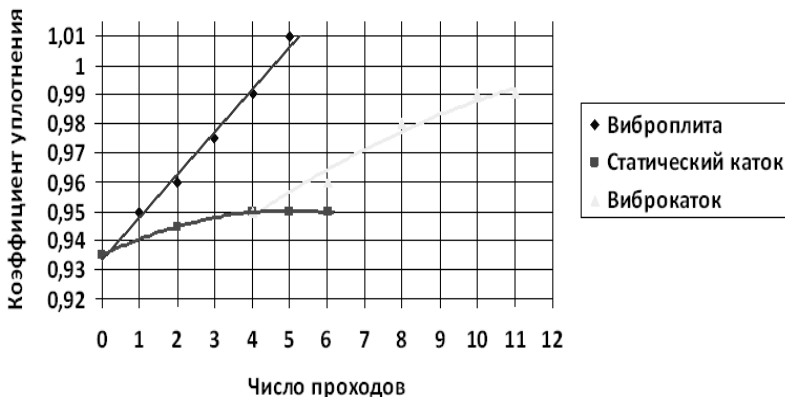


Рис. 4.1. Зависимость коэффициента уплотнения асфальтобетона от числа проходов:

- ◆ – комбинированный каток статического действия;
- – вибрационный каток, тандем, WB151-AD; ◆ – вибрационная плита

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.

4.2. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННЫХ ПЛИТ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ технологий по уплотнению материалов показал, что в зависимости от конкретных условий производства работ применяются вибрационные плиты с разными параметрами, зависящими от свойств материала. На основе статистического анализа параметров вибрационных плит установлено, что имеются общие закономерности, которые не зависят от области применения машины. С этой целью было обработано свыше 150 моделей вибрационных плит разных фирм-изготовителей. Согласно ГОСТ Р51922–2002, за основной параметр вибрационных плит принята масса плиты. Установлено, что между массой плиты и рабочей поверхностью поддона плиты, в зависимости от способа передвижения, существуют зависимости, которые представлены на рис. 4.2.

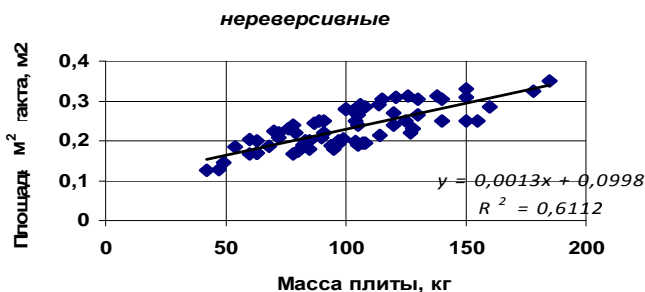
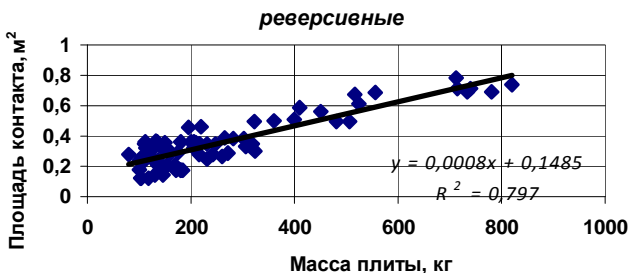


Рис. 4.2. Зависимость рабочей поверхности плиты от массы машины

Из представленных данных видно, что между массой плиты и площадью ее контакта с уплотняемым материалом существует зависимость, поскольку масса влияет на уплотняющую способность плиты. Эффективность работы вибрационной плиты зависит от времени воздействия на уплотняемую частицу материала при проходе, которая зависит от длины поддона плиты. В то же время для обеспечения устойчивости плиты в процессе работы должна быть определенная ширина поддона. На рисунке 4.3 представлена зависимость ширины поддона плиты от длины.

Из представленных данных видно, что между параметрами существует зависимость, хотя при изготовлении вибрационных плит фирмами эта взаимосвязь параметров колеблется в широком диапазоне.

Известно, что уплотняющая способность машины определяется величиной контактных напряжений под рабочим органом машины. Для вибрационных плит, в статическом режиме, контактные напряжения определяются величиной давления плиты на материал. Установлено, что при малом статическом давлении под плитой обеспечить тре-

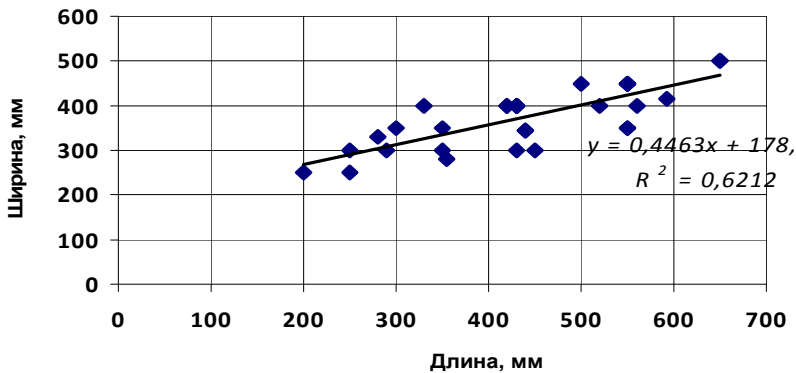


Рис. 4.3. Зависимость ширины поддона плиты от длины

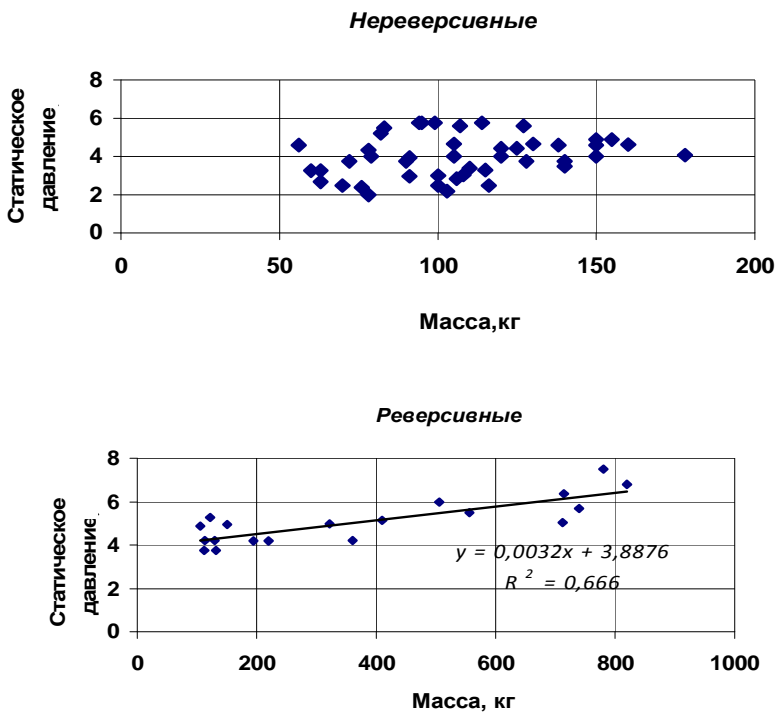


Рис. 4.4. Зависимость статического давления от массы плиты

буемую плотность материала, даже при значительной вынуждающей силе, практически невозможно. Проведенный статистический анализ показал, что величина статического давления, как для реверсивных, так и нереверсивных вибрационных плит, находится в одинаковом диапазоне значений (рис. 4.4). Но если для реверсивных плит наблюдается закономерность повышения статического давления с увеличением массы плиты, то для нереверсивных плит такая связь отсутствует. Такой вывод можно сделать на основе значения коэффициента корреляции, показывающий связь между искомыми параметрами. Это объясняется тем, что нереверсивные плиты имеют сравнительно небольшую массу и применяются в основном при малом объеме работ и небольшой толщине уплотняемого слоя материала. Из представленных данных видно, что величина статического давления у реверсивных и нереверсивных плит имеет разные интервалы значений. Если для нереверсивных плит статическое давление находится в интервале 0,02...0,06, то для реверсивных плит интервал составляет 0,04...0,08 МПа. Следовательно, потенциальные возможности уплотняющей способности у реверсивных плит выше, чем у нереверсивных.

Уплотняющая способность вибрационной плиты зависит и от параметров динамической нагрузки, к которым относятся вынуждающая сила и ее частота колебаний. Повышение уплотняющего эффекта стараются достичь за счет увеличения вынуждающей силы. На рисунке 4.5 представлена зависимость вынуждающей силы от массы плиты.

Из представленных данных видно, что с увеличением массы вибрационной плиты возрастает вынуждающая сила. Проведенный анализ показал, что между вынуждающей силой и массой плиты имеется устойчивая связь. Для нереверсивных вибрационных плит соотношение между рассматриваемыми параметрами подчиняется логарифмической зависимости, а для реверсивных плит – прямой зависимости. Различие в закономерностях между рассматриваемыми параметрами можно объяснить тем, что характер колебаний рабочего органа машины зависит от величины относительной вынуждающей силы. С увеличением относительной вынуждающей силы рабочего органа гармонические колебания меняются на субгармонические и далее на беспорядочные, что влияет на результат уплотнения. На основе статистических данных установлена зависимость между массой плиты и относительной вынуждающей силой, которая представлена на рис. 4.6. Из представленных данных видно, что для всех вибрационных плит с увеличением массы относительная вынуждающая сила уменьшается. Анализ данного параметра показал, что если у вибрационных плит с

малой массой плиты это отношение принимается в пределах 14...19, то для тяжелых плит оно носит явно экспоненциальный характер и с ростом массы уменьшается до 10. Такое различие можно объяснить тем, что с увеличением массы плиты величина напряжений под плитой растет и при значительной вынуждающей силе превышает прочностные характеристики уплотняемого материала. В то же время увеличение статического давления повышает уплотняющую способность машины и позволяет уплотнять материал более толстыми слоями.

Анализ частот колебаний вынуждающей силы показал, что практически все вибрационные плиты имеют диапазон частот в пределах 90...100 Гц. Экспериментально установлено, что при уплотнении горячих смесей увеличение частоты колебаний свыше 60 Гц практически не дает эффекта [6].

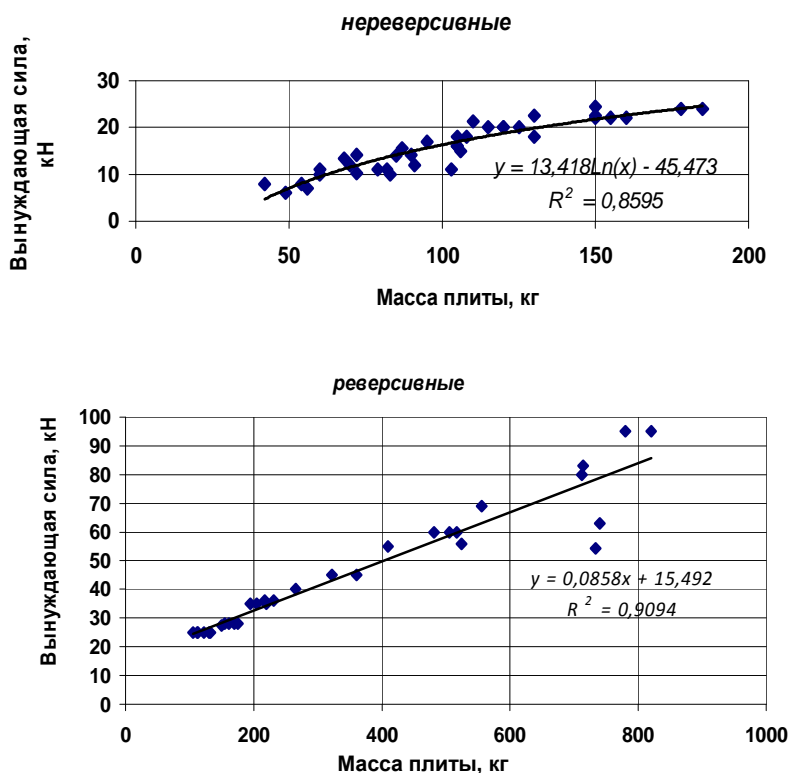


Рис. 4.5. Зависимость вынуждающей силы от массы плит

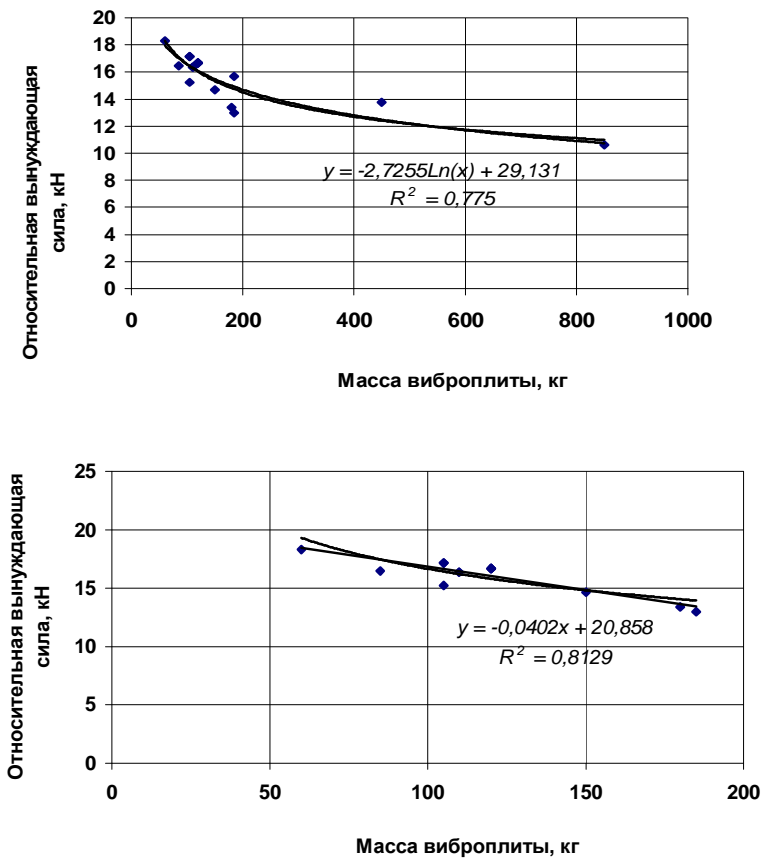


Рис. 4.6. Зависимость относительной вынуждающей силы от массы плиты

Известно, что для устранения прилипания частиц горячей смеси к рабочей поверхности плиты необходимо осуществлять прогрев контактной поверхности плиты. У существующих вибрационных плит этот фактор не учтен и требует дополнительных конструктивных решений с учетом области их применения.

На основании проведенного статистического анализа параметров вибрационных плит можно сделать вывод, что применение существующих конструкций вибрационных плит при ямочном ремонте асфальтобетонных покрытий является более эффективным при условии правильного выбора параметров.

4.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ПЛИТЫ С УПЛОТНЯЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

Анализ статистических параметров применяемых вибрационных плит показал, что они меняются в широком интервале значений. Известно, что между достигаемой плотностью материала и величиной контактных напряжений под рабочим органом уплотняющей машины существует зависимость, и каждой величине контактных напряжений соответствует определенная плотность материала. Уплотняющая способность вибрационной плиты зависит от статического давления под плитой и параметров вибрации. Вопросу определения контактных напряжений под вибрационной плитой посвящен ряд исследований [9, 30]. Полученные зависимости основаны на экспериментальных исследованиях при уплотнении грунтового полупространства. Они не учитывают влияния ограниченной толщины уплотняемого слоя, конструктивных параметров вибрационных плит и жесткости нижележащего слоя основания, а также не установлены взаимосвязи между параметрами вибрации.

С целью установления аналитической зависимости контактных напряжений под вибрационной плитой от ее параметров при уплотнении дорожно-строительного материала проведено моделирование процесса взаимодействия плиты с уплотняемым материалом (рис. 4.7).

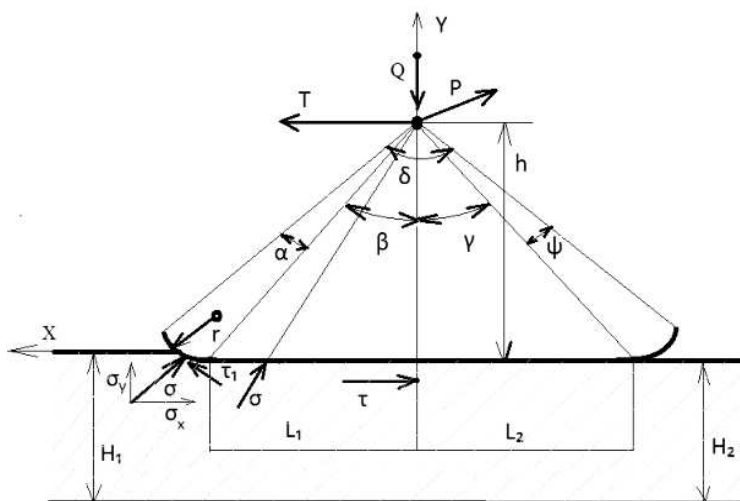


Рис. 4.7. Схема взаимодействия вибрационной плиты с уплотняемым материалом

В расчетной схеме приняты следующие обозначения: Q – масса вибрационной плиты; B – ширина поддона вибрационной плиты; T – толкающее усилие; β – угол контакта поддона плиты с материалом; σ – величина нормальных напряжений; τ – величина касательных напряжений; φ – угол, характеризующий рассматриваемую точку в зоне контакта вальца; X и Y – оси координат; P – вынуждающая сила; ω – частота колебаний вынуждающая сила; t – время; $(\alpha, \beta, \gamma, \psi)$ – углы, зависящие от геометрических параметров вибрационной плиты; φ – переменная величина угла, характеризующая напряжения в зоне контакта плиты с материалом; H – толщина слоя материала до уплотнения; H_1 – толщина слоя материала после уплотнения; h – расстояние от поддона плиты до точки приложения толкающей силы; l_1 и l_2 – расстояние от центра тяжести вибрационной плиты до закругления поддона; r – радиус закругления передней и задней части поддона.

При моделировании процесса взаимодействия вибрационной плиты с уплотняемым материалом приняты следующие допущения:

- центр тяжести вибрационной плиты и точка приложения вынуждающей силы возбудителя колебаний расположены в одной точке (O);
- контактные напряжения под плитой на направлены к точке приложения внешних сил;
- контактные напряжения по ширине плиты распределяются равномерно, что позволяет вести расчет напряжений как для плоской задачи. В общем виде напряженное состояние частицы материала в зоне контакта плиты с материалом будет определяться выражением

$$-\sigma = -\sigma_x + -\tau_y, \text{ МПа}, \quad (4.1)$$

где σ_x, τ_y – нормальные и касательные напряжения от действия внешних сил по оси X и Y .

В зависимости от расположения центра тяжести относительно поддона плиты и ее оси симметрии численное значение углов β и γ определяются из выражений:

$$\beta = \text{arctg}(kl/h); \quad \gamma = \text{arctgl}(l - k)/h, \quad (4.2)$$

где K – коэффициент, зависящий от расположения центра тяжести вибрационной плиты, численное значение которого находится в интервале от 0 до 1; l – общая длина поддона вибрационной плиты. Принимаем, что $l_1 = l_2 = r$.

Рассмотрим условие равновесия напряженного состояния частицы материала в зоне контакта плиты с материалом, которое можно представить системой уравнений

$$\begin{aligned} \sum X = 0; & \int_0^\alpha \sigma B r \sin(\varphi - \alpha) d\varphi + \int_0^\alpha \tau B r \cos(\varphi - \alpha) d\varphi + \int_\alpha^\beta \sigma B l_1 \sin(\varphi - \beta) d\varphi + \\ & + \int_\beta^\gamma \sigma B l_2 \sin(\gamma - \varphi) d\varphi + \int_\gamma^\psi \sigma B r \sin(\varphi - \psi) d\varphi + \int_\gamma^\psi \tau B r \cos(\varphi - \psi) d\varphi - \\ & - \int_\alpha^\beta \tau B l_1 d\varphi - \int_\beta^\gamma \tau B l_2 d\varphi = P \cos \omega t - T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum Y = 0; & \int_0^\alpha \sigma B r \cos(\varphi - \alpha) d\varphi + \int_0^\alpha \tau B r \sin(\varphi - \alpha) d\varphi + \\ & + \int_\alpha^\beta \sigma B l_1 \cos(\varphi - \beta) d\varphi + \int_\beta^\gamma \sigma B l_2 \cos(\gamma - \varphi) d\varphi + \int_\gamma^\psi \sigma B r \cos(\psi - \varphi) d\varphi - \\ & - \int_\gamma^\psi \tau B r \sin(\psi - \varphi) d\varphi = Q - P \sin \omega t. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Принимаем, что нормальные и касательные напряжения зависят от угла поворота [4]:

$$\tau = \mu \sigma + C, \text{ МПа}, \quad (4.4)$$

где μ – коэффициент внутреннего трения; C – коэффициент сцепления.

Начальные условия имеют вид при $\varphi = 0$; $\sigma_x = \tau_y = 0$

$$\varphi = \delta \sigma_x = \tau_y = 0.$$

Граничные условия при $\varphi = \alpha$; $\tau_{x2} - \sigma_{x1} = \tau_{x3} - \sigma_{x3}$; $\sigma_{y1} + \tau_{y2} = \sigma_{y3}$

$$\varphi = \alpha + \beta d\sigma_y/d\varphi = 0; \quad \tau_{x3} = \tau_{x5},$$

$$\varphi = \alpha + \beta + \gamma \tau_{x5} + \sigma_{x4} = \tau_{x5} + \sigma_{x6} - \tau_{x6}; \quad \sigma_{y4} = \tau_{y6} + \sigma_{y5}.$$

В качестве аппроксимирующей функции напряжения принимаем функцию вида

$$\sigma = a_0 + a_1 \varphi + a_2 \varphi^2 + a_3 \varphi^3 + a_4 \varphi^4, \text{ МПа}, \quad (4.5)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – численные коэффициенты; φ – переменная величина угла, характеризующая расчетную точку, в которой определяются напряжения.

С учетом начальных условий значение коэффициента $a_0 = 0$.

Подставив значения аппроксимирующей функции в систему интегральных уравнений и поведя ряд преобразований, в конечном виде получим аналитические уравнения, позволяющие определить контактные напряжения в любой точке контактной поверхности поддона вибрационной плиты с уплотняемым материалом, которые имеют вид

$$\begin{aligned}\sigma = & \varphi \delta^2 Q_1 [y_2 \delta (-\delta l_3 + l_4) + y_3 (\delta^2 l_2 - l_4) + y_4 (l_3 - \delta l_2)] / \Delta + \\ & + \varphi^2 Q_1 \delta [y_1 \delta^2 (\delta l_3 - l_4) + y_3 (l_4 - \delta^3 l_1) + y_4 (\delta^2 l_1 - l_3)] / \Delta + \\ & + \varphi^3 Q_1 \delta [y_1 \delta (l_4 - \delta^2 l_2) + y_2 (l_1 \delta^3 - l_4) + y_4 (l_2 - \delta l_1)] / \Delta + \varphi^4 Q_1 \delta [y_1 \delta (\delta l_2 - l_3) + \\ & + y_2 (l_3 - \delta^2 l_1) + y_3 (\delta l_1 - l_2)] / \Delta;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau = & \varphi \delta^2 T_1 [y_2 \delta (\delta l_7 - l_8) + y_3 (l_8 - \delta^2 l_6) + y_4 (\delta l_6 - l_7)] / \Delta + \varphi^2 T_1 \delta [y_1 \delta^3 (l_8 - \delta l_7) + \\ & + y_3 \delta (\delta^3 l_5 - l_8) + y_4 (l_7 - \delta^2 l_5)] / \Delta + \varphi^3 T_1 \delta [y_1 \delta (\delta^2 l_6 - l_8) + y_2 (l_8 - \delta^3 l_5) + \\ & + y_4 (\delta^3 l_5 - l_6)] / \Delta + \varphi^4 T_1 \delta [y_1 \delta (l_7 - \delta l_6) + y_2 (\delta^2 l_5 - l_7) + y_3 (l_6 - \delta l_5)] / \Delta, \quad (4.6)\end{aligned}$$

где l_{1-8} – коэффициенты, численное значение которых определяется из выражений:

$$\begin{aligned}l_1 &= K_1 - K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + U_5 + \mu(U_1 + U_4); \\ l_2 &= M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + \mu V_1 + \mu V_4 + \mu U_6 + K_6; \\ l_3 &= N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + K_7 + \mu U_7 + \mu(W_1 + W_4); \\ l_4 &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + K_8 + \mu(E_1 + E_4 + U_8); \\ l_5 &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + \mu(K_1 - K_4); \\ l_6 &= V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \mu(M_1 - M_4); \\ l_7 &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + \mu(N_1 - N_4); \\ l_8 &= E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + \mu(C_1 - C_4).\end{aligned}$$

Численные значения величин K , N , M , C , U , W , V и E зависят от расположения точки определения напряжений поддона плиты и определяется выражениями:

$$\begin{aligned}K_1 &= \sin \alpha - \alpha; \quad M_1 = -\alpha^2 + 2(1 - \cos \alpha); \quad N_1 = -\alpha^3 + 6(\alpha + \sin \alpha); \\ C_1 &= -\alpha^4 + 4W_1; \quad U_1 = 1 - \cos \alpha; \quad V_1 = 2(\alpha - \sin \alpha); \\ W_1 &= 3\alpha^2 + 6(\cos \alpha - 1); \quad E_1 = -4N_1; \\ K_2 &= -\beta + \alpha \cos(\beta - \alpha) + \sin(\beta - \alpha); \quad U_2 = 1 - \alpha \sin(\alpha - \beta) - \cos(\beta - \alpha); \\ M_2 &= -\beta^2 + \alpha^2 \cos(\beta - \alpha) + 2\alpha \sin(\beta - \alpha) - 2\cos(\beta - \alpha) + 2; \\ N_2 &= -\beta^3 \cos(\beta - \alpha) + \alpha^3 + 3\beta^2 \sin(\beta - \alpha) + 6\beta \cos(\beta - \alpha) + 6\sin(\beta - \alpha) - 6\alpha; \\ V_2 &= \alpha^2 \sin(\beta - \alpha) - 2\alpha \cos(\beta - \alpha) - 2\sin(\beta - \alpha) + 2\beta; \\ W_2 &= \beta^3 \sin(\beta - \alpha) + 3\beta^2 \cos(\beta - \alpha) - 3\alpha^2 - 6\beta \sin(\beta - \alpha) + 6 - 6\cos(\beta - \alpha); \\ C_2 &= -\beta^4 \cos(\beta - \alpha) + \alpha^4 + 4W_2; \quad E_2 = \beta^4 \sin(\beta - \alpha) - 4N_2; \\ K_3 &= -\gamma + \beta \cos(\gamma - \beta) + \sin(\gamma - \beta);\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_3 &= -\gamma^2 + \beta^2 \cos(\gamma - \beta) + 2\beta \sin(\gamma - \beta) - 2\cos(\gamma - \beta) + 2; \\
N_3 &= -\gamma^3 \sin(\gamma - \beta) + \beta^3 + 3\gamma^2 \sin(\gamma - \beta) + 6\gamma \cos(\gamma - \beta) - 6\sin(\gamma - \beta) - 6\beta; \\
U_3 &= 1 - \beta \sin(\beta - \gamma) - \cos(\gamma - \beta); \\
V_3 &= \beta^2 \sin(\gamma - \beta) - 2\beta \cos(\gamma + \beta) - 2\sin(\gamma - \beta) + 2\gamma; \\
W_3 &= \gamma^3 \sin(\gamma - \beta) - 3\beta^2 + 3\gamma^2 \cos(\gamma - \beta) - 6\gamma \sin(\gamma - \beta) + 6 - 6\cos(\gamma - \beta); \\
C_3 &= -\gamma^4 \cos(\gamma - \beta) + \beta^4 + 4; \quad C_3 = -\gamma^4 \cos(\gamma - \beta) + \beta^4 + 4W_3; \\
E_3 &= \gamma^4 \sin(\gamma - \beta) - 4N_3; \quad K_4 = -\psi + \gamma \cos(\psi - \gamma) + \sin(\psi - \gamma); \\
M_4 &= -\psi^2 + \gamma^2 \cos(\psi - \gamma) + 2\gamma \sin(\psi - \gamma) - 2\cos(\psi - \gamma) + 2; \\
N_4 &= -\psi^3 \sin(\psi - \gamma) + \gamma^3 + 3\psi^2 \sin(\psi - \gamma) - 6\psi \cos(\psi - \gamma) - 6\gamma - 6\sin(\gamma - \psi); \\
U_4 &= \varphi \cos(\varphi - \psi) d\varphi = 1 - \gamma \sin(\gamma - \psi) - \cos(\psi - \gamma); \\
V_4 &= \gamma^2 \sin(\psi - \gamma) - 2\gamma \cos(\psi + \gamma) - 2\sin(\psi - \gamma) + 2\psi; \\
W_4 &= \psi^3 \sin(\psi - \gamma) - 3\gamma^2 - 3\psi^2 \cos(\psi - \gamma) - 6\psi \sin(\psi - \gamma) + 6 - 6\cos(\psi - \gamma); \\
C_4 &= -\gamma^4 \cos(\psi - \gamma) + \gamma^4 + 4W_4; \quad E_4 = \gamma^4 \sin(\psi - \gamma) - 4N_4 \\
K_5 &= (\beta^2 - \alpha^2)/2; \quad U_5 = (\gamma^2 - \beta^2)/2; \quad K_6 = (\beta^3 - \alpha^3)/3; \quad U_6 = (\gamma^3 - \beta^3)/3; \\
K_7 &= (\beta^4 - \alpha^4)/4; \quad U_7 = (\gamma^4 - \beta^4)/4; \quad K_8 = (\beta^5 - \alpha^5)/5; \quad U_8 = (\gamma^5 - \beta^5)/5;
\end{aligned}$$

Q_1 и T_1 – силовые факторы, значения которых определяются из выражений:

$$Q_1 = (Q - P \sin \omega t)/F; \quad T_1 = (T - P \cos \omega t)/F;$$

F – контактная поверхность; Δ – определитель системы уравнений.

С учетом граничных условий, согласно которым при $\varphi = \alpha + \beta \rightarrow \rightarrow d\sigma_y/d\varphi = 0$, определены значения коэффициентов y_1 ; y_2 ; y_3 и y_4 :

$$y_1 = 1; \quad y_2 = 2\beta_1; \quad y_3 = 3\beta_1^2; \quad y_4 = 4\beta_1^3.$$

Из полученной зависимости видно, что напряженное состояние частицы материала под вибрационной плитой зависит от действия силовых факторов Q_1 и T_1 и расположения частицы, характеризуемое геометрическими углами.

Анализ уравнений показывает, что при условии $\varphi = 0$ и $\varphi = \delta$ составляющие общего напряжения равны нулю. Полученные зависимости соответствуют частным решениям контакта вибрационной плиты с уплотняемым материалом. Следовательно, полученные зависимости позволяют определить величину контактных напряжений (сжимающих

и сдвигающих) в любой точке контакта плиты с материалом в зависимости от параметров вибрационной плиты. Для расчета контактных напряжений под вибрационной плитой разработана программа для расчета на ЭВМ, позволяющая определять численное значение напряжений при разных геометрических и силовых параметрах вибрационных плит.

4.1. Результаты расчетов напряжений под вибрационной плитой

| Время, с | $t = 0,005$ | | $t = 0,01$ | | $t = 0,015$ | | $t = 0,02$ | |
|----------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | σ , МПа | τ , Па | σ , МПа | τ , Па | σ , МПа | τ , Па | σ , МПа | τ , Па |
| 0 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | -0,0002 | -0,0219 | -0,0001 | -0,0137 | 0,0004 | 0,0253 | 0,0007 | 0,0464 |
| 9 | -0,0004 | -3,4543 | -0,0002 | -2,1649 | 0,0008 | 3,9826 | 0,0013 | 7,3099 |
| 13 | -0,0005 | -9,1597 | -0,0002 | -5,7405 | 0,0011 | 10,5604 | 0,0019 | 19,3834 |
| 18 | -0,0007 | -16,1342 | -0,0003 | -10,1114 | 0,0014 | 18,6014 | 0,0023 | 34,1425 |
| 22 | -0,0008 | -23,5079 | -0,0004 | -14,7326 | 0,0016 | 27,1027 | 0,0027 | 49,7464 |
| 27 | -0,0009 | -30,5447 | -0,0004 | -19,1426 | 0,0018 | 35,2155 | 0,0030 | 64,6374 |
| 31 | -0,0009 | -36,6423 | -0,0004 | -22,9640 | 0,0020 | 42,2456 | 0,0033 | 77,5410 |
| 36 | -0,0010 | -41,3323 | -0,0004 | -25,9033 | 0,0021 | 47,6528 | 0,0034 | 87,4659 |
| 40 | -0,0010 | -44,2802 | -0,0005 | -27,7508 | 0,0021 | 51,0515 | 0,0035 | 93,7040 |
| 45 | -0,0010 | -45,2851 | -0,0005 | -28,3806 | 0,0021 | 52,2101 | 0,0036 | 95,8306 |
| 49 | -0,0010 | -44,2802 | -0,0005 | -27,7508 | 0,0021 | 51,0515 | 0,0035 | 93,7040 |
| 54 | -0,0010 | -41,3323 | -0,0004 | -25,9033 | 0,0021 | 47,6528 | 0,0034 | 87,4659 |
| 58 | -0,0009 | -36,6423 | -0,0004 | -22,9640 | 0,0020 | 42,2456 | 0,0033 | 77,5410 |
| 63 | -0,0009 | -30,5447 | -0,0004 | -19,1426 | 0,0018 | 35,2155 | 0,0030 | 64,6374 |
| 67 | -0,0008 | -23,5079 | -0,0004 | -14,7326 | 0,0016 | 27,1027 | 0,0027 | 49,7464 |
| 72 | -0,0007 | -16,1342 | -0,0003 | -10,1114 | 0,0014 | 18,6014 | 0,0023 | 34,1425 |
| 76 | -0,0005 | -9,1597 | -0,0002 | -5,7405 | 0,0011 | 10,5604 | 0,0019 | 19,3834 |
| 81 | -0,0004 | -3,4543 | -0,0002 | -2,1649 | 0,0008 | 3,9826 | 0,0013 | 7,3099 |
| 85 | -0,0002 | -0,0219 | -0,0001 | -0,0137 | 0,0004 | 0,0253 | 0,0007 | 0,0464 |
| 90 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

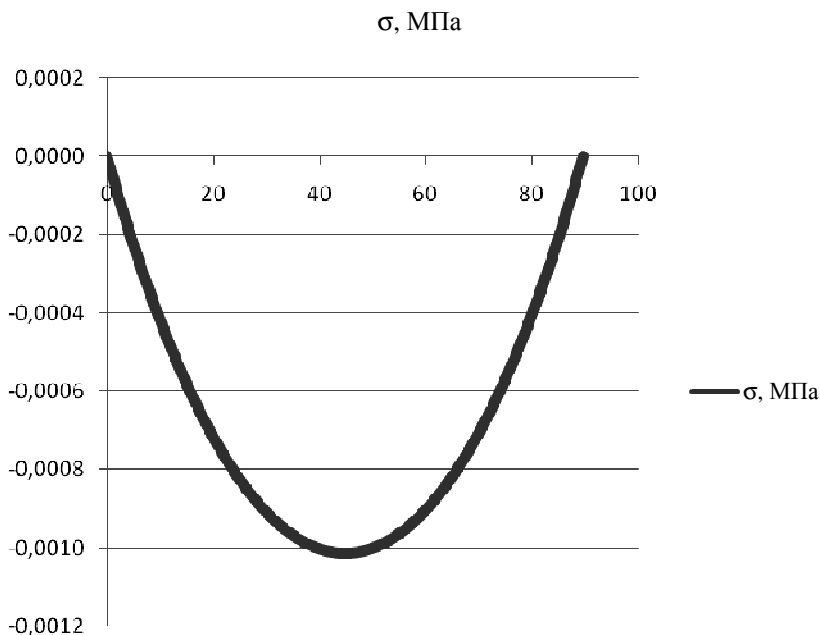


Рис. 4.8. Распределение по длине поддона сжимающих напряжений под вибрационной плитой

В таблице 4.1 и на рисунке 4.8 представлены результаты расчета контактных напряжений под вибрационной плитой при массе плиты 0,162 кН, контактной поверхности 0,13 м² и относительной вынуждающей силе 2,0. Установлено, что величина контактных напряжений по ширине поддона плиты распределяется равномерно. По длине поддона вибрационной плиты максимальное значение напряжений соответствует оси приложения силовых параметров плиты.

Из проведенного статистического анализа параметров вибрационных плит установлено, что относительная вынуждающая сила колеблется в широком интервале значений, что влияет на уплотняющую способность плит. На рисунке 4.9 представлена аналитическая зависимость сжимающих контактных напряжений от относительной вынуждающей силы.

Из представленных на рисунке данных видно, что с увеличением относительной вынуждающей силы контактные напряжения возрастают. С увеличением вынуждающей силы, за счет сил инерции, наблюдается снижение контактных напряжений. Установлено, что зависи-

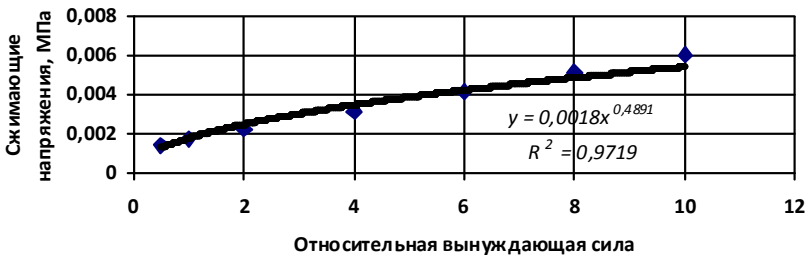


Рис. 4.9. Зависимость сжимающих напряжений под вибрационной плитой от относительной вынуждающей силы

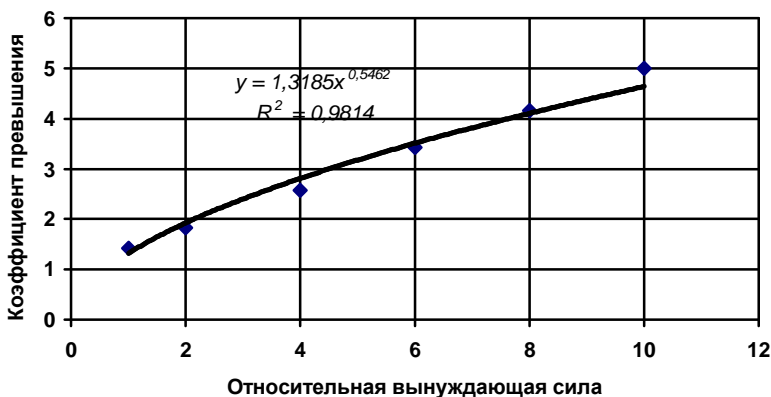


Рис. 4.10. Влияние относительной вынуждающей силы на коэффициент превышения контактных напряжений под вибрационной плитой

мось величины сжимающих напряжений от относительной вынуждающей силы характеризуется степенной зависимостью. На рисунке 4.10 представлена зависимость коэффициента превышения контактных напряжений от относительной вынуждающей силы, который определяется как отношение контактных напряжений при динамическом и статическом воздействии вибрационной плиты на уплотняемый материал. Анализ взаимодействия вибрационной плиты с уплотняемым материалом показал, что при относительной вынуждающей силе более единицы, возникает отрыв поддона плиты от поверхности уплотняемого материала, что приводит к изменению режима работы плиты и уменьшению времени воздействия уплотняющей нагрузки на материал. Следовательно, с увеличением относительной вынуждающей силы, одновременно с ростом контактных напряжений уменьшается время контакта, что влияет на эффективность процесса уплотнения материала.

4.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ВИБРАЦИОННОЙ ПЛИТОЙ

Для уточнения полученных теоретических исследований по расчету контактных напряжений под вибрационной плитой проведены экспериментальные исследования. С этой целью была изготовлена вибрационная плита с размерами 500 на 270 мм и массой 0,162 кН, позволяющая менять относительную вынуждающую силу в пределах 2,2...8,7 при уплотнении разного материала (рис. 4.11). Исследование взаимодействия вибрационной плиты с уплотняемой горячей асфальтобетонной смесью проводилось также в производственных условиях при строительстве участка автомобильной дороги «Москва–Волгоград» [15].

Измерение контактных напряжений под вибрационной плитой осуществлялось с помощью круглых штампов, встроенных в днище поддона плиты и расположенных в разных точках как по длине, так и по ширине поддона. Каждый штамп имел площадь 1 см², жестко соединенный с направляющим стержнем, на который наклеивались тензорезисторные датчики. Общий вид поддона плиты с расположенными на нем датчиками представлен на рис. 4.12.



Рис. 4.11. Общий вид установки для лабораторных исследований

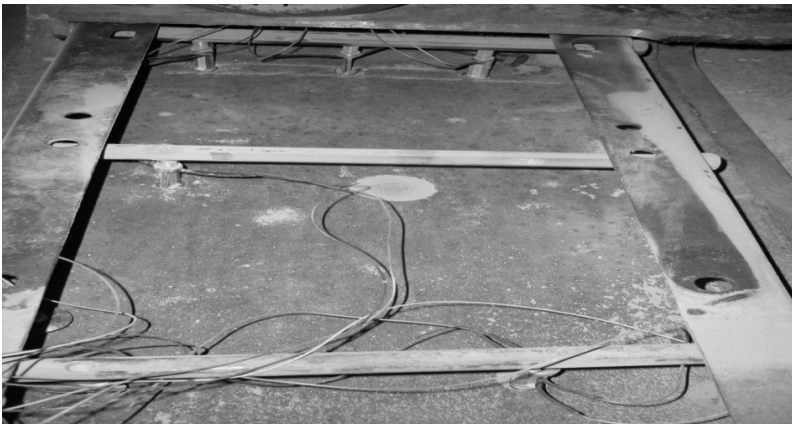


Рис. 4.12. Общий вид поддона вибрационной плиты с расположенными на нем датчиками для измерения контактных напряжений

Тарировка датчиков осуществлялась путем приложения нагрузки к поверхности штампа и фиксировалась с помощью измерительной аппаратуры (рис. 4.13). В качестве регистрирующего прибора использовался прибор АИД-4. Тарировка датчиков осуществлялась перед каждым измерением контактных напряжений.

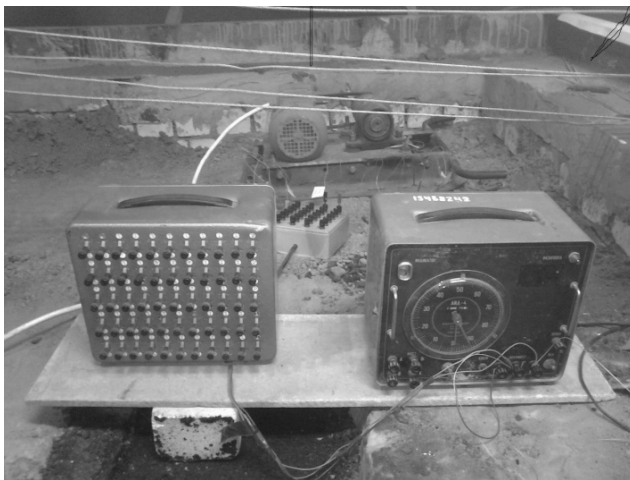


Рис. 4.13. Измерительная аппаратура для определения контактных напряжений

Распределение контактных напряжений при статической и динамической нагрузке под вибрационной плитой представлено на рис. 4.14, где 1 – при статической нагрузке, 2 – при динамической нагрузке.

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что в отличие от уплотнения грунтового полупространства, при уплотнении слоев незначительной толщины на жестком основании величина контактных напряжений возрастает с увеличением относительной вынуждающей силы выше единицы и вибрационная плита работает в виброударном режиме. На рисунке 4.15 представлена зависимость контактных напряжений от относительной вынуждающей силы.

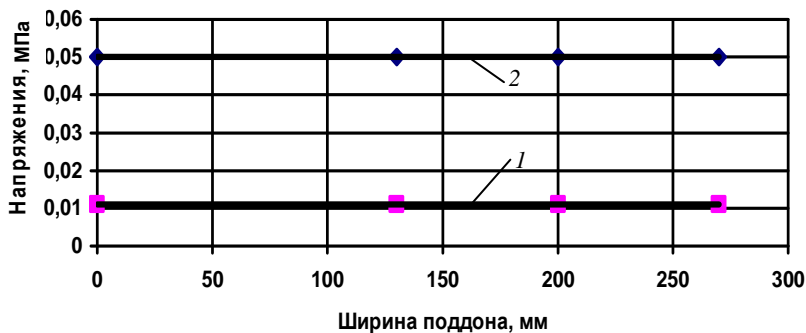
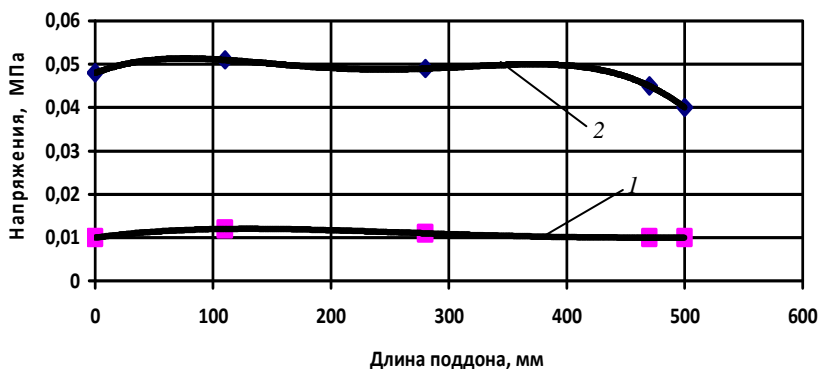


Рис. 4.14. Распределение контактных напряжений под вибрационной плитой при действии статической и динамической нагрузках

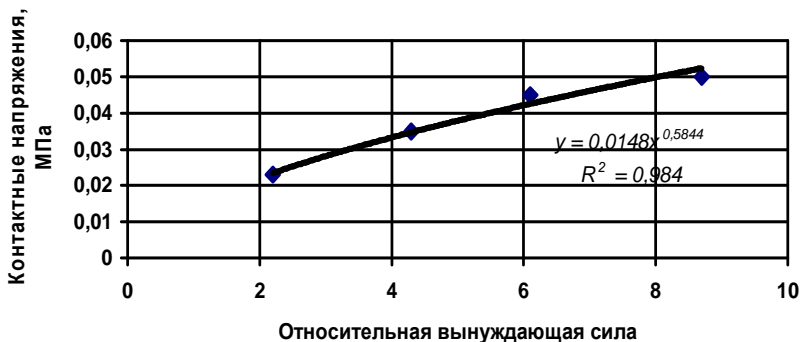


Рис. 4.15. Зависимость контактных напряжений от относительной вынуждающей силы

4.5. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИБРАЦИОННЫХ ПЛИТ

Из представленных статистических параметров вибрационных плит видно, что практически все плиты имеют относительную вынуждающую силу свыше 4. С учетом незначительной толщины уплотняемого слоя материала и влияния жесткости основания можно полагать, что они работают в ударном режиме, что подтверждается экспериментальными исследованиями. Известно, что при ударном взаимодействии плоского штампа с уплотняемым материалом амплитудное значение контактного давления определяется выражением [30]

$$\sigma_k = ai_y/t_y, \quad (4.7)$$

где a – безразмерный коэффициент, определяемый экспериментальным путем; t_y – время удара, с; i_y – удельный импульс удара, величина которого определяется зависимостью

$$i_y = VM/F, \quad (4.8)$$

где V – скорость штампа в момент начала контакта с уплотняемым материалом; M – масса штампа; F – контактная поверхность.

Выражая массу штампа через силу тяжести и учитывая, что отношение силы тяжести к контактной поверхности определяет величину контактных напряжений под штампом, значение удельного импульса будет определяться выражением

$$i_y = V\sigma_{ct}/g, \quad (4.9)$$

g – ускорение силы тяжести, $\text{см}/\text{с}^2$.

В конечном виде величина контактных напряжений под вибрационным штампом определяется выражением

$$\sigma_k = a_1 V \sigma_{ст} / g t_y, \text{ МПа.} \quad (4.10)$$

Для установления численных значений параметров, входящих в выражение (4.7), и их зависимость от относительной вынуждающей силы, в лабораторных условиях использовалась вибрационная плита, на которой устанавливался датчик измерения параметров вибрации (ВИБ-А).

Установлено, что характер колебаний вибрационной плиты при постоянной частоте колебаний зависит от величины относительной вынуждающей силы. При величине относительной вынуждающей силы менее единицы отрыва плиты от поверхности материала не происходит. С увеличением относительной вынуждающей силы более единицы происходит отрыв плиты от поверхности слоя материала, что подтверждается результатами исследований других авторов [9]. Следовательно, режим работы вибрационной плиты зависит от относительной вынуждающей силы. С ростом относительной вынуждающей силы меняется характер колебаний. Гармонические колебания плиты, когда удар вибрационной плиты о поверхность уплотняемого материала происходит за один оборот возбудителя колебаний, меняются на субгармонические, при которых один удар плиты происходит за несколько оборотов возбудителя колебаний. При таком режиме работы плиты время контакта уменьшается, что способствует снижению эффективности процесса уплотнения материала. На рисунке 4.16 представлена зависимость времени нарастания напряжения в материале при контакте плиты с поверхностью материала от относительной вы-

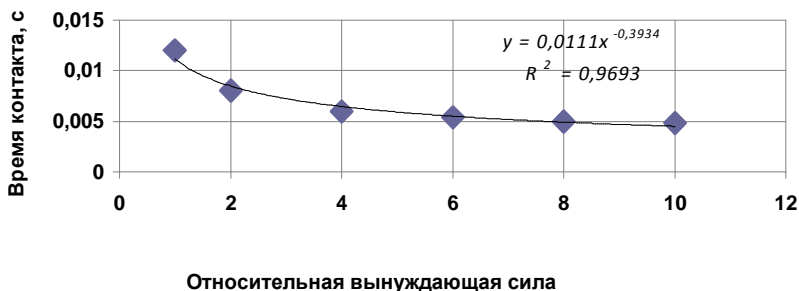


Рис. 4.16. Зависимость времени нарастания контакта плиты с материалом от относительной вынуждающей силы

нуждающей силы. При ударном взаимодействии вибрационной плиты с уплотняемым материалом импульс удара зависит от скорости в момент контакта плиты с уплотняемым материалом. По результатам исследований установлена зависимость скорости контакта плиты с поверхностью материала от относительной вынуждающей силы, которая представлена на рис. 4.17. Установлено, что между скоростью в момент контакта плиты с поверхностью уплотняемого материала и контактными напряжениями имеется прямая зависимость, которая представлена на рис. 4.18.

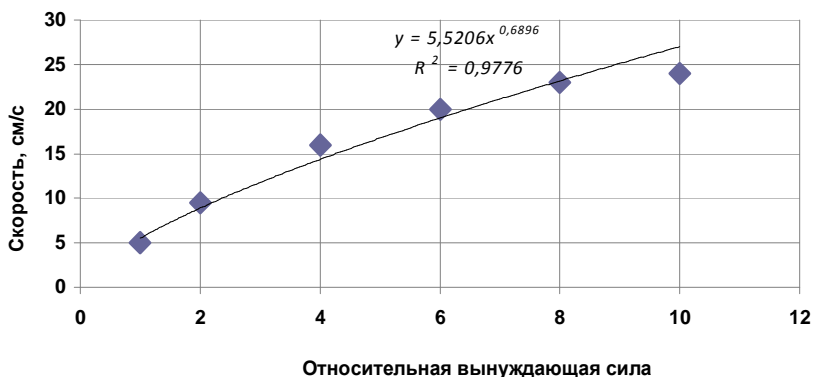


Рис. 4.17. Зависимость скорости плиты в момент контакта с поверхностью материала от относительной вынуждающей силы



Рис. 4.18. Зависимость контактных напряжений от скорости плиты в момент контакта с поверхностью уплотняемого материала

Из представленных данных видно, что скорость в момент контакта плиты с поверхностью уплотняемого материала влияет на величину контактных напряжений под рабочим органом машины.

Используя экспериментальные данные по определению контактных напряжений под вибрационной плитой в зависимости от относительной вынуждающей силы, получено численное значение безразмерного коэффициента a_1 от относительной вынуждающей силы, которая представлена на рис. 4.19.

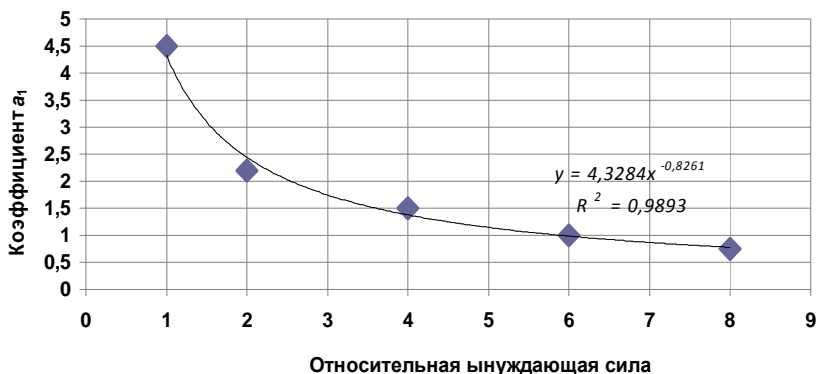


Рис. 4.19. Зависимость коэффициента a_1 от относительной вынуждающей силы

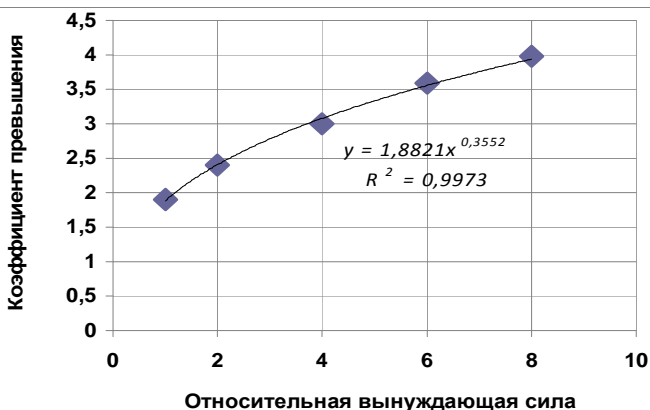


Рис. 4.20. Влияние относительной вынуждающей силы на коэффициент превышения контактных напряжений при работе вибрационных плит в динамическом режиме

Из представленных зависимостей, влияющих на величину контактных напряжений под вибрационной плитой, видно, что они зависят от относительной вынуждающей силы, что позволяет установить общую закономерность влияния относительной силы на эффективность развития контактных напряжений под вибрационной плитой, которая представлена на рис. 4.20.

На основании экспериментальных данных, полученных при работе вибрационных плит в виброударном режиме, можно сделать вывод, что с увеличением относительной вынуждающей силы величина контактных напряжений возрастает, но интенсивность их роста уменьшается.

4.6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРЕВЫШЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ВИБРАЦИОННОЙ ПЛИТОЙ ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Эффективность работы уплотняющих машин определяется величиной необратимой деформации уплотняемого материала, зависящей не только от величины контактных напряжений, но и времени действия нагрузки на уплотняемый материал и скорости изменения напряженного состояния материала [30]. В то же время согласно основному закону уплотнения, величина контактных напряжений должна быть близка к пределу прочности уплотняемого материала, и при нарушении этого условия достичь требуемой плотности материала практически невозможно [23, 30]. Проведенными исследованиями установлено, что предел прочности асфальтобетона зависит от температуры, причем зависимость носит экспоненциальный характер. Выбор параметров уплотняющих машин при уплотнении горячих смесей зависит не только от температуры смеси начала работы машины, но и коэффициента предварительного уплотнения при распределении горячей смеси на место производства работ [20]. С учетом данных факторов предел прочности горячей смеси при укладке в выбоину имеет незначительную величину. Наличие жесткого основания при уплотнении тонких слоев влияет на режим работы вибрационной плиты. Если при уплотнении грунтовых оснований вибрационной плитой характер колебаний меняется при относительной вынуждающей силе, равной двум, то при уплотнении слоев малой толщины переход от вибрационного режима к ударному происходит при относительной вынуждающей силе, равной единице. Анализ технологий применения вибрационных плит при ремонте выбоин дорожных покрытий показал, что масса применяемых вибрационных плит находится в пределах 50...100 кг. По результатам

статистической обработки параметров вибрационных плит установлено, что для таких вибрационных плит статическое давление под плитой находится в пределах 0,02...0,06 МПа с относительной вынуждающей силой 5...8. По результатам проведенных исследований получены значения коэффициентов превышения контактных напряжений при работе вибрационных плит в динамическом режиме при разных методах их определения. Под коэффициентом превышения напряжений принято отношение напряжений при динамическом режиме работы к статическому. Полученные результаты представлены на рис. 4.21 и в табл. 4.2.

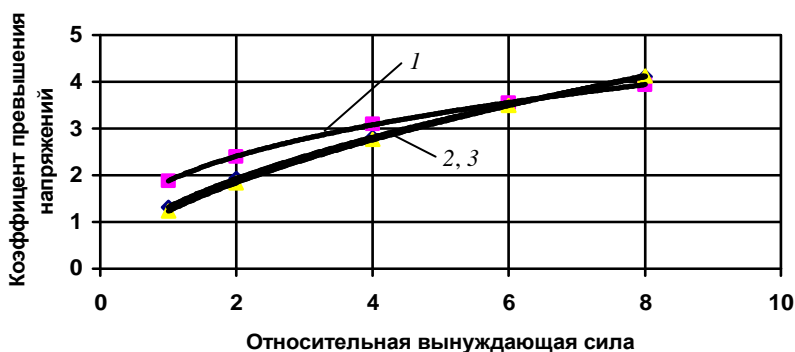


Рис. 4.21. Значения коэффициента превышения напряжений при работе вибрационных плит в динамическом режиме от относительной вынуждающей силы

4.2. Значения коэффициента превышения напряжений при работе вибрационных плит в динамическом режиме от относительной вынуждающей силы

| Методика определения | Зависимость | Относительная вынуждающая сила | | | | |
|----------------------|---------------------|--------------------------------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| Моделирование | $1,32(P/Q)^{0,546}$ | 1,32 | 1,93 | 2,81 | 3,51 | 4,11 |
| Ударный метод | $1,88(P/Q)^{0,355}$ | 1,84 | 2,4 | 3,07 | 3,55 | 3,93 |
| Эксперимент | $1,23(P/Q)^{0,582}$ | 1,23 | 1,84 | 2,77 | 3,49 | 4,12 |

На основании представленных зависимостей можно сделать вывод, что при производстве ремонтных работ дорожных покрытий и определении контактных напряжений под вибрационной плитой при ее работе в динамическом режиме может быть использована любая предложенная зависимость для определения коэффициента превышения напряжений под плитой.

4.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ЗОН РАБОТЫ ВИБРАЦИОННЫХ ПЛИТ

Известно, что эффективность работы вибрационных машин зависит от параметров, определяющих режимы их работы. Моделирование процесса взаимодействия рабочего органа машины в виде расчетных схем позволяет уточнить в качественном отношении влияние разных параметров системы на эффект уплотнения (рис. 4.22). При работе машин свойства применяемых материалов меняются в широких пределах, что влияет на характер колебаний и, как следствие, достигаемый результат работы машины. При моделировании процесса взаимодействия вибрационной плиты с уплотняемым материалом приняты обозначения: M_1 – масса подрессоренной части вибрационной плиты; M_2 – масса поддона плиты; c_1 – коэффициент жесткости амортизаторов; g – ускорение силы тяжести; N – сила сопротивления перемещению поддона; P – амплитуда вынуждающей силы; ω – частота колебаний вынуждающей силы; X_1 и X_2 – перемещения масс; φ – начальный угол.

Уравнение движения системы под действием приложенных к ней сил может быть представлено в виде

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) &= m_1 g, \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1(x_2 - x_1) &= P \cos(\omega t + \varphi) + N + m_2 g. \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

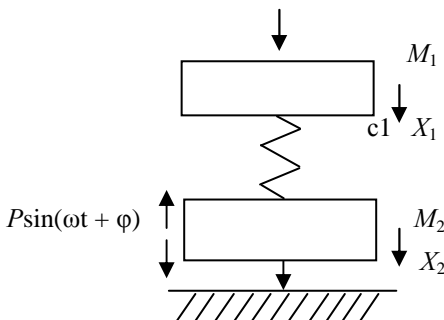


Рис. 4.22. Расчетная схема вибрационной плиты с уплотняемым материалом

За начало отсчета координат x_1 и x_2 принят момент соприкосновения вибраторного вальца с уплотняемым материалом. В этом случае начальные условия имеют вид

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } t = t_0, \quad x_1 = 0, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{10}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{20}; \\ \text{при } t = t_1, \quad x_1 = x_{t_1}, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{20}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{21}. \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

Сила сопротивления N перемещению вальца будет различной на разных участках движения, т.е.

$$N = \begin{cases} 0 & \text{при } x_2 < 0, \\ -c_2 x_2 & \text{при } x_2 > 0, \end{cases} \quad (4.13)$$

где c_2 – коэффициент жесткости уплотняемого материала.

Сила сопротивления N определяется из условия равновесия сил, действующих на рабочий орган. P – сопротивление ограничителя вдавливанию единичной площадки; b – ширина площадки; dS – длина площадки.

Полное сопротивление ограничителя вдавливанию равно

$$N = \int_{-a_1}^{a_2} P b dy. \quad (4.14)$$

Удельное сопротивление (P) вдавливанию можно определить по формуле М.И. Летошнева

$$P = c x^\mu, \quad (4.15)$$

где c и μ – постоянные величины, зависящие от состояния уплотняемого материала.

Дифференциальные уравнения движения системы по этапам имеют вид

$$\left. \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) = Q_1, \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1(x_2 - x_1) + c_2 x_2 = P \cos(\omega t + \varphi) + Q_2; \end{array} \right\} \quad (4.16)$$

$$\left. \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) = Q_1, \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1(x_2 - x_1) = P \cos(\omega t + \varphi) + Q_2. \end{array} \right\} \quad (4.17)$$

Система уравнений (4.16) описывает движение системы в контакте с уплотняемым материалом, система уравнений (4.17) соответствует системе при отрыве вальца от поверхности уплотняемого материала.

Граничные условия для данных систем уравнений имеют вид

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } t = t_0, \quad x_1 = 0, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{10}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{20}; \\ \text{при } t = t_1, \quad x_1 = x_{\tau_1}, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{20}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{21}. \end{array} \right\}$$

Для системы уравнений соответственно:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } t = t_1, \quad x_1 = x_{\tau_1}, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{11}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{21}; \\ \text{при } t = t_2, \quad x_1 = x_{\tau_2}, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{12}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{22}. \end{array} \right\} \quad (4.18)$$

Рассмотрим движение системы по этапам. Для удобства ведения расчетов введем безразмерные переменные

$$\left. \begin{array}{l} y_1 = \frac{m_1 \omega^2}{P} x_1, \\ y_2 = \frac{m_2 \omega^2}{P} x_2, \\ \tau = \omega t. \end{array} \right\} \quad (4.19)$$

Тогда система уравнений (4.16) примет вид

$$\left. \begin{array}{l} \ddot{y}_1 + \varepsilon_{11}^2 y_1 - \varepsilon_{12}^2 y_2 = P_1, \\ \ddot{y}_2 + \varepsilon_{12}^2 y_2 - \varepsilon_{11}^2 y_1 + \varepsilon_{22}^2 y_2 = P_2 + \cos(\tau + \varphi), \end{array} \right\} \quad (4.20)$$

где

$$\varepsilon_{11}^2 = \frac{c_1}{m_1 \omega^2}, \quad \varepsilon_{22}^2 = \frac{c_2}{m_2 \omega^2}, \quad \varepsilon_{12}^2 = \frac{c_1}{m_2 \omega^2},$$

$$P_1 = \frac{Q_1}{P}, \quad P_2 = \frac{Q_2}{P}.$$

Граничные условия в новых переменных определяются в виде

$$\left. \begin{aligned} \text{при } \tau = \tau_0, \quad y_1 = 0, \quad \dot{y}_1 = \dot{y}_{10}, \\ y_2 = 0, \quad \dot{y}_2 = \dot{y}_{20}. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

Установлено, что в зависимости от параметров вибрации возможны различные режимы колебания рабочего органа. При виброударном уплотнении материала практический интерес представляет случай одноударного периодического движения, когда за один оборот вынуждающей силы происходит один удар об уплотненный материал.

Общее решение системы уравнений (4.16) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} y_1^B &= A_1 + B_1 \cos(\tau + \varphi) + c_1 \sin \varepsilon_{01} \tau + D_1 \cos \varepsilon_{01} \tau, \\ y_2^B &= A_2 + B_2 \cos(\tau + \varphi) + c_2 \sin \varepsilon_{02} \tau + D_2 \cos \varepsilon_{02} \tau, \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

где ε_{01} – собственная частота подрессоренной массы; ε_{02} – собственная частота вибрационного вальца катка.

Решение системы уравнений для этапа вдавливания рабочего органа в уплотняемый материал имеет вид

$$\left. \begin{aligned} y_1^B &= \frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{22}^2 - 1} + \frac{P_1 (\varepsilon_{22}^2 - \varepsilon_{12}^2) - P_2 \varepsilon_{12}^2}{\varepsilon_{12}^2 \varepsilon_{22}^2} (1 - \cos \varepsilon_{01} \tau) + \\ &+ \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau - \varepsilon_{01} \cos \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau)}{\left[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{22}^2 + 1 \right] \varepsilon_{01}} + \frac{\dot{y}_{20} \sin \varepsilon_{01} \tau}{\varepsilon_{01}}; \\ y_2^B &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \cos(\tau + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} - \frac{(P_1 + P_2 X 1 + \cos \varepsilon_{02} \tau)}{\varepsilon_{22}^2} + \\ &+ \frac{\dot{y}_{20} \sin \varepsilon_{02} \tau}{\varepsilon_{02}} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) X \sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau}{\left[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1 \right] \varepsilon_{02}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

Соответственно скорости движения системы определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned}
 y_1^B &= \frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{22}^2 - 1} + \frac{P_1 (\varepsilon_{22}^2 - \varepsilon_{12}^2) - P_2 \varepsilon_{12}^2 (1 - \cos \varepsilon_{01} \tau)}{\varepsilon_{12}^2 \varepsilon_{22}^2} + \\
 &+ \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau - \varepsilon_{01} \cos \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau)}{\left[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1 \right] \varepsilon_{01}} + \frac{\dot{y}_{20} \sin \varepsilon_{01} \tau}{\varepsilon_{01}}; \\
 y_2^B &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \cos(\tau + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} - \frac{(P_1 + P_2 X 1 + \cos \varepsilon_{02} \tau)}{\varepsilon_{22}^2} + \\
 &+ \frac{\dot{y}_{20} \sin \varepsilon_{02} \tau}{\varepsilon_{02}} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1 X \sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau)}{\left[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1 \right] \varepsilon_{02}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Рассмотрим второй этап движения системы, когда происходит отрыв плиты от уплотняемой поверхности материала. Аналогично первому этапу движения вводим безразмерные переменные в систему дифференциальных уравнений. Тогда система уравнений, а также начальные условия, в новых переменных имеют вид

$$\left. \begin{aligned}
 \ddot{y}_1 + \varepsilon_{11}^2 y_1 - \varepsilon_{12}^2 y_2 &= P_1, \\
 \ddot{y}_2 + \varepsilon_{12}^2 y_2 - \varepsilon_{11}^2 y_1 &= P_2 + \cos(\tau + \varphi),
 \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \text{при } \tau = \tau_1, \quad y_1^n &= y_{\tau_1}^n, \quad \dot{y}_1 = \dot{y}_{12}^n, \\
 y_2^n &= 0, \quad \dot{y}_2 = \dot{y}_{21}^n; \\
 \text{при } \tau = \tau_2, \quad y_1^n &= y_{\tau_2}^n, \quad \dot{y}_1 = \dot{y}_{12}^n; \\
 y_2^n &= 0, \quad \dot{y}_2 = \dot{y}_{22}^n.
 \end{aligned} \right\}$$

В конечном виде решение системы дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{aligned}
 y_1^n &= \frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau - \varepsilon_{01} \cos \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau)}{\varepsilon_{01} (1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2)} + \\
 &+ \dot{y}_{12} (\tau - \tau_2) - (P_1 / 2) (\tau - \tau_2)^2, \\
 y_2^n &= \frac{(\varepsilon_{12}^2 - 1) \cos(\tau + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) (\sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau)}{\varepsilon_{02} (1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2)} + \\
 &+ \dot{y}_{22} (\tau - \tau_2) - (P_2 / 2) (\tau - \tau_2)^2.
 \end{aligned} \quad (4.26)$$

Скорости соответственно равны

$$\begin{aligned} \dot{y}_1^n &= \frac{\varepsilon_{12}^2 \sin(\tau + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau + \varepsilon_{01} \cos \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \\ &+ \dot{y}_{12} - P_1(\tau - \tau_2)^2, \\ y_2^n &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \sin(\tau + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) (\sin \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau + \varepsilon_{02} \cos \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \\ &+ \dot{y}_{22} - P_2(\tau - \tau_2)^2. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Для нахождения общего решения движения системы в интервале от τ_0 до τ_2 , используем метод припасовывания (сшивания). Сущность метода заключается в том, что находится решение для каждого участка, а затем начальные условия последующего участка припасовываются (сшиваются) к конечным условиям предыдущего участка. Для данной задачи эти условия имеют вид

при $\tau = \tau_1$,

$$\begin{aligned} y_1^B &= y_1^n, \quad \dot{y}_1^B = \dot{y}_1^n; \\ y_2^B &= y_2^n = 0, \quad \dot{y}_2^B = \dot{y}_2^n. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Используя полученные решения системы уравнений для каждого этапа движения с учетом граничных условий (4.21), находим общее решение

$$\begin{aligned} &\frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau_1 + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} + \frac{P_1 (\varepsilon_{22}^2 - \varepsilon_{12}^2) - P_2 \varepsilon_{12}}{\varepsilon_{11}^2 \varepsilon_{22}^2} (1 - \cos \varepsilon_{01} \tau_1) + \frac{\dot{y}_{10}}{\varepsilon_{01}} \sin \varepsilon_{01} \tau_1 + \\ &+ \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau_1 - \varepsilon_{01} \cos \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau_1)}{\varepsilon_{01} [(\varepsilon_{11}^2 - 1) \varepsilon_{22}^2 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1]} = \frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau_1 + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \dot{y}_{12} (\tau_1 - \tau_2) + \\ &+ \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau_1 - \varepsilon_{01} \cos \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau_1)}{\varepsilon_{01} (1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2)} - \frac{P_1}{2} (\tau_1 - \tau_2)^2; \\ &- \frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau_1 + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} + \frac{[P_1 (\varepsilon_{22}^2 - \varepsilon_{12}^2) - P_2 \varepsilon_{12}] \varepsilon_{01} \sin \varepsilon_{01} \tau_1}{\varepsilon_{11}^2 \varepsilon_{22}^2} + \\ &+ \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau_1 + \varepsilon_{01} \cos \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau_1)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} + \dot{y}_{10} \cos \varepsilon_{01} \tau_1 = \\ &= \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau_1 + \varepsilon_{01} \cos \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau_1)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} - \frac{\varepsilon_{12}^2 \sin(\tau_1 + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \dot{y}_{12} - P_1 (\tau_1 - \tau_2); \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned}
y_2^B &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \cos(\tau_1 + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} - \frac{P_1 + P_2}{\varepsilon_{22}^2} (1 - \cos \varepsilon_{02} \tau_1) + \frac{\dot{y}_{20}}{\varepsilon_{02}} \sin \varepsilon_{01} \tau_1 + \\
&+ \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) (\sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau_1 - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau_1)}{[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1] \varepsilon_{02}} = 0; \\
y_2^n &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \cos(\tau_1 + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) (\sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau_1 - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau_1)}{(1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2) \varepsilon_{02}} + \\
&+ \dot{y}_{22} (\tau_1 - \tau_2) - \frac{P_2}{2} (\tau_1 - \tau_2)^2 = 0; \\
&- \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \sin(\tau_1 + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} + \frac{(P_1 + P_2) \varepsilon_{02} \sin \varepsilon_{02} \tau_1}{\varepsilon_{22}} + \\
&+ \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) (\sin \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau_1 + \varepsilon_{02} \cos \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau_1)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} + \dot{y}_{20} \cos \varepsilon_{02} \tau_1 = \\
&= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \sin(\tau_1 + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) (\sin \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau_1 + \varepsilon_{02} \cos \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau_1)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \\
&+ \dot{y}_{22} - P_2 (\tau_1 - \tau_2). \tag{4.30}
\end{aligned}$$

Анализ полученных уравнений показал, что полученное решение данной системы уравнений представляет трансцендентные уравнения, численное значение которого можно получить с использованием метода последовательных приближений. Исследование данной системы уравнений аналитическим методом трудоемко, а определение областей устойчивых колебаний вообще не представляется целесообразным из-за сложности получающихся уравнений. Эффективным методом исследования таких систем является численное решение на ЭВМ. Использование ЭВМ позволяет получить частные решения, что дает возможность выявить общую картину возможных движений системы. Меняя параметры системы, можно установить различия в характере ее движения. С этой целью система дифференциальных уравнений была приведена к виду, удобному для моделирования и, используя вычислительные машины, были получены численные решения данных уравнений. На основании полученных решений установлены границы устойчивых колебаний рабочего органа вибрационной плиты при разных параметрах вибрации. С практической точки зрения наибольший интерес представляют одноударные колебания с периодом, равным периоду возмущающей силы. Поэтому были определены границ таких коле-

баний. Области существования более сложных движений довольно узки, и нельзя с достаточной точностью указать границы между ними. На основе анализа результатов моделирования определены области устойчивых одноударных колебаний с периодом, равным периоду возмущающей силы, при соотношении масс, равных единице. Результаты представлены на рис. 4.23. Область А соответствует движению вибрационного вальца без отрыва от поверхности уплотняемого материала. Работа без отрыва возможна в случае, когда $A_2 < \delta$, где

$$A_2 = \frac{P(c_1 - m_1\omega^2)}{(c_1 + c_2 - m_2\omega^2)(c_1 - m_1\omega^2) - c_1^2}, \quad \delta = \frac{Q_1 + Q_2}{c_2}. \quad (4.31)$$

Тогда граница этой области может быть определена по формуле:

$$\frac{P}{Q_1 + Q_2} = P_0 \leq \frac{(c_1 + c_2 - m_2\omega^2)(c_1 - m_1\omega^2) - c_1^2}{c_2(c_1 - m_1\omega^2)}, \quad (4.32)$$

где A_2 – амплитуда колебаний рабочего органа, м; δ – деформация материала, м.

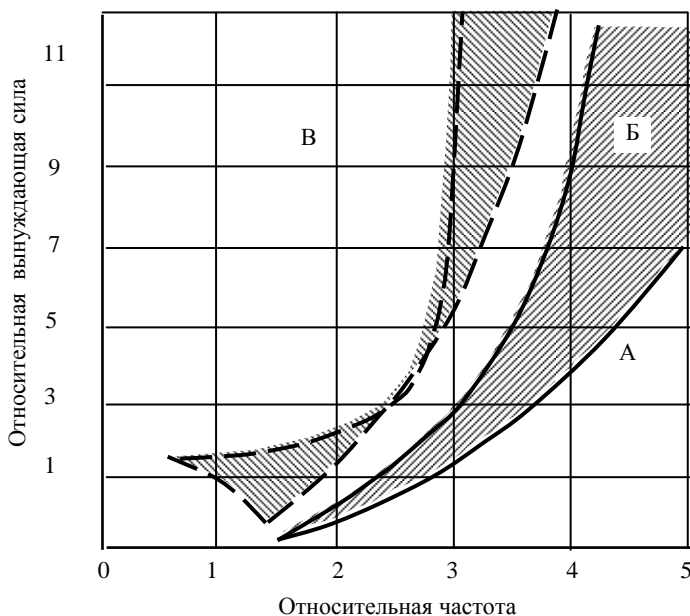


Рис. 4.23. Области устойчивых одноударных колебаний

В области В вибратор осуществляет одноударные движения с периодом, равным периоду возмущающей силы. Область В соответствует более сложным колебаниям системы. Представляет интерес сравнение областей устойчивых движений колеблющейся массы данной расчетной системы с исследованиями вибрационных площадок, работающих в виброударном режиме. В результате рассмотрения одноударной виброударной системы рассчитаны и построены области устойчивых одноударных колебаний с периодом, равным периоду возмущающей силы. Результаты вычислений представлены на рис. 4.22 пунктирными линиями

Из рисунка 4.22 видно совпадение областей существования и устойчивости таких колебаний. Различие наблюдается в смещении области устойчивых колебаний в сторону увеличения относительной частоты колебаний. Наличие подрессоренной верхней массы расширяет зону одноударных колебаний с периодом, равным периоду возмущающей силы.

На основании данных результатов можно сделать вывод, что изменение верхней подрессоренной массы катка не влияет на амплитуду колебаний поддона плиты. Это объясняется тем, что колебательная система «рама–поддон плиты» работает за второй резонансной зоной и изменение верхней подрессоренной массы меняет зону первого резонанса, оставляя без изменений зону второго резонанса.

На основе проведенного анализа расчетной системы можно отметить, что введение вязкого сопротивления при низких частотах расширяет область одноударных колебаний с периодом, равным периоду вынуждающей силы. Кроме того, наличие вязкого сопротивления расширяет область одноударных колебаний с периодом, равным периоду вынуждающей силы. Это имеет место при постоянной частоте колебаний, а также и при изменяющейся деформативной способности уплотняемого материала.

Полученные результаты могут быть учтены при расчете вибрационных машин, которые работают на асфальтобетонной смеси без значительных пластических деформаций. Такое положение имеет место в конце процесса уплотнения.

Глава 5

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

При строительстве автомобильных дорог и в процессе их эксплуатации они должны соответствовать нормативным требованиям, направленным на обеспечение безопасности движения транспортных средств. Повышение интенсивности движения, при одновременном увеличении осевой нагрузки на дорожные конструкции от транспортных средств, способствует снижению транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги и для их повышения необходимо своевременно и качественно осуществлять работы по содержанию и ремонту дорожных одежд. С учетом непрерывного движения транспортных средств в течение года 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 дорожных покрытий нежесткого типа рассчитаны, в основном, на их применение при положительных температурах окружающего воздуха. Однако на практике возникает необходимость проводить ремонтные работы при отрицательных температурах воздуха с обеспечением требуемого качества работ. 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.

5.1. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ НА ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ПОКРЫТИЯХ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Безопасность дорожного движения транспортных средств в течение всего периода эксплуатации автомобильных дорог, независимо от погодных условий, обеспечивается за счет достижения требуемых нормативных транспортно-эксплуатационных показателей дороги в процессе ее строительства и содержания. Жизненный цикл автомобильной дороги зависит от многих факторов, к которым можно отне-

сти этапы, связанные как с проектной документацией, так и процессами строительства и эксплуатации во времени.

При разработке проектной документации, с учетом данных прогноза эксплуатации дороги на установленный срок, в соответствии с расчетной осевой нагрузкой от транспортных средств и интенсивности движения, принимаются конструктивные решения дорожной одежды. Обеспечение требуемых транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог достигается в процессе строительства и зависит от качества применяемого материала, технологии строительства и параметров механизированного звена машин. При эксплуатации автомобильной дороги расчетные данные, принятые на стадии проектирования, не всегда соответствуют реальным значениям, что влияет на состояние дороги и требует в процессе ее эксплуатации дополнительных расходов на приведение в состояние, соответствующее нормативным требованиям [34]. В процессе эксплуатации на дорожных покрытиях возникают деформации и разрушения, что проявляется в виде различных выбоин, просадок, трещин и волн, что ухудшает транспортно-эксплуатационные показатели и снижает срок эксплуатации автомобильной дороги. Образование дефектов на поверхности дорожного покрытия нежесткого типа возможно также за счет нарушения технологий при устройстве земляного полотна и дорожных одежд. С целью 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.

Для устранения образовавшихся дефектов на поверхности дорожного покрытия в процессе эксплуатации дороги в настоящий момент применяются разные технологии, зависящие как от времени проведения работ, так и применяемого материала. 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. Этот метод применяется, в основном, на дорогах первой и второй категорий. Производство работ в соответствии с действующей нормативной документацией должно производиться при температуре окружающего воздуха не ниже $+5^{\circ}\text{C}$, поверхность выбоины должна быть сухой, за исключением применения в качестве

вяжущего материала битумных эмульсий или на их основе других применяемых материалов. Однако на практике приходится выполнять работы по ямочному ремонту покрытия и при других погодных условиях (срочный аварийный ремонт). Установлено, что ямочный ремонт, выполненный с нарушениями технологии, снижает срок службы отремонтированной поверхности дорожного покрытия в 2 – 4 раза.

Качество ремонтных работ по устранению выбоин и просадок на покрытиях нежесткого типа с применением горячих асфальтобетонных смесей зависит от качества подготовки места для укладки горячей смеси, обеспечения температурных режимов смеси при укладке и уплотнении горячей смеси и достижения требуемых показателей асфальтобетона в месте заделки выбоины. 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 горячих смесей при производстве ремонта покрытий и предъявляют повышенные требования к укладке и уплотнению горячих асфальтобетонных смесей. Поэтому все технологические режимы и параметры механизированного звена машин должны быть взаимосвязаны между собой.

5.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ГОРЯЧЕЙ СМЕСИ ПРИ УКЛАДКЕ В ВЫБОИНУ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Действующими нормативными документами производство работ с горячей асфальтобетонной смесью зависит от температуры окружающего воздуха и их выполнение допускается при температуре воздуха весной и летом не ниже +5 °С и осенью +10 °С [36]. С учетом особенностей эксплуатации автомобильных дорог и обеспечения безопасности движения транспортных средств рекомендациями допускается, при соблюдении особых условий, производство работ с горячей смесью при температуре воздуха до –10 °С [7]. Такое условие на производство работ объясняется значительным влиянием температуры воздуха на температурные режимы горячей смеси, от которых зависит качество работ по устройству и ремонту дорожных покрытий нежесткого типа в процессе эксплуатации автомобильной дороги. В главе 3 показано, что интенсивность охлаждения горячей асфальтобетонной смеси зависит от температуры воздуха, и в отличие от устройства дорожного покрытия, производство ремонтных работ имеет некоторые

особенности, влияющие на качество работы по устранению выбоин на поверхности покрытия. При производстве работ по устранению выбоины на поверхности дорожного покрытия, после проведения подготовительных работ, горячая асфальтобетонная смесь укладывается и распределяется по объему выбоины. Установлено, что после укладки смеси, одновременно с общим процессом охлаждения горячей смеси, происходит интенсивное охлаждение небольших объемов горячей смеси по периметру выбоины. 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, особенно в зоне контакта горячей смеси с боковой поверхностью выбоины. Это способствует повышению темпа охлаждения горячей смеси в пограничной зоне горячей смеси, 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.

На рисунке 5.1 представлено распределение температуры смеси по длине выбоины и в табл. 5.1 представлены 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 данных на рисунке и в таблице видно, что распределение температуры горячей смеси симметрично относительно центра выбоины, ширина зоны пониженной температуры смеси зависит от температуры воздуха и зона понижения температуры горячей смеси наблюдается даже при температуре окружающего воздуха до +40 °С.

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 59 | 93 | 101 | 102 | 102 | 102 | 102 | 101 | 93 | 59 |
| 1,5 | 4,5 | 7,5 | 10,5 | 13,5 | 16,5 | 19,5 | 22,5 | 25,5 | 28,5 |

Рис. 5.1. Распределение температуры асфальтобетона по длине выбоины

5.1. Влияние температуры воздуха на ширину зоны смеси с пониженной температурой

| Температура воздуха, °С | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ширина зоны асфальтобетона с пониженной температурой, см | 3,5 | 3,2 | 3,1 | 3,0 | 2,2 | 1,5 | 1,4 | 0,5 |

Это можно объяснить тем, что при укладке смеси с высокой температурой, за счет разницы температуры покрытия и горячей смеси, в зоне контакта происходит интенсивная передача тепла от горячей смеси материалу покрытия с более низкой температурой, что способствует понижению температуры смеси в зоне контакта. На основании представленных данных можно сделать вывод, что при укладке горячей асфальтобетонной смеси в выбоину по ее периметру возникает зона материала с пониженной температурой, которая не позволяет достичь требуемого коэффициента уплотнения асфальтобетона по всей поверхности выбоины или просадки покрытия. На рисунке 5.2 представлены размеры зоны с пониженной температурой смеси в выбоине при температуре воздуха $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре горячей смеси при укладке $119\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С целью уточнения данного вывода были взяты образцы асфальтобетона при производстве ямочного ремонта в Тамбове, выполненного при температуре окружающего воздуха $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты испытания образцов показали, что если в центре выбоины коэффициент уплотнения асфальтобетона равен 0,99, то в зоне пониженной температуры смеси равен 0,98.

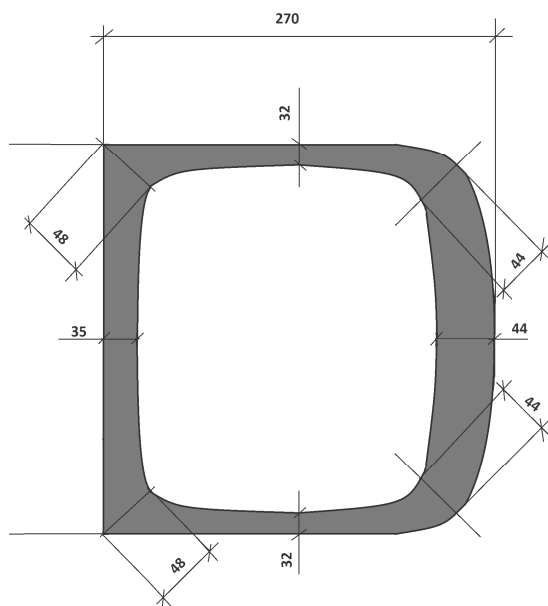


Рис. 5.2. Зона пониженной температуры смеси по периметру выбоины

В таблице 5.2 представлены результаты измерения ширины зоны с пониженной температурой асфальтобетонной смеси ниже 80 °С, уложенной при температуре 150 °С, что соответствует температурным режимам укладки и уплотнения горячей смеси типа В с битумом марки БНД 90/130. Из представленных в таблице 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 и особенно при низких температурах окружающего воздуха необходим постоянный контроль за температурой горячей смеси при ее укладке в выбоину. На основании полученных данных можно сделать вывод, что в зависимости от типа смеси и марки битума, с учетом температуры воздуха, имеется определенная температурная граница, ниже которой применение горячей смеси не допускается.

5.2. Влияние температуры воздуха на ширину зоны с температурой горячего асфальтобетона ниже допустимой с учетом влияния температуры смеси при укладке

| Температура смеси, °С | Температура воздуха, °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 | | | | | | | |

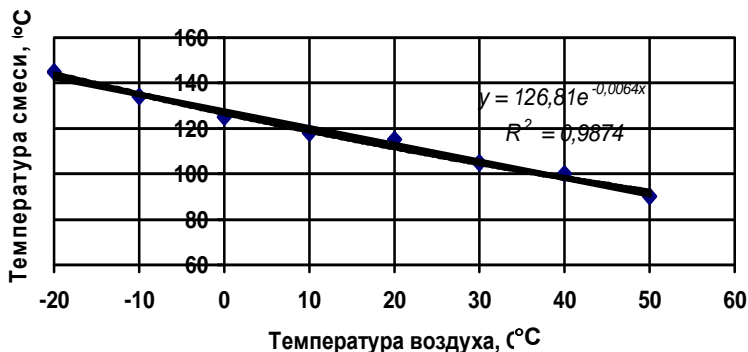


Рис. 5.3. Влияние температуры воздуха на температуру смеси, ниже которой эффективного уплотнения не обеспечивается (тип смеси А, битум марки БНД 90/130, скорость ветра – 0 м/с, температура окончания работ – 80 °С)

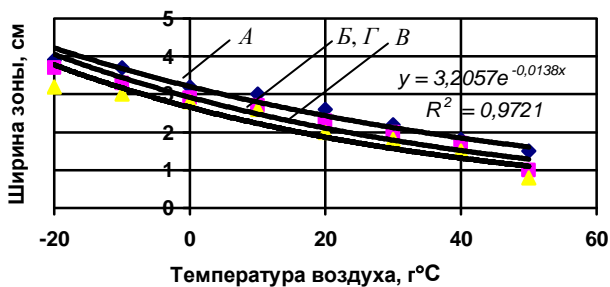
Для горячей смеси типа В с битумом марки БНД 90/130 такой граничной температурой, при температуре воздуха от –20 до 0 °С, является температура смеси 90 °С. Применение горячей смеси с такой температурой при положительной температуре окружающего воздуха способствует образованию зоны материала выбоины с пониженными эксплуатационными параметрами асфальтобетона в выбоине. На рисунке 5.3 представлена зависимость минимального значения температуры асфальтобетонной смеси с учетом температуры окружающего воздуха, ниже которой применение смеси не допускается.

Существующими нормативными документами допускается для приготовления горячей асфальтобетонной смеси использовать, в зависимости от климатической зоны района строительства дорожных покрытий, разные марки битумов [36, 37]. Установлено, что асфальтобетонные смеси, приготовленные на битумах разных марок, имеют разные температурные режимы приготовления, укладки и окончания процесса эффективного уплотнения [10, 17, 21]. Данный фактор практически не учитывается при производстве ремонтных работ с применением горячих асфальтобетонных смесей. С учетом этого установлено влияние температуры воздуха и марки битума на ширину зоны пониженных температур горячей смеси выбоины при производстве ремонтных работ покрытий нежесткого типа для разных типов смеси с учетом применяемых марок битума. Численные значения ширины зоны материала с пониженной температурой смеси представлены в табл. 5.3.

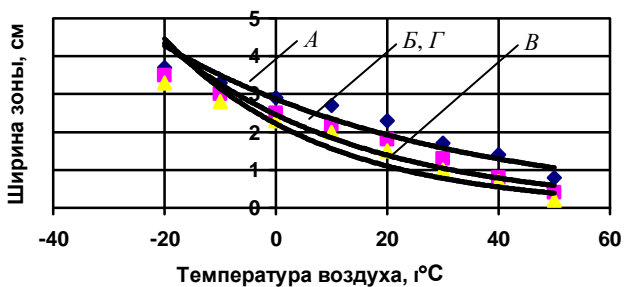
5.3. Влияние температуры воздуха и марки битума на ширину зоны пониженной температуры выбоины

| Марка битума | Температура воздуха, °С | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -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 |
| БНД130/200 | 3,1 | 3,0 | 2,6 | 2,3 | 1,3 | 1,0 | 0,5 | 0 |
| БНД200/300 | 2,7 | 2,2 | 1,5 | 1,3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <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 |
| БНД130/200 | 1,8 | 1,7 | 1,5 | 0,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| БНД200/300 | 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 |

марка битума БНД 40/60



марка битума БНД 60/90



марка битума БНД 90/130

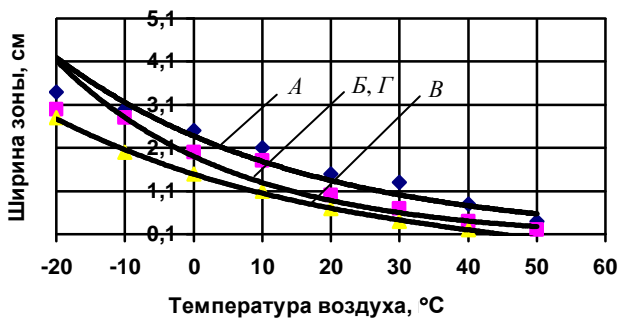


Рис. 5.4. Зависимость ширины зоны материала с пониженной температурой асфальтобетона для разных типов смеси с учетом марки битума

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. Ранее отмечалось, что темп охлаждения горячей смеси зависит также от процентного содержания щебня, который определяется типом смеси. На рисунке 5.4 представлены зависимости ширины зоны материала с пониженной температурой асфальтобетона для разных марок битума в зависимости от типа смеси.

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 0...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.

5.3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СМЕСИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ В ВЫБОИНЕ

Действующими нормативными документами и существующими рекомендациями на производство работ с применением горячих асфальтобетонных смесей за основу, при выборе технологических параметров процессов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, принята температура с учетом типа смеси. Температура смеси при отгрузке потребителю зависит от марки битума и регламентирована ГОСТ 9128–2009. Технологические режимы горячих смесей зависят от марки битума и различаются режимами укладки и уплотнения для одного и того же типа смеси [17, 21]. В таблице 5.4 представлены рекомендуемые температурные режимы уплотнения асфальтобетона разных типов в зависимости от марки битума.

Соблюдение температурных режимов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей позволяет обеспечить требуемые показатели качества работы при устройстве и ремонте дорожных покрытий нежесткого типа, зависящие также от продолжительности работы уплотняющих машин.

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

5.4. Рекомендуемые температурные режимы уплотнения плотного асфальтобетона разных типов в зависимости от марки битума

| Марка битума | Температура укладки, °С | Температура окончания уплотнения горячих смесей | | | | |
|--------------|-------------------------|---|----------|---------|----------|---------|
| | | 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 | 60...55 | 55...50 | 50...45 | 55...50 | 50...45 |

5.5. Время нахождения горячей смеси при укладке в выбоину

| Температура воздуха, °С | -20 | -10 | 0 | +10 | +20 | +30 | +40 | +50 |
|-------------------------|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| Время, мин | 12,0 | 12,5 | 13,0 | 15 | 16 | 17,5 | 20 | 22 |

смеси и незначительным временем нахождения смеси в заданном температурном интервале. В таблице 5.5 представлены данные по времени нахождения горячей асфальтобетонной смеси в интервале температур 150...90 °С для смеси типа Б с битумом марки БНД 60/90.

Из представленных данных видно, что в отличие от процесса уст-ройства дорожного покрытия из горячих асфальтобетонных смесей, когда смесь находится в заданных температурных интервалах до 50...60 мин, 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 12...22 мин. Объясняется это тем, что температурные режимы уложенной горячей смеси в выбоину покрытия соответствуют нестационарным процессам, происходящим на стадии укладки горячей смеси 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. 5.6. При расчете приняты следующие исходные данные: смесь типа Б, битум марки БНД60/90, толщина слоя смеси 0,05 м, скорость ветра 0 м/с, нижняя температурная граница уплотнения смеси 85 °С, температура основания равна температуре воздуха.

5.6. Влияние температуры смеси на ширину зоны асфальтобетона с пониженной температурой смеси

| Показатели | 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 |
| <i>Температура воздуха –10 °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 0 °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 | |

Продолжение табл. 5.6

| Показатели | Температура смеси, °С | | | | | | |
|--|-----------------------|------|------|------|------|----------|----------|
| | 150 | 140 | 130 | 120 | 110 | 100 | 90 |
| <i>Температура воздуха +10 °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 | |
| <i>Температура воздуха +20 °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 | |
| <i>Температура воздуха +30 °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 | |

Из представленных в таблицах данных видно, что независимо от температуры воздуха и смеси при ее укладке в выбоину на границе покрытия и свежееуложенной 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, за счет интенсивной передачи тепла от смеси боковым поверхностям выбоины, происходит их нагрев за счет отдачи тепла от горячей смеси. При понижении разницы тем-

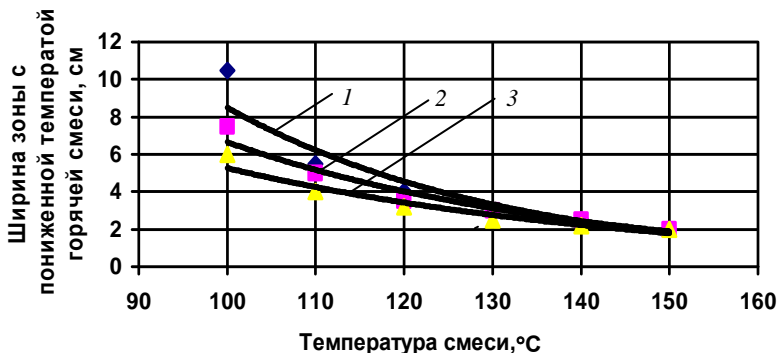


Рис. 5.5. Зависимость ширины зоны с пониженной температурой от температуры укладываемой смеси:

тип смеси Б, битум марки БНД 60/90, толщина слоя 0,05 м;

1 – при температуре воздуха –10 °C; 2 – при температуре воздуха 0 °C;

3 – при температуре воздуха +10 °C

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 5.5 представлена зависимость изменения ширины зоны с пониженной температурой от температуры укладываемой смеси.

Из представленных данных в табл. 5.7 и на рис. 5.5 видно, что при укладке горячих смесей с пониженными температурами, что очень часто наблюдается при производстве 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. 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 укладки и уплотнения горячей асфальтобетон смеси и способствует некачественной работе (табл. 5.7).

Из представленных данных таблицы можно сделать следующие выводы:

- 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.

5.7. 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 |
| 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 |

Данные табл. 5.6 представлены на рис. 5.6 – 5.10.

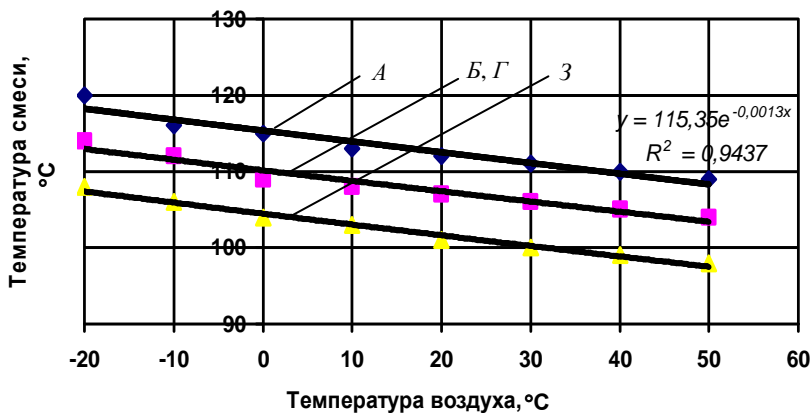


Рис. 5.6. Зависимость минимальной температуры смеси при укладке в выбоину, ниже которой весь объем уложенной смеси имеет температуру ниже рекомендованной. Битум марки БНД 40/60

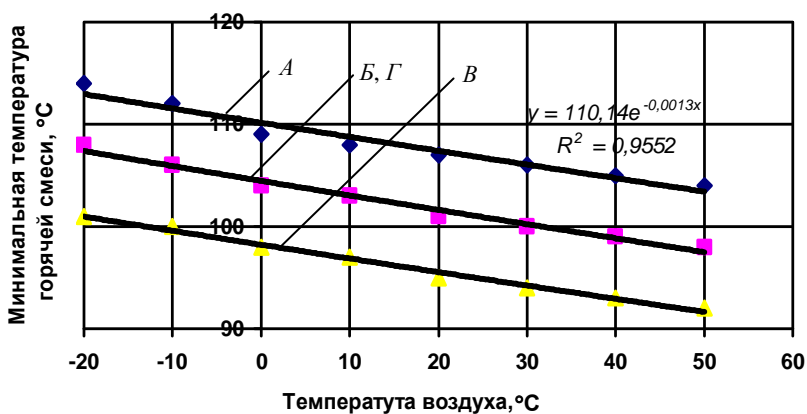


Рис. 5.7. Зависимость температуры асфальтобетонной смеси, ниже которых качество ремонтных работ не достигается. Битум марки БНД 60/90, температура смеси при укладке 150 °C

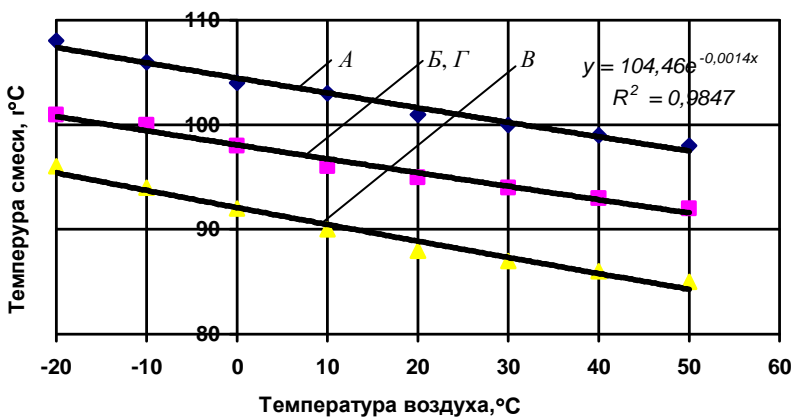


Рис. 5.8. Зависимость температуры асфальтобетонной смеси, ниже которых качество ремонтных работ не достигается.
Битум марки БНД 90/130,
температура смеси при укладке 150 °C

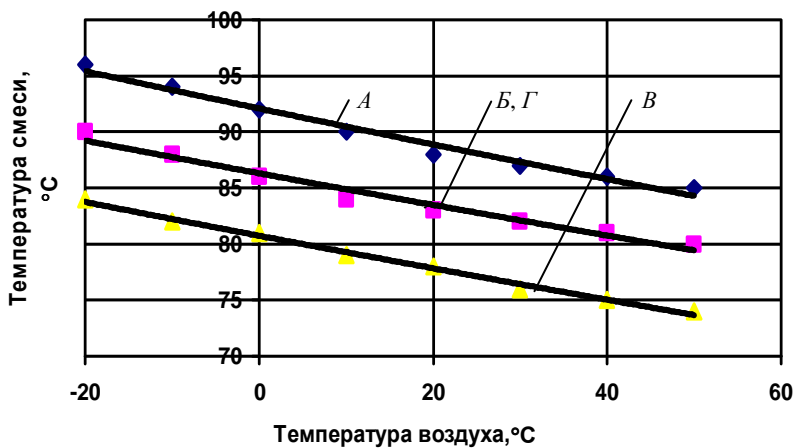


Рис. 5.9. Зависимость температуры асфальтобетонной смеси, ниже которых качество ремонтных работ не достигается.
Битум марки БНД 130/200,
температура смеси при укладке 140 °C

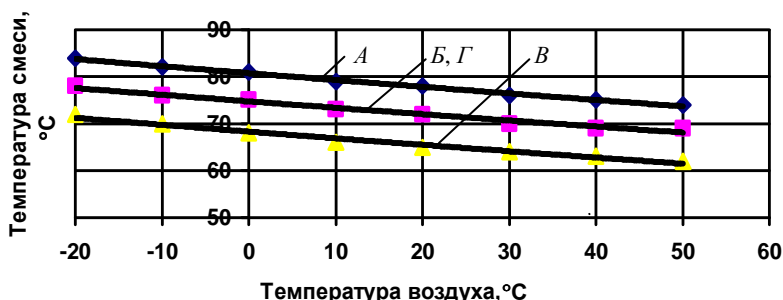


Рис. 5.10. Зависимость температуры горячей асфальтобетонной смеси, ниже которых качество ремонтных работ не достигается. Битум марки БНД 200/300, температура смеси при укладке 130 °С

5.4. 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 существуют ограничения на производство работ с горячими асфальтобетонными смесями в зависимости от скорости ветра [7]. При понижении температуры воздуха существующими рекомендациями разрешается укладывать горячую асфальтобетонную смесь на подготовленное основание при условии, что скорость ветра не превышает пределов, указанных в табл. 5.8. Ограничение производства работ, в зависимости от скорости ветра, связано с интенсивной отдачей тепла в окружающую среду при распределении горячей смеси небольшим слоем на значительной поверхности покрытия, что способствует повышению темпа охлаждения горячей смеси и снижению продолжительности устройства покрытия.

5.8. Допускаемая предельная скорость ветра при укладке горячей смеси при пониженных температурах окружающего воздуха

| Температура воздуха, °C | от +10 до 0 °C | от 0 до -5 °C | от -5 до -10 °C |
|-------------------------|----------------|---------------|-----------------|
| Скорость ветра, м/с | 7 | 5 | 3 |

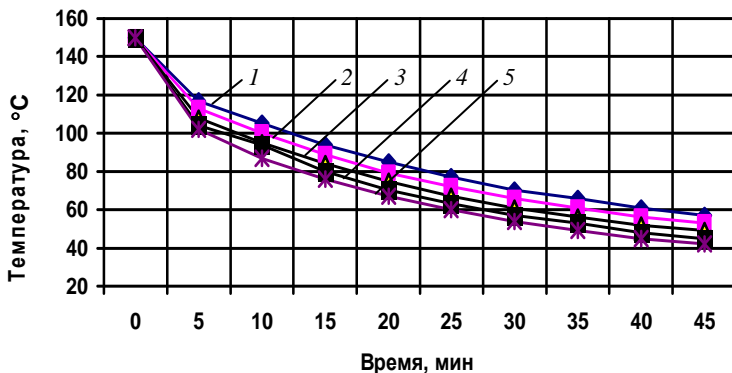


Рис. 5.11. Зависимость изменения температуры горячей смеси во времени:
 1 – 5 – соответственно скорости ветра 0, 2, 4, 6, 8 м/с;
 температура воздуха +10 °С; смеси – 150; окончания – 80 °С; глубина – 1 см

При производстве ремонтных работ дорожных покрытий нежесткого типа ввиду небольших объемов укладываемых горячих асфальтобетонных смесей, скорость ветра также оказывает влияние на темп охлаждения горячей смеси (рис. 5.11).

Численное значение температуры горячей смеси в зависимости от ее температуры при укладке, с учетом влияния скорости ветра, представлено в табл. 5.9. Температура горячей смеси определялась через 5 мин после ее укладки при толщине слоя 0,05 м на глубине 1/3 от толщины слоя смеси.

5.9. Влияние скорости ветра с учетом температуры воздуха на температуру горячей смеси

| Температура при укладке, °С | Скорость, м/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 |

Продолжение табл. 5.9

| Температура при укладке, °С | Скорость, м/с | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| <i>Температура воздуха –10 °С</i> | | | | | |
| 160 | 137 | 136 | 133 | 131 | 128 |
| 140 | 120 | 119 | 117 | 114 | 112 |
| 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 |

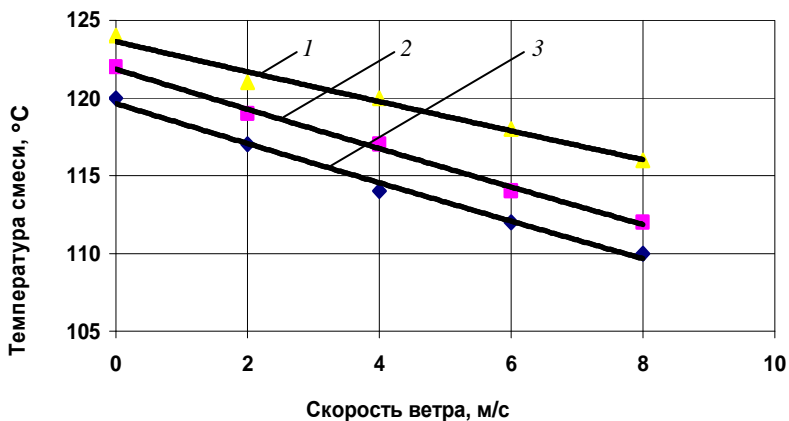


Рис. 5.12. Влияние скорости ветра на температуру горячей смеси:
 температура смеси при укладке 140 °С; толщина слоя 0,05 м;
 измерение температуры на глубине 0,015 м от поверхности слоя;
 температура воздуха: 1 – +10 °С; 2 – –10 °С; 3 – –20 °С

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что независимо от температуры окружающего воздуха и температурой смеси при ее распределении существует зависимость скорости охлаждения горячей смеси от перемещения воздушных масс.

На рисунке 5.12 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 ввиду одиночного их расположения предусматривается ее уплотнение сразу после распределения горячей смеси. 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 5...10 мин, в зависимости от объема уложенного материала.

На основании полученных данных можно сделать выводы, что независимо от температуры воздуха и температуры смеси при укладке горячей смеси скорость ветра влияет на общий характер охлаждения смеси, который подчиняется экспоненциальной зависимости. Величи-

ной, характеризующей процесс охлаждения, независимо от свойств и толщины слоя горячей смеси, является темп охлаждения. С учетом зависимости (табл. 5.10) можно утверждать, что между темпом охлаждения горячей смеси и скоростью ветра существует прямая связь, что подтверждается экспериментальными данными других авторов [12].

Используя данные, представленные в табл. 5.9, установлено распределение температуры горячей смеси по поверхности выбоины на глубине 0,01м от поверхности уложенной горячей смеси с учетом температуры воздуха, которое представлено в табл. 5.10.

5.10. 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. 5.9 данных видно, что ширина зоны материала с пониженной температурой зависит от скорости ветра. В таблице 5.11 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. На рисунке 5.13 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, не позволяющей достичь требуемых эксплуатационных параметров асфальтобетона в выбоине.

5.11. 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 |

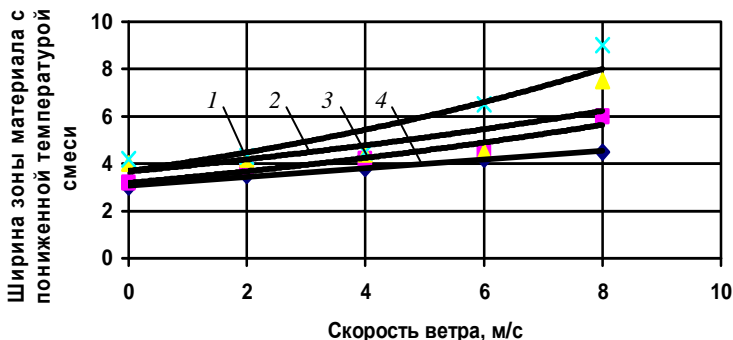


Рис. 5.13. Зависимость ширины зоны материала с пониженной температурой от скорости ветра при разных температурах воздуха:
 температура смеси при укладке –150 °С;
 температура смеси при окончании работы – 80 °С;
 температура воздуха: 1 – –10 °С; 2 – –5 °С; 3 – 0 °С; 4 – +10 °С

Используя рекомендации 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 [11, 17, 21]. Результаты расчетов представлены в табл. 5.12.

5.12. 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 |

| Марка битума | Температура воздуха, °С | | | |
|--------------------|-------------------------|---|----|-----|
| | +10 | 0 | -5 | -10 |
| <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 |

5.5. 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 Б.И. Ладыгина, Н.В. Горелышева, А.Ф. Зубкова [10, 17, 24]. В данных работах влияние нагрева основания на технологию устройства дорожного покрытия учитывается за счет введения коэффициента влияния темпера-

туры основания на процесс охлаждения горячих смесей. При расчете длины укладки горячей смеси асфальтоукладчиком Б.И. Ладыгин и Н.В. Горельшев учитывают влияние температуры основания за счет введения коэффициента, зависящего от температуры окружающего воздуха. В работах А.Ф. Зубкова обоснована зависимость коэффициента влияния температуры основания на продолжительность охлаждения горячей асфальтобетонной смеси в зависимости от разницы температуры основания и воздуха и получена зависимость, позволяющая учитывать температуру нагрева основания на технологические процессы устройства дорожного покрытия [17]. 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 °С температура основания нагревается до температуры 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 [17]. Однако такой способ повышения температуры основания приводит к общему понижению температуры укладываемой горячей асфальтобетонной смеси, а следовательно, не обеспечивает соблюдения температурных режимов смеси при уплотнении и способствует снижению качества ремонтных работ.

В условиях пониженных температур окружающего воздуха при устройстве дорожных покрытий нежесткого типа допускается укладывать верхний слой на свежееуложенный нижний слой при его температуре 20...40 °С и температуре воздуха ниже +10 °С [7]. 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...40 °С, при температуре окружающего воздуха – 10 °С, способствует увеличению продолжительности устройства покрытия в интервале температур смеси 160...60 °С на 25...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, при-

меняемые при устройстве асфальтобетонных покрытий, не соответствуют технологии ремонтных работ.

Применяемый на практике метод прогрева основания выбоины научно не обоснован. Использование открытого пламени 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 необходимо уточнить влияние температуры основания на процесс охлаждения слоя и получить численное значение температуры нагрева поверхностей выбоины или просадки для качественного ремонта покрытия в зависимости от конкретных условий производства работ с учетом свойств применяемого материала.

На рисунке 5.14 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, равной нулю, и разных температурах основания.

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 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 |

а)

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 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 |

б)

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 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 |

в)

Рис. 5.14. Влияние температуры основания на распределение температуры по горизонтальной поверхности выбоины:
температура основания: а – –10 °С; б – 0 °С; в – +10 °С

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 5.13 представлены значения ширины зоны материала с температурой смеси, ниже допустимой и продолжительность охлаждения слоя смеси в выбоине в зависимости от температуры основания.

5.13. 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 |

Температура смеси 130 °С

| | | | | | |
|--|------|-----|-----|-----|---|
| 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 | | |

| | Температура основания, °С | | | | |
|--|---------------------------|---|----|----|----|
| | –10 | 0 | 10 | 30 | 45 |

Температура смеси 140 °С

| | | | | | |
|--|-----|-----|-----|------|---|
| 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 | |

| | Температура основания, °С | | | | |
|--|---------------------------|---|----|----|----|
| | –10 | 0 | 10 | 30 | 35 |

Температура смеси 150 °С

| | | | | | |
|--|-----|-----|------|-----|----|
| 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 |

Продолжение табл. 5.13

| | 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 | 15 | | 12 | 15 | 17,5 | 20 | | |
| | Температура основания, °С | | | | | | | |
| | -10 | 0 | 10 | 30 | 50 | 70 | 80 | |
| <i>Температура смеси 100 °С</i> | | | | | | | | |
| Ширина зоны пониженной температуры, см | 6 | 5,2 | 4,5 | 4,0 | | 1,5 | 0 | |
| Время охлаждения смеси до минимального значения, мин | 6 | 7 | 7,2 | 7,5 | | 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 | |

На основании данных, представленных в табл. 5.13, установлена связь между шириной зоны асфальтобетона с пониженной температурой от температуры поверхности выбоины, которая представлена на рис. 5.15.

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 5.16 представлено распределение температуры в асфальтобетоне при нагреве боковых поверхностей выбоины до 80 °С при температуре горячей смеси при укладке 80 °С.

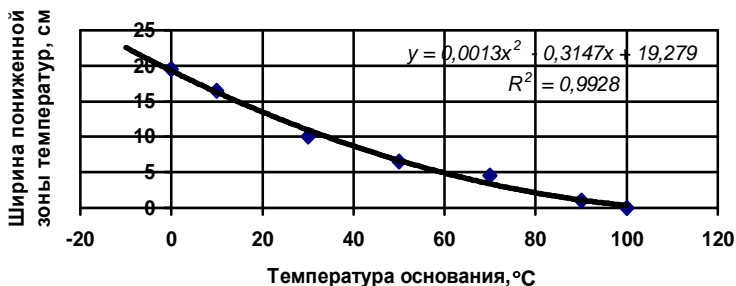


Рис. 5.15. Влияние температуры нагрева основания
 (асфальтобетон типа В, битум марки БНД 90/130, температура смеси при укладке – 120 °С; температура воздуха – 0 °С; скорость ветра – 0 м/с)

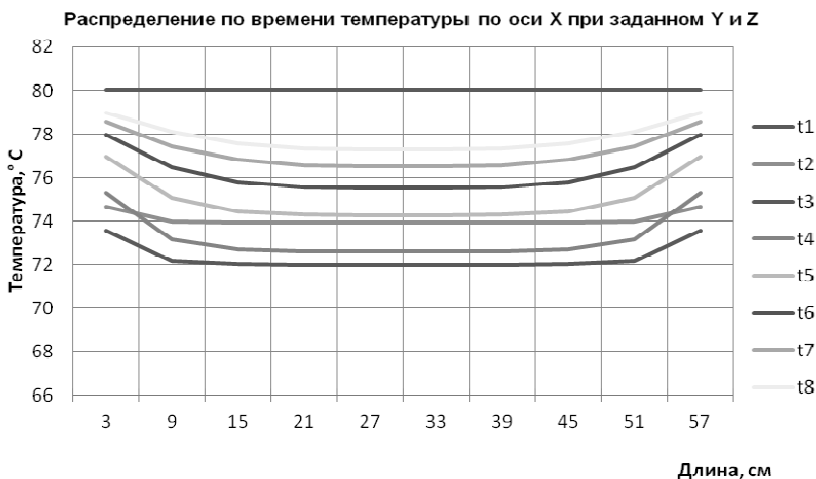


Рис. 5.16. Влияние температуры нагрева основания на температуру горячей смеси (при отсутствии зоны)
 (температура воздуха –10 °С, толщина слоя 5 см, температура основания –10 °С, скорость ветра 0 м/с, температура окончания –80 °С)

По результатам моделирования тепловых процессов при укладке в выбоину дорожного покрытия горячих асфальтобетонных смесей установлено, что температура нагрева поверхности выбоины, для ис-

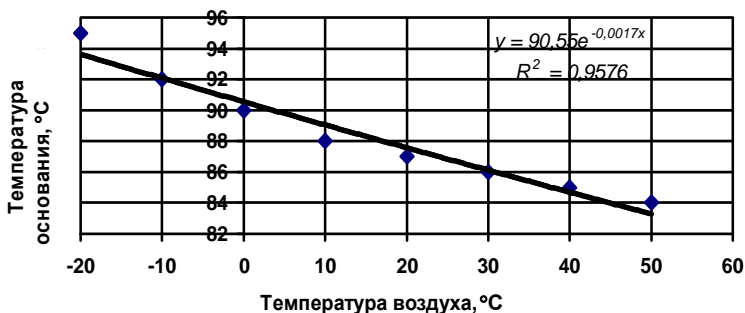


Рис. 5.17. Зависимость температуры нагрева основания от температуры воздуха

ключения образования в выбоине асфальтобетона с пониженными температурами, зависит от температуры воздуха и температуры смеси при доставке к месту производства работ. На рисунке 5.17 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 °C, толщина слоя 5 см, температура основания – 10 °C, 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, позволяющие производить качественный ремонт покрытия при условии обеспечения доставки заданной температуры горячей асфальтобетонной смеси 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 в течение определенного периода времени остается постоянной, то температура горячей асфальтобетонной смеси со временем меняется. По результатам исследований установлена зависимость между температурой горячей асфальтобетонной смеси и температурой нагрева поверхности выбоины, исключающей образование объемов материала в выбоине с пониженной температурой горячей смеси, которая представлена на рис. 5.18. Из представленной зависимости видно, что с понижением температуры горячей смеси необходимо увеличивать температуру нагрева поверхности выбоины.

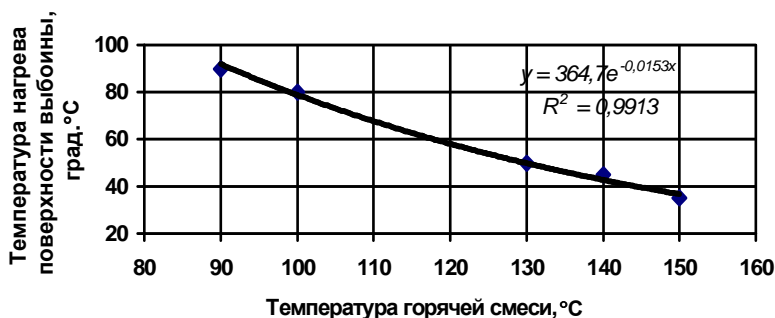


Рис. 5.18. Зависимость температуры нагрева основания от температуры укладки горячей смеси

Исследованиями установлено, что для устранения образования объема горячей смеси с пониженной температурой при производстве ремонта выбоин на дорожном покрытии и обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении горячих смесей, для каждого типа смеси и марки битума имеется связь между температурой горячей смеси при доставке к месту производства работ, температурой окружающего воздуха и температурой поверхности выбоины. На рисунке 5.19 представлены зависимости между температурой воздуха, поставляемой горячей смесью к месту производства работ и температурой нагрева поверхности выбоины для тип смеси типа Б, приготовленной на битуме марки БНД 90/130.

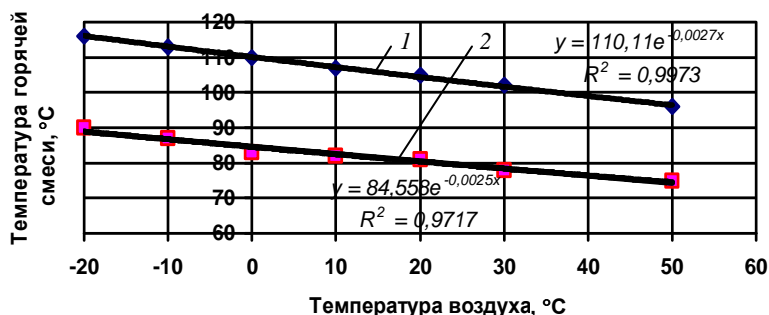


Рис. 5.19. Зависимости между температурой воздуха, температурой смеси к месту производства ремонтных работ и температурой нагрева поверхности выбоины для смеси типа Б на битуме марки БНД 90/130:

- 1 – минимальная температура смеси при укладке в выбоину;
- 2 – температура основания при соответствующей температуре воздуха

На основании полученных результатов можно сделать выводы:

- уменьшение температуры горячей смеси при доставке к месту производства ремонтных работ способствует росту объема асфальтобетона выбоины в зоне контакта с покрытием 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 укладкой горячей смеси обеспечивает температурные режимы горячей смеси при производстве ремонтных работ даже при условии доставки смесей с температурой, ниже минимально допустимой;
- нагрев боковых поверхностей выбоины позволяет уменьшить зону асфальтобетона с пониженной температурой при одновременном увеличении продолжительности работ по ремонту выбоин с обеспечением температурных режимов горячей смеси.

5.6. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ВЫБОИН ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Существующими нормативными документами, в зависимости от дорожно-климатической зоны расположения автомобильной дороги и ее категории, для слоев дорожного покрытия нежесткого типа рекомендуются асфальтобетоны определенных типов и марок битумов [37].

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 укладывать крупнозернистые асфальтобетонные смеси. Для обеспечения безопасности движения транспортных средств в верхние слои покрытия укладывают смеси типов А, Б или Г. Минимальная толщина верхнего слоя покрытия, в зависимости от категории дороги, составляет для скоростных и магистральных дорог первой и второй категории 0,05 м и для дорог третьей и четвертой категории 0,03 м. Для обеспечения одинаковых физико-механических и теплофизических параметров покрытия, при производстве ремонтных работ дорожных покрытий необходимо, чтобы применяемый материал для устранения дефектов покрытия, по своей структуре и свойствам соответствовал материалу дорожного покры-

**5.14. Рекомендуемые температурные режимы уплотнения
плотного асфальтобетона разных типов
в зависимости от марки битума [10, 15, 21]**

| Марка битума | Температура укладки, °С | Температура окончания уплотнения горячих смесей, °С | | | | |
|--------------|-------------------------|---|----------|---------|----------|---------|
| | | 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 | 60...55 | 55...50 | 50...45 | 55...50 | 50...45 |

тия. Установлено, что каждая марка битума горячей асфальтобетонной смеси имеет эффективные температурные режимы укладки и уплотнения, при которых обеспечиваются требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетона (табл. 5.14).

Соблюдение температурных режимов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей позволяет обеспечить требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетона при устройстве и ремонте дорожных покрытий нежесткого типа, зависящие также от параметров уплотняющих машин и продолжительности их работы. 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. 5.15).

С учетом температурных режимов горячей смеси установлены граничные значения температуры горячей смеси, при укладке которых весь объем укладываемого материала горячей смеси не соответствует температурным режимам укладываемого материала (табл. 5.16).

**5.15. 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 |
| 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 |

**5.16. 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 |
| 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 следующие выводы:

– 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 табл. 5.16, в зависимости от марки битума, представлены на рис. 5.20 – 5.25.

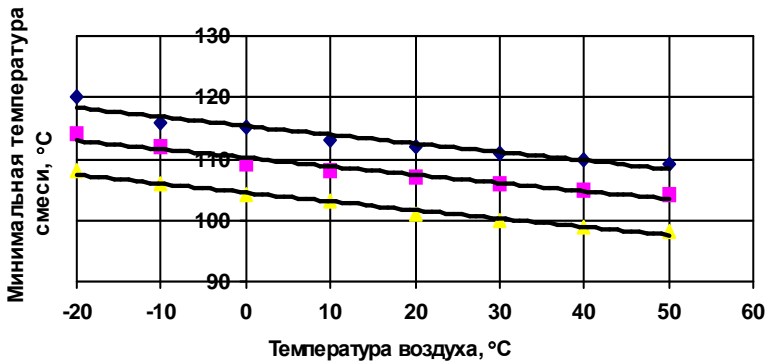


Рис. 5.20. Зависимость минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси от температуры воздуха для горячих смесей с битумом марки 40/60. А, Б, В – тип смеси

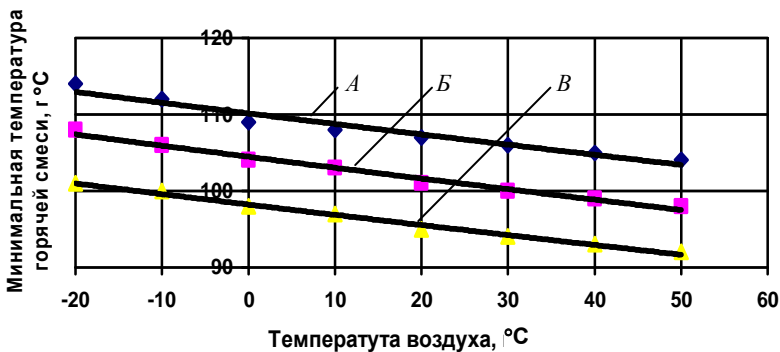


Рис. 5.21. Зависимость минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси от температуры воздуха для горячих смесей с битумом марки 60/90. А, Б, В – тип смеси

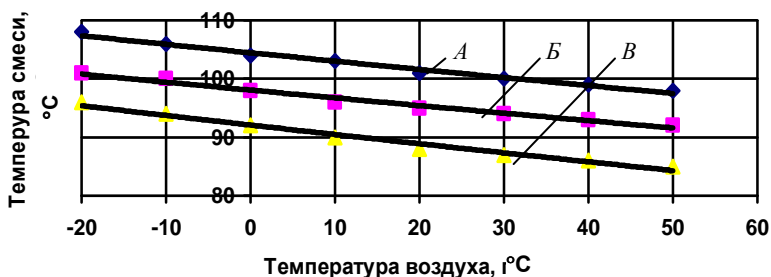


Рис. 5.22. Зависимость минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси от температуры воздуха для горячих смесей с битумом марки 90/130. А, Б, В – тип смеси

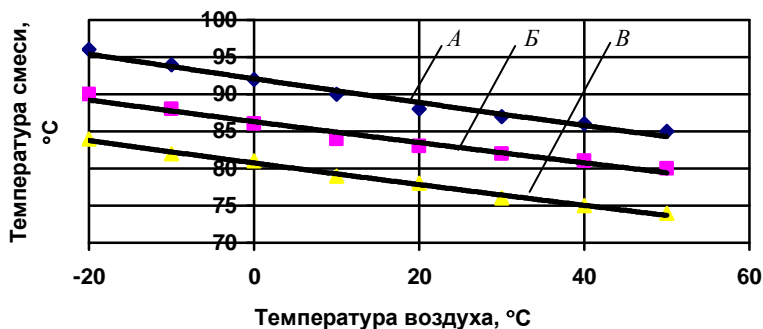


Рис. 5.23. Зависимость минимальной температуры горячей смеси от температуры воздуха для горячих смесей с битумом марки 130/200. А, Б, В – тип смеси

Установлено, что при укладке горячей асфальтобетонной смеси в выбоину, при температуре смеси выше минимальной, в зависимости от разности температур смеси и основания, за счет передачи тепла горячей смесью боковой поверхности выбоины, на границе покрытия и свежеложенной смеси образуется некоторый объем материала с пониженной температурой, что способствует образованию по периметру выбоины объема асфальтобетона с пониженными эксплуатационными параметрами. Зависимость ширины зоны материала с пониженной температурой смеси, ниже минимально предельной температурой смеси, для конкретного типа смеси и марки битума представлена на рис. 5.24.

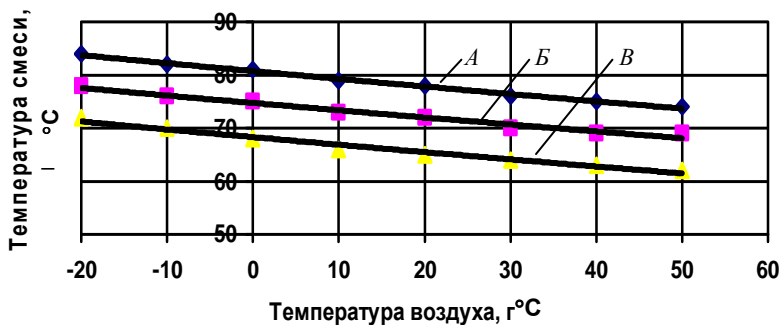
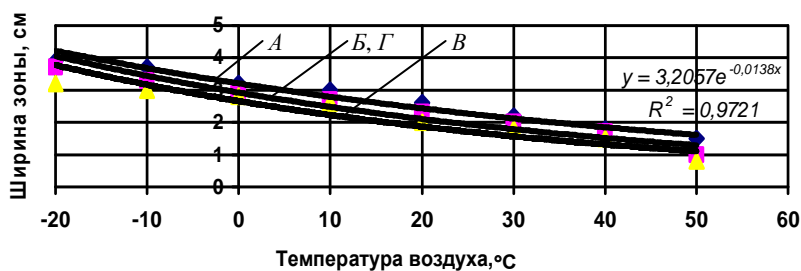
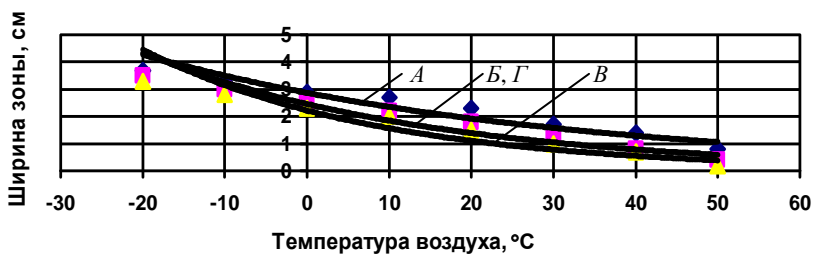


Рис. 5.24. Зависимость минимальной температуры горячей смеси от температуры воздуха для горячих смесей с битумом марки 200/300. А, Б, В – тип смеси



а)

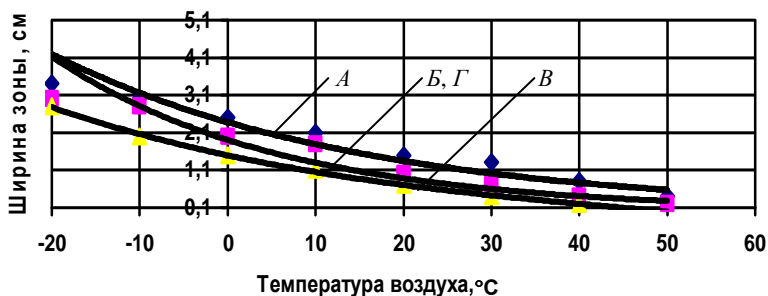


б)

Рис. 5.25. Зависимость ширины зоны материала с пониженной температурой смеси, ниже минимально предельной температурой смеси, для конкретного типа смеси и марки битума:

а – марка битума БНД 40/60; б – марка битума БНД 60/90;

в – марка битума БНД 90/130



в)

Рис. 5.25. Окончание

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 0...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.

При работе с горячими асфальтобетонными смесями температурные режимы и продолжительность выполнения работ зависят от скорости ветра. В соответствии с рекомендациями, 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. 5.17. 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.

5.17. Допускаемая предельная скорость ветра при укладке горячей смеси при пониженных температурах окружающего воздуха [7]

| Температура воздуха, °C | от + 10 до 0 | От 0 до -5 | От -5 до -10 |
|-------------------------|--------------|------------|--------------|
| Скорость ветра, м/с | 7 | 5 | 3 |

**5.18. 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 | 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 |
| <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 |

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 5.18 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 в выбоину.

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 горячей 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. 5.19.

5.19. Зависимость нагрева поверхности выбоины от температуры смеси и воздуха

| Тип смеси | Марка битума | Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания | Допустимая продолжительность работ, мин |
|-----------|--------------|---|---|
| А | 40/60 | $t_{\text{осн}} = 361,43e^{-0,0113 t_{\text{см}} - 0,0024 t_{\text{возд}}}$ | $t = 11,63e^{0,0064 t_{\text{возд}}}$ |
| | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 609,03e^{-0,0165 t_{\text{см}} - 0,004 t_{\text{возд}}}$ | $t = 13,16e^{0,0068 t_{\text{возд}}}$ |
| | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t = 14,05e^{0,0073 t_{\text{возд}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 488,57e^{-0,019 t_{\text{см}}}$ | $t = 13,285e^{0,0094 t_{\text{возд}}}$ |
| | 200/300 | $t_{\text{осн}} = 1675,9e^{-0,0359 t_{\text{см}}}$ | $t = 16,484e^{0,0099 t_{\text{возд}}}$ |

Продолжение табл. 5.19

| Тип смеси | Марка битума | Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания | Допустимая продолжительность работ, мин |
|-----------|--------------|---|--|
| Б | 40/60 | $t_{\text{осн}} = 619,81e^{-0,0166t_{\text{см}} - 0,004 t_{\text{возд}}}$ | $t = 13,16e^{0,0068 t_{\text{возд}}}$ |
| | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t = 14,05e^{0,0073 t_{\text{возд}}}$ |
| | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092 t_{\text{см}}}$ |
| | 200/300 | $t_{\text{осн}} = -139,01\ln(t_{\text{см}}) + 675,91$ | $t_{\text{осн}} = 18,423e^{0,0112 t_{\text{см}}}$ |
| В | 40/60 | $t_{\text{осн}} = 875,3,03e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,0044 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 14,05e^{0,0073 t_{\text{см}}}$ |
| | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 1407,35e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1676,92e^{-0,0275 t_{\text{см}} - 0,0063 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 16,289e^{0,0088 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 1196,3e^{-0,033 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 16,484e^{0,0099 t_{\text{см}}}$ |
| | 200/300 | $t_{\text{осн}} = -116,46\ln(t_{\text{см}}) + 560,25$ | $t_{\text{осн}} = 19,146,16e^{0,0122 t_{\text{см}}}$ |
| Г | 40/60 | $t_{\text{осн}} = 619,81e^{-0,0166 t_{\text{см}} - 0,004 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 13,16e^{0,0068 t_{\text{см}}}$ |
| | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 14,05e^{0,0073 t_{\text{см}}}$ |
| | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092 t_{\text{см}}}$ |
| | 200/300 | $t_{\text{осн}} = -139,01\ln(t_{\text{см}}) + 675,91$ | $t_{\text{осн}} = 18,372e^{0,0109 t_{\text{см}}}$ |

5.7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ СМЕСИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕМОНТНЫХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В зависимости от дорожно-климатической зоны расположения дорожного покрытия нежесткого типа назначаются марки дорожного битума для приготовления горячих асфальтобетонных смесей, рекомендуемые нормативными документами для данной территории, которые представлены табл. 5.20 [37].

**5.20. Область применения асфальтобетонов
при устройстве верхних слоев покрытий автомобильных дорог и городских улиц**

| Дорожно-климатическая зона | Вид асфальтобетона | Категория нормативной нагрузки | | | | | |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|---|-------------|--|-------------|---|
| | | в/к, I, II, III | | IV | | V | |
| | | марка смеси | марка битума | марка смеси | марка битума | марка смеси | марка битума |
| I | Плотный и высокоплотный | I | БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 | II | БНД 90/130 БНД 130/20 БНД 200/30 СГ 130/200 МГ 130/200 МГО 130/20 | III | БНД90/130 БНД130/20 БНД200/30 СГ130/200 МГ130/200 МГО130/200 |
| | | I | БНД 60/90 БНД 90/130 БНД130/200 БН90/130 | II | БНД 60/90 БНД 90/130 БНД130/200 БН200/300 БН60/90, БН90/130 БН130/200 БН200/300 | III | БНД 60/90 БНД90/130 БНД130/200 БНД200/300 БН60/90, БН90/130 БН130/200, БН200/300 СГ130/200, МГ130/200 МГО130/200 |
| II, III | Плотный и высокоплотный | I | БНД 60/90 БНД 90/130 БНД130/200 БН90/130 | II | БНД 60/90 БНД 90/130 БНД130/200 БН200/300 БН60/90, БН90/130 БН130/200 БН200/300 | III | БНД 60/90 БНД90/130 БНД130/200 БНД200/300 БН60/90, БН90/130 БН130/200, БН200/300 СГ130/200, МГ130/200 МГО130/200 |

| Дорожно-климатическая зона | Вид асфальтобетона | Категория нормативной нагрузки | | | | | |
|----------------------------|--------------------|--------------------------------|--|-------------|--------------|-------------|---|
| | | в/к, I, II, III | | IV | | V | |
| | | марка смеси | марка битума | марка смеси | марка битума | марка смеси | марка битума |
| IV, V | Высокоплотный | I | БНД 40/60 БНД 60/90 БН 40/60 БН 60/90 | II | БНД 40/60 | III | БНД 40/60 БНД 60/90 БНД90/130 БН 40/60 БН 60/90 БН90/130 |

Примечания.

1. Для городских скоростных и магистральных улиц и дорог следует применять асфальтобетоны из смесей видов и марок, рекомендуемых для дорог первой и второй категорий; для дорог промышленно-складских районов – рекомендуемых для дорог третьей категории; для остальных улиц и дорог – рекомендуемых для дорог четвертой категории.
2. Битумы марок БН рекомендуется применять в мягких климатических условиях, характеризуемых средними температурами самого холодного месяца года выше –10 °С.
3. Битум марки БН 40/60 должен соответствовать технической документации, утвержденной в установленном порядке.

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 СНиП и зависят от категории дороги (табл. 5.21).

5.21. 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 |
| 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. Каменные материалы, обработанные органическим вяжущим. Горячие и теплые смеси для высокопористого асфальтобетона марки I |

| Категория дороги | Материал слоя покрытия | |
|--|--|---------|
| | верхнего | нижнего |
| 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 9128–2009, дегтебетонные – ГОСТ 25877–83.

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.

4. В районах I и V дорожно-климатических зон не следует предусматривать устройство покрытий из дегтебетонных смесей.

В нижние слои покрытия укладывают крупнозернистые смеси, в верхние – мелкозернистые или песчаные смеси. Для обеспечения безопасности движения транспортных средств в верхние слои покрытия укладывают смеси типа А или Б, Г. Минимальная толщина слоя в уплотненном состоянии приведена в табл. 5.22 [36].

5.22. Минимальная толщина асфальтобетонных слоев

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

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 и категории нормативной нагрузки рекомендуются горячие асфальтобетонные смеси типа А, Б, В, Г и Д. Установлено, что каждой марке битума горячей смеси соответствуют эффективные температурные режимы укладки и уплотнения, при которых достигаются требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетона.

Действующими нормативными документами и существующими рекомендациями на производство работ с применением горячих асфальтобетонных смесей за основу, при выборе технологических параметров процессов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, принята температура с учетом типа смеси. Температура смеси при отгрузке потребителю зависит от марки битума и регламентирована ГОСТ 9128–2009. Технологические режимы горячих смесей зависят от марки битума и различаются режимами укладки и уплотнения для одного и того же типа смеси [17]. В таблице 5.14 представлены рекомендуемые температурные режимы уплотнения асфальтобетона разных типов в зависимости от марки битума.

Согласно нормативным документам и рекомендациям 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.

Для I дорожно-климатической зоны.

При производстве ремонтных работ по устранению выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа минимальная температура доставляемой горячей смеси к месту производства работ должна быть выше, чем указанные значения температуры на рис. 5.26 – 5.28, в зависимости от типа смеси и марки битума. Использование горячих асфальтобетонных смесей с более низкой температурой (без подогрева поверхности выбоины) не обеспечивает требуемых эксплуатационных показателей асфальтобетона в выбоине.

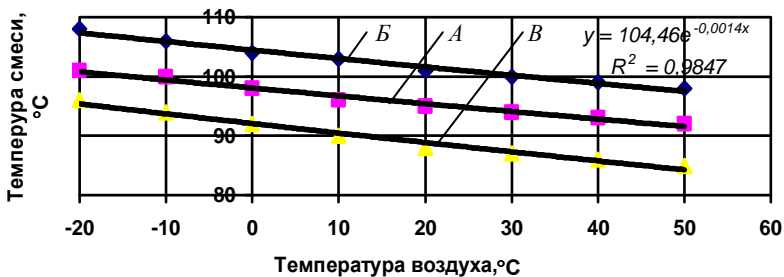


Рис. 5.26. Зависимость минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси от температуры воздуха с битумом марки 90/130. А, Б, В – тип смеси

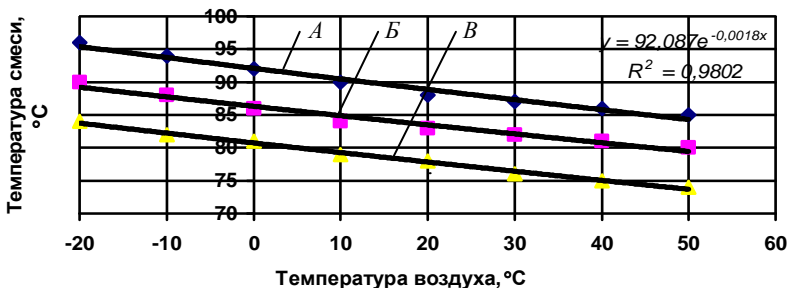


Рис. 5.27. Зависимость минимальной температуры горячей смеси от температуры воздуха с битумом марки 130/200. А, Б, В – тип смеси

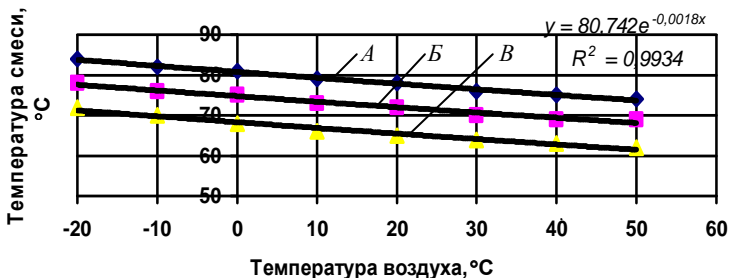


Рис. 5.28. Зависимость минимальной температуры горячей смеси от температуры воздуха с битумом марки 200/300. А, Б, В – тип смеси

Применение горячих асфальтобетонных смесей с температурой, выше минимально допустимой, способствует образованию на контакте выбоины и поверхности покрытия объемов материала с пониженной температурой смеси. Ширина зоны материала по периметру выемки с пониженной температурой смеси зависит от температуры воздуха и температуры укладываемой горячей смеси. На рисунке 5.29 представлены зависимости ширины зоны материала с пониженной температурой смеси в выбоине при укладке горячей смеси, с учетом марки битума, в соответствии с требованиями нормативных документов.

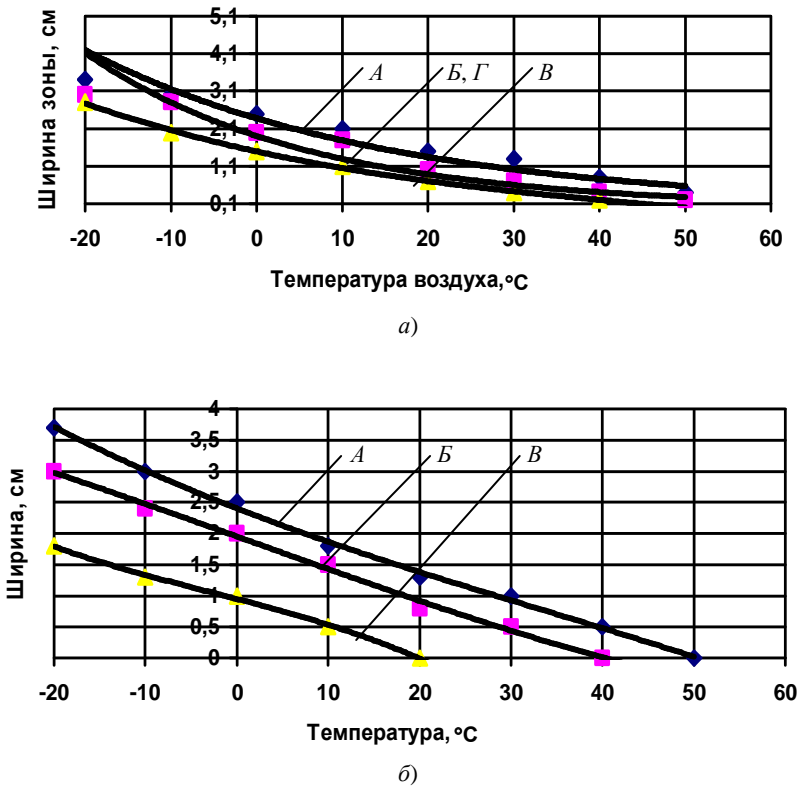
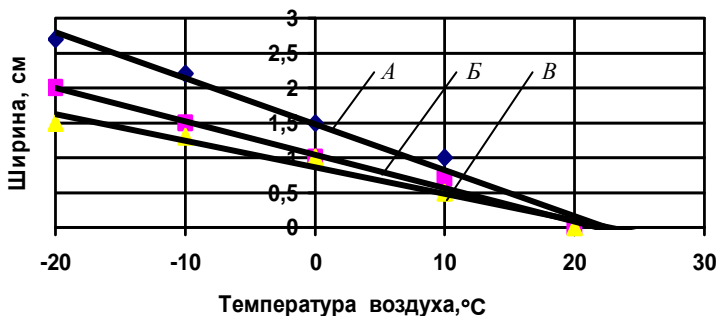


Рис. 5.29. Зависимость ширины зоны материала с пониженной температурой смеси, ниже минимально предельной температурой смеси, для конкретного типа смеси и марки битума:

a – марка битума БНД 90/130; *б* – марка битума 130/200;

в – марка битума 200/300



б)

Рис. 5.29. Окончание

Для обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении горячей смеси в выбоине продолжительность работ не должна превышать времени, указанного в табл. 5.23. 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.

5.23. 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 |
| 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 | 17,5 | 20,0 |
| | 130/200 | 14,0 | 15,0 | 16,0 | 17,5 | 20,0 | 22,5 | 25,0 |
| | 200/300 | 16,0 | 17,5 | 19,0 | 21,0 | 25,0 | 27,0 | 32,0 |

Выполнение работ с применением горячих асфальтобетонных смесей допускается при скорости ветра, обеспечивающей соблюдение температурных режимов при укладке и уплотнению горячих смесей и представлены в табл. 5.24.

Для обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении горячей асфальтобетонной смеси в выбоине дорожного покрытия необходимо осуществлять нагрев поверхности выбоины до значений, определяемых из выражений, представленных в табл. 5.25.

5.24. Значения допускаемых скоростей ветра при производстве ремонтных работ выбоин

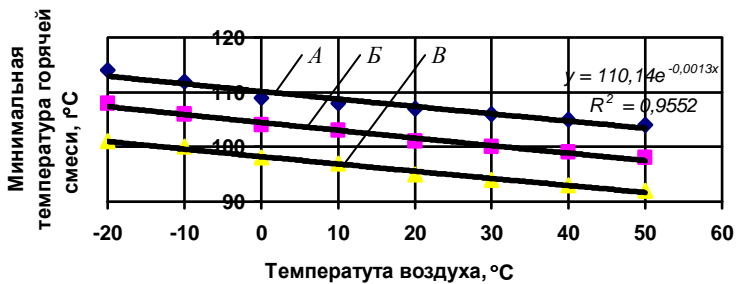
| Марка битума | Температура воздуха, °С | | | |
|--------------------|-------------------------|---|----|-----|
| | +10 | 0 | -5 | -10 |
| <i>Тип смеси А</i> | | | | |
| 90/130 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| 130/200 | 9 | 6 | 5 | 4 |
| 200/300 | 9 | 8 | 7 | 6 |
| <i>Тип смеси Б</i> | | | | |
| 90/130 | 8 | 6 | 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 |
| <i>Тип смеси Г</i> | | | | |
| 90/130 | 8 | 6 | 6 | 4 |
| 130/200 | 9 | 6 | 5 | 5 |
| 200/300 | 9 | 8 | 5 | 4 |

5.25. Зависимости для определения нагрева поверхности выбоины в зависимости от температуры поставляемой горячей смеси к месту производства работ и температуры окружающего воздуха и для расчета допустимой продолжительности работы с учетом температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси, мин

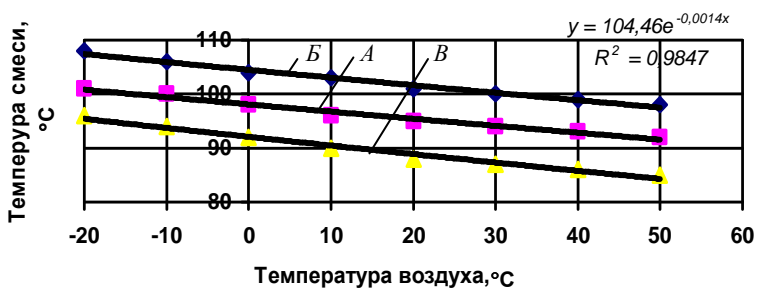
| Тип смеси | Марка битума | Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания | Допустимая продолжительность работ, мин |
|-----------|--------------|--|--|
| А | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t = 14,05e^{0,0073 t_{\text{возд}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 488,57e^{-0,019 t_{\text{см}}}$ | $t = 13,285e^{0,0094 t_{\text{возд}}}$ |
| | 200/300 | $t_{\text{осн}} = 1675,9e^{-0,0359 t_{\text{см}}}$ | $t = 16,484e^{0,0099 t_{\text{возд}}}$ |
| Б | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092 t_{\text{см}}}$ |
| | 200/300 | $t_{\text{осн}} = -139,01\ln(t_{\text{см}}) + 675,91$ | $t_{\text{осн}} = 18,423e^{0,0112 t_{\text{см}}}$ |
| В | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1676,92e^{-0,0275 t_{\text{см}} - 0,0063 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 16,289e^{0,0088 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 1196,3e^{-0,033 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 16,484e^{0,0099 t_{\text{см}}}$ |
| | 200/300 | $t_{\text{осн}} = -116,46\ln(t_{\text{см}}) + 560,25$ | $t_{\text{осн}} = 19,146,16e^{0,0122 t_{\text{см}}}$ |
| Г | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092 t_{\text{см}}}$ |
| | 200/300 | $t_{\text{осн}} = -139,01\ln(t_{\text{см}}) + 675,91$ | $t_{\text{осн}} = 18,372e^{0,0109 t_{\text{см}}}$ |

Для II и III дорожно-климатических зон.

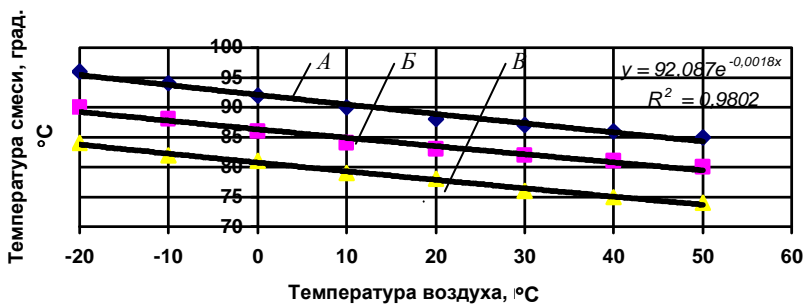
Для ремонтных работ дорожных покрытий нежесткого типа во II и III климатических зонах используются горячие асфальтобетонные смеси, приготовленные на битумах марок БНД 60/90, 90/130 и 130/200. С учетом погодных условий для этих климатических зон при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей широкое применение получили битумы марки БНД 60/90. На рисунке 5.30 представлены зависимости минимальной температуры поставляемой горячей смеси к месту производства работ для II и III дорожно-климатических зон для разных типов смеси с учетом марки битума в зависимости от температуры окружающего воздуха, ниже которой применение горячей смеси без нагрева поверхности выбоины, не допускается.



а)



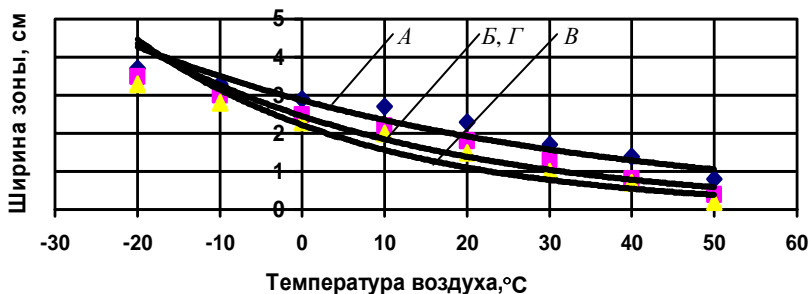
б)



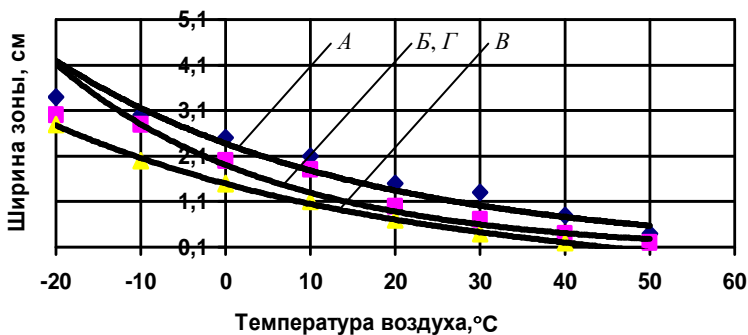
в)

Рис. 5.30. Зависимость минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси от температуры воздуха. А, Б, В – тип смеси:
а – битум марки БНД 60/90; б – битум марки БНД 90/130;
в – битум марки БНД 130/200

При использовании горячих асфальтобетонных смесей с температурой выше минимально допустимой, без прогрева поверхности выбоины, в зоне контакта выбоины и поверхности покрытия возникает зона материала с пониженной температурой смеси. Ширина такой зоны зависит от температуры воздуха и температуры укладываемой горячей смеси. На рисунке 5.31 представлены зависимости ширины зоны материала с пониженной температурой смеси в выбоине при укладке горячей смеси, с учетом марки битума, в соответствии с требованиями нормативных документов.



а)



б)

Рис. 5.31. Зависимость ширины зоны материала с пониженной температурой смеси ниже предельно допустимой температуры смеси.

А, Б, В и Г – тип смеси:

а – марка битума БНД 60/90; *б* – марка битума БНД 90/130;

в – марка битума 130/200

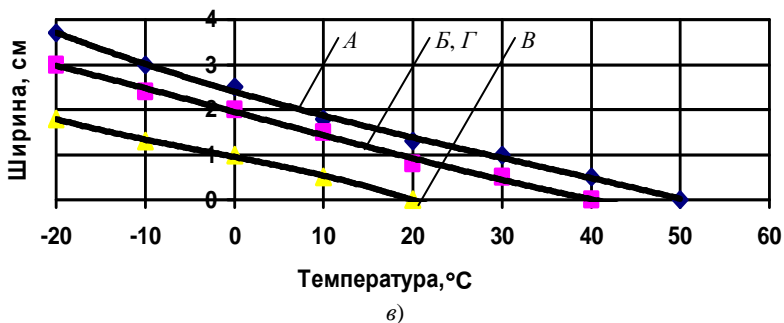


Рис. 5.31. Окончание

В зависимости от погодных условий продолжительность ремонтных работ для данной дорожно-климатической зоны находится в пределах 11,5...22,5 мин. Конкретную продолжительность работ, в зависимости от погодных условий, типа смеси и марки битума можно определить на основе данных табл. 5.26.

5.26. 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 | 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 |

5.27. 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 |
| <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 |

Значения допустимых скоростей ветра, обеспечивающих достижение требуемых температурных режимов горячей смеси при укладке и уплотнении в выбоине дорожного покрытия, представлено в табл. 5.27.

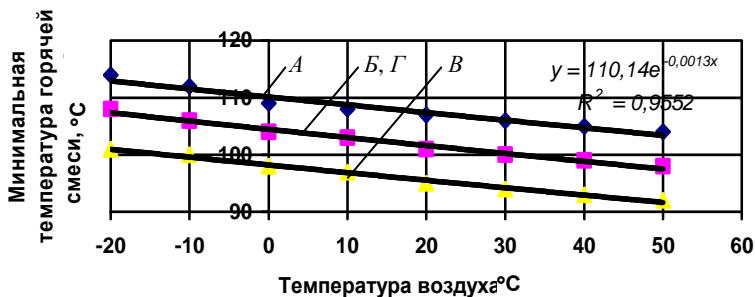
При выполнении ремонтных работ выбоин с прогревом поверхности температура нагрева поверхности выбоины определяется по зависимостям, представленным в табл. 5.28.

5.28. Зависимости для определения нагрева поверхности выбоины от температуры поставляемой горячей смеси к месту производства работ и температуры окружающего воздуха и для расчета допустимой продолжительности работы с учетом температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси, мин

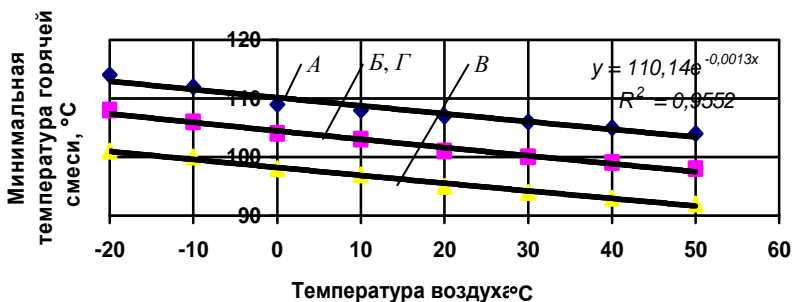
| Тип смеси | Марка битума | Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания | Допустимая продолжительность работ, мин |
|-----------|--------------|--|--|
| А | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 609,03e^{-0,0165 t_{\text{см}} - 0,004 t_{\text{возд}}}$ | $t = 13,16e^{0,0068 t_{\text{возд}}}$ |
| | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t = 14,05e^{0,0073 t_{\text{возд}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 488,57e^{-0,019 t_{\text{см}}}$ | $t = 13,285e^{0,0094 t_{\text{возд}}}$ |
| Б | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t = 14,05e^{0,0073 t_{\text{возд}}}$ |
| | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092 t_{\text{см}}}$ |
| В | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 1407,35e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1676,92e^{-0,0275 t_{\text{см}} - 0,0063 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 16,289e^{0,0088 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 1196,3e^{-0,033 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 16,484 e^{0,0099 t_{\text{см}}}$ |
| Г | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t = 14,05e^{0,0073 t_{\text{возд}}}$ |
| | 90/130 | $t_{\text{осн}} = 1406,92e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| | 130/200 | $t_{\text{осн}} = 756,71e^{-0,026 t_{\text{см}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,036e^{0,0092 t_{\text{см}}}$ |

IV и 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 дорожно-климатических зон рекомендуются битумы марок БНД 40/60 и БНД 60/90, характеризующиеся высокой вязкостью. На рисунке 5.32 представлены значения минимальных температур горячей смеси при доставке к месту производства работ.



а)



б)

Рис. 5.32. Зависимость минимальной температуры горячей асфальтобетонной смеси от температуры воздуха.

А, Б, В и Г – тип асфальтобетонной смеси:

а – битум марки БНД 40/60; *б* – битум марки БНД 60/90

Применение асфальтобетонных смесей при производстве ремонтных работ с температурой, выше минимально допустимой, без прогрева поверхности выбоины, способствует возникновению в зоне контакта выбоины с поверхностью покрытия, зоны материала с пониженной температурой смеси. Ширина такой зоны зависит от температуры воздуха и температуры укладываемой горячей смеси. На рисунке 5.33 представлены зависимости ширины зоны материала с пониженной температурой смеси в выбоине при укладке горячей смеси, с учетом марки битума, в соответствии с требованиями нормативных документов.

С учетом погодных условий продолжительность ремонтных работ для данной дорожно-климатической зоны находится в пределах 10...21 мин, в зависимости от типа смеси и марки битума. Продолжи-

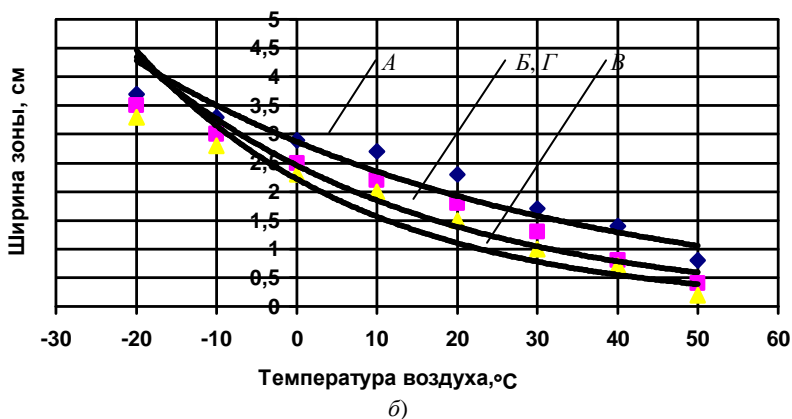
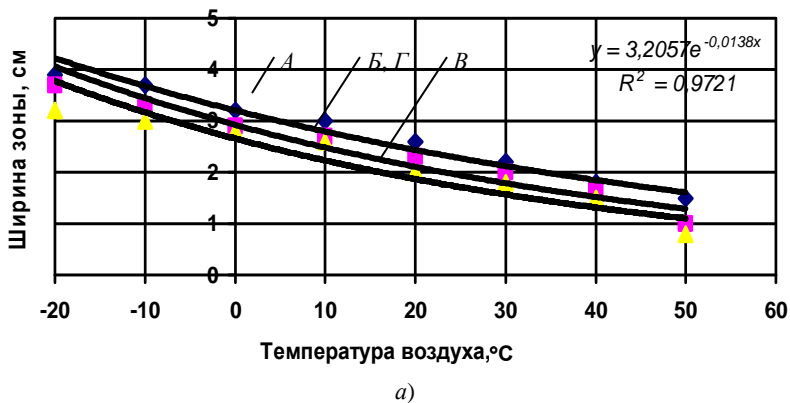


Рис. 5.33. Зависимость ширины зоны материала с пониженной температурой смеси от температуры воздуха:
a – марка битума БНД 40/60; *б* – марка битума БНД 60/90

тельность работ, в зависимости от погодных условий, типа смеси и марки битума, можно определить на основе данных табл. 5.29.

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, представлено в табл. 5.30.

5.29. 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 |
| 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 |

5.30. 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 |

5.31. Зависимости для определения нагрева поверхности выбоины в зависимости от температуры поставляемой горячей смеси к месту производства работ и температуры окружающего воздуха и для расчета допустимой продолжительности работы с учетом температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси, мин

| Тип смеси | Марка битума | Расчетная зависимость для определения температуры нагрева основания | Допустимая продолжительность работ, мин |
|-----------|--------------|---|---|
| А | 40/60 | $t_{\text{осн}} = 361,43e^{-0,0113 t_{\text{см}} - 0,0024 t_{\text{возд}}}$ | $t = 11,63e^{0,0064 t_{\text{возд}}}$ |
| | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 609,03e^{-0,0165 t_{\text{см}} - 0,004 t_{\text{возд}}}$ | $t = 13,16e^{0,0068 t_{\text{возд}}}$ |
| Б | 40/60 | $t_{\text{осн}} = 619,81e^{-0,0166 t_{\text{см}} - 0,004 t_{\text{возд}}}$ | $t = 13,16e^{0,0068 t_{\text{возд}}}$ |
| | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t = 14,05e^{0,0073 t_{\text{возд}}}$ |
| В | 40/60 | $t_{\text{осн}} = 875,3,03e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,0044 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 14,05e^{0,0073 t_{\text{см}}}$ |
| | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 1407,35e^{-0,0262 t_{\text{см}} - 0,006 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 15,204e^{0,0075 t_{\text{см}}}$ |
| Г | 40/60 | $t_{\text{осн}} = 619,81e^{-0,0166 t_{\text{см}} - 0,004 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 13,16e^{0,0068 t_{\text{см}}}$ |
| | 60/90 | $t_{\text{осн}} = 875,307e^{-0,0207 t_{\text{см}} - 0,044 t_{\text{возд}}}$ | $t_{\text{осн}} = 14,05e^{0,0073 t_{\text{см}}}$ |

Соблюдение температурных режимов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей позволяет обеспечить требуемые показатели качества работы как при устройстве, так и 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 материала с пониженной температурой материала, что влияет на эксплуатационные показатели асфальтобетона в зоне контакта выбоины с дорожным покрытием. Для обеспечения температурных режимов при ремонте выбоин на дорожном покрытии, при температуре окружающего воздуха до +25 °С, необходимо осуществлять прогрев поверхности выбоины. В таблице 5.31 представлены зависимости, позволяющие определить температуру нагрева поверхности выбоины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безопасность движения транспортных средств зависит от состояния дорожной сети.

Под действием осевых нагрузок от транспортных средств и погодных условий на дорожных покрытиях возникают разрушения, что проявляется в виде различных выбоин, просадок, трещин и волн, что ухудшает условия движения транспортных средств и уменьшает срок эксплуатации автомобильной дороги. Для устранения таких дефектов применяют разные технологии, позволяющие устранить образовавшиеся дефекты на покрытиях, и при качественном ремонте, увеличить продолжительность эксплуатации автомобильной дороги в течение нескольких лет. Выбор технологии и ее параметров зависит от многих факторов, в том числе от свойств применяемого материала и погодных условий.

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 применяемой технологии с использованием горячих асфальтобетонных смесей показал, что низкому качеству работ способствует несоответствие температурных режимов при укладке и уплотнении горячих асфальтобетонных смесей условиям производства работ и недостаточное уплотнение. Предложенная методика выбора технологических режимов при ремонте выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа позволит улучшить качество ремонтных работ и увеличить срок службы автомобильных дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов В.И. Дорожные материалы на основе битумных эмульсий. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2003. – 1542 с.
2. Артемьев К.А. Дорожные машины. Машины для устройства дорожных покрытий. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 349.
3. Апестин В.К. О расхождении проектных и нормативных сроков службы дорожных одежд // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 18 – 20.
4. Бабков В.Ф., Безруков В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1986. – С. 96 – 100.
5. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1970. – С. 197.
6. Варганов С.А. Теоретические и экспериментальные исследования динамики вибрационных катков // Труды ВНИИ СтрОйДОРМАШ. – М., 1962. – № 28.
7. Васильев А.П. и др. Строительство и реконструкция автомобильных дорог. СЭД; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2005. – Т. 1. – С. 207.
8. Васильев А.П. и др. Справочная энциклопедия дорожника. Т. II: Ремонт и содержание автомобильных дорог; под ред. засл. деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук, проф. А.П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2004. – 505 с.
9. Владимиров В.Н. Исследование динамики вибрационных плит в процессе уплотнения грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1976. – 25 с.
10. Горельшев Н.В. и др. Технология и организация строительства автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1991. – 551 с.
11. Горельшева Л.А. Органоминеральные смеси в дорожном строительстве // Обзорная информация. Вып. 3. – М., 2000. – 95 с.
12. Иноземцев А.А. Битумоминеральные материалы. – Л.: Изд-во литературы по строительству, 1972. – С. 94.

13. Ищенко И.С., Калашникова Т.Н., Семенов Д.А. Технология устройства и ремонта асфальтобетонных покрытий. – М.: «Аир-Арт», 2001.

14. Ереско С.П., Зяблов С.Ф. Технология ремонта асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. – М.: Изд-во Дороги, 2011. – № 1. – С. 28 – 30.

15. Евсеев Е.Ю. Влияние технологии работ на эксплуатационные показатели асфальтобетонного покрытия // Механизация строительства. – 2011. – № 1. – С. 25–26.

16. Зубков А.Ф. О нестационарной теплопередаче в процессах строительства дорожных покрытий нежесткого типа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2007. – № 2. – С. 589 – 597.

17. Зубков А.Ф. Технология устройства дорожных покрытий с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2006. – 151 с.

18. Зубков А.Ф. Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. – М.: Машиностроение, 2009. – 223 с.

19. Зубков А.Ф., Матвеев В.Н., Евсеев Е.Ю. Разработка теплофизической модели при производстве ремонтных работ покрытий нежесткого типа // Российская академия наук, Вестник Центрального регионального отделения. – Тамбов–Воронеж, 2012. – Вып. 11. – С. 303 – 309.

20. Костельов М.П. Современные методы и средства ямочного ремонта дорожных покрытий // Еженедельник «Стройка»: информационно-строительный портал. – СПб.; опубл. 30.09.03, WWW.STROIT.ru

21. Подольский В.П. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Т. 2: Дорожные покрытия; под ред. В.П. Подольского. – М.: Академия, 2012. – 297 с.

22. Пермяков В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях // Строительные материалы. – 2005. – № 10. – С. 8–9.

23. Пермяков В.Б., Захаренко А.В. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей // Строительные и дорожные машины. – 1989. – № 5. – С.12–13 .

24. Ладыгин Б.И. Прочность и долговечность асфальтобетона; под ред. Б.И. Ладыгина. – Минск: Изд-во «Наука и техника», 1972. – С. 187.

25. Локшин Е.С. Выбор рациональных режимов работы и областей применения комплекса самоходных катков при строительстве асфальтобетонных покрытий. – М.: МАДИ, 1984.

26. Ложечко В.П., Шестопалов А.А., Окунев В.П., Окулов Р.Д. Уплотняющие машины. – Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2004. – 78 с.

27. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередач. – М.: Энергия, 1979.

28. Мучник Г.Ф., Рубашов И.Б. Методы теории теплообмена. Ч. 1: Теплопроводность. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1987.

29. Сергеева Т.Н. Выбор параметров катков при уплотнении асфальтобетонных покрытий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛИСИ, 1981.

30. Хархута Н.Я., Капустин М.И., Семенов В.П., Эвентов И.Э. Дорожные машины; под ред. Н.Я. Хархута. – Л.: Машиностроение, 1976.

31. Автомобильные дороги общего пользования Российской Федерации (справочник о наличии и протяженности по состоянию на 01.01.2005 год). – М.: ФГУ «Дороги России», 2005.

32. <http://www.gosthelp.ru/text/SpravochnikSpravochnayaen3.html>

33. Состояние автомобильных дорог в России. Клинцы. RU Размещено: 09.04.2011 www.klintsy.ru/.../sostojanie-av...ossii_2014.html.

34. ГОСТ Р 50597–93. Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Госстандарт России. 1994-07–01. – М.– 11 с.

35. СНиП 2.07.01–89. Планировка и застройка городских и сельских поселений. – М.: ФГУП ЦПП, 1989.

36. СНиП 3.03.06.85. Автомобильные дороги. – М.: ФГУП ЦПП, 1985.

37. ГОСТ 9128–2009. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромы и асфальтобетон. Технические условия. – М.: МНТКС, 2009.

38. Государственная служба дорожного хозяйства министерства транспорта РФ. Руководство по производству работ дорожным мастером (при содержании и ремонте автомобильных дорог). – М., 2001. – 48 с.

39. Технические рекомендации по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона ТР 103-00. – М.: ГУП НИИ Мосстрой, 2000. – 43 с.

40. ОДМД. Методические рекомендации по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования. Утверждены министерством транспорта РФ от 17.03.2004. – № ОС-28/1270 ИС. – М., 2004. – 131 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РЕМОНТА ВЫБОИН НА ПОКРЫТИЯХ НЕЖЕСТКОГО ТИПА | 4 |
| 1.1. Анализ состояния автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа | 4 |
| 1.2. Требования нормативных документов к транспортно-эксплуатационному состоянию автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа | 6 |
| 1.3. Влияние свойств материала на выбор технологии ремонта покрытий нежесткого типа | 9 |
| 1.4. Факторы, влияющие на процессы разрушения дорожных покрытий нежесткого типа | 15 |
| 1.5. Анализ технологий для ремонта выбоин на покрытиях дорог нежесткого типа | 18 |
| Глава 2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ | 28 |
| 2.1. Влияние температуры горячей асфальтобетонной смеси на качество работ по ремонту дорожных покрытий нежесткого типа | 28 |
| 2.2. Влияние температуры на свойства асфальтобетонных смесей | 32 |
| 2.3. Влияние температуры на прочностные характеристики горячих асфальтобетонных смесей | 36 |
| Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕМОНТНЫХ РАБОТ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ | 44 |
| 3.1. Разработка математической модели при производстве ямочного ремонта дорожных асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2. Экспериментальные исследования по определению температуры горячей асфальтобетонной смеси при ремонте выбоин дорожных покрытий | 55 |
| 3.3. Влияние условий производства работ на температурные режимы горячих асфальтобетонных смесей | 62 |
| 3.3.1. Влияние температуры окружающего воздуха на распределение температуры смеси в выбоине дорожного покрытия | 62 |
| 3.3.2. Влияние температуры смеси при укладке в выбоину на продолжительность работ по ремонту выбоин | 65 |
| 3.4. Влияние теплофизических характеристик горячей смеси на распределение температуры в выбоине дорожного покрытия | 67 |
| 3.4.1. Влияние скорости ветра на темп охлаждения горячей асфальтобетонной смеси | 70 |
| Глава 4. ОБОСНОВАНИЕ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ВЫБОИН ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА | 75 |
| 4.1. Выбор уплотняющих машин при производстве ямочного ремонта покрытий нежесткого типа | 76 |
| 4.2. Статистический анализ параметров вибрационных плит, применяемых для уплотнения дорожно-строительных материалов | 78 |
| 4.3. Моделирование процесса взаимодействия вибрационной плиты с уплотняемым материалом | 84 |
| 4.4. Экспериментальные исследования по определению напряжений под вибрационной плитой | 92 |
| 4.5. Влияние параметров вибрации на эффективность вибрационных плит | 95 |
| 4.6. Сравнительный анализ коэффициентов превышения контактных напряжений под вибрационной плитой при разных методах определения | 99 |
| 4.7. Определение эффективных зон работы вибрационных плит | 101 |

| | |
|--|------------|
| Глава 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА | 110 |
| 5.1. Влияние условий производства работ на выбор технологии ремонтных работ на покрытиях нежесткого типа | 110 |
| 5.2. Влияние температуры воздуха на тепловые процессы горячей смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия | 112 |
| 5.3. Влияние температуры смеси на технологические режимы горячей асфальтобетонной смеси в выбоине | 119 |
| 5.4. Влияние скорости ветра на охлаждение горячей смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия | 127 |
| 5.5. Влияние температуры основания на температурные режимы горячей смеси при укладке в выбоину покрытия | 134 |
| 5.6. Методика разработки технологии ремонта выбоин дорожных покрытий нежесткого типа с применением горячих асфальтобетонных смесей | 142 |
| 5.7. Рекомендации по выбору температурных режимов горячей смеси при производстве ремонтных работ с применением горячих асфальтобетонных смесей | 152 |
| Заключение | 172 |
| Список литературы | 173 |

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Зубков Анатолий Федорович,
Однолько Валерий Григорьевич,
Евсеев Евгений Юрьевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

Редактор И.В. Калистратова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Сдано в набор 14.08.2013

Подписано в печать 28.08.2013. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 11,63. Тираж 400 экз. Заказ № 368

ISBN 978-5-4442-0043-8



ООО «Издательский дом «Спектр»,

119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1

[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru) E-mail: idspektr@rambler.ru

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться
по телефону 8(4752)63-81-08

E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru