

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

**А. Ф. ЗУБКОВ, К. А. АНДРИАНОВ,
В. Г. ОДНОЛЬКО, М. Э. ПИЛЕЦКИЙ**

ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА СТРУЙНО-ИНЪЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Рекомендовано Научно-техническим советом университета
в качестве монографии для научных работников,
аспирантов и магистрантов строительного профиля



Тамбов

◆Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»◆
2018

УДК 625:691.168
ББК О-311-08
3-91

Рецензенты:

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

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Конструкции зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «ТГТУ»
В. В. Леденев

Зубков, А. Ф.
3-91 Технология ремонта дорожных покрытий нежесткого типа
струйно-инъекционным методом : монография / А. Ф. Зубков,
К. А. Андрианов, В. Г. Однолько, М. Э. Пилецкий. – Тамбов :
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – 200 с. – 400 экз.
ISBN 978-5-8265-1928-8

Рассмотрены вопросы технологии ремонта дорожных покрытий
нежесткого типа струйно-инъекционным методом. Разработаны реко-
мендации по технологии ремонта выбоин на асфальтобетонных покры-
тиях.

Предназначена для научных работников, аспирантов и магистран-
тов строительного профиля.

УДК 625:691.168
ББК О-311-08

ISBN 978-5-8265-1928-8

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2018

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экономического развития страны зависит не только от уровня развития отраслей промышленности, но и наличия и состояния дорожной сети. В зависимости от интенсивности движения и осевой нагрузки от транспортных средств, с учетом применяемого материала для строительства дороги, определяются конструктивные параметры автомобильной дороги. Принятыми нормативными документами дорожной отрасли установлены сроки эксплуатации дорог, в пределах которых она должна обеспечить безопасность движения транспортных средств с установленными скоростными режимами. Требуемые транспортно-эксплуатационные показатели автомобильных дорог обеспечиваются в процессе строительства дорожной конструкции и зависят от качества применяемого материала и технологии строительства.

В настоящее время при строительстве и реконструкции покрытий нежесткого типа на автомобильных дорогах наибольшее применение находят асфальтобетонные покрытия, доля которых составляет свыше 97% 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 происходит также за счет нарушения технологий при устройстве земляного полотна и дорожных одежд. Для устранения таких дефектов, в процессе эксплуатации дороги осуществляют содержание и ремонт, которые позволяют устранять образовавшиеся дефекты на дорожном покрытии, что способствует увеличению срока службы автомобильной дороги с обеспечением требуемых транспортно-эксплуатационных показателей в течение нескольких лет. Такой вид работ производится при условии нецелесообразности устройства поверхностного слоя дорожного покрытия.

В настоящее время, в зависимости от конкретных условий эксплуатации дороги, применяются разные технологии для устранения возникающих дефектов дорожного покрытия. Выбор технологии ремонта покрытия зависит от многих факторов, в том числе от применяемого материала, наличия средств механизации, дефектов на покрытии дороги, а также времени года. Характерной особенностью при выполнении ремонта покрытий нежесткого типа является использование в качестве вяжущего материала разных марок битума или других материалов на их основе. Производство работ с применением такого материала проводится при положительной температуре окружающего воздуха. 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 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.

Наиболее распространенным методом ремонта дорожных покрытий нежесткого типа является технология с использованием горячих асфальтобетонных смесей. В настоящее время широкое применение получают современные методы ремонта дорожных покрытий с использованием литых и холодных асфальтобетонных смесей, асфальтогранулята и инъекционно-струйного метода. Каждый метод при производстве ремонтных работ дорожного покрытия характеризуется как положительными, так и отрицательными моментами. Поэтому при выборе метода производства ремонтных работ необходим анализ всех факторов, влияющих на качество и экономическую целесообразность выполняемых работ.

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

1.1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ДОРОЖНЫМИ 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 [31, 33]. Понижение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильной дороги в процессе эксплуатации требуемых показателей 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, что часто является причиной дорожно-транспортных происшествий. Для обеспечения транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог, согласно требованиям нормативных документов, дорожные организации выполняют значительный объем работ по их ремонту и содержанию, обеспечивающих безопасность дорожного движения. С этой целью из бюджета страны выделяются значительные денежные средства. Согласно по-

становлению Правительства РФ от 23.08. 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 выполнение работ по ремонту и содержанию автомобильных дорог установлены нормативы, которые определяют затраты на 1 км дороги при выполнении ремонтных работ 2540 тыс. р. и содержание 695 тыс. р. В то же время для обеспечения транспортно-эксплуатационного состояния дорог, в соответствии с существующими нормативными требованиями, 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%. 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 [5, 16], согласно которым общая протяженность федеральных автодорог составляет 54 000 км, из которых около 30% перегружены. Около 25...30% федеральных дорог не отвечают нормативным требованиям по транспортно-эксплуатационным показателям, предъявляемым к автомобильным дорогам. Свыше 60% от общей протяженности дорог имеют недостаточную прочность дорожных одежд. 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 при эксплуатации автомобильных дорог является своевременное устранение возникающих дефектов дорожного покрытия, что позволяет увеличить срок службы дороги и повысить работоспособность покрытий нежесткого типа. Потребность в проведении таких работ возникает иногда и в более ранние сроки эксплуатации дороги, что предусматривается существующими нормативными документами. Установлено, что проведение 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 [2]. 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

Статистический анализ дорожно-транспортных происшествий, проведенный ГИБДД, показал, что значительная доля ДТП происходит из-за неблагоприятных дорожных условий, способствующих их возникновению. По транспортно-эксплуатационным характеристикам автомобильные дороги разделены в три группы [26]:

– 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*. Эксплуатационное состояние автомобильных дорог определено требованиями ГОСТ Р 50597. Предельно допустимые повреждения покрытия, а также сроки их ликвидации приведены в табл. 1.1 и 1.2.

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

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

Примечание. В скобках приведены значения повреждений для весеннего периода.

1.2. 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
ПРОЕЗЖАЯ ЧАСТЬ (включая используемые съезды)					
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

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 технологии ремонта и используемого оборудования, но и свойств применяемого материала. В зависимости от конструкции дорожной одежды и конкретных условий

эксплуатации автомобильной дороги для устранения дефектов применяют разные материалы, которые характеризуются физико-механическими, теплофизическими и технологическими параметрами.

Наиболее интенсивно образование дефектов на дорожных покрытиях происходит в весенний и осенний периоды эксплуатации автомобильных дорог, когда под действием проникающей влаги в дорожные одежды и температуры окружающего воздуха происходит понижение прочностных характеристик 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 [29].

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 охлаждения вяжущего, на поверхности минеральных зерен битум теряет свою липкость, и смесь при хранении не слеживается. После укладки в выбоину покрытия, для образования монолитного слоя, смесь должна прогреться 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 III–IV технической категории. Технология ремонта и выполняемые операции аналогичны ямочному ремонту покрытий с применением горячих смесей. При такой технологии отсутствуют ограничения на время укладки и уплотнение уложенной смеси, которое определяет продолжительность устранения выбоины на дорожном покрытии. Анализ применения технологий с использованием холодных смесей показал, что в некоторых зарубежных

странах (Швеция, Финляндия, Норвегия и др.) ограничивают область применения и рекомендуют их применять на дорогах с интенсивностью движения до 1000...1500 авт./сут. Такие смеси приготавливают и укладывают в дорожные покрытия как и горячие асфальтобетонные смеси.

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. Такая технология ремонта дорожных покрытий также эффективна при положительных температурах окружающего воздуха.

При производстве ремонтных работ с использованием холодной технологии на покрытиях дорог третьей и ниже категорий применяют влажную органоминеральную смесь (ВОМС). Такой материал рекомендуется применять в 1–2 климатических зонах при толщине укладываемого слоя не менее 0,03 м при проведении аварийного ямочного ремонта. В качестве вяжущего материала используется гудрон, жидкий или разжиженный вязкий битум. Вместо щебня допускается применение отсевов дробления каменного материала, песчано-гравийной смеси, дробленого шлака. Приготовление смесей производится в холодном виде в смесительных установках асфальтобетонных заводов, дооборудованных системой подачи и дозировки воды в мешалку. Достоинством таких смесей является возможность их применения при температуре воздуха до -10°C и влажной поверхности выбоины. Существенным недостатком является замедленное формирование прочной структуры ВОМС из-за частых переходов температуры воздуха через 0°C . Максимальная прочность материала в 1,5–2 раза ниже прочности холодного и в 2,5–3 раза ниже прочности горячего асфальтобетона.

При проведении ямочного ремонта в качестве вяжущего материала применяют битумную эмульсию. Рекомендуемый тип используемой эмульсии ЭБК-1 при концентрации битума – 60...70%.

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 III–IV категорий. Горячие

асфальтобетонные смеси и литой асфальт применяют при ремонте покрытий дорог I–II категорий.

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-морозо-устойчивости 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 строгое соблюдение температурных режимов укладки и уплотнения.

В целях устранения отмеченных недостатков при производстве работ по устранению выбоин применяют вибролитую асфальтобетонную 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). 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 целях экономии материальных ресурсов при производстве ремонтных работ, для восстановления покрытия применяют способ термопрофилирования, при котором в старый асфальтобетонный материал после фрезерования добавляют новую асфальтобетонную смесь (20...50 кг/м²). Такой способ позволяет не только уменьшить материальные ресурсы, но и корректировать состав восстанавливаемого покрытия в соответствии с ранее применяемой структурой покрытия с одновременным устранением последствий старения битума в покрытиях.

При строительстве дорожных покрытий нежесткого типа в качестве основного материала применяют высокоплотный и плотный асфальтобетон марки I с высоким содержанием щебня. Однако на практике, при производстве ремонтных работ, ввиду того, что смеси типа А обладают более высокой жесткостью из-за высокого содержания щебня, предпочтение отдают смесям типа Б, В и Г. Для приготовления горячих смесей могут быть использованы разные марки битума, в зависимости от климатической зоны расположения автомобильной дороги.

Эффективность работы уплотняющей машины зависит от температурных режимов горячей смеси, определяемых типом смеси и маркой битума. На основании рекомендованных температурных режимов смеси, с учетом условий выполнения работ, можно определить время на устранение дефекта в виде выбоины дорожного покрытия в зависимости от объема укладываемой смеси.

Наиболее распространенным методом ремонта дорожных покрытий нежесткого типа является ремонт 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 зависит от условий производства работ, 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 в процессе эксплуатации связано с комплексным воздействием различных факторов на дорожные конструкции. В процессе строительства дороги, из-за нарушений технологии укладки и уплотнения слоев материала, имеет место недостаточное уплотнение уложенного материала, что в дальнейшем способствует образованию дефектов в виде выбоин. Образование выбоин на дорожных покрытиях возможно также за счет низкого коэффициента уплотнения земляного полотна. 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 прочностные характеристики 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 возникновению дефектов на покрытиях дороги в виде отслоения частиц материала покрытия и образованию 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 понижение коэффициента уплотнения материала земляного полотна и дорожных одежд.

Под воздействием осевой нагрузки от транспортных средств и неблагоприятных климатических условий 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 дорожного покрытия в процессе 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, образованию 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 происходит также 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 приводит к появлению дефектов на покрытии дороги, которые проявляются в виде трещин, просадок, проломов и выбоин (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Разрушение дорожного покрытия за счет недостаточного уплотнения основания и нарушения температурных режимов горячей смеси в зоне стыка сопряженных полос покрытия

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 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, в некоторых случаях являются причиной дорожно-транспортных происшествий. 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 в процессе строительства. Нарушение температурных режимов при устройстве покрытия, неоднородность смеси по структуре при укладке, отсутствие контроля за расходом охлаждающей жид-

кости для смачивания вальца катка при укатке горячей смеси способствует снижению характеристик асфальтобетона, а также образованию на поверхности микротрещин, что в дальнейшем способствует образованию выбоин на дорожном покрытии.

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

Воздействие погодных-климатических факторов и превышение осевой нагрузки от транспортных средств по отношению к нормативной нагрузке способствует интенсивному износу и разрушению дорожных 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 проведения их параметров в соответствии 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 $+5^{\circ}$ [29]. 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, шероховатости, ровности и водонепроницаемости по отношению к основной части покрытия; наличия требуемых материалов и механизмов по выбранной технологии для обеспечения заданного срока службы отремонтированного участка покрытия; возможность реализации принятой технологии ремонта с учетом погодных условий; 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 ремонтных работ, снижает срок службы 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 требуемого 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 [9]. На основе проведенного анализа разных технологий для ремонта дорожных покрытий и их экономических показателей по пятибалльной системе получен график эффективности разных технологий в течение года, который представлен на рис. 1.2.

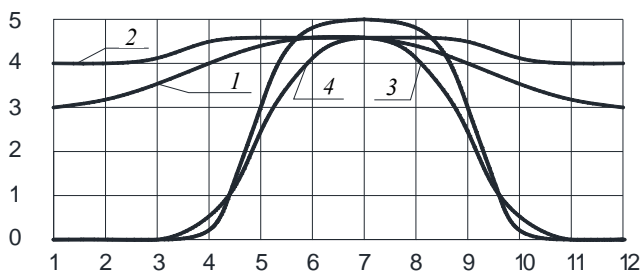


Рис. 1.2. Сравнительная эффективность технологий для ремонта дорожных покрытий в течение года:

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

Из представленных на рис. 1.2 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, не эффективны 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 выполнение ремонтных работ. Однако для формирования структуры смеси после укладки должны прогреться 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 III–IV 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 дорожного покрытия выполняется следующими способами:

- 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 асфальтозагретелем;
- обработка стенок и дна ремонтируемой выбоины органическим вяжущим;
- укладка, разравнивание и уплотнение уложенного материала;
- 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 органоминеральной смеси предусматривает промывку выбоины водой, укладку материала подобранного состава и жидкого органического вяжущего (гудрона или разжиженного битума) и уплотнение. 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 готовят 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 (струйно-инъекционный метод) выполняют с применением прицепного специального оборудования, например, пломбировщика марки БЦМ-24, УДМ-1 или самоходных машин MADPATCHER .

Очистку выбоины под ремонт осуществляют струей сжатого воздуха или методом всасывания, подгрунтовку – подогретой до 60...75 °С битумной 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, что 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 ремонтных 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 в разных странах 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 зернами 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. 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 пригото-

ления и использования которой разработали в РосдорНИИ [5]. Такой смесью ремонтируют выбоины глубиной не менее 3...4 см. Преимуществом применения ВОМС состоит в том, что она используется уже в готовом виде по холодной технологии при температуре воздуха до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако в зимний период года и ранней весной формирование прочной структуры происходит медленно, из-за частых переходов температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. К тому же, достигаемая прочность такого материала в выбоине покрытия значительно ниже прочности холодного и горячего асфальтобетона. Поэтому такую технологию можно применять для аварийного ремонта покрытий.

В настоящее время для ремонта выбоин и просадок применяют инжекторную или струйно-инъекционную технологию. При этой технологии 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.

Укладка мелкого щебня в выбоину покрытия происходит при его перемещении из патрубка машины, предварительно обработанного битумной эмульсией в камере смешения, за счет энергии воздушной струи. За счет подачи щебня воздушной струей, укладка в выбоину происходит с высокой скоростью, что способствует его уплотнению, исключая процесс уплотнения. При такой технологии рекомендуется применять чистый 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. 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 необходимо учитывать, что прочность и водостойкость холодного асфальтобетона значительно ниже прочности горячего асфальтобетона. Поэтому его используют при ремонте покрытий дорог III–IV категорий.

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. К месту работ смесь доставляют специальными машинами с обогреваемой емкостью и выливают в подготовленную карту. После охлаж-

дения смеси до 50...60 °С на отремонтированном участке открывают движение. Существенным недостатком применения такой технологии, с точки зрения транспортно-эксплуатационных показателей покрытия, являются низкие сцепные показатели, что требует повышения шероховатости покрытия (вдавливание мелкого щебня в уложенный слой горячего асфальтобетона). Такая технология не требует процесса уплотнения, 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.

Наиболее распространенной технологией при ремонте выбоин покрытий нежесткого типа является ремонт 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. Чаще всего, при ремонте для этих целей применяют мелкозернистые и среднезернистые асфальтобетонные смеси типов Б и В. Жесткие и прочные крупнозернистые и многощебенистые смеси типа А, из-за своих технологических характеристик, применяются редко.

Одним из недостатков, характерных для горячего метода ремонта выбоин на дорожном покрытии, является недостаточная подготовка основания выбоины и нарушение температурных режимов при укладке и уплотнении горячей смеси [11, 12]. Недостаточная ровность основания выбоины способствует при укладке неравномерности уложенного по толщине слоя горячей смеси, что влияет на температурные режимы смеси по поверхности выбоины (рис. 1.3).

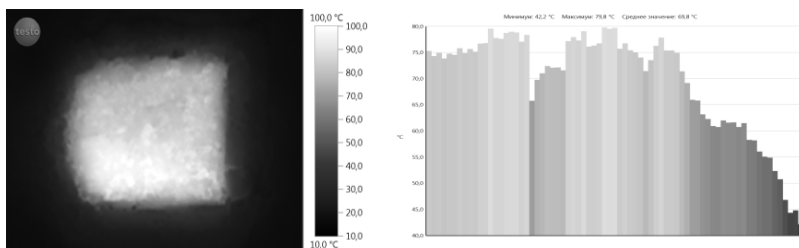


Рис. 1.3. Распределение температуры асфальтобетонной смеси в выбоине дорожного покрытия

Из представленных экспериментальных данных видно, что недостаточная ровность основания выбоины способствует неравномерности распределения температуры по поверхности выбоины, что приводит при уплотнении к разным характеристикам уложенного слоя асфальтобетона.

В некоторых странах (Германия, Голландия и др.) нормативными документами определено, что температура асфальтобетонных смесей при укладке должна быть не ниже 110...120 °С. Применение смесей с более низкой температурой не допускается и считается браком.

Анализ технологий ремонтных работ с применением горячих смесей показал, что основными недостатками, способствующими низкому 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.

При отсутствии возможности приготовления горячей асфальтобетонной смеси на заводе рекомендуется применять технологию рециклинга, позволяющую готовить горячую смесь путем вторичной переработки асфальтобетонного материала непосредственно 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 твердого или полутвердого битума 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.

1.6. ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ СТРУЙНО-ИНЪЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В связи с использованием в качестве вяжущего материала битумной эмульсии выполнение работ по ремонту дорожных покрытий осуществляется при положительных температурах окружающего воздуха. Существующие рекомендации по применению данного метода ремонта дорожных покрытий применяются для ремонта повреждений в виде трещин и незначительных поверхностных повреждений покрытия,

когда толщина слоя при распределении смеси достигает незначительных размеров. Применение данного метода при ремонте выбоин на дорожных покрытиях связано с укладкой смеси слоем 0,05 м и более. При такой толщине укладываемого слоя характеристики битумоминеральной смеси отличаются от тех характеристик, которые имеют смеси при малой толщине слоя. Поэтому при выполнении работ по устранению выбоин на дорожных покрытиях за основу принимается информация от производителей установок.

Согласно проведенному анализу опубликованных источников по применению струйно-инъекционного метода можно сделать вывод, что при работе место выбоины очищают (обеспыливают и обезвоживают) струей воздуха под давлением с помощью воздухоудвки, приводимой в движение двигателем. После этого поверхность выбоины и прилегающее к ней асфальтобетонное покрытие обрабатывается разогретой (до 50...75 °С) битумной эмульсией для обеспечения сцепления уложенного слоя материала с основанием ремонтируемого покрытия. Гидравлический насос подает эмульсию к основному соплу через отдельный шланг, и оператор направляет ее в распыленном виде на участок заделки выбоины. После этого щебень вводится в поток воздуха при помощи сопла воздушной струи в бункере, в основном сопле он покрывается эмульсией и направляется в яму. Последующее уплотнение другими средствами не требуется. Завершается ремонт распределением на поверхности выбоины слоем сухого щебня для предотвращения прилипания шин автомобиля к покрытию. Через 10...40 мин (время полного распада битумной эмульсии) дорожное движение возобновляется. Применение таких установок имеет существенные преимущества. Ремонт можно выполнять по влажному покрытию, что позволяет вести дорожные работы с ранней весны до поздней осени при температуре окружающего воздуха +5 °С; не требуется предварительная обрубка краев выбоины; не требуется трамбовка «заплат», сокращаются сроки ремонта. На рисунке 1.4 представлено оборудование для ямочного ремонта дорожных покрытий фирмы БЦМ.

Шарнирная стрела, состоящая из трех секций, с радиусом действия более 5 м дает возможность ремонтировать большие площади без перемещения оборудования, что облегчает управление распыляющим устройством. Струйно-инъекционный метод ямочного ремонта – скоростной, так как норма времени в среднем в 1,8 раза меньше, чем при заделке повреждений по традиционной технологии, трудоемкость ямочного ремонта снижается в 3 раза.

Наряду с установкой БЦМ-24.3, широкое применение получили установки MAGNUM американского производства (рис. 1.5).



Рис. 1.4. Оборудование на прицепе для ямочного ремонта дорожных покрытий (БЦМ-24.3)



Рис. 1.5. Установка MAGNUM для ямочного ремонта струйно-инъекционным методом производства компании Crafco

Некоторые компании «ИДТ-Инвест», специализирующиеся на разработках и внедрениях технологий и поставках материалов, оборудования для ремонта и содержания дорожных покрытий, ссылаясь на зарубежный опыт применения струйно-инъекционной технологии по заделке выбоин с помощью битумной эмульсии (страны Европы, США) дополнительно, на основе производственного опыта, рекомендуют применять вибрационное уплотнительное оборудование [35]. Также рекомендуют применять чистый мелкий щебень фракции 5...10 мм и быстрораспадающуюся катионную (для кислых каменных пород, как гранита) или анионную (для основных каменных пород: например, известняка).

В некоторых работах, посвященных вопросам ремонта выбоин на дорожных покрытиях, отмечается, что за счет вовлечения и подачи щебня воздушной струей, укладка частиц смеси в выбоину происходит с высокой скоростью, что обеспечивает хорошую упаковку (уплотнение), практически исключая необходимость в дополнительном применении вибрационных плит и вибрационных катков [20]. Отмечается также, что исследования и опытные работы в течение нескольких последних лет (в основном в США) показали, что чистота и сухость выбоины играют более важную роль для качества ямочного ремонта, чем даже температура материала и наружного воздуха, и поэтому струйно-инъекционная технология в последнее время подверглась дальнейшему качественному усовершенствованию, суть которого свелась к замене очистки и сушки выбоины продувкой высокоскоростной струей воздуха на вакуумную очистку (рис. 1.6).

Подгрунтовка битумной эмульсией и заполнение выбоины щебнем, обработанным эмульсией, в вакуумно-струйно-инъекционной технологии аналогична операциям по струйно-инъекционной технологии. Разработчики метода и оборудования на основе опыта его использования в 25 штатах США дают гарантию на трехлетний срок службы отремонтированных мест.

Широкое применение для ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с применением струйно-инъекционной технологии послужило основанием разработки параметрического ряда дорожных ремонтеров марки MADPATCHER (см. рис. 1.6).

Технические характеристики MADPATCHER приведены в табл. 1.3.

Технология работ дорожным ремонтером MADPATCHER аналогична технологической схеме установки MAGNUM.



Рис. 1.6. Дорожный ремонтер MADPATCHER MP 6,5 WD

1.3. Технические характеристики дорожного ремонтера MADP ATCHER

	MADP ATCHER MPA 4.5W	MADP ATCHER MPA 4.5WD	MADP ATCHER MPA 6.5W	MADP ATCHER MPA 6.5WD
Тип	Автономный	Автономный	Автономный	Автономный
Дизельный двигатель	Кубота (Япония), 25 л/с (18,7 кВт)	Кубота (Япония), 25 л/с (18,7 кВт)	Кубота (Япония), 25 л/с (18,7 кВт)	Кубота (Япония), 25 л/с (18,7 кВт)
Воздуходувка	Robuschi(Италия), 10 м ³ /мин, давление 800 мбар	Robuschi (Италия), 10 м ³ /мин, давление 800 мбар	Robuschi (Италия), 10 м ³ /мин, давление 800 мбар	Robuschi (Италия), 10 м ³ /мин, давление 800 мбар
Компьютерная система	Siemens (Германия)	Siemens (Германия)	Siemens (Германия)	Siemens (Германия)
Теплообменник	Alfa Laval (Швеция)	Alfa Laval (Швеция)	Alfa Laval (Швеция)	Alfa Laval (Швеция)
Подогрев эмульсии	Автоматический	Автоматический	Автоматический	Автоматический
Насос подачи эмульсии	GVR (Италия), 5,7 л/мин, давление 10 бар центро- бежный	GVR (Италия), 5,7 л/мин, давление 10 бар центро- бежный	GVR (Италия), 5,7 л/мин, давление 10 бар центро- бежный	GVR (Италия), 5,7 л/мин, давление 10 бар центро- бежный
Гидравлика	Danfoss (Дания)	Danfoss (Дания)	Danfoss (Дания)	Danfoss (Дания)

	MADPACHER MPA 4.5W	MADPACHER MPA 4.5WD	MADPACHER MPA 6.5W	MADPACHER MPA 6.5WD
Привод насоса эмульсии	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический
Вес	2850 кг	2900 кг	3000 кг	3000 кг
Размеры (длина× ширина×высота)	3000×2290×2000 мм	3000×2290×2000 мм	3000/3700×2290× ×2100/1900 мм	3000/3700×2290× ×2100/1900 мм
Бункер щебня 1	4 м ³	2 м ³	6 м ³	3 м ³
Бункер щебня 2	Отсутствует	2 м ³	Отсутствует	3 м ³
Бункер мелкой крошки	0,5 м ³	0,5 м ³	0,5 м ³	0,5 м ³
Количество шнеков	1	2	1	2
Привод шнеков	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический	Гидравлический
Бак эмульсии	1100 л	1100 л	1100 л	1100 л
Радиус работы	4 м/240°	4 м/240°	4 м/240°	4 м/240°
Электрическая система	12 V	12 V	12 V	12 V

1.7. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С УЧЕТОМ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА

В настоящее время при проведении ямочного ремонта на асфальтобетонных покрытиях широко используется струйно-инъекционный метод (на основе битумной катионной эмульсии). Анализ работ показал, что в настоящее время дорожные организации при применении данного метода используют рекомендации производителей оборудования без обоснования технологических режимов при ремонте выбоин (рецептура состава смеси, погодные условия, необходимость уплотнения и т.п.).

Известно, что ямочный ремонт покрытия применяется при текущем содержании дорог. В настоящее время при ограниченном размере финансирования дорожной отрасли соблюдать межремонтные сроки автомобильных дорог практически невозможно. В то же время сокращать затраты на текущее содержание автомобильных дорог недопустимо. Анализ системы планирования содержания автомобильных дорог на примере Германии показал, что в настоящее время в России остро стоит проблема несоответствия нормативных (расчетных) сроков службы дорожных конструкций фактическим. Дорожные одежды под действием возрастающих осевых нагрузок и интенсивности движения, на которые они не были первоначально рассчитаны, практически «не доживают» до планируемого срока ремонта. В связи с этим программа, в том числе и содержания дорог, не может опираться только на заданные межремонтные сроки, а должна учитывать фактическое состояние дорог [2].

Текущему содержанию автомобильных дорог большое внимание уделяется за рубежом. В США наиболее распространенными способами ямочного ремонта являются [36, 37]:

- «EDGE SEAL» («Запечатанные края», далее – метод «EDGE SEAL») – в данном методе используется холодная смесь, без удаления воды, герметизация вяжущим по периметру выбоины и уплотнение шиной (колесом рабочего автомобиля);

- «SEM PERMANENT» (далее – метод «SEM PERMANENT») – на этом методе задействовано в общей сложности четыре человека, обрубается кромка выбоины, удаляется старый материал, мусор и вода, производится подгрунтовка вяжущим, выбоина заполняется асфальтобетоном на 20...25% выше ее глубины и уплотняется вибро-трамбовкой, края заполненной выбоины сверху проливаются битум-

ной мастикой. Этот метод считается наиболее трудоемким и продолжительным по времени, но наиболее надежным;

– «THROW – AND – ROLL» («бросок и укатка») – считается одним из распространенных способов ямочного ремонта, состоящий из следующих операций: заполнение материалом, уплотнение шиной (колесом рабочего автомобиля) или катком или виброплитой. Применяется в основном для временных исправлений, когда погодные условия не позволяют использовать метод «SEM PERMANENT». Наименее дорогой и менее трудоемкий;

– «OTHERS» (другие методы, далее – «OTHERS»);

– «SPRAY INJECTION» («струйно-инъекционный», далее – метод «SPRAY INJECTION») – состоит из следующих операций: удаление воды и мусора из выбоины, нанесение связующего слоя по бокам и дну выбоины, подача смеси в выбоину под давлением (распыление), покрытие исправленной поверхности тонким слоем сухого заполнителя. Как утверждается, такой способ создает потенциал для гораздо большей производительности и эффективности работ, а также он может работать в экстремальных погодных условиях. В штате Орегон (США) метод «THROW-AND-ROLL» – основной метод для временного ямочного ремонта дорожных покрытий. Этот процесс является более трудоемким, чем метод «SPRAY INJECTION». Так, в штате Орегон после соответствующих наблюдений пришли к выводу, что нужно расширять применение метода «SPRAY INJECTION» также и в других штатах. Так, в девяти разных штатах США, включая Южную и Северную Каролину, метод «SPRAY INJECTION» использовался на государственных (федеральных) трассах. Важно подчеркнуть, что независимо от типа или модели оборудования (на базе грузовика или прицепное), каждое дорожное агентство использовало промытый 9,5 или 6,3 мм равномерно измельченный щебеночный материал. В роли вяжущего использовалась катионная активная битумная эмульсия CRS-2 [37].

Основным требованием технических условий на эмульсии является ее вязкость. Эмульсии для распыления должны иметь достаточно низкую вязкость для обеспечения надлежащего распределения эмульсии по поверхности проезжей части дороги, но при этом вязкость должна быть достаточной для того, чтобы предотвратить стекание.

В марте 2003 года в ежеквартальном издании «THE ROAD AHEAD» («Дорога в будущее») Транспортного Технологического Трансферного Центра представлен исследовательский отчет по методу «SPRAY INJECTION». Отмечается, что данный метод первоначально был разработан для устранения именно выбоин в покрытии.

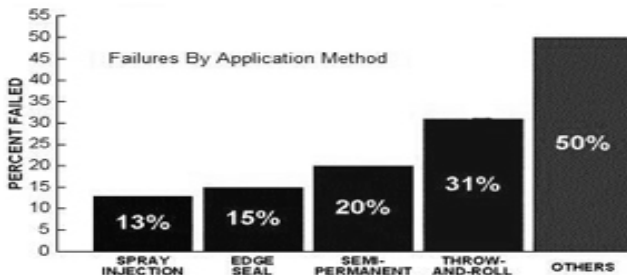


Рис. 1.7. Процент отрицательных результатов по качеству выполнения ямочного ремонта с применением разных технологий

Однако впоследствии стало очевидным, что он может эффективно применяться при появлении эрозии, выкрашивания, отслоения материала и трещин аллигаторного типа на дорожных покрытиях, что сокращает расходы и продлевает срок службы дорожной одежды. На рисунке 1.7 показаны результаты наблюдений за основными методами ямочного ремонта дорожных покрытий в США и Канаде [37].

Зарубежными специалистами (США) представлен анализ результатов применения метода «SPRAY INJECTION» на автомобильных дорогах штата Огайо в процессе их эксплуатации. Отмечается, что уложенный материал в выбоине покрытия не требует дополнительно уплотнения после укладки смеси, поскольку мелкие фракции материала (от 6,5 мм до 9,5 мм) под давлением равномерно и плотно распределяются в выбоине покрытия. В то же время доказательств в обосновании такого вывода не приводится.

Анализ качества ремонтных работ с применением данного метода проводился на 8 полигонах в Соединенных Штатах и Канаде с применением разных конструктивных решений при создании установок. Процент отрицательных результатов (отказов) при использовании метода «SPRAY INJECTION» оказался гораздо ниже по отношению к другим рассматриваемым методам укладки. Отмечается, что отрицательные результаты получены при температуре окружающего воздуха ниже нуля или близкой к нулю.

Из проанализированной информации по технологии ямочного ремонта покрытий струйно-инъекционным методом можно сделать определенный вывод, что многие рекомендации и утверждения требуют дополнительного изучения и подтверждения (опровержения) научно-исследовательским путем.

1.8. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЯМОЧНОГО РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ СТРУЙНО-ИНЪЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Продолжительность выполнения ремонтных работ по устранению выбоин на покрытиях дорог нежесткого типа с применением струйно-инъекционного метода занимает значительно меньше времени по сравнению с традиционными способами (литых и горячих смесей), что позволяет отнести его к скоростному методу ямочного ремонта. С учетом ограниченного финансирования дорожной деятельности был проведен анализ экономической эффективности применения данного метода при выполнении ямочного ремонта в Тамбовской области. Сравнение по стоимости одного квадратного метра выбоины производилось в сопоставлении с распространенными методами ямочного ремонта дорожных покрытий (горячие, литые и холодные асфальтобетонной смеси) [23].

Все необходимые данные для расчета экономической эффективности применяемых методов ремонта дорожных покрытий нежесткого типа принимались на основании действующих документов в области сметных нормативов, стоимостных показателей и индексов изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ в Тамбовской области. Полученные результаты представлены в табл. 1.4. Из представленных результатов видно, что стоимость ямочного ремонта с применением струйно-инъекционного метода по отношению к другим методам ремонтных работ значительно меньше (от 160,6 до 252,7 р. за 1 м²).

Это достигается за счет уменьшения трудозатрат (маш/ч, чел/ч) на единицу объема ремонта и не требуется дополнительных механизированных средств в составе отряда (фреза, каток, самосвал, компрессор и другое вспомогательное оборудование), а также дополнительных людских ресурсов для подготовительных и основных работ.

На основании представленного анализа по применению струйно-инъекционного метода для ремонта выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа можно сделать следующие выводы:

- с экономической стороны, струйно-инъекционный метод для ямочного ремонта выбоин является эффективным и перспективным;
- при наличии разных моделей машин для струйно-инъекционного метода ремонта выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа отсутствуют практические рекомендации по выбору технологических режимов укладки битумоинертальной смеси;
- не ясен вопрос о соответствии характеристик смеси при укладке в выбоину требованиям нормативных документов к качеству

ремонтных работ, поскольку рекомендациями предполагается дальнейшее уплотнение смеси в выбоине за счет осевой нагрузки транспортных средств;

– если повышение плотности смеси в выбоине покрытия обеспечивается за счет осевой нагрузки, то какие параметры осевой нагрузки обеспечивают требуемые параметры качества ремонтных работ;

– отсутствуют рекомендации по применению данного метода при выполнении ремонтных работ на автомобильных дорогах со значительными осевыми нагрузками и высокой интенсивностью движения транспортных средств.

1.4. Сравнительная стоимость методов ямочного ремонта дорожных покрытий и струйно-инъекционного метода за 1 м² в ценах 2015 года

Наименование и характеристика работ	Стоимость работ за 1 м ² в р.
Ямочный ремонт асфальтобетонного покрытия дорог однослойного толщиной 50 мм	633,9
Ямочный ремонт асфальтобетонного покрытия дорог литой асфальтобетонной смесью с разрушением поверхности до 1 м ²	683,6
Ямочный ремонт асфальтобетонного покрытия дорог литой асфальтобетонной смесью с разрушением поверхности	726,0
Ямочный ремонт асфальтобетонного покрытия дорог однослойного толщиной 50 мм, (применительно к холодным смесям)	682,0
Ямочный ремонт асфальтобетонных и цементобетонных покрытий струйно-инъекционным методом, толщина слоя до 50 мм	473,3

2. ПРИМЕНЕНИЕ БИТУМНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В процессе эксплуатации автомобильных дорог, за счет увеличения интенсивности движения и повышения осевых нагрузок от транспортных средств на дорожные покрытия нежесткого типа, а также нарушения технологических режимов при устройстве покрытия, образуются дефекты, влияющие на безопасность движения и скоростные режимы транспорта. В целях устранения образовавшихся дефектов на дорожных покрытиях и обеспечения безопасности дорожного движения и повышения работоспособности автомобильной дороги выполняются работы, в результате которых устраняются дефекты покрытия. Основным требованием при производстве таких работ является своевременное и качественное выполнение работ по устранению выявленных дефектов покрытия. В зависимости от погодных условий и наличия механизированных средств для достижения поставленной задачи, используются технологии с применением разных материалов, каждая из которых имеет свои определенные области эффективного применения. Наиболее широкое применение получила технология ремонта выбоин покрытия с использованием горячих асфальтобетонных смесей, где в качестве вяжущего применяются дорожные вязкие битумы. Наряду с положительными моментами, характерными для данной технологии, следует отметить и недостатки, снижающие ее эффективность. Прежде всего, это сложность подготовительных работ, связанных с фрезерованием слоя покрытия на ремонтном участке и подготовкой поверхности выбоины для укладки слоя горячей асфальтобетонной смеси одинаковой толщины. Другой причиной низкого качества работ является нарушение температурных режимов укладки и уплотнения горячих смесей, способствующих недостаточной степени уплотнения смеси в выбоине, что приводит к повышенному водонасыщению и низкому пределу прочности уложенного асфальтобетона.

Широкое применение в дорожном строительстве у нас в стране и за рубежом при производстве ремонтных работ дорожных покрытий получили битумные эмульсии. Особенно широко их применяют в дорожном строительстве во Франции, где ежегодный выпуск битумных эмульсий в стране за последние 25 лет увеличился почти в четыре раза. По данным французских исследователей, применение битумных эмульсий позволяет экономить от 6 до 7 л жидкого топлива на 1 т каменного материала только за счет исключения необходимости просушивания материала.

В последнее время в США разжиженный битум вытесняется битумными эмульсиями, что позволяет снизить или полностью исключить расход топлива. Полная замена разжиженных битумов позволяет экономить свыше миллиона тонн нефтепродуктов ежегодно.

Практика строительства и содержания автомобильных дорог у нас в стране показала, что битумные эмульсии находят все большее применение. Основным достоинством дорожных битумных эмульсий, по сравнению с обычными вязкими битумами, является возможность их применения при повышенной влажности и пониженной температуре окружающего воздуха с одновременной экономией битума. Эмульсии обладают значительно меньшей вязкостью по сравнению с вязким битумом, что позволяет производить дорожные работы холодным способом, исключая подогрев каменного материала, эмульсии и смесей на их основе. Особенно важно, с точки зрения практики, что эмульсии позволяют работать при неблагоприятных погодных условиях, когда невозможно добиться необходимого качества работ с использованием горячих смесей.

Предъявляемым требованиям соответствует струйно-инъекционный метод, где в качестве вяжущего материала применяется битумная эмульсия. Основным преимуществом этого метода, по отношению к традиционным, является простота технологических операций и уменьшение времени их выполнения, особенно при значительных объемах работы в весенний период. Применение данного метода позволяет заделывать повреждения в виде выбоин, а также локальные разрушения покрытия нежесткого типа: выкрашивание, вогнутости поверхности, тонкие сетки трещин, колеи (без гребней выпора), а также разрушенные технологические швы и трещины шириной более 2 см с вогнутыми или разрушенными краями.

Каждое повреждение имеет свои характерные особенности (различия по объему, площади, длине, ширине, изменению глубины по площади дна, углу наклона и ровности стенок; по виду и количеству мелких повреждений по его краям). По месту расположения они могут находиться на различном расстоянии друг от друга. Данный метод, в отличие от других применяемых методов ремонта покрытий нежесткого типа, позволяет устранять повреждения по фактическим размерам дефектной поверхности без проведения дополнительных подготовительных работ. При этом дорожные покрытия могут находиться как на сухом, так и влажном покрытии. Применение битумных эмульсий и активированных минеральных порошков дает возможность регулировать скорость распада катионоактивной битумной эмульсии за счет изменения характера взаимодействующих поверхностей.

В целях уточнения качества выполненных ремонтных работ с применением струйно-инъекционного метода при устранении выбоин на покрытиях нежесткого типа взяты образцы асфальтобетона с мест производства ремонтных работ, выполненных в 2014 и 2015 гг. За критерий качества выполненных работ принимались предел прочности и коэффициент уплотнения асфальтобетона в выбоине покрытия. Технические параметры дороги соответствовали третьей категории с интенсивным движением и значительной осевой нагрузкой от транспортных средств. На взятых образцах материала при визуальном осмотре внешних повреждений обнаружено не было. Испытания образцов проводились согласно ГОСТ 12801–98 и результаты испытаний сравнивались с требованиями ГОСТ 9128–2009. Во всех случаях результаты испытаний переформованных образцов по прочностным характеристикам при температуре 20 °С соответствовали пределу прочности от 2,1 до 2,3 МПа, что отвечает ГОСТ 9128–2009. Результаты испытаний образцов по прочностным характеристикам показали, что предел прочности на сжатие ниже минимальных значений по требованиям ГОСТ 9128–2009 и составил от 1,2 до 1,7 МПа. Коэффициент уплотнения находился в пределах 0,96...0,97. На основании этого можно сделать вывод, что для повышения качества ремонтных работ с применением данного метода необходимо провести анализ применяемой технологии и уточнить влияние производственных факторов на конечный результат работы по укладке и уплотнению уложенной битумоминеральной смеси в выбоину дорожного покрытия. После укладки смеси в выбоину покрытия, согласно рекомендациям, открывается движение транспортных средств, что способствует дополнительному уплотнению смеси в выбоине [32]. В процессе движения транспортных средств достижение требуемых характеристик слоя материала в выбоине зависит от многих факторов, в том числе от осевой нагрузки транспортных средств, интенсивности движения, толщины слоя материала, погодных условий, технологических режимов работы машины и т.д.

Необеспечение требуемых характеристик битумоминеральной смеси при использовании струйно-инъекционного метода при укладке смеси объясняется тем, что при взаимодействии битумной эмульсии с мелкими частицами минерального материала происходит быстрый распад эмульсии. При этом вязкость битумной пленки на поверхности минеральной частицы возрастает. При этом образование структуры уложенного материала происходит не за счет энергии удара и заклинивания частиц минерального материала между собой, а за счет контактирования частиц по поверхности битумной пленки на минеральных частицах.

Эмульсия представляет собой коллоидно-дисперсную систему из двух несмешивающихся жидкостей, одна из которых распределена (диспергирована) мелкими каплями в другой. Как уже было сказано выше, в промышленном производстве получают эмульсии двух типов: прямую (частицы битумы диспергированы в воде) и обратную (капли воды равномерно диспергированы в вяжущем). Общий вид эмульсии (при многократном увеличении) приведен на рис. 2.1 [1].

Одной из основных способностей эмульсии является то, что она обладает способностью к распаду в течение определенного промежутка времени, в результате чего образуется пленка органического вяжущего материала, которая прочно обволакивает поверхность каменного материала (заполнителя). Вязкость битумной эмульсии зависит от концентрации битума в эмульсии и температуры.

В качестве минеральных материалов для приготовления смесей используют щебень фракции 2,5...15 мм. Для приготовления смеси ЭМС используют катионную битумную эмульсию. Ее преимуществом являются быстрые сроки структурообразования и высокие физико-механические характеристики получаемого материала. За счет высокой активности катионного эмульгатора вяжущее вступает во взаимодействие с минеральным наполнителем в момент соприкосновения с ним. Эмульгатор, адсорбируясь на поверхности минеральных частиц, вытесняет воду, что способствует более высокой водоустойчивости пленки вяжущего на поверхности зерен минерального материала. По мере испарения воды из смеси происходит распад эмульсии, увеличение концентрации битумных частиц и слияние их между собой в сплошную пленку за счет образования адгезионных и когезионных связей. Период полного формирования структуры происходит медленно из-за наличия воды (после распада эмульсии) в межзерновом пространстве смеси, что способствует сравнительно длительному набору прочности по времени.

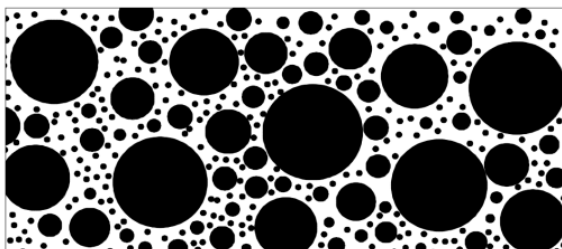


Рис. 2.1. Вид эмульсии (при многократном увеличении)

2.1. ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ

В качестве вяжущего материала применяют быстрораспадающиеся катионные битумные эмульсии классов ЭБК-1. При устойчивой температуре воздуха 15 °С и выше допускается применение эмульсии класса ЭБК-2, которая имеет меньшую скорость распада. По техническим показателям эмульсии должны отвечать требованиям ГОСТ 18659. Массовая доля битума с эмульгатором должна составлять 60...70%. Эмульсия должна выдерживать испытания на сцепление пленки вяжущего со щебнем, применяемым для устранения повреждений. Область применения битумных эмульсий различных классов приведена в табл. 2.1. При приготовлении эмульсии применяют битум марок БНД 60/90 и 90/130, которые должны отвечать требованиям ГОСТ 22245.

Оценка качества битумной эмульсии проводится в соответствии ГОСТ-18659–81. Температура эмульсии должна находиться в пределах 40...80 °С. При выполнении работ расход эмульсии зависит глубины выбоины и составляет от 10,5 до 15% от объема материала, что составляет при пересчете на битум от 6,8 до 9,8% битума [1].

2.1. Область применения битумных эмульсий

Класс битумной эмульсии	Область применения
ЭБК-1	Устройство поверхностной обработки. Ямочный ремонт дорожных покрытий. Подгрунтовка
ЭБК-2	Устройство поверхностной обработки. Устройство оснований дорожных конструкций способом пропитки. Приготовление черного щебня и пористых щебеночных смесей для устройства оснований дорожных одежд
ЭБК-3	Приготовление плотных эмульсионно-минеральных смесей для устройства покрытий и слоев износа. Укрепление откосов земляного полотна. Приготовление грунтовых смесей. Обеспыливание грунтовых дорог

Повышенное содержание битума в выбоине при эксплуатации дорожного покрытия способствует миграции битума из нижней части выбоины вверх, что приводит к обратной пропитке щебня. В то же время избыток битума при высокой температуре воздуха приводит к снижению прочностных показателей асфальтобетона в выбоине. Оптимальная температура катионоактивной битумной эмульсии во время ведения ремонтных работ равна 71...80 °С.

Для ямочного ремонта применяют щебень фракции 5...10 мм с маркой по прочности не менее 1200, показателем морозостойкости не менее 50, маркой по износу И I и с содержанием пылевидных и глинистых частиц не более 1%, и отвечающий требованиям ГОСТ 8267. Щебень обрабатывается катионоактивной битумной эмульсией класса ЭБК-1 согласно ГОСТ 18659. Содержание битума в битумной эмульсии должно составлять $60 \pm 2\%$. Эмульсия должна выдерживать испытания на водостойчивость пленки согласно требованиям ГОСТ 18659. При испытании рекомендуется использовать щебень фракции 5...10 или 10...15 мм. В зависимости от глубины выбоины, применяют щебень фракции 5...10 и 5...8 мм. При глубине повреждения до 3 см, оптимальной является фракция щебня 5...8 мм. Щебень должен быть чистым, фракционированным и кубовидной формы. При наличии грязи и пленки пыли рекомендуется щебень промывать водой. Наличие зерен пластинчатой (лещадной) формы не должно превышать 15% по массе. Рекомендуемые параметры зернового состава щебня фракции 5...10 (8) мм представлены в табл. 2.2 [1]. Соотношение подаваемых в выбоину щебня и эмульсии регулируется. Весовое соотношение битумная эмульсия–щебень должно находиться при этом в пределах 0,21...0,24 [1]. Используемый для ремонта щебень имеет свою естественную температуру.

Нормы расхода используемых материалов при ремонте асфальтобетонного покрытия автодороги указаны в табл. 2.3 [1].

2.2. Зерновой состав щебня, рекомендуемый для применения при струйном методе ремонта выбоин

Диаметр отверстий контрольных сит, мм	2,5	5	10(8)	15
Полные остатки на ситах, % по массе	90...100	80...90	до 10	до 0,5

2.3. Нормы расхода материалов на 100 м² ямочного ремонта

Наименование материалов	Единица измерения	Количество материала при толщине слоя, мм						
		40	50	60	70	80	90	100
Щебень 5-10	м ³	5,96	7,15	8,58	10,0	10,92	12,28	13,65
Битумная эмульсия	т	1,75	2,10	2,52	2,94	3,20	3,68	4,00

После очистки поверхности выбоины под давлением воздуха производится подгрунтовка места ремонта катионоактивной битумной эмульсией, которая распыляется через форсунки, закрепленные на насадке рукава для транспортировки щебня. Битумная эмульсия подается по трубопроводам к форсункам с помощью компрессора, развивающего давление до 0,10 МПа, что обеспечивает хорошую транспортировку эмульсии, а также образование эмульсионной завесы в распылительном кольце, проходя через которую, частицы щебня идеально обволакиваются.

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ УКЛАДКЕ В ВЫБОИНУ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Согласно принятым рекомендациям по применению струйно-инъекционного метода для ремонта дорожных покрытий нежесткого типа считается, что при укладке смеси в выбоину достигается требуемая прочность уложенного слоя материала, достаточная для движения транспортных средств. Считается, что полученная от воздушного потока энергия частицы материала достаточна для обеспечения требуемой плотности материала при укладке, которая расходуется на образование контактов при взаимодействии с ранее уложенными частицами.

Однако результаты мониторинга автомобильных дорог с ремонтными участками по устранению выбоин с применением данного метода показали, что коэффициент уплотнения и водонасыщение материала в выбоине покрытия имеют достаточно низкие показатели. Достижимые характеристики материала при укладке (плотность, коэффициент уплотнения, водонасыщение) зависят как от технологических параметров при укладке (масса частиц, скорость перемещения, высота подачи материала), так и свойств битумной эмульсии (содержания

битума и температуры эмульсии на поверхности частицы). С учетом влияния на результат укладки смеси разных факторов в рекомендациях допускается, что дальнейшее уплотнение может осуществляться за счет осевой нагрузки от транспортных средств.

Анализ работ, посвященных применению данного метода при ремонте дорожных покрытий нежесткого типа, показал, что отсутствует единое мнение по вопросу его применения без дополнительного уплотнения смеси [12, 20].

Отмечалось, что после укладки битумоминеральной смеси в выбоину покрытия открывается движение транспортных средств. В процессе движения транспортных средств осевая нагрузка машины через контактную поверхность шины с покрытием передается на уложенный материал выбоины. Анализ транспортного потока на автомобильных дорогах показал, что осевые нагрузки на дорожные конструкции очень часто превышают допустимые. Поэтому в зависимости от нагрузки и характеристик уложенного материала может происходить как уплотнение уложенной смеси, так и разуплотнение. Следовательно, качество ремонтных работ и срок службы отремонтированных участков покрытия зависит не только от технологических режимов работы машины при укладке битумоминеральной смеси, но и нагрузки на дорожные покрытия. На рисунке 2.2 представлена поверхность дорожного покрытия после укладки смеси инъекционно-струйным методом.

Из представленного рисунка видно, что при укладке смеси, за счет энергии частиц смеси при движении и соударения частиц между собой происходит разброс материала на определенной площади покрытия, что способствует дополнительному расходу минерального материала.

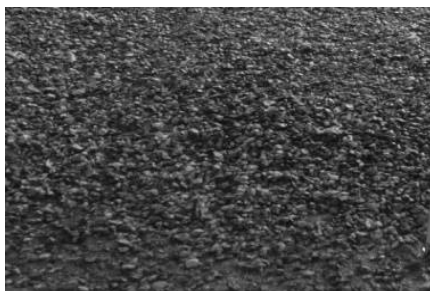


Рис. 2.2. Поверхность покрытия выбоины после укладки минерально-битумной эмульсии инъекционно-струйным методом



Рис. 2.3. Структура уложенного слоя материала после заполнения выбоины инъекционно-струйным методом

Экспериментально установлено, что коэффициент уплотнения смеси в выбоине покрытия, без дополнительного уплотнения, составляет 0,4...0,8, а определить прочность на сжатие образца не представляется возможным из-за его разрушения. На рисунке 2.3 представлен образец после укладки смеси струйно-инъекционным методом без дополнительного уплотнения.

Из представленного рисунка видно, что при укладке смеси без дополнительного уплотнения образуется высокопористая структура слоя материала, что характеризует малую прочность и высокое водонасыщение. Получение таких характеристик при укладке смеси объясняется тем, что вязкость битумной пленки на поверхности минеральной частицы имеет высокое значение, что способствует образованию контактов зерен материала между собой за счет сил сцепления без достижения достаточной плотности. Схематично структура смеси представлена на рис. 2.4.

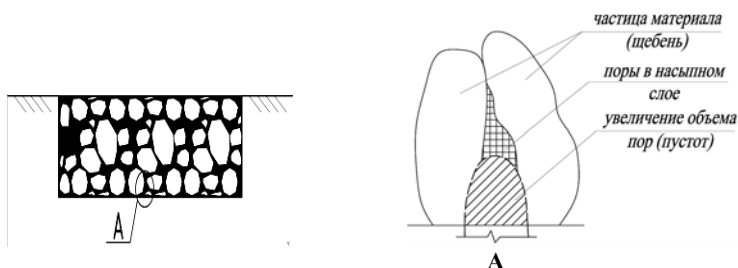


Рис. 2.4. Структура уложенного слоя материала после заполнения выбоины и увеличения пустот (пористости) за счет пристеночного эффекта на границе насыпного слоя

Оценим изменение пористости слоя гранитного щебня толщиной 0,05 м, имеющего основную фракцию с размерами частиц в диапазоне 0,005...0,01 м, применяемой для ямочного ремонта дорожных покрытий. Насыпная плотность гранитного щебня, согласно паспорту продукции, составляет $\rho_n = 1390 \text{ кг/м}^3$. Истинная плотность зерна для используемого гранита составляет $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$. В этом случае пористость объема насыпного слоя составляет

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_n}{\rho} = 1 - \frac{1390}{2500} = 0,444. \quad (2.1)$$

Считаем, что у границы слоя на расстоянии, равном половине диаметра частицы, концентрация частиц вдвое меньше и, соответственно, пористость вдвое выше, чем в объеме насыпного слоя. Тогда для насыпного слоя толщиной h при среднем значении диаметра частиц d и пористости в объеме насыпного слоя ε_0 , с учетом двухстороннего ограничения слоя, имеем

$$\varepsilon = \frac{2\varepsilon_0 d + \varepsilon_0(h-d)}{h} = \frac{\varepsilon_0(h+d)}{h} = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{d}{h} \right). \quad (2.2)$$

Для рассматриваемого случая $h = 0,05 \text{ м}$, $d = 0,0075 \text{ м}$ и $\varepsilon_0 = 0,444$ фактическое значение величины пористости составит

$$\varepsilon = 0,444 \left(1 + \frac{0,0075}{0,05} \right) = 0,51. \quad (2.3)$$

Таким образом, увеличение значения пористости ремонтного слоя по сравнению со значением пористости для объема гранитного щебня составляет порядка 15%.

Выполним оценку оптимального соотношения размеров частиц и количества крупной и мелкой фракций зернистого материала из условия максимального заполнения частицами мелкой фракции пустот между крупными частицами на примере слоя шарообразных частиц.

Принимаем, что крупные частицы имеют плотную укладку по вершинам тетраэдров, а мелкие частицы имеют максимально возможный диаметр, при котором они могут поместиться в центре каждого тетраэдра (рис. 2.5).

В этом случае общее количество крупных и мелких частиц можно считать одинаковым.

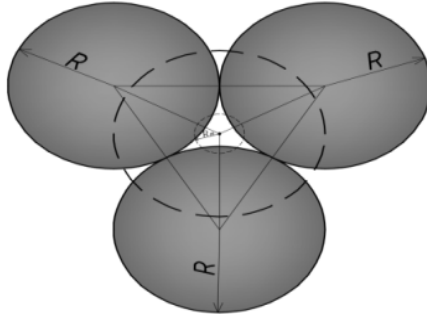


Рис. 2.5. Схема заполнения мелкими частицами пустот между крупными частицами материала (вид сверху)

Обозначим радиус крупной частицы через R . Тогда сторона тетраэдра будет равна $2R$, а радиус описанной окружности равен $R_t = R\sqrt{\frac{3}{2}}$. Следовательно, максимальный радиус мелкой частицы равен

$$R_m = R_t - R = R\sqrt{\frac{3}{2}} - R = R\left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1\right). \quad (2.4)$$

Массовое соотношение фракций для рассматриваемого случая равно отношению кубов радиусов частиц

$$D = \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{3}{2}} - 1}\right)^3 = 88,1. \quad (2.5)$$

Таким образом, оптимальное соотношение диаметров крупных и мелких частиц составляет 1 к $\left(\sqrt{\frac{3}{2}} - 1\right)$ (для крупных частиц со средним диаметром 0,0075 м оптимальный диаметр мелких частиц составляет 0,0017 м).

Оптимальное массовое содержание мелкой фракции составляет

$$M = \frac{1}{D+1} = 0,011 = 1,1\%. \quad (2.6)$$

При прохождении минерального материала через камеру с распыленным битумом происходит обволакивание поверхности частиц материала битумной эмульсией, при этом температура эмульсии находится в пределах 70...80 °С [1]. Однако из-за перемещения частицы в воздушном потоке и малой толщине слоя эмульсии на поверхности частицы температура эмульсии на поверхности частицы понижается и можно считать, что ее величина равна температуре минеральных частиц, т.е. температуре окружающего воздуха. Зависимость вязкости эмульсии от температуры представлена, по данным В. И. Алферова, на рис. 2.6.

Из представленных данных на рис. 2.6 видно, что с повышением температуры эмульсии, ее вязкость понижается и при температуре свыше 100 °С стабилизируется. Данная зависимость может быть представлена уравнением

$$\eta = 623,67e^{-0,027t}, \text{ сСт}, \quad (2.7)$$

где t – температура эмульсии, °С. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Исследованиями В. И. Алферова установлено, что вязкость битумной эмульсии зависит от содержания битума (рис. 2.7) [1].

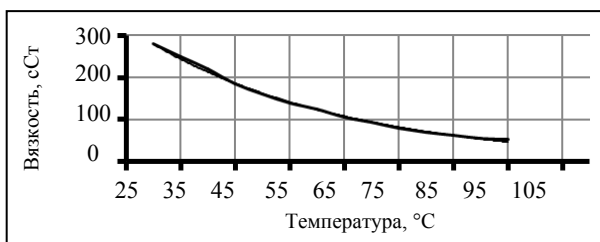


Рис. 2.6. Зависимость вязкости битумной эмульсии от температуры

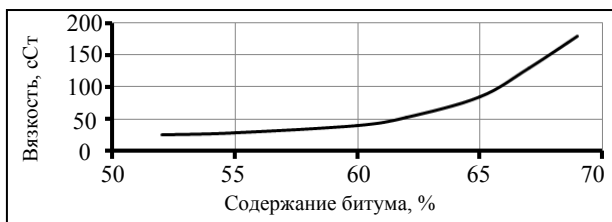


Рис. 2.7. Зависимость вязкости битумной эмульсии от содержания битума

Представленную зависимость вязкости битумной эмульсии от содержания битума можно аппроксимировать зависимостью

$$\eta = 0,88b^2 - 0,97b + 2740, \text{ сСт}, \quad (2.8)$$

где b – содержание битума в эмульсии, %. Коэффициент корреляции равен 0,986.

Для установления общей зависимости влияния вязкости битумной эмульсии от процентного содержания битума представим данные на рис. 2.6 в относительных значениях, принимая вязкость эмульсии при содержании битума 60% за единицу. Обозначим полученную относительную величину вязкости за коэффициент влияния содержания битума на вязкость битумной эмульсии ($K_{эм}$). Влияние содержания битума в эмульсии на значение $K_{эм}$ представлено на рис. 2.8.

Численное значение $K_{эм}$ от содержания битума в эмульсии может быть определено по формуле

$$K_{эм} = 0,001b^3 - 0,218b^2 + 12,05b - 221,5, \quad (2.9)$$

где b – содержание битума в эмульсии, %. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,998.

Учитывая, что вязкость битумной эмульсии зависит от содержания битума и температуры, общую зависимость вязкости битумной эмульсии от температуры и содержания битума в эмульсии можно представить в виде

$$\eta = 623,67K_{эм}e^{-0,027t}. \quad (2.10)$$

При укладке битумоминеральной смеси в выбоину дорожного покрытия частица смеси за счет кинетической энергии, при перемещении контактирует с уложенным ранее материалом. Расположение частиц относительно друг друга зависит от энергии частицы при контакте и вязкости битумной эмульсии.



Рис. 2.8. Зависимость $K_{эм}$ от содержания битума в эмульсии

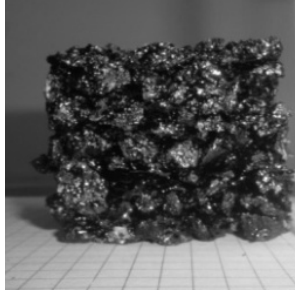


Рис. 2.9. Структура образца уложенного материала в выбоину покрытия (без уплотнения) инъекционно-струйным методом

Согласно рекомендациям, при контакте происходит прессование частиц материала, что должно способствовать требуемой плотности уложенного слоя материала. Однако, как показали исследования, обеспечение высокой плотности за счет энергии удара при контактировании не происходит (рис. 2.9).

Из представленного образца на рис. 2.9 видно, что контакт частиц при укладке смеси в выбоину покрытия происходит за счет сил вязкости эмульсии в зоне контакта. Для обеспечения процесса прессования при контактировании частиц смеси, а следовательно, повышения плотности материала при укладке смеси, необходимо перемещение частиц материала относительно друг друга в момент возникновения контакта, что возможно только за счет повышения кинетической энергии частицы при ударе.

2.3. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА БИТУМОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Для уточнения влияния состава битумоминеральной смеси на прочностные характеристики асфальтобетона, с учетом влияния технологических режимов, проведены исследования при разном содержании битумной эмульсии и разных фракционных составах смеси. Для проведения исследования в лабораторных условиях была изготовлена установка, моделирующая процесс укладки смеси в производственных условиях. Для обеспечения постоянного воздушного потока использована воздуходувка «Husqvarna» производительностью $780 \text{ м}^3/\text{ч}$ с устройством боковой загрузки материала, обработанного битумной эмульсией (рис. 2.10). Для формования образцов были изготовлены круглые формы диаметром 0,1 м с разной высотой для укладываемой смеси.



Рис. 2.10. Установка Husqvarna производительностью 780 м³/ч с устройством боковой загрузки материала на шланге

В качестве минерального материала применялся чистый, промытый и подогретый до 50 °С гранитный щебень фракции 2,5...10 мм кубовидной формы по ГОСТ 8267–93. В качестве вяжущего использовалась быстрораспадающаяся катионная битумная эмульсия 60 %-ной концентрации – ЭБК 1 по ГОСТ 5128–2003. Оптимальная температура битумной эмульсии во время проведения работ была принята равной 71...80 °С.

Расчет скорости подачи материала проводился в зависимости от производительности установки (780 м³/ч). Скорость подачи материала была изменена путем использования насадок (сопло) различных диаметров. При использовании насадок с диаметром 100 мм (как на используемом оборудовании для ямочного ремонта покрытий в реальных производственных условиях типа Мадпатчер), расчетное значение скорости – 27,6 м/с. Расчетное значение скорости при использовании насадки с диаметром 80 мм – 41,35 м/с. При попытке увеличения скорости путем дальнейшего уменьшения диаметра выходного отверстия воздуходувки наблюдался выброс материала через боковое отверстие в шланге.

Подача материала осуществлялась с высот 90, 60 и 30 см от выходного отверстия воздуходувки до поверхности заполнения форм (рис. 2.11).

После выдерживания образцов в формах в течение 30 сут проводилось определение характеристик битумоминеральной смеси. Определение прочности образцов проводилось на прессе ИП-100. Испытания образцов проводились согласно ГОСТ 12801–98, полученные экспериментально физико-механические характеристики сравнивались с нормативными значениями ГОСТ 9128–2009. Обработка полученных результатов проводилась с применением полного факторного эксперимента.

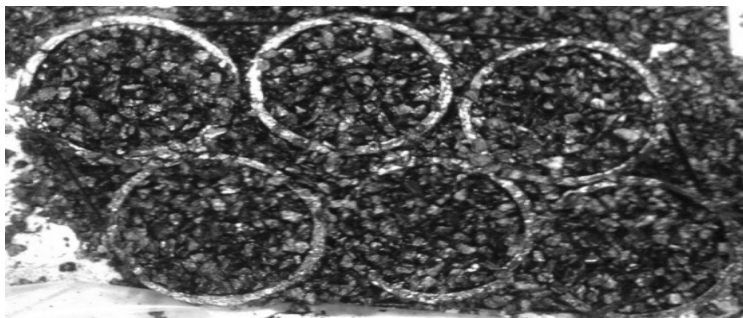


Рис. 2.11. Цилиндрические формы, заполненные битумоминеральной смесью при укладке струйным методом

Для исследования характеристик битумоминеральной смеси использованы размеры трех фракций щебня: 5...10; 5...15 и 5...20 мм (табл. 2.4). Результаты испытаний образцов, после укладки смеси в выбоину, с разным гранулометрическим составом и процентным отношением эмульсии представлены в табл. 2.5.

Из представленных результатов видно, что содержание битумной эмульсии в смеси зависит от гранулометрического состава минеральной части смеси. С уменьшением размера фракций потребное количество эмульсии возрастает. Если для смеси с размером фракции 5...20 мм весовое соотношение битумная эмульсия–щебень находится при этом в пределах 0,21...0,24, то для смеси с размером фракции 5...10 мм весовое соотношение битумная эмульсия–щебень находится при этом в пределах 0,09...0,11.

Для наглядности данные табл. 2.5 представлены на рис. 2.12.

2.4. Гранулометрический состав битумоминеральной смеси

Размер фракции, мм	Полные остатки на ситах, % по массе					
	Диаметр отверстий контрольных сит, мм					
5...20 мм	1,25	2,5	5	10	15	20
	3,5	15	16,5	36	23	6
5...15 мм	1,5	4,0	51,5	37,5	5,5	–
5...10 мм	5,5	10,2	80	4,3	–	–

**2.5. Значения предела прочности смеси
при разном гранулометрическом составе
и процентном содержании битумной эмульсии**

№ п/п	Фракция	% эмульсии	Прочность, МПа	Средняя величина прочности, МПа
1	5...20	5	0,51	0,64
2	5...20	10	0,65	
3	5...20	15	0,56	
4	5...15	20	1,53	1,39
5	5...15	25	1,63	
6	5...15	30	1,01	
7	5...10	15	2,24	2,19
8	5...10	20	2,29	
9	5...10	25	2,04	

Установлено, что предел прочности битумоминеральной смеси зависит от гранулометрического состава и процентного содержания эмульсии. На рисунке 2.13 представлены результаты испытаний в относительных значениях прочности битумоминеральных смесей при разных гранулометрических составах.

Из представленных на рис. 2.13 данных видно, что с увеличением максимального размера фракции минерального материала прочность смеси снижается. Это можно объяснить тем фактом, что с увеличением размера фракции скорость частицы смеси при контакте с поверхностью выбоины снижается, что влияет на достигаемую прочность уложенного материала.

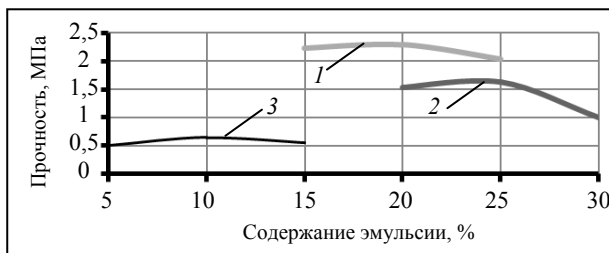


Рис. 2.12. Зависимость предела прочности от гранулометрического состава смеси при разном содержании эмульсии:

1 – фракция 5...10 мм; 2 – фракция 5...15 мм; 3 – фракция 5...20 мм



Рис. 2.13. Влияние максимального размера фракции материала на прочность образца

Зависимость прочности смеси от максимального содержания размера частиц минерального материала можно определить по формуле

$$R_{сж}^{20} = -2,2 \ln(D) + 7,3, \text{ МПа}, \quad (2.11)$$

где D – максимальный размер минерального материала, мм. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Рекомендациями определено, что оптимальная температура катионоактивной битумной эмульсии во время ведения ремонтных работ должна быть в пределах 71...80 °С. Экспериментально установлено, что изменение температуры битумной эмульсии в пределах от 50 до 70 °С не влияет на достигаемую прочность и водонасыщение материала (табл. 2.6).

Из представленных результатов видно, что содержание битумной эмульсии в смеси зависит от гранулометрического состава минеральной части смеси. С уменьшением размера фракций потребное количество эмульсии возрастает.

Если для смеси с размером фракции 5...20 мм весовое соотношение битумная эмульсия–щебень находится при этом в пределах 0,21...0,24, то для смеси с размером фракции 5...10 мм весовое соотношение битумная эмульсия–щебень находится при этом в пределах 0,09...0,11.

На рисунке 2.14 представлены результаты испытаний на прочность битумо-минеральных смесей при разных гранулометрических составах при укладке струйно-инъекционным методом.

В целях установления аналитических зависимостей между влияющими факторами на качество укладки битумо-минеральных смесей струйно-инъекционным методом полученные результаты анализирова-

лись с применением полного факторного эксперимента (ПФЭ). По плану эксперимента были заданы: количество опытов $n = 8$, число повторений опытов $m = 3$ и количество влияющих факторов – 3. По результатам обработки необходимо установить влияние рассматриваемых факторов на коэффициент уплотнения k прочность f , МПа, плотность ρ , г/см³, водонасыщение r , %. В качестве влияющих факторов определены: x_1 – скорость подачи материала (минимальное и максимальное значения $x_1^- = 27,6$, $x_1^+ = 41,5$); x_2 – высота подачи материала (минимальное и максимальное значения $x_2^- = 30$, $x_2^+ = 90$); x_3 – содержание эмульсии в смеси (минимальное и максимальное значения $x_3^- = 10$, $x_3^+ = 20$).

В качестве примера рассмотрим вывод уравнения для коэффициента уплотнения k . Исходная матрица планирования эксперимента представлена в табл. 2.7.

2.6. Влияние температуры эмульсии при укладке смеси на прочность при стандартном уплотнении

№	Температура, °С	Прочность, МПа	Плотность, г/см ³	W, %
1	50	1,81	2,2	4,01
2	50	1,9	2,21	5,2
3	50	2,04	2,21	5,95
4	70	1,83	2,22	4,65
5	70	2,0	2,06	3,9
6	70	2,15	2,17	3,43



Рис. 2.14. Влияние размера фракции материала на прочность образца

2.7. Исходная матрица планирования ПФЭ

№ эксперимента	Изучаемые факторы			Результаты опытов		
	x_1	x_2	x_3	k_1	k_2	k_3
1	–	–	–	0,78	0,79	0,79
2	+	–	–	0,79	0,80	0,79
3	–	+	–	0,72	0,74	0,72
4	+	+	–	0,82	0,82	0,82
5	–	–	+	0,80	0,77	0,79
6	+	–	+	0,81	0,80	0,79
7	–	+	+	0,81	0,84	0,79
8	+	+	+	0,80	0,86	0,83

Определяем для каждого фактора центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной z_i от натуральной x_i величины. Результаты представлены в табл. 2.8.

Для каждого эксперимента определяем средние выборочные результаты \bar{k}_j и строим матрицу планирования с учетом всех взаимодействий и средних значений отклика (табл. 2.9).

Определяем коэффициенты уравнения регрессии (табл. 2.10).

2.8. Кодирование факторов

Факторы	Верхний уровень x_i^+	Нижний уровень x_i^-	Центр $x_i^0 = \frac{x_i^+ + x_i^-}{2}$	Интервал варьирования $\lambda_i = \frac{x_i^+ - x_i^-}{2}$	Зависимость кодированной переменной от натуральной $z_i = \frac{x_i - x_i^0}{\lambda_i}$
x_1	41,5	27,6	34,55	6,95	$z_1 = \frac{x_1 - 34,55}{6,95}$
x_2	90	30	60	30	$z_2 = \frac{x_2 - 60}{30}$
x_3	20	10	15	5	$z_3 = \frac{x_3 - 15}{5}$

2.9. Матрица планирования для обработки результатов

№ эксперимента	Факторы			Взаимодействия				Результаты опытов			Среднее результатов
	z_1	z_2	z_3	z_1z_2	z_1z_3	z_2z_3	$z_1z_2z_3$	k_1	k_2	k_3	\bar{k}_j
1	-	-	-	+	+	+	-	0,78	0,79	0,79	0,79
2	+	-	-	-	-	+	+	0,79	0,80	0,79	0,79
3	-	+	-	-	+	-	+	0,72	0,74	0,72	0,73
4	+	+	-	+	-	-	-	0,82	0,82	0,82	0,82
5	-	-	+	+	-	-	+	0,80	0,77	0,79	0,79
6	+	-	+	-	+	-	-	0,81	0,80	0,79	0,8
7	-	+	+	-	-	+	-	0,81	0,84	0,79	0,81
8	+	+	+	+	+	+	+	0,80	0,86	0,83	0,83

2.10. Коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициенты	Формула	Значение
b_0	$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \bar{k}_j$	0,69
b_1	$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 z_{j1} \bar{k}_j$	0,016
b_2	$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 z_{j2} \bar{k}_j$	0,00025
b_3	$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 z_{j3} \bar{k}_j$	0,013
b_{12}	$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 z_{j1} z_{j2} \bar{k}_j$	0,011
b_{13}	$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 z_{j1} z_{j3} \bar{k}_j$	-0,009
b_{23}	$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 z_{j2} z_{j3} \bar{k}_j$	0,012
b_{123}	$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 z_{j1} z_{j2} z_{j3} \bar{k}_j$	-0,01

2.11. Расчет выборочных дисперсий

j	k_1	k_2	k_3	\bar{k}_j	$(k_{j1} - \bar{k}_j)^2$	$(k_{j2} - \bar{k}_j)^2$	$(k_{j3} - \bar{k}_j)^2$	S_j^2
1	0,78	0,79	0,79	0,79	0,000044	0,000011	0,000011	0,000033
2	0,79	0,80	0,79	0,79	0,000011	0,000044	0,000011	0,000033
3	0,72	0,74	0,72	0,73	0,000100	0,000225	0,000025	0,000175
4	0,82	0,82	0,82	0,82	0,0000017	0,000007	0,000002	0,000005
5	0,80	0,77	0,79	0,79	0,000178	0,000278	0,000011	0,000233
6	0,81	0,80	0,79	0,8	0,000100	0,000000	0,000100	0,000100
7	0,81	0,84	0,79	0,81	0,000011	0,000711	0,000544	0,000633
8	0,80	0,86	0,83	0,83	0,000900	0,000900	0,000000	0,000900

Рассчитываем дисперсию воспроизводимости $S_{\{f\}}^2$ (табл. 2.11).

Вычисленные коэффициенты уравнения регрессии представлены в табл. 2.12.

Дисперсия воспроизводимости и среднее квадратическое отклонение коэффициентов соответственно имеют следующие вычисленные значения: $S_{\{f\}}^2 = 0,00025$ и $S_{\text{коэф}} = 0,003$. Находим на основе таблиц распределения Стьюдента $t_{\text{кр}} = 2,12$. Следовательно,

$$t_{\text{кр}} S_{\text{коэф}} = 2,12 \cdot 0,003 = 0,0068.$$

Сравнивая полученное значение с коэффициентами уравнения регрессии, представленными в табл. 2.12, видим, что все коэффициенты являются значимыми, кроме b_2 и b_{13} . Получаем уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$k = 0,69 + 0,016z_1 + 0,013z_3 + 0,011z_1z_2 + 0,012z_2z_3 - 0,01z_1z_2z_3. \quad (2.12)$$

2.12. Коэффициенты уравнения регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
0,69	0,016	0,0025	0,013	0,011	-0,009	0,012	-0,01

Проверяем полученное уравнение на адекватность по критерию Фишера. Для этого определяем значения параметра по полученному уравнению регрессии (подставляя +1 или -1 вместо z_j в соответствии с номером j эксперимента из табл. 2.12):

$$\begin{aligned}\tilde{k}_1 = 0,69; \quad \tilde{k}_2 = 0,69; \quad \tilde{k}_3 = 0,61; \quad \tilde{k}_4 = 0,7; \quad \tilde{k}_5 = 0,68; \\ \tilde{k}_6 = 0,71; \quad \tilde{k}_7 = 0,698; \quad \tilde{k}_8 = 0,73.\end{aligned}$$

Вычисляем остаточную дисперсию

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{3}{8-6} \sum_{j=1}^8 (\tilde{k}_j - \bar{k}_j)^2 = 0,12$$

и расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{расч}} = 0,0021$. Табличное значение критерия $F_{\text{табл}}$ находим из таблиц критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по соответствующим степеням свободы: $k_1 = n - r = 8 - 6 = 2$ и $k_2 = n(m - 1) = 8 \cdot 2 = 16$, т.е. $F_{\text{табл}} = 3,63$. Так как $F_{\text{расч}} = 0,0021 < F_{\text{табл}} = 3,63$, то уравнение регрессии (4) адекватно.

Проведем интерпретацию полученной модели (2.12):

$$k = 0,69 + 0,016z_1 + 0,013z_3 + 0,011z_1z_2 + 0,012z_2z_3 - 0,01z_1z_2z_3. \quad (2.13)$$

Из уравнения видно, что наименьшее влияние оказывают фактор z_2 (высота подачи материала) и двойное влияние факторов z_1z_3 , так как их коэффициенты равны нулю. При факторах z_1z_3 коэффициенты положительны, это означает, что с увеличением этих факторов увеличивается отклик, т.е. увеличивается скорость подачи материала и содержание эмульсии в смеси. То же самое можно сказать и про взаимодействие факторов z_1z_2 и z_2z_3 . Коэффициент при $z_1z_2z_3$ отрицательный, это означает, что с уменьшением указанного взаимодействия значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать.

Записываем уравнение регрессии (2.14) в натуральных переменных, подставляя вместо z_i их выражения через x_i , используя выражения из табл. 2.8.

$$\begin{aligned}k = 0,69 + 0,016 \frac{x_1 - 34,55}{6,95} + 0,013 \frac{x_3 - 15}{5} + 0,011 \frac{x_1 - 34,55}{6,95} \frac{x_2 - 60}{30} + \\ + 0,012 \frac{x_2 - 60}{30} \frac{x_3 - 15}{5} - 0,01 \frac{x_1 - 34,55}{6,95} \frac{x_2 - 60}{30} \frac{x_3 - 15}{5}.\end{aligned} \quad (2.14)$$

После преобразований, получаем уравнение вида

$$k = 1,02 - 0,0097x_1 - 0,0075x_2 - 0,02x_3 + 0,0002x_1x_2 + 0,0006x_1x_3 + 0,0004x_2x_3 - 0,0000096 x_1x_2x_3. \quad (2.15)$$

На рисунке 2.15 показано поведение коэффициента уплотнения от фактора x_1 при фиксированных значениях факторов x_2 (высота подачи материала, см) и x_3 (процентное содержание битумной эмульсии в смеси, %).

Из графика на рис. 2.15 видно, что полученный коэффициент уплотнения материала не соответствует требуемому нормативному значению по СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.0603–85, которое для асфальтобетона из холодных смесей должно быть не ниже $-0,96$.

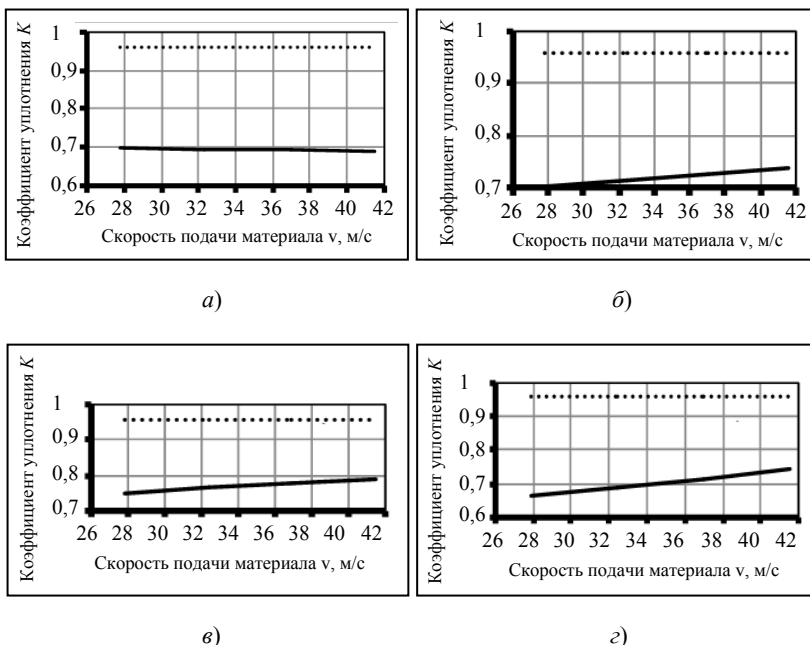


Рис. 2.15. Коэффициент уплотнения материала:

$a - x_2 = 30, x_3 = 10$; $б - x_2 = 30, x_3 = 20$; $в - x_2 = 90, x_3 = 10$ $г - x_2 = 90, x_3 = 20$;

— — коэффициент уплотнения; - - - нормативное значение по СНиП 3.0603–85 – 0,96

Полученные экспериментальные данные опровергают существующие мнения производителей и пользователей оборудования для струйно-инъекционного метода, что его преимуществом является отсутствие процесса уплотнения при укладке материала в выбоине, принимая во внимание тот факт, что материал подается в выбоину со скоростью, за счет чего и происходит равномерное и плотное распределение укладываемого материала в выбоине. Увеличение скорости и высоты подачи материала существенно не влияет на показатель коэффициента уплотнения смеси.

Полученные экспериментальные данные опровергают существующие мнения, что преимуществом струйно-инъекционного метода является отсутствие процесса уплотнения при укладке материала в выбоине дорожного покрытия. Кроме того, увеличение скорости и высоты подачи материала существенно не влияет на показатель коэффициента уплотнения смеси.

Вычисленные значения параметров отличаются от средних в допустимых пределах (табл. 2.13). Результаты проведенного полного факторного эксперимента являются достоверными.

На основании полученных значений получены аналитические зависимости влияния переменных факторов на конечный результат уплотнения.

2.13. Результаты проверки уравнений

Вычисленные значения параметров				Средние значения параметров			
f_j	ρ_j	r_j	k_j	\tilde{f}_i	$\tilde{\rho}_j$	\tilde{r}_j	\tilde{k}_j
0,30	1,73	7,35	0,70	0,37	1,76	7,75	0,79
0,26	1,70	9,88	0,69	0,31	1,7	10,06	0,79
0,40	1,84	8,57	0,66	0,45	1,84	8,5	0,73
0,30	1,81	9,94	0,74	0,37	1,84	9,96	0,82
0,38	1,95	2,21	0,71	0,45	1,76	2,73	0,79
0,41	1,99	1,84	0,74	0,49	1,8	2,15	0,8
0,48	2,01	2,30	0,75	0,55	1,82	2,7	0,81
0,45	2,05	3,17	0,79	0,51	1,86	3,64	0,83

В результате применения вышеизложенного алгоритма получили уравнения в натуральных переменных для исследуемых параметров: прочности (1), плотности (2), водонасыщения (2) и

$$f = 0,354 - 0,0065x_1 + 0,0032x_2 - 0,0056x_3 - 0,00006x_1x_2 + 0,0005x_1x_3 . \quad (2.16)$$

На рисунке 2.16 показано поведение функции прочности материала от фактора x_1 при фиксированных значениях факторов x_2 (высоты подачи материала, см) и x_3 (процентного содержания битумной эмульсии в смеси, %).

Из графика на рис. 2.16 видно, что полученная прочность материала не соответствует требуемому нормативному значению по ГОСТ 9128–2009, которое для асфальтобетона из холодных смесей должно быть не ниже – 2,2 МПа. Увеличение скорости и высоты подачи материала не влияет на показатель прочности смеси.

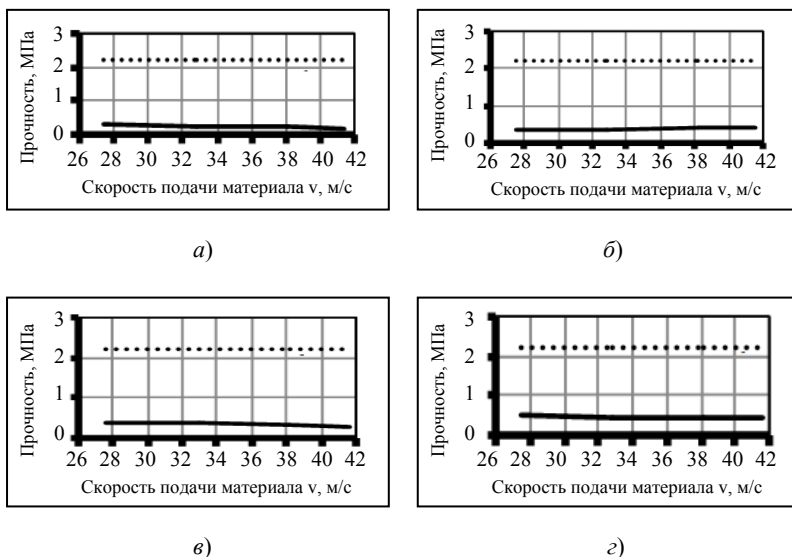


Рис. 2.16. Функция прочности материала:
 а – $x_2 = 30$ см, $x_3 = 10\%$; б – $x_2 = 30$ см, $x_3 = 20\%$;
 в – $x_2 = 90$ см, $x_3 = 10\%$; з – $x_2 = 90$ см, $x_3 = 20\%$;
 ———— – прочность; - - - - - нормативное значение по ГОСТ 9128–2009 (2,2 МПа)

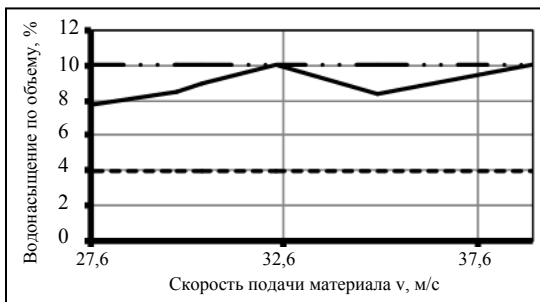
Зависимость плотности уложенной битумоминеральной смеси от высоты подачи материала и процентного содержания битумной эмульсии имеет вид

$$\rho = 1,64 - 0,0073x_1 + 0,0025x_2 + 0,0103x_3 + 0,0005x_1x_3 - 0,00007x_2x_3. \quad (2.17)$$

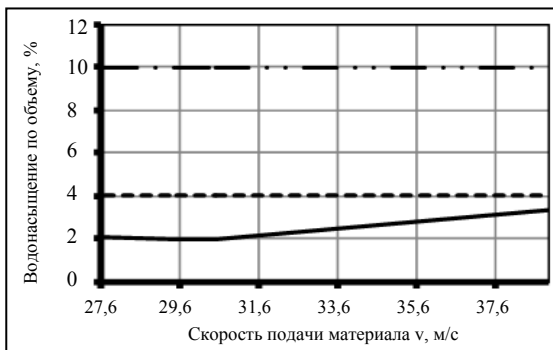
Зависимость водонасыщения от переменных факторов имеет вид

$$r = -3,04 + 0,52x_1 + 0,158x_2 + 0,36x_3 - 0,0043x_1x_2 - 0,0296x_1x_3 - 0,0099x_2x_3 + 0,00029x_1x_2x_3. \quad (2.18)$$

На рисунке 2.17 показано поведение функции водонасыщения материала от фактора x_1 при фиксированных значениях факторов x_2 (высоты подачи материала, см) и x_3 (процентного содержания битумной эмульсии в смеси, %).



а)



б)

Рис. 2.17. Функция водонасыщения материала:

а — $x_2 = 30,90$ см; $x_3 = 10\%$; б — $x_2 = 30,90$ см; $x_3 = 20\%$;

— водонасыщение; — — — — норм. значение 4% по ГОСТ 9128–2009;

— · · — норм. значение 10% по ГОСТ 9128–2009

Из графика на рис. 2.17 видно, что полученное значение показателя водонасыщения материала соответствует требуемому нормативному значению по ГОСТ 9128–2009, которое для данного типа пористых смесей должно быть в интервале от 4 до 10% по объему. При 20% эмульсии по объему значение показателя водонасыщения ниже нормативного (смесь чрезмерно подвижная). При этом важно отметить, что 20% содержание эмульсии по объему и средняя скорость подачи материала (30...32 м/с) используется в производственных условиях по рекомендациям производителей. Увеличение высоты подачи материала существенно не влияет на показатель водонасыщения смеси.

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИТУМОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ

Битумоминеральная смесь, уложенная с применением струйно-инъекционного метода, за счет энергии удара при формировании структуры материала в выбоине покрытия обладает упругими, пластическими и вязкими свойствами в зависимости от содержания эмульсии и размеров частиц смеси. Битумоминеральная смесь является дисперсной системой, состоящей из двух фаз: мелких твердых частиц, распределенных в вязкой жидкости – эмульсии. Состояние такой системы можно определить с помощью теории реологии, которая рассматривает среду как однородную, обладающую механическими свойствами, которые определяются на основании экспериментальных данных с конкретным материалом. Это дает возможность представить систему как математическую модель, описываемую уравнениями, связывающими напряженное состояние модели с деформациями при нагружении модели разными нагрузками:

$$\sigma = E\lambda + \mu\dot{\lambda}, \text{ МПа}, \quad (2.19)$$

где E – модуль упругости, МПа; μ – коэффициент вязкости, Нс/мм; λ – деформация, мм.

На основании данных экспериментальных исследований по напряженно-деформированному состоянию образца материала определяется сила сопротивления уложенной смеси силовому воздействию нагрузки от рабочих органов машин. При уплотнении материала под действием приложенной нагрузки возникают упругие, вязкие и пластические деформации. Упругие свойства материала характеризуются модулем упругости, определяемым по формуле

$$E_y = \sigma/\lambda_y, \text{ МПа}, \quad (2.20)$$

где σ – напряженное состояние материала, МПа; λ_y – упругая относительная деформация, рассчитанная по зависимости

$$\lambda_y = \lambda/d, \quad (2.21)$$

где λ – величина упругой деформации слоя материала при действии нагрузки, мм; d – диаметр штампа, мм.

Величиной, характеризующей связь между приращением нагрузки на уплотняемый материал и его деформацией, принято оценивать модулем деформации (ГОСТ 30146). Численное значение модуля деформации определяется по формуле [18]

$$E_d = \sigma d_{ш}/\lambda_{п}, \quad (2.22)$$

где $d_{ш}$ – диаметр штампа, м; $\lambda_{п}$ – полная деформация слоя материала при действии нагрузки, м.

При действии нагрузки на слой материала в нем возникают процессы, связанные с внутренним сопротивлением перемещения частиц слоев материала, зависящие от скорости приложения нагрузки, которые принято характеризовать коэффициентом вязкого сопротивления. Численное значение коэффициента вязкого сопротивления можно определить по формуле [19]

$$\eta = \sigma/(d\lambda_1/dt), \text{ Н с/м}, \quad (2.23)$$

где λ_1 – необратимая относительная деформация. Способность уплотненного материала воспринимать нагрузку без разрушения и образования остаточной деформации характеризуется его прочностью. В общем виде уравнение имеет вид

$$R_{сж} = Q/F, \text{ МПа}, \quad (2.24)$$

где Q – нагрузка на поверхность образца материала, Н; F – площадь контактной поверхности штампа, м².

Под действием приложенной нагрузки к поверхности уплотняемого слоя материала возникает сила сжатия слоя материала или сила сопротивления действующей нагрузке. В теории реологии эта величина выражена через коэффициент жесткости (коэффициент упругости) и рассчитывается по формуле

$$K_{ж} = \sigma/\lambda_{п} , \text{ Н/мм}, \quad (2.25)$$

σ – напряжение на поверхности контакта штампа с материалом, МПа;
 $\lambda_{п}$ – полная деформация слоя материала при действии нагрузки, мм;

Испытание образцов проводилось на одноосное сжатие, соответствующее состоянию уложенной смеси в выбоину дорожного покрытия при воздействии пневматической шиной или вибрационными плитами. Принятая методика проведения испытания позволяет оценить прочность образца смеси при постоянной скорости нагружения, а также деформативность при динамических режимах нагружения. Деформативность битумоминеральной смеси как вязкоупругого тела определялась в диапазоне линейной вязкоупругости, при условии сохранения прямой пропорциональности между напряжениями и деформациями.

Установлено, что эффективность процесса уплотнения дорожно-строительного материала зависит от скорости изменения напряженного состояния материала, т.е. $d\sigma/dt$. Однако с увеличением скорости изменения напряженного состояния материала (при работе катков, вибрационных машин) влияние на развитие деформации уменьшается [25].

При действии нагрузки на уложенный материал в выбоине покрытия в нем возникают упруго-вязко-пластические деформации, зависящие от свойств материала и действующей нагрузки. С этой целью проведены экспериментальные исследования по определению реологических характеристик битумоминеральной смеси при действии разных нагрузок.

2.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИТУМОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ

Для выявления закономерностей воздействия нагрузки от транспортных средств на битумоминеральную смесь с использованием математических моделей необходимо определить реологические характеристики применяемого материала, которые зависят от свойств материала. С этой целью проведены исследования, при которых смесь укладывалась в форму с разной толщиной слоя. Перед испытаниями смесь предварительно уплотнялась. Определение реологических характеристик битумоминеральной смеси осуществлялось путем нагружения штампа площадью $3,85 \text{ см}^2$ переменной нагрузкой при заданной величине деформации.

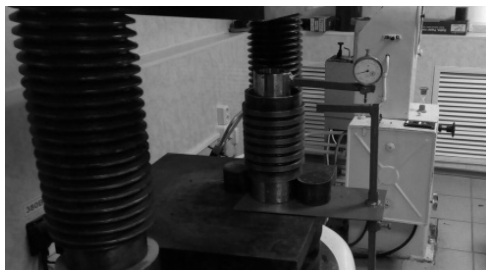


Рис. 2.18. Определение деформаций при нагрузке образцов из битумоминеральной смеси

На поверхность образца устанавливался штамп, и верхняя плита прессы останавливалась выше уровня поверхности штампа на 1,5...2,0 мм. Для измерения деформации индикатор, прикрепленный к стойке, размещался таким образом, чтобы подвижная часть его ножки касалась верхней плиты прессы. После этого начинали нагружать образец материала через штамп (рис. 2.18).

По заданной величине деформации материала с помощью индикатора часового типа определялась нагрузка на штамп. При достижении заданной величины деформации материала нагрузка на штамп снималась, и производился замер упругой деформации. Затем процесс нагружения материала нагрузкой, при заданной деформации материала, повторялся. За результат принималось округленное до второго десятичного знака среднее арифметическое значение испытаний трех образцов. Расхождение между ними не превышало 10%. Результаты испытания смеси при разной толщине слоя представлены в табл. 2.14.

2.14. Результаты измерения деформаций смеси под действием нагрузки при разной толщине укладываемого слоя (в абсолютных значениях)

Напряжение, МПа	Деформация, мм								
	толщина слоя – 0,03 м			толщина слоя – 0,05 м			толщина слоя – 0,07 м		
	$\lambda_{\text{п}}$	λ_{y}	λ_{o}	$\lambda_{\text{п}}$	λ_{y}	λ_{o}	$\lambda_{\text{п}}$	λ_{y}	λ_{o}
1,04	3,6	1,9	1,7	3,9	1,8	2,1	7,7	2,6	5,1
2,08	8,2	2,6	5,6	5,7	1,9	3,8	8,5	2,7	5,8
2,6	8,9	2,7	6,2	6,9	2,3	4,6	8,5	2,8	5,7
3,12	10,0	2,9	7,1	7	2,5	5	11,2	3,0	8,2

На основании полученных результатов рассчитаны реологические характеристики битумоминеральной смеси в зависимости от толщины укладываемого слоя смеси в выбоину, которые представлены в табл. 2.15 – 2.17 и в виде графиков на рис. 2.19.

На рисунке 2.19 представлена относительная остаточная деформация материала при действии нагрузки в зависимости от толщины слоя.

2.15. При толщине слоя 0,03 м

Напряжение, МПа	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$E_{\text{упр}}$, МПа	$E_{\text{деф}}$, МПа	η	$K_{\text{жест}}$
1,04	0,05	0,027	38,5	20,8	44,05	0,29
2,08	0,117	0,037	56,2	17,8	60,99	0,258
2,6	0,128	0,039	67,5	20,3	74,71	0,29
3,12	0,143	0,041	76,10	21,8	88,45	0,31

2.16. При толщине слоя 0,05 м

Напряжение, МПа	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$E_{\text{упр}}$, МПа	$E_{\text{деф}}$, МПа	η	$K_{\text{жест}}$
1,04	0,056	0,026	40	18,3	38,66	0,27
2,08	0,081	0,026	40	25,7	62,46	0,36
2,6	0,099	0,033	78,8	26,3	79,10	0,38
3,12	0,100	0,036	86,7	31,2	87,39	0,44

2.17. При толщине слоя 0,07 м

Напряжение, МПа	$\lambda_{\text{полн}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$E_{\text{упр}}$, МПа	$E_{\text{деф}}$, МПа	η	$K_{\text{жест}}$
1,04	0,11	0,037	28,1	9,45	31,42	0,135
2,08	0,12	0,039	53,3	17,3	61,0	0,24
2,6	0,12	0,040	65,0	21,6	77,61	0,31
3,12	0,16	0,043	72,6	19,5	85,25	0,28



Рис. 2.19. Зависимость относительной остаточной деформации смеси от напряжения:

1 – толщина слоя 0,03 м; *2* – 0,05 м; *3* – 0,07 м

Развитие деформации материала под действием нагрузки зависит от его способности сопротивляться внешней нагрузке. На рисунке 2.20 представлена зависимость коэффициента жесткости смеси от напряжения при разной толщине укладываемых слоев смеси.

Из представленных данных на рис. 2.20 видно, что коэффициент жесткости смеси, как и относительная деформация материала, зависит от напряжения в зоне контакта и толщины слоя при укладке. Для слоя толщиной 0,03 м, с учетом предварительного уплотнения смеси, увеличение напряжения в зоне контакта приводит к снижению модуля жесткости. Объясняется это развитием пластической деформации и переориентацией частиц смеси под действием нагрузки. В дальнейшем, с повышением контактного напряжения, коэффициент жесткости смеси повышается. С повышением толщины слоя укладки (0,05 м и более) аналогичный процесс наблюдается при более высоких напряжениях.



Рис. 2.20. Зависимость модуля жесткости смеси от напряжения:

1 – толщина слоя 0,03 м; *2* – 0,05 м; *3* – 0,07 м

В зависимости от степени разрушения дорожной одежды размеры выбоины по глубине могут достигать больших размеров. Из данных табл. 2.15 – 2.17 видно, что с увеличением толщины слоя характеристики смеси меняются. В таблице 2.18 представлены данные при укладке смеси в выбоину толщиной 0,1 м.

Из представленных в табл. 2.18 данных видно, что с увеличением деформации материала при действии нагрузки, его способность сопротивляться внешней нагрузке возрастает. На рисунке 2.21 представлена зависимость коэффициента жесткости слоя смеси от деформации.

2.18. Характеристики битумоминеральной смеси при толщине слоя 0,1 м

Деформация, h , мм	Напряжения, σ , н/мм ²	$K_{н} = Q/\lambda$, кН/мм	$K = \sigma/\lambda$, Н/мм	$\eta = \sigma/d\lambda/dt$, Нс/мм
1	0,05	0,2	0,05	7,2
4	0,77	0,75	0,19	15,4
8	1,74	0,85	0,21	34,8
12	2,92	0,95	0,24	58,4
16	4,59	1,12	0,29	91,8
20	6,41	1,25	0,32	128,2
24	8,15	1,33	0,339	163,0
28	10,8	1,51	0,385	216,0
32	15,1	1,84	0,47	302,6

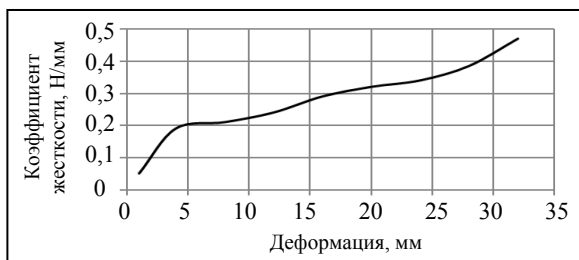


Рис. 2.21. Зависимость коэффициента жесткости смеси от деформации

Из рисунка 2.21 видно, что на зависимости коэффициента жесткости от деформации можно выделить три участка, характерных для уплотнения битумоминеральной смеси.

На начальной стадии действия нагрузки, при деформации слоя материала 4...5 мм между коэффициентом жесткости и деформацией смеси имеется линейная зависимость. При увеличении нагрузки и развитии деформации (5...9 мм) значение коэффициента жесткости смеси стабилизируется, что можно объяснить смещением частиц смеси в горизонтальной плоскости. При дальнейшем росте контактных напряжений линейная зависимость между коэффициентом жесткости и деформацией смеси возрождается.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в начальный период действия нагрузки на уложенный материал развитие деформации пропорционально росту коэффициента жесткости. При достижении определенной деформации, зависящей от достигаемой плотности смеси при укладке и толщины слоя, возникают пластические деформации, в результате которых коэффициент жесткости стабилизируется или понижается (рис. 2.19, 2.20).

На этой стадии уплотнения материала, за счет касательных напряжений, происходит перемещение частиц в горизонтальной плоскости. В результате уменьшается пористость материала, повышается плотность и, как следствие, при увеличении контактных напряжений повышается коэффициент жесткости смеси.

Установлено, что коэффициент вязкого сопротивления смеси зависит от напряженного состояния смеси. С увеличением напряжения в зоне контакта поверхности выбоины с шиной автомобиля происходит сближения частиц смеси под действием нагрузки, что способствует уменьшению толщины битумной пленки на поверхности частиц и возникновению между ними контактов. Образование контактов между частицами смеси приводит к возникновению в контактной зоне напряжений как сжимающих (нормальных), так и касательных (сдвигающих). Увеличение нагрузки на поверхность выбоины приводит к росту напряжений в контактной зоне частиц, и при достижении определенной величины (в зависимости от начальной плотности, толщины слоя, вязкости эмульсии), касательные напряжения превышают сопротивление сдвигу в горизонтальной плоскости.

При этом условии возникают деформации сдвига, что является причиной прекращения роста коэффициента жесткости смеси или его снижения (см. рис. 2.21). В качестве величины, характеризующей смещение частиц в горизонтальной плоскости, принят коэффициент вязкого сопротивления. Экспериментально установлено, что численное значение коэффициента вязкого сопротивления зависит от напряженного состояния слоя материала (рис. 2.22).



Рис. 2.22. Зависимость коэффициента вязкого сопротивления смеси от напряжения при разной толщине слоя смеси:
 1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,07 м

Из представленных данных на рис. 2.22 видно, что коэффициент вязкого сопротивления смеси зависит от напряженного состояния уплотняемого материала. В процессе уплотнения материала происходит образование контактов между частицами смеси, что приводит к увеличению сопротивления перемещения частиц смеси относительно друг друга. Численное значение коэффициента вязкого сопротивления смеси незначительно зависит от толщины уплотняемого слоя смеси.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- установлены зависимости влияния технологических режимов при укладке смеси в выбоину дорожного покрытия (высоты подачи, скорости подачи материала и процентного содержания битумной эмульсии) на коэффициент уплотнения, прочность, плотность и водонасыщение уложенного материала в выбоине;
- определены численные значения реологических характеристик битумоминеральной смеси от действия нагрузки для расчета деформаций с учетом толщины укладываемого слоя смеси;
- содержание битумной эмульсии должно соответствовать фракционному составу битумоминеральной смеси;
- с повышением размера фракций, за счет образования каркасной структуры, прочность материала в выбоине возрастает при одновременном увеличении водонасыщения уложенного материала;
- независимо от толщины слоя при укладке смеси в выбоину, относительная деформация материала подчиняется общей закономерности и может быть представлена логарифмической зависимостью.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕМОНТЕ ВЫБОИН НА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЯХ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Основной задачей при строительстве автомобильных дорог является обеспечение безопасного движения транспортных средств в течение всего периода эксплуатации. При расчете конструктивных параметров автомобильной дороги учитываются факторы, влияющие на ее эксплуатационные характеристики с учетом прогнозируемой интенсивности движения и нагрузки на дорожные одежды. Однако после сдачи дороги в эксплуатацию, через сравнительно короткий срок, на дорожных покрытиях возникают дефекты, связанные как с нарушением технологии при строительстве, так и эксплуатацией дороги. Одним из направлений в увеличении срока службы автомобильных дорог является проведение своевременных и качественных работ по содержанию и ремонту, в том числе, и дорожных покрытий. Несвоевременное устранение дефектов покрытия приводит к ухудшению его состояния, и в дальнейшем, как следствие, к удорожанию работ по приведению в нормативное состояние.

При выполнении работ по ремонту покрытий нежесткого типа применяются разные технологии производства работ, каждая из которых имеет определенные эффективные области применения. В последние годы широкое применение при ямочном ремонте покрытий нежесткого типа находит струйно-инъекционный метод, который относится к скоростному (оперативному) методу ремонта. По затратам и времени выполнения работ он является более эффективным по сравнению с традиционными способами ямочного ремонта покрытий (с применением литых и горячих смесей). Заделка выбоины осуществляется посредством заполнения мелким щебнем, предварительно обработанным битумной эмульсией в камере смешения. Укладка и уплотнение смеси в выбоину покрытия происходит за счет энергии удара частицы с поверхностью материала в выбоине, зависящей от скорости частицы в момент контакта и ее массы (рис. 3.1).

Заполнение выбоины щебнем, обработанным битумной эмульсией, производится с учетом запаса на уплотнение. При этом считают, что скорость перемещения частиц смеси равна скорости воздушного потока, что обеспечивает требуемое уплотнение смеси при ее укладке в выбоину покрытия.

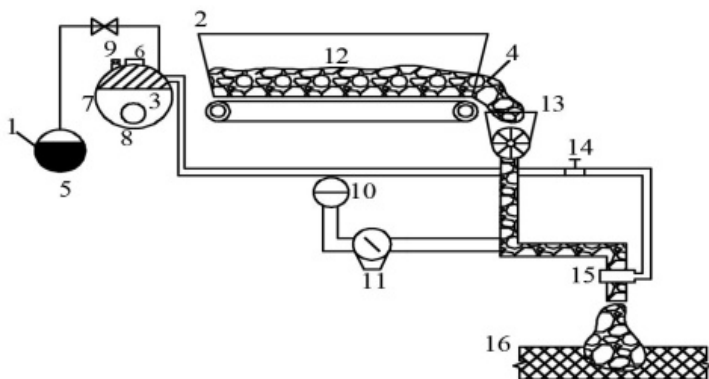


Рис. 3.1. Технологическая схема установки по ремонту выбоин на покрытии струйно-инъекционным способом:

- 1 – жидкость для промывания труб; 2 – воздух; 3 – битумная эмульсия;
 4 – щебень; 5 – емкость для промывочной жидкости;
 6 – кран промывочной жидкости; 7 – для эмульсии; 8 – подогрев эмульсии;
 9 – предохранительный воздушный клапан; 10 – воздушный фильтр;
 11 – нагнетатель воздуха; 12 – бункер с щебнем и транспортер;
 13 – воздушный замок; 14 – эмульсионный кран; 15 – камера смешения
 щебня с эмульсией; 16 – покрытие с выбоиной

После заполнения выбоины битумоминеральной смесью на поверхность ремонтного участка распределяется чистый щебень в целях предотвращения прилипания частиц смеси к шинам транспортных средств при наезде на поверхность выбоины. Окончательное доуплотнение происходит под действием движущихся по участку транспортных средств.

Согласно существующему мнению, преимуществом данного метода ремонта дорожных покрытий является отсутствие процесса уплотнения после укладки смеси в выбоину. Материал подается с высоты 0,6 м от поверхности выбоины со скоростью 30...32 м/с при 20% содержании битумной эмульсии в смеси. В качестве обоснования отсутствия необходимости уплотнения принимается тот факт, что материал (с размером фракций от 2,5 до 10 мм) подается в выбоину с высокой скоростью, что способствует равномерному и плотному распределению укладываемого материала в выбоине. Однако такие выводы не подкреплены экспериментальными исследованиями. Результаты испытания образцов асфальтобетона с мест выполненных работ показали, что прочностные характеристики и водонасыщение асфальтобетона в выбоине не соответствуют требованиям ГОСТ 9128–2009.

3.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УКЛАДКИ И УПЛОТНЕНИЯ БИТУМОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ СТРУЙНЫМ МЕТОДОМ

В отличие от общепринятых методов ремонта выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа укладка смеси в выбоину покрытия при струйно-инъекционном методе осуществляется за счет энергии частиц смеси, получаемой при движении в воздушном потоке воздуховода машины. При выходе из сопла воздуховода некоторые частицы смеси, с учетом расположения в воздушном потоке, в процессе движения смещаются от направления потока. Это приводит к распределению частиц смеси на площади, превышающей поверхность выбоины, что способствует повышенному расходу материала при малой толщине слоя укладки смеси в выбоину, увеличения стоимости производства работ и снижения эффективности применяемого метода. На рисунке 3.2 представлен процесс укладки смеси в выбоину покрытия (рис. 3.2, *a*) и схема движения частицы смеси при укладке (рис. 3.2, *б*) в выбоину дорожного покрытия.

Из представленного рисунка видно, что при укладке смеси в выбоину покрытия некоторые частицы смеси распределяются за пределами выбоины. В таблице 3.1 представлены данные, полученные при проведении экспериментальных работ по ремонту выбоин дорожных покрытий при укладке битумоминеральных смесей.

Из представленных в таблице данных видно, что с увеличением высоты расположения сопла трубы подачи смеси при укладке в выбоину и скорости воздушного потока, потери материала увеличиваются. Распределение материала вблизи границ насыпного слоя смеси отличается от плотности материала в объеме насыпного слоя.

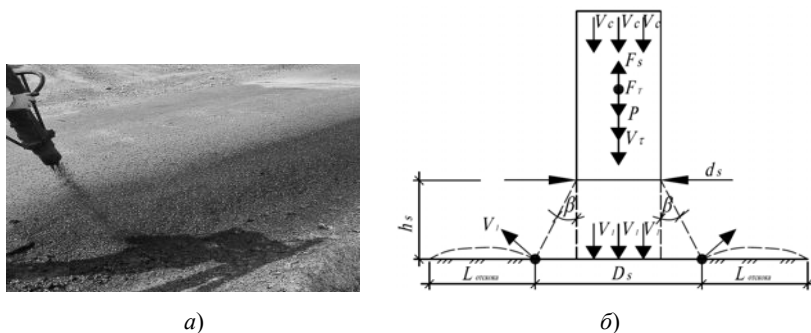


Рис. 3.2. Укладка смеси в выбоину покрытия при струйном методе

3.1. Распределение битумоминеральной смеси по поверхности дорожного покрытия при укладке смеси в выбоину при разной скорости воздушного потока и высоты сопла трубы для укладки смеси

Показатели	Скорость и высота подачи материала, м/с при разной высоте расположения рабочего органа машины, м			
	27,6 м/с при высоте 0,6 м	41,35 м/с при высоте 0,3 м	41,35 м/с при высоте 0,6 м	41,35 м/с при высоте 0,9 м
Общий вес образцов, г	3162,39	3247,77	3655,23	2917,62
Общий расход смеси, г	10 548	12 654	12 654	16 872
Потери материала, г	7385,61	9406,23	8998,77	13 954,38
% потери материала	70,02	74,33	71,11	82,71

Потери материала (щебня) связаны с дополнительным распределением материала в зоне, характеризующейся отскоком частиц смеси от уложенного ранее материала.

3.2. РАСЧЕТ ЗОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕСИ ПРИ УКЛАДКЕ СТРУЙНО-ИНЪЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

С учетом данных, представленных в табл. 3.1, определим долю частиц смеси, совершающих отскок при укладке слоя битумоминеральной смеси и максимальный радиус отскока в зависимости от высоты подачи материала и скорости воздушной струи. При выводе зависимости длины отскока частицы при укладке смеси в выбоину принимаем, что отскок совершают те частицы, которые находятся во внешнем слое струи подачи материала, поскольку только они могут избежать взаимодействия с другими частицами потока. Считаем, что максимальный радиус отскока возможен при абсолютно упругом соударении частиц и незначительном влиянии связующего компонента, поток смеси подается вертикально. Направление и угол отскока частицы материала являются случайными. Принимаем, что начальная скорость

частицы равна v_0 , высота подачи струи равна h_s , начальный диаметр струи равен d_s и угол расширения свободной струи равен β . Тогда диаметр струи в плоскости дорожного покрытия равен

$$D_s = d_s + 2h_s \operatorname{tg}(\beta), \text{ м.} \quad (3.1)$$

Скорость частиц, движущихся в струе, в момент соударения с неподвижными частицами распределенного слоя равна

$$v_1 = \sqrt{v_0^2 + 2gh_s}, \text{ м/с,} \quad (3.2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

С учетом изменения величины пористости по площади распределенного материала, и учитывая, что отскок частиц возможен только в направлениях, где частица находится вне сечения потока, определим долю частиц, которые могут совершить отскок

$$N = 0,375 \left(1 - \frac{(D_s - d)^2}{D_s^2} \right). \quad (3.3)$$

В зависимости от угла отскока α длина отскока составляет

$$L = \frac{v_1^2 \sin(2\alpha)}{g}, \text{ м.} \quad (3.4)$$

Максимальная длина отскока соответствует значению $\sin(2\alpha) = 1$,

т.е. $\alpha = \frac{\pi}{4}$, и составляет

$$L_m = \frac{v_1^2}{g}. \quad (3.5)$$

Тогда максимальный радиус отскока составляет

$$R_m = L_m + 0,5D_s, \text{ м.} \quad (3.6)$$

Рассмотрим движение частицы на участке воздуховода при разгоне частицы в воздушном потоке. При движении потока в вертикальном направлении сверху вниз на частицу действуют сила тяжести (F_T) и сила взаимодействия с потоком воздуха (P). Их уравновешивает равнодействующая сила F_S

$$F_S = F_T + P. \quad (3.7)$$

Сила тяжести частицы равна

$$F_T = m_t g,$$

где m_t – масса частицы.

Сила, действующая на частицу щебня за счет энергии воздушного потока, равна

$$P = \xi S \gamma_v \frac{\Delta v^2}{2g}, \quad (3.8)$$

где ξ – коэффициент сопротивления частицы; S – площадь сечения частицы по нормали к потоку; γ_v – удельный вес воздуха; Δv – разность скоростей потока и частицы

$$F_s = m_t \frac{dv(\tau)}{d\tau}. \quad (3.9)$$

Равнодействующую силу можно определить из выражения

$$m_t \frac{dv(\tau)}{d\tau} = m_t g + \xi S \gamma_v \frac{(v_c - v(\tau))^2}{2g} \quad (3.10)$$

или
$$\frac{dv(\tau)}{d\tau} - k(v_c - v(\tau))^2 = g,$$

где $k = \frac{\xi S \gamma_v}{2g m_t}$.

При начальном условии $v(0) = 0$, имеем

$$v(\tau) = v_c + \frac{-v_c \sqrt{kg} + g \operatorname{tg}(\sqrt{kg}) \tau}{\sqrt{kg} + v_c \operatorname{ktg}(\sqrt{kg}) \tau}. \quad (3.11)$$

Тогда расстояние, на которое перемещается частица за время τ , определяется выражением

$$L(\tau) = \int_0^\tau v(\tau) d\tau = \left(v_c + \frac{g}{kv_c} \right) \tau - \frac{\sqrt{kg}}{\operatorname{ktg}(\sqrt{kg})} \left(1 + \frac{g}{kv_c^2} \right) \ln \left(1 + \frac{v_c \operatorname{ktg}(\sqrt{kg})}{\sqrt{kg}} \tau \right). \quad (3.12)$$

Предложенное математическое описание параметров укладки битумоминеральной смеси в выбоину дорожного покрытия позволяет выбрать рациональный состав смеси и режим ее укладки, а также уточнить представление об особенностях процесса ямочного ремонта.

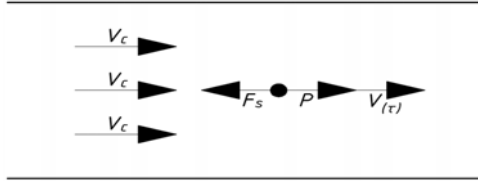


Рис. 3.3. Схема движения частицы в воздушном потоке на горизонтальном участке воздуховода

Распределение вяжущего по поверхности минерального материала зависит от режима движения воздушного потока в воздуховоде. Режим движения воздушного потока влияет также на характер движения частиц, а, следовательно, на величину отскока частицы. Если движение частицы материала происходит по горизонтальному участку воздуховода или близкому к нему, то на частицу в процессе разгона не действует сила тяжести (рис. 3.3).

Тогда

$$m_t \frac{dv(\tau)}{d\tau} = \xi S \gamma_v \frac{(v_c - v(\tau))^2}{2g} \quad (3.13)$$

или

$$\frac{dv(\tau)}{d\tau} - k(v_c - v(\tau))^2 = 0, \quad (3.14)$$

где $k = \frac{\xi S \gamma_v}{2gm_t}$.

При начальном условии $v(0) = v_a$, имеем

$$v(\tau) = v_c + \frac{v_a - v_c}{1 - (v_a - v_c)k\tau}, \quad (3.15)$$

$$L(\tau) = \int_0^{\tau} v(\tau) d\tau = v_c \tau - \frac{\ln(1 + (v_c - v_a)k\tau)}{k}. \quad (3.16)$$

Известно, что движение частицы материала в воздушном потоке характеризуется режимом движения воздушного потока, который определяется критерием Рейнольдса (Re). Значение критерия для частицы в воздушном потоке определяется зависимостью

$$Re = \frac{v_c d \rho_v}{\mu_v}, \quad (3.17)$$

где v_c – скорость воздушного потока, м/с; d – диаметр воздуховода, м; ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; μ_v – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Установлено, что при численном значении критерия Рейнольдса менее 2300, движение воздушного потока соответствует ламинарному движению, а при значении более 2300 – турбулентному. С технологической точки зрения, для обеспечения качественного покрытия эмульсионной пленкой поверхности частицы щебенки, предпочтение следует отдать турбулентному режиму движения воздушного потока.

Определим режимы движения частиц материала в воздухопроводе при подаче частиц материала в камеру смешения машины при разных диаметрах частиц материала и вертикальном разгонном участке. Принимаем (согласно рекомендациям) длину вертикального разгонного участка, равного 0,5 м при скорости перемещения воздушного потока для частицы в $v_c = 27,6$ м/с, диаметре перемещаемой частицы 0,0075 м и диаметре выходного конца патрубка $d_s = 0,1$ м. Частица материала подается на поверхность выбоины с высоты $h_s = 0,6$ м.

При таких условиях численное значение критерия Рейнольдса равно

$$\text{Re} = \frac{v_c \rho_v}{\mu_v} = \frac{27,6 \cdot 0,0075 \cdot 1,2}{2 \cdot 10^{-5}} = 12\,400. \quad (3.18)$$

При значениях критерия Рейнольдса выше 500, коэффициент сопротивления частицы в потоке воздуха (ξ) равен 0,44 [19].

Следовательно, расчетная скорость частицы на уровне дорожного полотна – 4,7 м/с; максимальный радиус отскока – 2,3 м.

С уменьшением диаметра частицы материала (0,002 м) и аналогичных параметров укладки смеси, численное значение критерия Рейнольдса равно 36 000. Расчетная скорость частицы при укладке на уровне дорожного полотна равняется 5,1 м/с, а максимальный радиус отскока частицы 2,69 м.

С увеличением высоты укладки материала ($h_s = 0,9$ м) и повышения скорости воздушного потока ($v_c = 41,35$ м/с), за счет уменьшения диаметра выходного конца патрубка 0,08 м при укладке аналогичных по гранулометрическому размеру частиц материала (0,0075 м), численное значение критерия Рейнольдса равно 18 600. Расчетное значение скорости частицы на уровне дорожного полотна равно 5,5 м/с, а максимальный радиус отскока – 3,1 м.

В реальных условиях производства работ при укладке смеси частица последовательно перемещается за счет энергии воздушного потока сначала на горизонтальном участке длиной 3,5 м и затем на вертикальном участке длиной 0,5 м. Технологические режимы укладки сме-

си соответствуют перемещению частиц материала 0,01 м при выходном диаметре сопла 0,1 м, высоте подачи материала 0,6 м скорости воздушного потока 30 м/с. При таких условиях производства работ численное значение критерия Рейнольдса равняется 16 500, а скорость частицы на уровне дорожного покрытия равняется 5,5 м/с при максимальном радиусе отскока частиц 3,11 м.

Установлено, что с увеличением горизонтального разгонного участка воздуховода, скорость частицы на уровне дорожного покрытия составляет 4,8 м/с, а максимальный радиус отскока 2,3 м.

Результаты моделирования укладки частиц смеси за счет энергии воздушного потока показали, что в отличие от существующих рекомендаций о скорости частицы при укладке в выбоину дорожного покрытия (30...32 м/с) она значительно отличается от реальной.

Полученные значения радиусов отскока частиц являются максимальной теоретической оценкой данной величины, так как в расчетах не учитывается трение частиц о стенки канала в процессе разгона в воздушном потоке и потери энергии частицами из-за наличия эмульсии. Сравнение экспериментальных значений максимальной длины отскока с соответствующим расчетным значением позволяет оценить общую величину потерь энергии частиц.

Поскольку максимальная длина отскока и кинетическая энергия частицы пропорциональны квадрату скорости, то потеря энергии частицы смеси в реальных условиях может быть оценена как

$$E = 1 - \frac{L_e}{L}, \quad (3.19)$$

где L_e – экспериментальное значение максимальной величины отскока.

Экспериментальное значение максимальной величины отскока частицы гравия составляет 1,5 м. Тогда потеря энергии частицы гравия составляет $E = 55\%$.

Разработанная математическая модель процесса укладки слоя битумоминеральной смеси в дорожное покрытие позволяет уточнить технологические режимы укладки смеси в выбоину дорожного покрытия с учетом конструктивных характеристик применяемых машин.

Для установления влияния разных факторов на процесс распределения частиц смеси при производстве ремонтных работ дорожных покрытий нежесткого типа инъекционно-струйным методом использована программа, которая использовалась при определении скорости частиц смеси в момент контакта с материалом в выбоине дорожного покрытия. Отскок (разброс) частиц смеси при укладке в выбоину зави-

сит от кинетической энергии частицы и свойств применяемой битумо-минеральной смеси, которая обладает вязкими свойствами. Зона разброса частиц смеси зависит также и от технологических режимов укладки. В общем виде расстояние отскока будет определяться зависимостью [22]

$$L_{\text{отс}} = f(K_{\text{пз}}; v_{\text{п}}; h; d; \rho; L_{\text{гор}}; L_{\text{вер}}), \quad (3.20)$$

где $K_{\text{пз}}$ – коэффициент потери энергии при отскоке частицы от поверхности выбоины при укладке, определяемый на основании экспериментальных исследований; $v_{\text{п}}$ – скорость воздушного потока, м/с; h – высота подачи материала от поверхности выбоины, м; d – диаметр частицы, мм; ρ – плотность частицы смеси, т/м³; $L_{\text{гор}}$ – длина горизонтального участка подачи воздуха, м; $L_{\text{вер}}$ – длина вертикального участка подачи смеси.

Для установления общей зависимости влияния разных факторов на длину разброса частиц материала при укладке в выбоину дорожного разработана программа. Установлено, что теоретическая величина отскока частицы при ударе с уложенным ранее материалом зависит от скорости воздушного потока в воздухопроводе машины. На рисунке 3.4 представлена зависимость дальности отскока частицы материала от скорости воздушного потока в воздухопроводе.

Установленная связь между скоростью воздушного потока и длиной отскока подчиняется экспоненциальной зависимости и может быть представлена уравнением

$$L_{\text{отс}} = 1,78e^{0,0238v_{\text{п}}}, \quad (3.21)$$

где $v_{\text{п}}$ – скорость воздушного потока в воздуходувке, м/с; коэффициент корреляции равен 0,99.

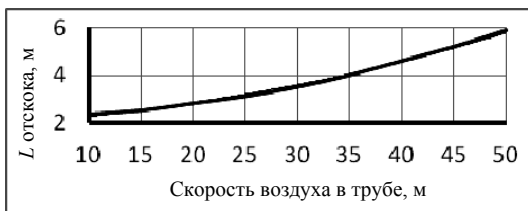


Рис. 3.4. Зависимость дальности отскока частицы материала от скорости воздуха в трубе установки

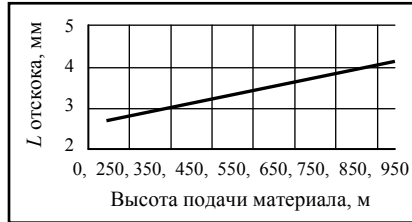


Рис. 3.5. Зависимость дальности отскока щебня от высоты подачи материала

С увеличением высоты подачи смеси в выбоину дорожного покрытия распределение частиц происходит на большую поверхность покрытия, что способствует дополнительному расходу материала при выполнении ремонтных работ и необходимости их удаления после окончания работ. На рисунке 3.5 представлена зависимость длины отскока частиц от высоты подачи смеси при укладке.

С увеличением высоты укладки смеси кинетическая энергия частицы возрастает. Зависимость длины отскока частицы смеси от высоты подачи материала в выбоину может быть определена по формуле

$$L_{\text{отс}} = 2,28e^{0,594h}, \text{ м}, \quad (3.22)$$

где h – высота подачи смеси от поверхности выбоины, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Следовательно, кинетическая энергия частицы возрастает на 29%. Для уточнения влияния высоты подачи смеси на величину отскока частицы при укладке в выбоину представим данные на рис. 3.5 в относительных величинах, произвольно принимая величину отскока при высоте 0,6 м. (табл. 3.2).

Обозначим данную величину через коэффициент влияния высоты на величину отскока частицы (K_h). Зависимость коэффициента K_h от высоты подачи смеси в выбоину покрытия представлена на рис. 3.6.

3.2. Влияние высоты подачи смеси на величину отскока (в относительных значениях)

Высота подачи материала, м	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0
Величина отскока, относительная величина	0,898	0,967	1,0	1,063	1,12

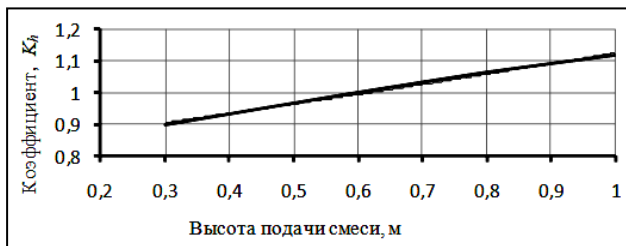


Рис. 3.6. Зависимость коэффициента K_h от высоты подачи смеси в выбоину покрытия

Численное значение коэффициента K_h определяется из уравнения

$$K_h = 0,82e^{0,31h}, \quad (3.23)$$

где h – высота подачи смеси в выбоину покрытия, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Кинетическая энергия частицы зависит от массы частицы, которая зависит от диаметра и плотности частицы. Зависимость длины отскока от диаметра и плотности частицы представлена в табл. 3.3 – 3.6.

3.3. Влияние диаметра частицы смеси на длину отскока

Диаметр, мм	2,5	5,0	8,0	10,0	15,0	20,0
Длина отскока	5,21	3,81	3,21	3,11	3,05	2,69

3.4. Влияние диаметра частицы смеси на длину отскока (в относительных величинах)

Диаметр, мм	2,5	5,0	8,0	10,0	15,0	20,0
Относительная величина (K_d)	1,67	1,225	1,038	1,00	0,98	0,86

3.5. Влияние плотности частицы на длину отскока

Плотность частицы, мм	0,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
Длина отскока	3,36	3,23	3,19	3,03	3,01	2,95	2,90

3.6. Влияние плотности частицы на длину отскока (в относительных величинах)

Плотность частицы, мм	0,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
Относительная величина (K_p)	1,109	1,066	1,053	1,0	0,993	0,973	0,970

Для выявления влияния диаметра и плотности частицы на величину отскока представим данные табл. 3.2 и 3.3 в относительных значениях. Принимаем (произвольно) диаметр частицы 10,0 мм, и ее плотность при 2,4 т/м³ за единицу. Обозначим полученные значения в относительных величинах за коэффициенты, влияющие на величину отскока частицы, через K_d и K_p .

На рисунках 3.7 и 3.8 представлены зависимости коэффициентов K_d и K_p от диаметра частицы и плотности материала.

Численное значение коэффициента K_d определяется по формуле

$$K_d = 2,06d^{-0,3}, \quad (3.24)$$

где d – диаметр частицы, мм. Коэффициент корреляции равен 0,94.

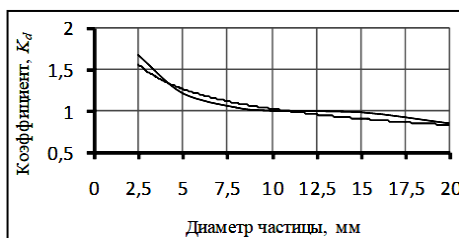


Рис. 3.7. Зависимость коэффициента влияния диаметра частицы на величину отскока

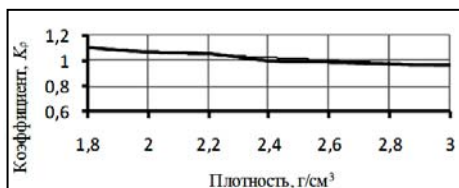


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента влияния плотности материала частицы на величину отскока частицы

Численное значение коэффициента K_p определяется по формуле

$$K_p = 1,35e^{-0,115\rho}, \quad (3.25)$$

где ρ – плотность материал, г/см³. Коэффициент корреляции 0,94.

Из представленных расчетных данных видно, что с увеличением как диаметра, так и плотности частицы, величина отскока частицы смеси уменьшается.

В зависимости от конструктивных параметров машины, общая длина воздухопровода (горизонтальный и вертикальный участок) может иметь разные значения, что влияет на передачу кинетической энергии частице материала при перемещении в воздушном потоке. Для уточнения влияния длины горизонтального и вертикального участков воздухопровода на величину отскока частицы смеси при укладке в выбоину дорожного покрытия смоделированы процессы перемещения частиц при разных длинах. Результаты моделирования представлены в табл. 3.7 – 3.10.

3.7. Влияние длины горизонтального участка воздухопровода на величину отскока

Длина, м	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Величина отскока, м	2,31	2,52	2,64	2,75	3,0	2,99	3,11	3,15

Из представленных в табл. 3.7 результатов моделирования влияния длины горизонтального участка воздухопровода на величину отскока частицы видно, что с увеличением длины горизонтального участка воздухопровода величина отскока частицы смеси увеличивается. Следовательно, увеличивая длину горизонтального участка, можно повысить скорость движения частицы. Для установления влияния длины горизонтального участка воздухопровода на величину отскока представим данные табл. 3.7 в относительных величинах. Условно принимаем длину горизонтального участка воздухопровода 2 м за единицу. Обозначим данную относительную величину коэффициентом влияния горизонтального участка воздухопровода на величину отскока (K_{Lr}). В таблице 3.8 представлены данные табл. 3.6 в относительных значениях.

3.8. Влияние длины горизонтального участка воздухопровода на величину отскока (в относительных величинах)

Длина, м	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Величина отскока в относительных значениях	0,84	0,915	0,96	1,0	1,09	1,05	1,13	1,15

На рисунке 3.9 представлена зависимость коэффициента влияния длины горизонтального участка воздухопровода на величину отскока частицы битумоминеральной смеси.

Численное значение коэффициента K_{L_r} определяется из уравнения

$$K_{L_r} = 0,15 \ln(L_r) + 0,92, \quad (3.26)$$

где L_r – длина горизонтального участка воздухопровода, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,97.

Анализ технологической схемы укладки битумоминеральной смеси инъекционно-струйным методом показал, что после передачи импульса движения частице минерального материала она попадает в камеру смешения с эмульсией и дальше перемещается по вертикальному участку воздухопровода. Длина вертикального участка воздухопровода также влияет на величину кинетической энергии частицы, а, следовательно, на величину отскока частицы при укладке в выбоину покрытия. В таблице 3.9 представлены результаты моделирования влияния длины вертикального участка воздухопровода на величину отскока частицы при укладке.

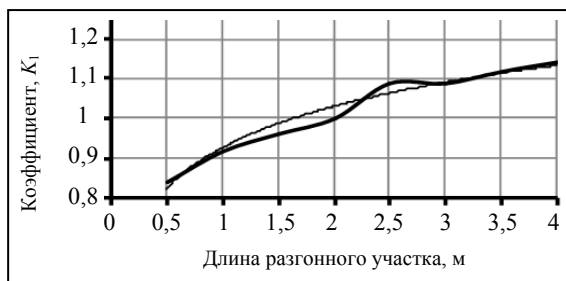


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента влияния длины горизонтального участка воздухопровода на величину отскока частицы битумоминеральной смеси

3.9. Влияние длины вертикального участка воздуховода на величину отскока

Длина, м	0,3	0,5	0,8	1,0
Величина отскока, м	2,31	2,52	2,64	2,75

Представим данные табл. 3.9 в относительных величинах (табл. 3.10). Принимаем длину вертикального участка воздуховода 0,5 м за единицу. Назовем данную величину коэффициентом влияния вертикальной участка воздуховода на величину отскока при укладке смеси (K_{L_b}). На рисунке 3.10 представлена зависимость коэффициента влияния длины вертикального участка воздухопровода на величину отскока частицы битумоминеральной смеси.

Численное значение коэффициента определяется из уравнения

$$K_{L_b} = 1,33L_b^{0,42}, \quad (3.27)$$

где L_b – длина вертикального участка воздуховода, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

3.10. Влияние длины вертикального участка воздуховода на величину отскока (в относительных величинах)

Длина, м	0,3	0,5	0,8	1,0
В относительных значениях	0,8	1,0	1,19	1,34

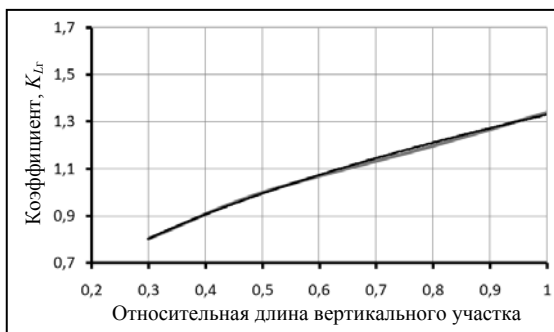


Рис. 3.10. Зависимость коэффициента K_{L_b} от относительной длины вертикального участка воздуховода

Свойства битумоминеральной эмульсии зависят от температуры, в том числе от температуры воздуха. С повышением температуры воздуха распад эмульсии происходит более интенсивно, что способствует проявлению вязких свойств смеси. Влияние температуры воздуха на величину разброса частиц при укладке смеси представлено на рис. 3.11.

Установленная связь между температурой окружающего воздуха и величиной отскока определяется уравнением

$$L_{\text{отс}} = 3,4e^{-0,001t_{\text{в}}}, \quad (3.28)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С. Коэффициент корреляции равен 0,98.

Анализ данных, представленных на рис. 3.11 в относительных значениях показал, что температура воздуха незначительно влияет на величину разброса материала при укладке смеси в выбоину.

Полученные значения отскока частиц являются максимальной теоретической оценкой данной величины, так как в расчетах не учитывается трение частиц о стенки канала в процессе разгона в воздушном потоке и потери энергии частицами из-за наличия эмульсии. Сравнение экспериментальных значений максимальной длины отскока с соответствующим расчетным значением позволяет оценить общую величину потерь энергии частиц.

Учитывая, что длина отскока частицы смеси после ее контакта с поверхностью выбоины покрытия зависит от сохраненной частицей кинетической энергии, которая пропорциональна квадрату скорости, то приблизительно потерю энергии частицы смеси в реальных условиях можно оценить

$$E = 1 - \frac{L_{\text{э}}}{L}, \quad (3.29)$$

где $L_{\text{э}}$ – экспериментальное значение максимальной величины отскока; L – теоретическое значение максимальной величины отскока.

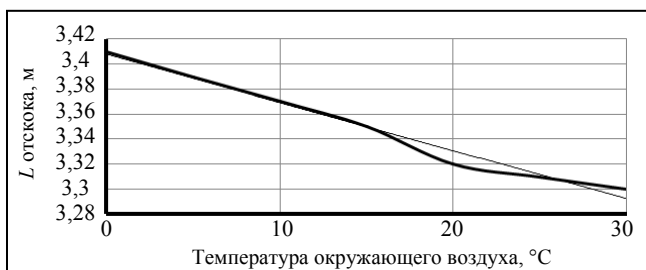


Рис. 3.11. Зависимость дальности отскока щепня от температуры окружающего воздуха

По результатам экспериментальных исследований установлено, что среднее значение максимальной величины отскока частицы гравия составляет 1,5 м. Тогда потеря энергии частицы щебня при отскоке составляет $E = 55\%$. Тогда коэффициент потерь (K_e) энергии при ударе частицы смеси о поверхность выбоины равен 0,2.

В конечном виде, с учетом влияния всех факторов, зависимость величины отскока имеет вид

$$L_{отс} = 1,78K_e K_d K_h K_p K_{L_T} K_{L_B} e^{0,0238v_n}. \quad (3.30)$$

Подставляя численные значения коэффициентов, в конечном виде зависимость для расчета величины отскока частицы смеси при укладке имеет вид

$$L_{отс} = 4,06K_e K_{L_T} K_{L_B} d^{-0,3} e^{0,31h+0,0238v_n-0,115\rho}, \text{ м}, \quad (3.31)$$

где K_e – коэффициент потери энергии частицей при ударе; h – высота подачи материала, м; L – длина горизонтального разгонного участка частицы в воздушном потоке, м; v – скорость подачи воздуха, м/с; t_b – температура воздуха окружающего воздуха, °С. Коэффициент корреляции уравнения 0,99.

С учетом значения величины отскока частиц материала при укладке смеси, радиус распределения материала по поверхности покрытия будет равен

$$R = L_{отс} + D/2 + 2htg\beta, \text{ м}. \quad (3.32)$$

где D – диаметр сопла патрубка машины, м.

Полученная аналитическая зависимость позволяет определить влияние конструктивных параметров машин и технологических режимов на процесс укладки битумоминеральных смесей при струйно-инъекционном методе ремонта дорожных покрытий нежесткого типа. Для выполнения расчетных работ по предложенной методике разработана программа для ЭВМ.

Результаты расчетов по предложенным зависимостям показали:

- с уменьшением диаметра патрубка трубы скорость частицы материала возрастает в среднем на 30% при увеличении максимального радиуса отскока частиц на 25%;

- с увеличением длины разгона частиц материала с 0,5 до 4,0 м увеличение скорости при тех же условиях составляет 26% при увеличении радиуса отскока на 43%;

- увеличение высоты подачи материала способствует увеличению радиуса отскока частиц на дорожном покрытии.

3.3. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ СМЕСИ ПРИ УКЛАДКЕ СТРУЙНО-ИНЪЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Установлено, что при движении транспортных средств в зоне контакта шины с поверхностью возникают напряжения, величина которых влияет на состояние дорожной одежды. Для определения допустимых напряжений в контактной зоне шины с покрытием, с учетом допустимой упругой деформации покрытия, необходимо знать модуль упругости (E_0) слоя покрытия, величина которого зависит от модуля упругости материала покрытия ($E_{\text{упр}}$). Для обеспечения работоспособности покрытия необходимо соблюдение условия $E_0 < E_{\text{упр}}$. Величина модуля упругости слоя покрытия может быть определена по формуле [1]

$$E_0 = K_3 P_{\text{уд}}^{0,33} E_{\text{упр}}^{0,67}, \quad (3.33)$$

где K_3 – эмпирический коэффициент, среднее значение которого равно 0,75; $P_{\text{уд}}$ – величина удельной внешней нагрузки.

Обоснованием утверждения об отсутствии процесса уплотнения при использовании инъекционно-струйного метода для ремонта выбоин на дорожных покрытиях является предположение, что при укладке смеси, за счет энергии частиц битумоминеральной смеси, обеспечивается плотная упаковка частиц при контакте с поверхностью ранее уложенной смеси. При возникновении контактов между частицами при укладке, за счет энергии удара, возникают силы, способствующие перемещению частиц относительно друг друга, что должно обеспечить плотную структуру уложенного материала, а также его прочность и водонепроницаемость. В процессе удара частица смеси за сравнительно малое время получает конечное изменение скорости перемещения, что способствует развитию значительных усилий. При ударе кинетическая энергия частицы переходит в другие виды энергии. Процесс удара характеризуется уравнением

$$\int_0^{\tau} P dt = M(v_1 - v_2), \quad (3.34)$$

где τ – время удара, с; P – развивающееся на поверхности контакта усилие, Н; M – масса частицы, г; v_1 и v_2 – скорость частицы в начале и после удара, м/с.

Процесс удара начинается с момента начала контакта частицы с поверхностью выбоины, т.е. с момента возникновения напряженного состояния материала на контактной поверхности выбоины. Время уда-

ра определяется продолжительностью изменения скорости от максимального значения (v_1) частицы в начале контакта до нуля при укладке смеси в выбоину, или ее изменение после контакта в другой плоскости при отскоке. За это время происходит переход кинетической энергии в другие виды энергии. Принимая скорость v_2 , равной нулю, получаем силу частицы при ударе, равную

$$P = Mv_1/\tau, \text{ Н.} \quad (3.35)$$

При укладке смеси и образования контактов между частицами за счет энергии удара возникают силы, способствующие перемещению частиц относительно друг друга, что должно обеспечить плотную структуру уложенного материала в выбоине покрытия, а также его прочность и водонепроницаемость.

Это возможно при условии, что величина напряжений при возникновении контакта будет равна пределу прочности укладываемого материала. Образование контакта частиц при укладке смеси представлено на рис. 3.12.

Для обеспечения более высоких физико-механических характеристик укладываемой смеси при образовании контактов при укладке необходимо взаимное перемещение частиц относительно друг друга, т.е. должно обеспечиваться условие

$$\sigma_x > \tau_{сд}, \quad \sigma_y > \sigma_{сж}, \quad (3.36)$$

где σ_x, σ_y – проекции напряжений в зоне контакта частицы с материалом выбоины, МПа; $\tau_{сд}$ – напряжения сдвига, МПа; $\sigma_{сж}$ – напряжения на сжатие.

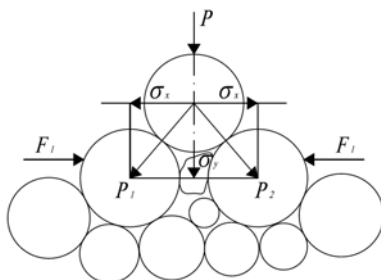


Рис. 3.12. Образование контактов частиц смеси при укладке инъекционно-струйным методом:

P – сила удара частицы при образовании контакта, Н; σ_x и σ_y – напряжения в зоне контакта частиц смеси, МПа; F – сила сопротивления перемещению частиц смеси при возникновении контакта, Н

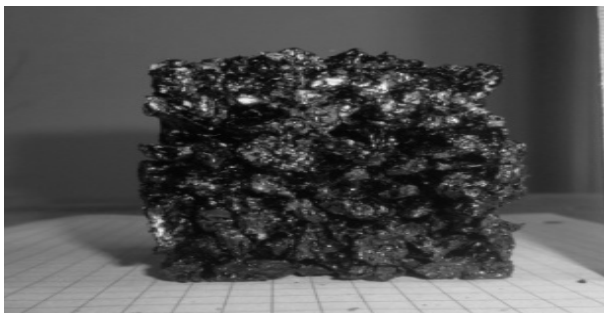


Рис. 3.13. Структура образца материала при укладке инъекционно-струйным методом

Напряжение сдвига при образовании контакта между частицами зависит от свойств смеси и энергии частицы при ударе (скорости частицы при образовании контакта, массы частицы смеси и содержания эмульсии) и может быть принято в пределах $0,17 \dots 0,32$ МПа [6].

Нарушение этих условий способствует образованию контактов при укладке без дополнительного уплотнения материала с высокой пористостью и низкой прочностью уложенного материала (рис. 3.13).

При инъекционно-струйном методе ремонта выбоин дорожных покрытий в качестве минерального материала используется щебень фракции $2,5 \dots 10$ мм [1]. В целях определения массы частиц минерального материала взят объем материала массой $0,5$ кг, разделенный на ситах с разными ячейками по фракциям и подсчитана масса частиц. Установлены массы частиц в зависимости от их диаметра (табл. 3.11).

Скорость перемещения частицы битумоминеральной смеси будет определяться скоростью воздушного потока, образующего воздушодувкой машины. Согласно техническим характеристикам этой группы машин скорость воздушного потока принимается $30 \dots 32$ м/с. Частица каменного материала, подаваемая питателем машины в воздушный поток, захватывается им и дальше перемещается со скоростью воздушного потока. Скорость перемещения частиц, движущихся в струе, в момент образования контакта с неподвижными частицами нанесенного слоя в выбоине определяется уравнением (3.12).

3.11. Масса частицы в зависимости от диаметра

Диаметр частицы, мм	2,5	5,0	10,0	15,0	20,0
Масса, г	0,5	0,8	1,30	1,19	2,4

Контакт частицы при ударе происходит по поверхности с уложенным ранее материалом. Следовательно, в зоне контакта частиц возникают контактные напряжения, величина которых зависит от удельного импульса, приходящегося на единицу контактной поверхности. Величина удельного импульса будет определяться

$$i_{\text{уд}} = mv/F, \quad (3.37)$$

где m – масса частицы, г; v – скорость в момент образования контакта, м/с; F – площадь контакта частицы при ударе, м.

Величина напряжений в зоне контакта зерен минеральных смесей будет определяться зависимостью

$$\sigma_{\text{к}} = i_{\text{уд}}/\tau, \text{ МПа.} \quad (3.38)$$

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА ЧАСТИЦ ПРИ УКЛАДКЕ БИТУМОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ В ВЫБОИНУ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

При укладке частиц битумоминеральной смеси в выбоину дорожного покрытия за счет кинетической энергии частицы происходит пресование материала, что характеризует обеспечение достигаемой плотности материала. Достижение требуемой прочности, пористости и плотности будет обеспечиваться при условии, когда напряжения в зоне контакта частицы с материалом в выбоине покрытия будут соответствовать прочностным характеристикам с уложенного слоя материала. При недостаточной кинетической энергии частицы, возникающие напряжения при ударе частицы со слоем уложенного материала не обеспечивают сближение частиц между собой, что характеризуется повышенной пористостью, низкой прочностью и плотностью уложенного материала.

При соударении частицы с поверхностью слоя материала, при недостаточной энергии удара возникают контакты между частицами смеси за счет вязкости битумоминеральной эмульсии. При энергии удара, превышающей предел прочности уложенного материала, возникающие силы сцепления битумной пленки на поверхности минерального материала незначительны и за счет остаточной энергии при ударе происходит отскок (разброс) частиц минерального материала по поверхности дорожного покрытия. Установлено, что в зоне контакта, в зависимости от возникающих сил, при соударении частиц могут возникать упругие, упругопластические и пластические деформации [21]. Следовательно, для обеспечения качества укладки и уплотнения битумоминеральной смеси в выбоине покрытия необходимо, чтобы напряжения в зоне контакта частицы с материалом соответствовали прочностным характеристикам уложенного ранее материала.

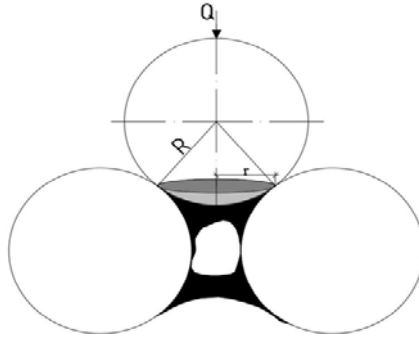


Рис. 3.14. Взаимодействие частицы с материалом выбоины

При взаимодействии частицы материала с полупространством под действием кинетической энергии при ударе частиц образуется контактная площадка с радиусом r , по которой сила распределяется в виде равномерно распределенного давления (рис. 3.14).

Радиус площади распределения среднего напряжения в частице укладываемого материала определяется выражением [21]

$$r = \left\{ 3P(1 - \mu^2)R/4E \right\}^{1/2}, \quad (3.39)$$

где P – нагрузка на контактную площадку, Н; R – радиус частицы материала, мм; E – модуль упругости, МПа; μ – коэффициент Пуассона, принимаем для смеси 0,3.

При ударном взаимодействии частицы сила удара определяется выражением

$$P = mv/\tau, \quad (3.40)$$

где m – масса частицы; v – скорость частицы в момент контакта, м/с; τ – время удара, с.

Принимаем, что при ударе сила приложена к центру тяжести частицы. Результаты расчетов по определению радиуса контактной площадки представлены в табл. 3.12 .

3.12. Параметры частиц битумоминеральной смеси

Диаметр частицы, мм	2,5	5,0	10,0	15,0	20,0
Радиус r , мм	0,35	0,51	0,72	0,91	1,04
Угол z , рад	0,28	0,204	0,144	0,121	0,104

3.13. Значения среднего напряжения сжатия по площади контакта

Диаметр частицы, мм	Масса частицы, кг	Скорость частицы при контакте, м/с	Площадь контактной площадки, мм ²	Величина среднего напряжения, МПа
2,5	0,0005	7,5	0,38	0,56
5,0	0,0008	7,0	0,81	0,24
10,0	0,0013	6,0	1,52	0,042
15,0	0,0019	5,5	2,6	0,014
20,0	0,0024	5,0	3,4	0,0012

В таблице 3.13 с учетом полученных значений контактной поверхности частицы и приложенной силы при соударении частиц между собой рассчитаны средние напряжения по контактной площадке частицы.

Для приготовления битумоминеральной смеси, согласно рекомендациям, применяется высокопрочный гранитный щебень кубовидной формы с размерами фракций 2,5...10 мм. При контакте с эмульсией поверхность частицы покрывается эмульсионной пленкой разной толщины. Поэтому можно допустить, что минеральная частица смеси принимает форму шара. При возникновении контактов между частицами, в процессе распределения частиц при укладке, контактирование частиц происходит по криволинейной поверхности. Известно, что в зоне контакта рабочего органа уплотняющей машины с криволинейной поверхностью (ваlec катка) с уплотняемым материалом распределение напряжений подчиняется степенной зависимости (рис. 3.15) [16, 21].

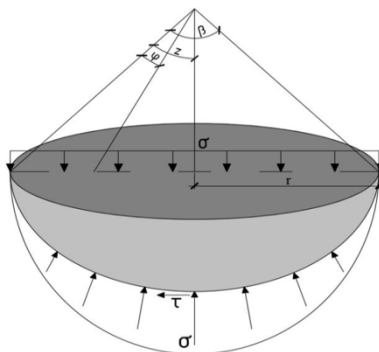


Рис. 3.15. Распределение контактных напряжений в зоне контакта частицы со слоем материала

Из представленного рисунка видно, что в центре контакта возникают максимальные напряжения сжатия, величина которых влияет на процесс укладки уплотнения смеси в выбоине покрытия.

3.5. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА ЧАСТИЦЫ С ОСНОВАНИЕМ ПОКРЫТИЯ

Эффективность процесса уплотнения при укладке смеси будет зависеть от величины напряжений, возникающих в зоне контакта частицы с поверхностью выбоины в момент соударения частицы при укладке. Установлено, что эффективность уплотнения зависит от соответствия максимальных напряжений в зоне контакта частицы с прочностными характеристиками уплотняемого материала [25]. При превышении контактных напряжений предела прочности уплотняемого материала происходит разрушение его структуры, что проявляется в виде пластических деформаций. При малых значениях контактных напряжений достичь требуемых параметров уплотнения практически невозможно. Поэтому для повышения эффективности укладки с одновременным уплотнением (прессованием) частиц материала необходимо обеспечить соответствие контактных напряжений при ударе прочностным характеристикам уплотняемого материала.

Анализ существующих методов для определения контактных напряжений в процессе уплотнения материала показал, что в отличие от имеющихся решений в данной задаче свойства контактируемых тел меняются в широких пределах. С учетом того, что при строительстве дорожных одежд применяемый материал проявляет упруго-вязкопластические свойства, то получение общей зависимости представляет определенные сложности. Принимаем, что контактные напряжения в зоне контакта частицы с поверхностью выбоины действуют в одной плоскости, поэтому расчет напряжений по дуге контакта частицы смеси можно вести как для плоской задачи. В общем виде напряженное состояние частицы в зоне контакта вальца с материалом будет определяться

$$\sigma = \sigma_x + \sigma_y, \text{ МПа}, \quad (3.41)$$

где σ_x , σ_y – составляющие общего напряжения при контакте частиц. Исходя из условия равновесия напряженного состояния материала в зоне контакта вальца, с учетом начальных и граничных условий, взаимодействие вальцов с материалом можно представить системой уравнений

$$\begin{aligned}\sum X = 0; \int_0^z F\sigma \sin(z - \varphi) d\varphi - \int_z^\beta F\sigma \sin(\varphi - z) d\varphi = 0; \\ \sum Y = 0; \int_0^z F\sigma \cos(z - \varphi) + \int_z^\beta F\sigma \cos(\varphi - z) d\varphi = P.\end{aligned}\quad (3.42)$$

Начальные и граничные условия имеют вид
при $\varphi = 0 \rightarrow \sigma_x = \sigma_y = 0$; $\varphi = \beta \rightarrow \sigma_x = \sigma_y = 0$

$$\frac{d\sigma_y}{d\varphi} = 0; \sigma_x = 0.\quad (3.43)$$

С учетом начальных условий определяем a_0 , значение которого равно нулю. В конечном виде решение системы уравнений имеет вид

$$\begin{aligned}\sigma_y = R\beta[\varphi\beta(N - \beta M) + \varphi^2(\beta^2 K - N) + \varphi^3(M - \beta K)]/\Delta; \\ \sigma_x = R\mu\beta[\varphi\beta(W - \beta V) + \varphi^2(\beta^2 U - W) + \varphi^3(V - \beta U)]/\Delta,\end{aligned}\quad (3.44)$$

где φ – угол, переменная величина, характеризующая рассматриваемую точку на дуге контакта частицы с поверхностью выбоины; K, U, M, V, W, N – коэффициенты, зависящие от свойств материала. Численное значение коэффициентов определяется из выражений:

$$\begin{aligned}K = -\beta \cos(\beta - z) + \sin(\beta - z) + \sin z; \quad U = \beta \sin(\beta - z) + \cos(\beta - z) - \cos z; \\ M = -\beta^2 \cos(\beta - z) + 2U; \quad V = \beta^2 \sin(\beta - z) - 2K; \\ N = -\beta^3 \cos(\beta - z) + 3V; \quad W = \beta^3 \sin(\beta - z) - 3M,\end{aligned}\quad (3.45)$$

где R – сила, действующие на частицу, значение которой определяется из выражения P/F , где P – сила, действующая на поверхность частицы материала, Н; F – контактная площадь частицы смеси, мм; Δ – определитель системы уравнений, значение которого определяется из выражения

$$\Delta = (1 + \mu^2) \left[\beta(MW - NV) - \beta^2(KW - UN) + \beta^3(KV - UM) \right],\quad (3.46)$$

где μ – коэффициент сопротивления движению и сцепления частицы между собой.

Следовательно, полученные зависимости позволяют определять значение контактных напряжений (сжимающих и сдвигающих) в любой точке контакта частицы с учетом свойств материалов. В таблице 3.14 представлены результаты расчета максимальных контактных напряжений между частицами смеси за счет энергии частиц при образовании контакта в процессе укладки смеси в выбоину покрытия.

3.14. Результаты расчетов параметров контакта частицы

Диаметр, мм	F , см ²	m , кг	v , м/с	$\dot{L} = mV$	$\dot{L}_{уд} = mV/F$	$\sigma_{x \max}$, МПа	$\sigma_{y \max}$, МПа
2,5	0,049	0,0005	7,6	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$7,65 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,058
5,0	0,196	0,0008	7,0	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$2,857 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,087
10,0	0,785	0,0013	6,0	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,06	0,10
15,0	1,766	0,0019	5,5	0,010	$5,66 \cdot 10^{-4}$	0,06	0,12
20,0	3,14	0,0024	5,0	0,012	$3,82 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,15

Экспериментально установлено, что прочность материала при укладке смеси в выбоину покрытия струйно-инъекционным методом составляет 0,4...0,5 МПа.

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- величина контактных напряжений при соударении частицы с поверхностью выбоины в процессе укладки смеси струйно-инъекционным методом не соответствует прочностным характеристикам битумоминеральной смеси, что не позволяет достичь требуемой плотности и прочности укладываемого материала в выбоину покрытия;

- предположения о возможности уплотнения битумоминеральной смеси без дополнительного уплотнения являются необоснованными;

- для достижения более высоких характеристик смеси при укладке с применением данного метода необходимо дополнительно уплотнять слой смеси с использованием уплотняющих машин.

4. УПЛОТНЕНИЕ БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ВИБРАЦИОННЫМИ ПЛИТАМИ

При укладке битумоминеральной смеси в выбоину дорожного покрытия с применением струйно-инъекционного метода процесс укладки и уплотнения осуществляется за счет перемещения частиц смеси под действием кинетической энергии, полученной частицей материала при совместном движении с воздушным потоком, создаваемым агрегатом применяемой машины. Проведенные исследования по определению прочностных характеристик асфальтобетона в выбоине дорожного покрытия с применением струйно-инъекционного метода показали, что достигаемая прочность и водонасыщение не соответствуют предъявляемым требованиям к уплотненному материалу (коэффициент уплотнения после укладки равен 0,6...0,8 и водонасыщение свыше 10%). Поэтому в процессе эксплуатации автомобильной дороги процесс доуплотнения уложенной смеси осуществляется за счет воздействия нагрузки от колес транспортных средств. Дополнительное уплотнение материала за счет осевой нагрузки транспортных средств зависит от многих факторов, в том числе от интенсивности движения и осевой нагрузки транспортных средств, свойств применяемой смеси, толщины слоя материала, погодных условий и т.д. При движении транспортных средств, за счет воздействия шины на уложенный материал в выбоине дорожного покрытия может происходить как доуплотнение, так и разуплотнение. Поэтому такой подход к обеспечению качества ремонтных работ не соответствует требованиям нормативных документов [27, 29, 33].

Известно, что образование дефектов на дорожном покрытии зависит от разных факторов, как и их размеры и расположение относительно друг друга. Экспериментально доказано, что при производстве ремонтных работ по устранению выбоин на дорожных покрытиях эффективно применение вибрационных плит [11, 14]. Анализ характеристик применяемых вибрационных плит показал, что их параметры находятся в широком интервале значений [13]. При работе вибрационных плит, под действием динамической нагрузки, развивается деформация в уплотняемом слое смеси. В зависимости от свойств уплотняемого материала и параметров вибрационных плит эффективность их применения разная. Поэтому при выборе параметров вибрационных плит необходимо учитывать свойства уплотняемого материала.

Процесс уплотнения материала вибрационными плитами существенно отличается от уплотнения катками. Величина необратимой деформации материала, при фиксированных характеристиках материала

ла зависит от величины напряжений в зоне контакта рабочего органа машины с материалом и времени действия нагрузки. Контактные напряжения под вибрационной плитой значительно меньше, чем у катков. Однако время действия нагрузки значительно больше. Величина необратимой деформации материала определяется уравнением [7]

$$\lambda_0 = \lambda_{ц} t, \text{ мм}, \quad (4.1)$$

где $\lambda_{ц}$ – необратимая деформация материала, возникающая при действии одного цикла нагрузки, мм/с; t – суммарное время действия нагрузки, с.

Отмечалось, что битумоминеральная смесь относится к упруго-вязко-пластическому материалу, и эффективность вибрационных плит будет зависеть от вязкости материала.

4.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫМИ ПЛИТАМИ

Процесс уплотнения битумоминеральной смеси вибрационными плитами можно моделировать с помощью реологической модели, которая описывает свойства уплотняемого материала (упругость, вязкость) с помощью модели Максвелла, которая соответствует упруго-вязкому телу. На рисунке 4.1 представлен процесс уплотнения битумоминеральной смеси в выбоине покрытия и реологическая модель, моделирующая этот процесс.

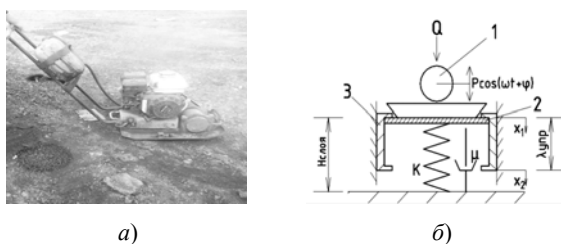


Рис. 4.1. Процесс уплотнения битумоминеральной смеси в выбоине покрытия (а) и реологическая модель уплотнения смеси вибрационной плитой (б):

1 – вибрационная плита; 2 – поверхность выбоины; 3 – невесомая (условная) пробка, моделирующая упругую деформацию битумоминеральной смеси; Q – сила тяжести вибрационной плиты, кН; K_1 – коэффициент упругости (коэффициент жесткости) материала, Н/мм; η – коэффициент вязкого сопротивления, Нс/мм; $\lambda_{\text{випр}}$ – перемещение пробки (невесомой), характеризует упругую деформацию смеси, мм; x_1 – перемещение вибрационной плиты, мм; x_2 – перемещение пробки

При разработке модели приняты следующие допущения:

- битумоминеральная смесь является упруго-вязко-пластической, сжимаемой средой;
- необратимая деформация является вязкопластической;
- деформация увеличивается до конечного значения;
- при разгрузке происходит частичное восстановление упруго-вязко-пластических деформаций;
- с ростом плотности в материале меняется соотношение между обратимой и необратимой деформациями.

При уплотнении битумоминеральной смеси в выбоине покрытия на поверхность слоя действует сила тяжести и вынуждающая сила вибрационной плиты. Под действием приложенных сил к опорной вибрационной плите на поверхности материала возникают напряжения, способствующие развитию деформации материала в выбоине. Под действием динамической нагрузки площадка 2 вместе с невесомой пробкой 3 перемещаются вниз при условии $x_1 + \lambda_y = x_2$. При перемещении плиты вверх, вместе с ним до верхнего упора пробки 3, перемещается площадка 2. Скорость подъема площадки 2 определяется скоростью перемещения в вертикальной плоскости вибрационной плиты.

Начальные условия перемещения плиты и пробки имеют вид

$$t = t_0; \quad x_1 = 0; \quad x_2 = \lambda_y. \quad (4.2)$$

Уравнение движения вибрационной плиты при начальных условиях $t = t_0; \quad x_1 = 0; \quad x_2 = \lambda_y$ имеет вид

$$M \ddot{x}_1 = Q + P \cos(\omega t + \varphi) + N, \quad (4.3)$$

где M – масса плиты; P – сила, действующая на единицу площади частицы материала, кН; ω – угловая частота вынуждающей силы, рад/с; φ – угол сдвига между направлением действия вынуждающей силы и перемещением вибратора,

Принимая за начало отсчета поверхность слоя материала, сопротивление перемещению плиты в вертикальной плоскости имеет вид

$$N = \begin{cases} \text{при } x_1 < 0 - \text{движение в отрыве от поверхности выбоины;} \\ \text{при } x_1 > 0 - \text{движение в контакте с поверхностью выбоины.} \end{cases}$$

Сила N определяется из условия равновесия сил, действующих на вибрационную плиту при вдавливании в уплотняемый материал и зависит от свойств материала:

$$N = \begin{cases} kx_1 + \eta\dot{x}_1 + j \}, & \text{при } x_2 - x_1 < \lambda_y, \\ \{0\}, & \text{при } x_2 - x_1 > \lambda_y, \end{cases} \quad (4.4)$$

где k – коэффициент жесткости смеси, Н/мм; η – коэффициент вязкого сопротивления, Нс/мм; j – сила инерции частицы материала, кН.

В общем виде сила, действующая на единицу площади контактной поверхности вибрационной плиты со стороны уплотняемой битумо-минеральной смеси, имеет вид

$$N = F_1 + F_2 + F_3, \quad (4.5)$$

где F_1, F_2, F_3 – соответственно упругие, вязкие и инерционные силы, кН.

Уравнение (4.4) можно представить в виде

$$N = kx_1 + \mu \frac{dx_1}{dt} + \frac{m d^2 x_1}{dt^2}, \quad (4.6)$$

где x_1 – величина перемещения частицы материала, мм; t – время действия нагрузки, с, m – масса частицы материала.

Экспериментально установлено, что масса частицы применяемого размера щебня зависит от диаметра и находится в пределах от 0,5 до 1,34 г.

Принимаем, что перемещение вибрационной плиты и частицы уплотняемого материала соответствует периодическим колебаниям. Тогда амплитуда колебаний вибрационной плиты и частицы материала характеризуется уравнением

$$x = x_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (4.7)$$

где x_0 – максимальная амплитуда перемещения, мм; ω – круговая частота, рад/с; t – время периода вынуждающей силы, 1/рад; φ – угол сдвига фаз.

Тогда уравнение (4.3) с учетом граничных условий можно представить в виде

$$\begin{cases} \text{при } x_1 < 0 & \left\{ \begin{aligned} mA\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) + Q - P \cos(\omega t + \varphi) &= 0; \\ \text{при } x_1 > 0 & \left\{ \begin{aligned} MA\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) + Q - P \cos(\omega t + \varphi) &= \\ = aE \cos(\omega t + \varphi) - \mu a \omega \sin(\omega t + \varphi) + a\omega^2 m \cos(\omega t + \varphi), \end{aligned} \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (4.8)$$

где a – амплитуда перемещения частицы материала под действием нагрузки, мм.

Анализ уравнения (10) показывает, что характер движения частицы материала определяется силовым воздействием уплотняющей машины, свойствами материала и представляет кусочно-линейную зависимость, состоящую из двух этапов: в контакте и в отрыве поддона плиты от поверхности материала.

При воздействии вибрационной плиты на частицу материала ей передается импульс энергии, за счет которого она перемещается. Перемещение частицы материала (полной деформации) определяется зависимостью

$$a = \frac{MA\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) + Q - P \sin(\omega t + \varphi)}{K \sin(\omega_1 t + \varphi) + \mu\omega \cos(\omega_1 t + \varphi) + \omega^2 m \cos(\omega_1 t + \varphi)}, \text{ мм.} \quad (4.9)$$

При действии вынуждающей силы вибрационной плиты частица уплотняемого материала получает импульс энергии, за счет которого происходит перемещение частиц материала, что способствует более плотному их расположению относительно друг друга. Установлено, что наилучший эффект от работы вибрационных плит достигается при условии совпадения периода колебаний рабочего органа плиты и периода колебаний частицы материала. В этом случае силы, действующие на упругие (пропорционально перемещению), вязкие (зависящие от скорости перемещения частицы) и инерционные (в зависимости от массы и ускорения при перемещении частицы), достигают своих максимальных значений.

Величину остаточной деформации при уплотнении материала можно представить в виде зависимости [25]

$$\lambda_{\text{ост}} = f(\sigma; t; d\sigma/dt), \text{ мм,} \quad (4.10)$$

где $\lambda_{\text{ост}}$ – остаточная деформация при воздействии рабочего органа уплотняющей машины на материал, мм; σ – величина напряжений в зоне контакта вибрационной плиты с поверхностью материала, мм; t – время действия нагрузки на материал, с; $d\sigma/dt$ – скорость изменения напряженного состояния уплотняемого материала, зависящая от режима работы плиты, мм/с.

Установлено, что при работе вибрационных машин деформация материала мало зависит от скорости изменения напряженного состояния материала [25]. При постоянном напряженном состоянии уплотняемого материала эквивалентное время можно определить из зависимости

$$t_{\text{экв}} = \frac{1}{\sigma_{t1}} \int_0^t \sigma(t) dt, \text{ с}, \quad (4.11)$$

где σ_{t1} – напряжение, соответствующее времени t_1 .

При работе уплотняющих машин циклического действия величина остаточной деформации определяется формулой [7]

$$\lambda_{\text{ост}} = \sigma n t / \eta, \quad (4.12)$$

где σ – напряжение под вибрационной плитой, МПа; n – число циклов приложения нагрузки; t – время действия нагрузки; η – коэффициент вязкости смеси, Нс/мм.

Для определения деформации материала под действием динамической нагрузки необходимо знать реологические характеристики битумоминеральной смеси, влияющие на деформацию поверхности слоя смеси, которые характеризуются коэффициентом жесткости и коэффициентом вязкости смеси.

Используя данные, представленные в главе 2 (табл. 2.18), на рис. 4.2 представлена зависимость полной деформации уплотняемого материала от напряжений в зоне контакта уплотняющего рабочего органа с поверхностью материала при укладке слоя смеси толщиной свыше 0,15 м.

Из данной зависимости видно, что с увеличением напряжения в зоне контакта с уплотняемым слоем деформация материала возрастает. Характер кривой подчиняется степенной зависимости и может быть представлен уравнением

$$\lambda_{\text{пол}} = 5,586\sigma^{0,663}, \quad (4.13)$$

где σ – напряжение в зоне контакта уплотняющего органа с поверхностью битумоминеральной смеси, Н/мм². Коэффициент корреляции уравнения равен 0,97.



Рис. 4.2. Зависимость деформации материала от напряжения

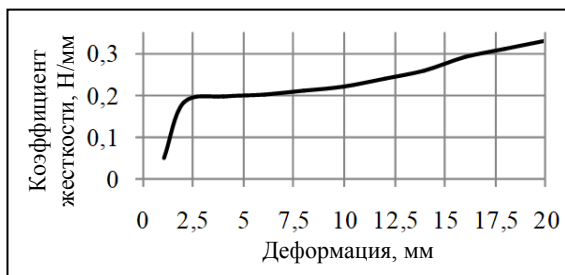


Рис. 4.3. Зависимость модуля жесткости от деформации смеси при толщине слоя более 0,15 м в замкнутом объеме выбоины

Установлено, что между деформацией материала и коэффициентом жесткости смеси существует связь (рис. 4.3).

Из представленных данных видно, что с увеличением деформации битумоминеральной смеси под действием прикладываемой нагрузки сопротивление смеси нагрузке возрастает, следовательно, меняется величина коэффициента жесткости смеси. На начальном этапе развития деформации наблюдается прямая зависимость между деформацией материала и коэффициентом жесткости. С развитием деформации происходит сближение частиц смеси относительно друг друга за счет напряжений сжатия, что характеризуется повышением плотности смеси и образованием контактов между частицами. Образование контактов между частицами смеси способствует уменьшению эмульсионной пленки на поверхности частицы в зоне контакта. С увеличением прикладываемой нагрузки к поверхности материала возрастают не только напряжения сжатия, но и касательные напряжения. При достижении касательных напряжений значения, превышающего вязкое сопротивление смеси, происходит пластическая деформация смеси за счет бокового перемещения частиц смеси при стабилизации или незначительном изменении коэффициента жесткости. Это можно объяснить тем, что на данном участке зависимости деформация материала происходит за счет перемещения частиц относительно друг друга, т.е. наблюдается процесс формирования структуры уплотняемого материала. Этот процесс характеризуется повышением сдвиговых характеристик смеси. После образования контактов между частицами смеси повышается сопротивление воспринимаемой нагрузке, и для развития деформации в уложенном материале возникает необходимость в увеличении уплотняющей нагрузки, что соответствует реальному процессу уплотнения любого материала.

Установлено, что коэффициент жесткости битумоминеральной смеси зависит от толщины слоя при укладке. На рисунке 4.4 представлена зависимость коэффициента жесткости смеси при толщине слоя 0,05 и 0,07 м при укладке смеси в выбоину со значительными размерами в плане. Температура эмульсии при укладке смеси 70 °С. Перед испытаниями смесь предварительно уплотнялась.

Из представленных данных на рис. 4 видно, что с увеличением толщины слоя коэффициент жесткости смеси уменьшается. С повышением плотности материала и образованием контактной структуры материала между частицами возрастают силы сцепления, что приводит к росту трения между частицами за счет сил вязкости, и для развития деформации материала при уплотнении требуется приложение большей нагрузки. На рисунке 4.5 представлены результаты расчетов коэффициента вязкости смеси при деформировании слоя толщиной более 0,15 м.

Из представленных данных видно, что при уплотнении толстых слоев смеси, за счет сближения частиц смеси относительно друг друга, коэффициент вязкости повышается.

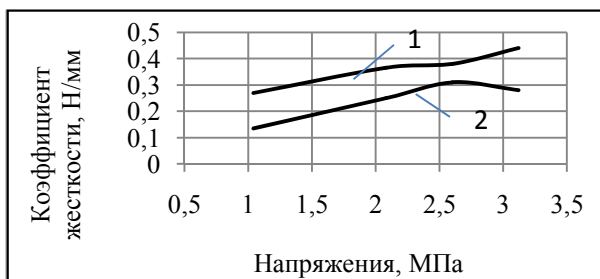


Рис. 4.4. Зависимость модуля жесткости смеси от напряжения:

1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – толщина слоя 0,07 м

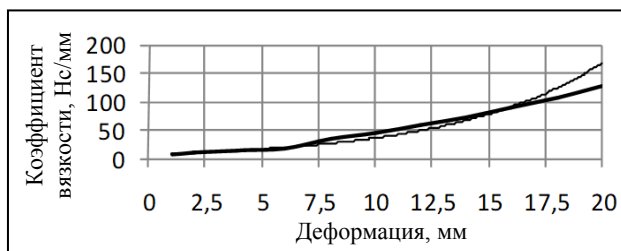


Рис. 4.5. Зависимость вязкости смеси от деформации

При уплотнении таких слоев смеси связь между коэффициентом вязкости и деформацией подчиняется экспоненциальной зависимости

$$\eta = 9,98e^{0,123\lambda}, \text{ Нс/м}, \quad (4.14)$$

где η – коэффициент вязкости, Нс/мм; λ – полная деформация материала, мм.

Установлено, что между коэффициентом вязкости битумоминеральной смеси и напряженным состоянием слоя существует линейная зависимость независимо от толщины уплотняемого слоя (рис. 4.6).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в процессе уплотнения битумоминеральной смеси реологические характеристики смеси зависят от напряженного состояния уплотняемого слоя смеси.

Результаты экспериментальных исследований, как в лабораторных, так и производственных условиях, показали, что между коэффициентом жесткости и коэффициентом плотности имеется связь, которая подчиняется линейной зависимости и представлена на рис. 4.7.

Установленная зависимость коэффициента уплотнения от коэффициента жесткости имеет вид

$$K_y = 0,043K_{ж} + 0,867. \quad (4.15)$$

Коэффициент корреляции уравнения равен 0,967.

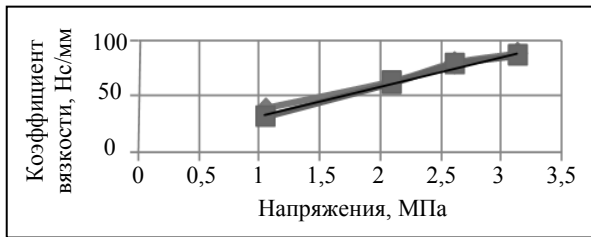


Рис. 4.6. Зависимость вязкости смеси от напряжения

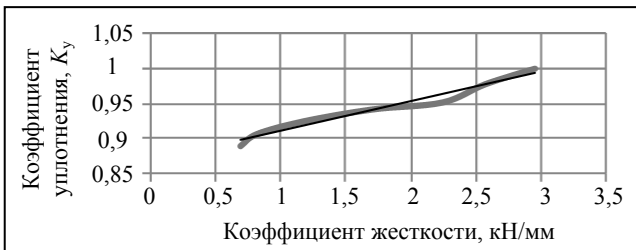


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента уплотнения от коэффициента жесткости

4.2. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА ВИБРАЦИОННОЙ ПЛИТЫ С УПЛОТНЯЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

Опыт применения вибрационных плит показывает, что за счет увеличения времени воздействия на уплотняемый материал они в состоянии обеспечить более высокие показатели уплотнения при условии правильного выбора их параметров. Анализ параметров применяемых вибрационных плит показал, что они меняются в широком интервале значений. Согласно ГОСТ Р51922–2002 за основной параметр вибрационных плит принята масса машины. Установлено, что уплотняющая способность машины зависит как от статического давления под плитой, так и параметров вибрации. При недостаточном статическом давлении обеспечить требуемую плотность материала практически невозможно.

Вопрос определения контактных напряжений под вибрационной плитой рассмотрен в работах [11, 25]. 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 зависимости между геометрическими параметрами плит и величиной контактных напряжений.

В целях 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. 4.8).

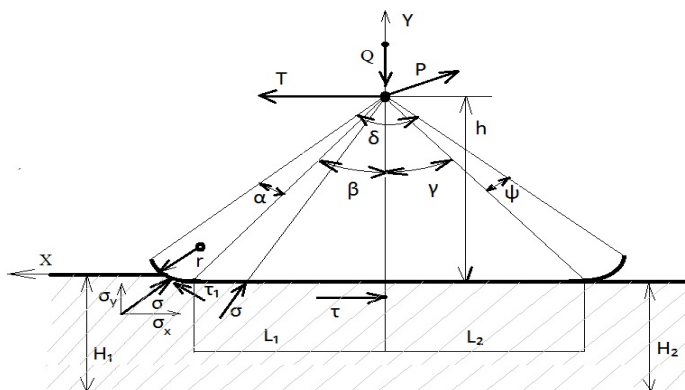


Рис. 4.8. Схема взаимодействия вибрационной плиты с уплотняемым материалом

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 вынуждающей силы; 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_1 – толщина слоя материала до уплотнения; H_2 – 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 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

$$\sigma = \sigma_x + \tau_y, \text{ МПа}, \quad (4.16)$$

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:

$$\beta = \arctg kl/h; \quad \gamma = \arctg l(1-k)/h, \quad (4.17)$$

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

$$\begin{aligned}
\sum X &= 0; \\
\int_0^\alpha \sigma B r \sin(\varphi - \alpha) d\varphi + \int_0^\alpha \tau B r \cos(\varphi - \alpha) d\varphi - \int_\alpha^\beta \sigma B l_1 \sin(\varphi - \beta) d\varphi + \\
&+ \int_\beta^\gamma \sigma B l_2 \sin(\gamma - \varphi) d\varphi + \int_\gamma^\psi \sigma B r \sin(\varphi - \psi) d\varphi + \int_\gamma^\psi \tau B r \cos(\varphi - \psi) d\varphi + \\
&+ \int_\alpha^\beta \tau B l_1 d\varphi + \int_\beta^\gamma \tau B l_2 d\varphi = P \cos(\omega t + \varphi) - T; \\
\sum Y &= 0; \\
\int_0^\alpha \sigma B r \cos(\varphi - \alpha) d\varphi + \int_0^\alpha \tau B r \sin(\varphi - \alpha) d\varphi + \int_\alpha^\beta \sigma B l_1 \cos(\varphi - \beta) d\varphi + \\
&+ \int_\beta^\gamma \sigma B l_2 \cos(\gamma - \varphi) d\varphi + \int_\gamma^\psi \sigma B r \cos(\psi - \varphi) d\varphi - \\
&- \int_\gamma^\psi \tau B r \sin(\psi - \varphi) d\varphi = Q + P \sin(\omega t + \varphi). \tag{4.18}
\end{aligned}$$

Принимаем, что нормальные и касательные напряжения подчиняются зависимости [26]

$$\tau = \mu \sigma + C, \text{ МПа}, \tag{4.19}$$

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

Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned}
\text{при} \quad \varphi = 0 \quad \sigma_x = \tau_y = 0; \\
\varphi = \delta \quad \sigma_x = \tau_y = 0. \tag{4.20}
\end{aligned}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned}
\text{при} \quad \varphi = \alpha; \quad \tau_{x_2} - \sigma_{x_1} = \tau_{x_3} - \sigma_{x_3}; \quad \sigma_{y_1} + \tau_{y_2} = \sigma_{y_3}; \\
\varphi = \alpha + \beta; \quad d\sigma_y/dt = 0; \quad \tau_{x_3} = \tau_{x_5}; \\
\varphi = \alpha + \beta + \gamma; \quad \tau_{x_5} + \sigma_{x_4} = \tau_{x_5} + \sigma_{x_6} - \tau_{x_6}; \quad \sigma_{y_4} = \tau_{y_6} + \sigma_{y_5}. \tag{4.21}
\end{aligned}$$

В качестве аппроксимирующей функции напряжения принимаем функцию вида

$$\sigma = a_0 + a_1 \varphi + a_2 \varphi^2 + a_3 \varphi^3, \text{ МПа}, \tag{4.22}$$

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

С учетом начальных условий находим значение коэффициента a_0 :

$$a_0 = 0.$$

Преобразуем систему уравнений. С этой целью подставим под знаки интегралов значения аппроксимирующей функции, разделим проекции внешних сил на контактную поверхность плиты и введем обозначения для численных значений интегралов:

$$K_1 = \int_0^\alpha \varphi \sin(\varphi\alpha) d\varphi = \sin \alpha\alpha; \quad (4.23)$$

$$M_1 = \int_0^\alpha \varphi^2 \sin(\varphi\alpha) d\varphi = \alpha^2 + 2(1 - \cos);$$

$$N_1 = \int_0^\alpha \varphi^3 \sin(\varphi\alpha) d\varphi = \alpha^3 + 6(\alpha - \sin \alpha);$$

$$U_1 = \int_0^\alpha \varphi \cos(\varphi\alpha) d\varphi = 1 \cos \alpha;$$

$$V_1 = \int_0^\alpha \varphi^2 \cos(\varphi\alpha) d\varphi = 2\alpha 1;$$

$$W_1 = \int_0^\alpha \varphi^3 \cos(\varphi\alpha) d\varphi = 3\alpha^2 + 6(\cos + 1);$$

$$K_2 = \int_\alpha^\beta \varphi \sin(\varphi\beta) d\varphi = -\beta + \alpha \cos(\beta - \alpha) - \sin(\alpha - \beta);$$

$$U_2 = \int_\alpha^\beta \varphi \cos(\varphi\beta) d\varphi = 1 + \alpha \sin(\beta - \alpha) - \cos(\beta - \alpha);$$

$$M_2 = \int_\alpha^\beta \varphi^2 \sin(\varphi\beta) d\varphi = -\beta^2 + \alpha^2 \cos(\alpha - \beta) + 2\alpha \sin(\alpha - \beta) - 2 \cos(\alpha - \beta) + 2;$$

$$N_2 = \int_\alpha^\beta \varphi^3 \sin(\varphi\beta) d\varphi = \beta^3 + \alpha^3 \cos(\alpha - \beta) + 3\alpha^2 \sin(\alpha - \beta) + 6\beta - \\ - \alpha \cos(\beta - \alpha) + 6 \sin(\alpha - \beta);$$

$$V_2 = \int_\alpha^\beta \varphi^2 \cos(\varphi\beta) d\varphi = \alpha^2 \sin(\beta - \alpha) - 2\alpha \cos(\beta - \alpha) + 2 \sin(\alpha - \beta) + \beta;$$

$$W_2 = \int_\alpha^\beta \varphi^3 \cos(\varphi\beta) d\varphi = \alpha^3 \sin(\beta - \alpha) + 3\beta^2 - 3\alpha^2 \cos(\alpha + \beta) - \\ - 6\alpha \sin(\alpha - \beta) - 6 + 6 \cos(\alpha - \beta);$$

$$K_3 = \int_\beta^\gamma \varphi \sin(\varphi\gamma) d\varphi = -\gamma + \beta \cos(\beta - \gamma) - \sin(\beta - \gamma);$$

$$M_3 = \int_\beta^\gamma \varphi^2 \sin(\varphi\gamma) d\varphi = -\gamma^2 + \beta^2 \cos(\beta - \gamma) + 2\beta \sin(\beta - \gamma) - 2 \cos(\beta - \gamma) + 2;$$

$$N_3 = \int_\beta^\gamma \varphi^3 \sin(\varphi\gamma) d\varphi = \beta^3 \sin(\gamma - \beta) + 3\gamma^2 - 3\beta^2 \cos(\beta + \gamma) - \\ - 6\beta \sin(\beta - \gamma) - 6 + 6 \cos(\beta - \gamma);$$

$$U_3 = \int_{\beta}^{\gamma} \varphi \cos(\varphi\gamma) d\varphi = 1 + \beta \sin(\gamma - \beta) - \cos(\gamma - \beta);$$

$$V_3 = \int_{\beta}^{\gamma} \varphi^2 \cos(\varphi\gamma) d\varphi = \beta^2 \sin(\gamma - \beta) - 2\beta \cos(\gamma - \beta) + 2\sin(\beta - \gamma) + \gamma;$$

$$W_3 = \int_{\beta}^{\gamma} \varphi^3 \cos(\varphi\gamma) d\varphi = \beta^3 \sin(\gamma - \beta) + 3\gamma^2 - 3\beta^2 \cos(\gamma + \beta) - \\ - 6\beta \sin(\gamma - \beta) - 6 + 6\cos(\gamma - \beta);$$

$$K_4 = \int_{\gamma}^{\psi} \varphi \sin(\varphi\psi) d\varphi = -\psi + \gamma \cos(\psi - \gamma) - \sin(\gamma - \psi);$$

$$M_4 = \int_{\gamma}^{\psi} \varphi^2 \sin(\varphi\psi) d\varphi = -\psi^2 + \gamma^2 \cos(\gamma - \psi) + 2\gamma \sin(\gamma - \psi) - 2\cos(\gamma - \psi) + 2;$$

$$N_4 = \int_{\gamma}^{\psi} \varphi^3 \sin(\varphi\psi) d\varphi = \gamma^3 \sin(\psi - \gamma) + 3\psi^2 - 3\gamma^2 \cos(\gamma + \psi) - \\ - 6\gamma \sin(\gamma - \psi) - 6 + 6\cos(\gamma - \psi);$$

$$U_4 = \int_{\gamma}^{\psi} \varphi \cos(\varphi\psi) d\varphi = 1 + \gamma \sin(\psi - \gamma) - \cos(\psi - \gamma);$$

$$V_4 = \int_{\gamma}^{\psi} \varphi^2 \cos(\varphi\psi) d\varphi = \gamma^2 \sin(\psi - \gamma) - 2\gamma \cos(\psi - \gamma) + 2\sin(\psi - \gamma) + \psi;$$

$$W_4 = \int_{\gamma}^{\psi} \varphi^3 \cos(\varphi\psi) d\varphi = \gamma^3 \sin(\psi - \gamma) + 3\psi^2 - 3\gamma^2 \cos(\psi + \gamma) - \\ - 6\gamma \sin(\psi - \gamma) - 6 + 6\cos(\psi - \gamma);$$

$$K_5 = \int_{\alpha}^{\beta} \varphi d\varphi = (\beta^2 - \alpha^2)/2;$$

$$K_6 = \int_{\alpha}^{\beta} \varphi^2 d\varphi = (\beta^3 - \alpha^3)/3;$$

$$K_7 = \int_{\alpha}^{\beta} \varphi^3 d\varphi = (\beta^4 - \alpha^4)/4;$$

$$U_5 = \int_{\beta}^{\gamma} \varphi d\varphi = (\gamma^2 - \beta^2)/2;$$

$$U_6 = \int_{\beta}^{\gamma} \varphi^2 d\varphi = (\gamma^3 - \beta^3)/3;$$

$$U_7 = \int_{\beta}^{\gamma} \varphi^3 d\varphi = (\gamma^4 - \beta^4)/4.$$

С учетом принятых обозначений численных значений интегралов и сгруппировав их по коэффициентам a_1 , a_2 и a_3 , система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & \sum X = 0; \\
 & a_1[K_1 - K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + U_5 + \mu(U_1 + U_4)] + \\
 & + a_2[M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + K_6 + U_6 + \mu(V_1 + V_4)] + \\
 & + a_3[N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + K_3 + U_7 + \mu(W_1 + W_4)] = T_1; \\
 & \sum Y = 0; \\
 & a_1[U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + \mu(K_1 - K_4)] + \\
 & + a_2[V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \mu(M_1 - M_4)] + \\
 & + a_3[W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + \mu(N_1 - N_4)] = Q_1;
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

Обозначим:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= K_1 - K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + U_5 + \mu(U_1 + U_4); \\
 l_2 &= M_1 - M_2 + M_3 + M_4 + \mu V_1 + \mu V_4 + U_6 + K_6; \\
 l_3 &= N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + K_3 + U_7 + \mu(W_1 + W_4); \\
 l_4 &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + \mu K_1 - \mu K_4; \\
 l_5 &= V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \mu M_1 - \mu M_4; \\
 l_6 &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + \mu N_1 - \mu N_4.
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

С четом принятых обозначений и начальных условий систему уравнений можно представить в виде матрицы

$$\begin{aligned}
 a_1 l_1 + a_2 l_2 + a_3 l_3 &= T_1; \\
 a_1 l_6 + a_2 l_5 + a_3 l_6 &= Q_1; \\
 a_1 \delta + a_2 \delta_2 + a_3 \delta_3 &= 0.
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

Численное значение определителя матрицы (Δ) и коэффициентов Δa_1 , Δa_2 , Δa_3 имеют вид

$$\begin{aligned}
 \Delta &= \delta(l_2 l_6 - l_3 l_5) - \delta_2(l_1 l_6 - l_4 l_3) + \delta_3(l_1 l_5 - l_4 l_2); \\
 \Delta a_1 &= -\delta_2(Fl_2 - Rl_3) + \delta_3(Fl_5 - Rl_2); \\
 \Delta a_2 &= \delta(Fl_6 - Rl_3) + \delta_3(Rl_1 - Fl_4); \\
 \Delta a_3 &= \delta(Rl_2 - Fl_5) + \delta_2(Rl_1 - Fl_4).
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Значения коэффициентов имеют вид

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \Delta a_1 / \Delta = -\delta_2 (Fl_2 - Rl_3) + \delta_3 (Fl_5 - Rl_2) / \Delta; \\
 a_2 &= \Delta a_2 / \Delta = \delta (Fl_6 - Rl_3) + \delta_3 (Rl_1 - Fl_4) / \Delta; \\
 a_3 &= \Delta a_3 / \Delta = \delta (Rl_2 - Fl_5) + \delta_2 (Rl_1 - Fl_4) / \Delta.
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

В общем виде напряженное состояние частицы материала в рассматриваемой точке определяется выражением:

$$\begin{aligned}
 \sigma &= [-\varphi \delta_2 (Fl_2 - Rl_3) + \delta_3 (Fl_5 - Rl_2)] / \Delta + \\
 &+ [\varphi^2 \delta (Fl_2 - Rl_3) + \delta_3 (Rl_1 - Fl_4)] / \Delta + \\
 &+ [\delta_3 \beta (Rl_2 - Fl_5) + \delta_2 (Rl_1 - Fl_4)] / \Delta.
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

Из полученной зависимости видно, что напряженное состояние частицы материала под вибрационной плиты зависит от действия силовых факторов R и F расположения частицы, характеризуемое геометрическими углами.

Преобразуем полученное выражение с учетом действия силовых факторов R и F . В конечном виде зависимости для расчета сжимающих и сдвигающих напряжений под вибрационной плитой имеют вид

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \varphi \delta_2 R (I_3 - \beta I_2) / \Delta + \varphi^2 \delta R (\beta^2 I_1 - I_3) / \Delta + \varphi^3 \delta R (I_2 - \beta I_1) / \Delta; \\
 \tau &= \varphi \delta_2 F (\beta I_5 - I_2) / \Delta + \varphi^2 \delta F (I_6 - \beta^2 I_4) / \Delta + \varphi^3 \delta F (\beta I_4 - I_5) / \Delta.
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Анализ уравнений показывает, что при условии $\varphi = 0$ и $\varphi = \beta$ составляющие общего напряжения равны нулю. Полученные зависимости соответствуют частным режимам контакта вибрационной плиты с уплотняемым материалом. Следовательно, полученные зависимости позволяют определять величину контактных напряжений (сжимающих и сдвигающих) в любой точке контакта плиты с материалом в зависимости от технических характеристик 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. Интерфейс программы представлен на рис. 4.9 с исходными данными для расчета контактных напряжений при работе вибрационной плиты ZITREK Z3K, используемой при проведении экспериментальных исследований.

$I =$	0,65	длина поддона вибрационной плиты, м
$b =$	0,32	ширина поддона вибрационной плиты, м
$k =$	0,5	коэффициент (0,5...1,0)
$h =$	0,4	высота под центром тяжести, м
$P =$	2,8	вынуждающая сила, кН
$n =$	90	частота колебаний вынуждающей силы, Гц
$t =$	0,02	Время, с
$Q =$	0,53	масса вибрационной плиты, кН
$\mu =$	0,15	коэффициент трения
$T =$	0,1	толкающее усилие, кН

РЕЗУЛЬТАТ

Рис. 4.9. Интерфейс программы для расчета контактных напряжений под вибрационной плитой

Результаты расчета контактных напряжений представлены в табл. 4.1. 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 и при заданных параметрах равно 0,035 МПа.

4.1. Результаты расчетов напряжений под вибрационной плитой

φ, град	$t = 0,005$ с		$t = 0,01$ с		$t = 0,015$ с		$t = 0,02$ с	
	σ, МПа	τ, Па	σ, МПа	τ, Па	σ, МПа	τ, Па	σ, МПа	τ, Па
0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	-0,012	333	0,016	-324	0,006	-82	-0,012	358
19	-0,002	496	0,027	-484	0,009	-122	-0,021	534
28	-0,024	560	0,033	-546	0,012	-138	-0,026	603
38	-0,026	576	0,035	-562	0,013	-142	-0,029	620
47	-0,026	575	0,035	-561	0,012	-142	-0,028	619
57	-0,023	567	0,032	-553	0,011	-140	-0,026	610
66	-0,019	545	0,027	-531	0,009	-134	-0,021	586
76	-0,014	478	0,019	466	0,007	-118	-0,015	514
85	-0,007	319	0,010	-311	0,004	-78	-0,008	343
94	0	0	0	0	0	0	0	0

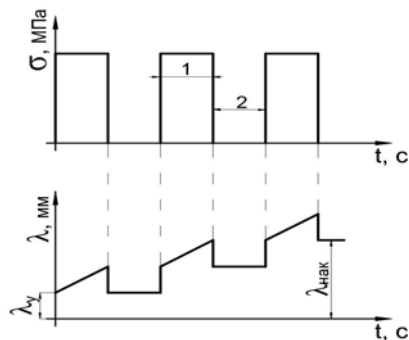


Рис. 4.10. Величина деформации материала при циклическом приложении нагрузки

Известно, что при циклической нагрузке материала величина остаточной деформации определяется с учетом деформации единичного цикла и числа циклов (рис. 4.10) [7].

Следовательно, зная значение максимального контактного напряжения под вибрационной плитой, число циклов приложения нагрузки и ее продолжительность, с учетом формулы (2.14) можно определить величину деформации смеси при уплотнении плитой. На рисунке 4.11 представлена зависимость деформации слоя смеси при уплотнении вибрационной плитой ZITREK Z3K после каждого прохода плиты. Изменение величины деформации смеси характеризуется логарифмической зависимостью, что подтверждается результатами других исследований [5, 25].

Отмечалось, что параметрический ряд вибрационных плит характеризуется набором разных конструктивных параметров (массой, вынуждающей силой, контактной площадью). Следовательно, эффективность воздействия на уплотняемый материал в зависимости от этого будет разной.

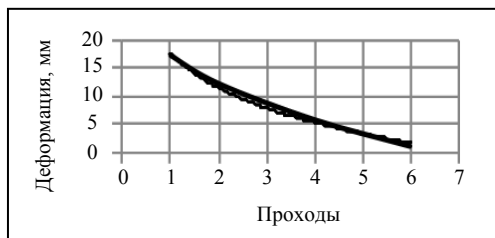


Рис. 4.11. Зависимость общей деформации слоя смеси от числа проходов

4.2. Зависимость деформации уплотняемого материала от параметров вибрационных плит

Марка	Q, кг	P, кН	F, м ²	σ, МПа	Деформация слоя после прохода, мм				
					1	2	3	4	5
Masalta MSR60	62	10,5	0,18	0,031	14	6,5	2	1,4	0,8
Samsan Rc212	120	21,0	0,27	0,045	20,2	9,4	2,9	2,0	1,1
ZITREk Z3K	53	2,8	0,15	0,013	5,8	2,7	0,8	0,6	0,3

В таблице 4.2 представлены результаты расчета деформации смеси при разных параметрах вибрационных плит и одинаковой деформационной способности уплотняемого материала. На рисунке 4.12 представлена зависимость деформации слоя уплотняемой смеси после прохода вибрационных плит с разными параметрами по данным табл. 4.2.

Из представленных данных видно, что развитие деформации уплотняемой смеси зависит от параметров уплотняющих машин, свойств материала и технологических параметров уплотнения.

Развитие деформации уплотняемого слоя смеси под действием нагрузки характеризует повышение плотности и прочности материала, что можно оценить коэффициентом уплотнения. На рисунке 4.13 представлена зависимость коэффициента уплотнения битумоминеральной смеси от деформации слоя смеси при уплотнении слоя толщиной 0,05 м.

Численное значение коэффициента уплотнения смеси от деформации слоя при действии нагрузки можно определить по формуле

$$K_y = e^{-0,013\lambda},$$

где λ – деформация слоя смеси, мм. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

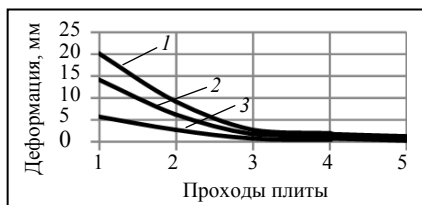


Рис. 4.12. Зависимость деформации слоя смеси от числа проходов плиты: 1 – Samsan Rc212; 2 – Masalta MSR60; 3 – ZITREk Z3K

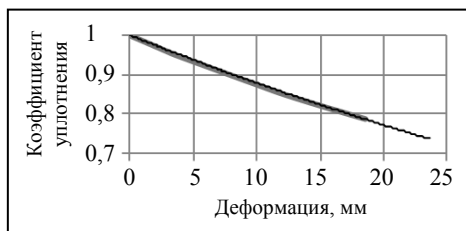


Рис. 4.13. Зависимость коэффициента уплотнения от деформации слоя смеси при уплотнении

Следовательно, зная деформацию слоя смеси, можно определить коэффициент уплотнения. Рассмотрим зависимость коэффициента уплотнения смеси при уплотнении вибрационными плитами, представленными в табл. 4.1. Используя данные табл. 4.2, на рис. 4.14 представлена зависимость коэффициента уплотнения от числа проходов плиты при уплотнении битумоминеральной смеси.

Анализ представленных данных в табл. 4.2 и на рис. 4.14 позволяет сделать следующие выводы:

- при выборе параметров вибрационных плит для уплотнения смесей необходимо учитывать свойства уплотняемого материал;
- достижение требуемого коэффициента уплотнения смеси вибрационной плитой, при соответствующих параметрах плиты, обеспечивается за 3–4 проход по одному следу;
- применение вибрационных плит со значительной массой и относительной вынуждающей силой способствует развитию значительных деформаций уплотняемого слоя на начальной стадии уплотнения, что характеризует процесс разуплотнения слоя смеси (1 и 2). Вследствие этого происходит понижение коэффициента уплотнения слоя материала. При дальнейших проходах плиты повышается плотность материала, и коэффициент уплотнения достигает нормативного значения.

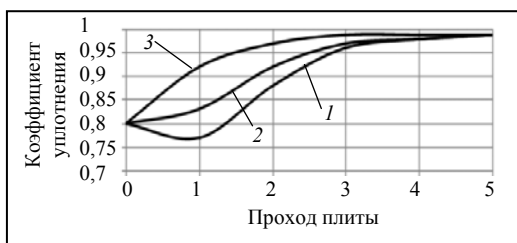


Рис. 4.14. Зависимость коэффициента уплотнения смеси от числа проходов вибрационной плиты

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

Из статистического анализа параметров вибрационных плит, а также результатов расчетов установлено, что относительная вынуждающая сила колеблется в широком интервале значений, что влияет на уплотняющую способность плит. На рисунке 4.15 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 зависимость величины сжимающих напряжений от относительной вынуждающей силы характеризуется степенной зависимостью. На рисунке 4.16 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.



Рис 4.15. Зависимость сжимающих напряжений под вибрационной плитой от относительной вынуждающей силы



Рис. 4.16. Влияние относительной вынуждающей силы на коэффициент превышения контактных напряжений под вибрационной плитой

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 [25]. 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 [25]. 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 [16]. 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 от 50 до 100 кг. По результатам статистической обработки параметров вибрационных плит установлено, что для таких вибрационных плит статическое давление под плитой находится в пределах от 0,02 до 0,06 МПа с относительной вынуждающей силой от 5 до 8.

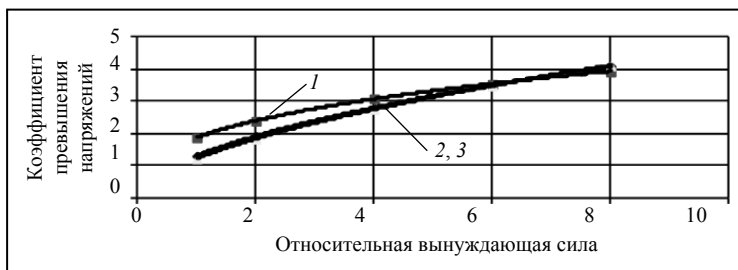


Рис. 4.17. Значения коэффициента превышения напряжений при работе вибрационных плит в динамическом режиме от относительной вынуждающей силы

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 режиму. Полученные результаты представлены на рис. 4.17 и в табл. 4.3.

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.

4.3. Зависимости для определения коэффициента превышения напряжений от режима работы вибрационной плиты

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

С учетом полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- для повышения качества работ и увеличения срока службы дорожных покрытий после проведения ямочного ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с применением струйно-инъекционного метода необходимо дополнительно уплотнять уложенную битумоминеральную смесь в выбоине покрытия;

- выбор параметров вибрационных плит необходимо осуществлять с учетом характеристик битумоминеральной смеси;

- получены аналитические зависимости для определения контактных напряжений под вибрационной плитой с учетом ее геометрических параметров и силового воздействия на уплотняемую смесь.

5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА С ДОРОЖНЫМ ПОКРЫТИЕМ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

На этапе проектирования автомобильной дороги, при определении технической категории дороги и конструктивных элементов дорожной одежды, за основу приняты интенсивность движения и осевая нагрузка транспортных средств в процессе ее эксплуатации. С течением времени интенсивность движения транспортных средств возрастает, как и осевые нагрузки, что влияет на состояние дорожной конструкции. В результате воздействия транспортного потока и погодных условий, с учетом нарушений, допущенных при строительстве, на дорожных покрытиях образуются дефекты в виде выбоин, которые влияют на безопасность дорожного движения. Для устранения таких дефектов в процессе содержания автомобильных дорог необходимо их устранение, которое производят с применением разных материалов и технологий.

Оперативным методом ремонта выбоин на покрытиях нежесткого типа является инъекционно-струйный метод, позволяющий без выполнения подготовительных работ (разметка, обрезка, обработка вяжущим материалом поверхности выбоин, прогрев, укладка и уплотнение материала в установленных границах температуры) выполнять работы по устранению выбоин в кратчайшее время с минимальными затратами. Существующие рекомендации предполагают, что в процессе движения транспортных средств битумоминеральная смесь, уложенная в выбоину, будет доуплотняться за счет осевой нагрузки от транспортных средств. Однако, как показали результаты экспериментальных исследований, не всегда при уплотнении уложенной смеси автомобильным транспортом достигаются требуемые характеристики материала в выбоине покрытия. Достижение требуемых характеристик уложенного материала в выбоину покрытия возможно при движении транспортных средств при определенных технологических режимах уплотнения с учетом свойств битумоминеральной смеси. Известно, что при уплотнении материала необходимо контролировать соответствие напряжения в зоне контакта рабочего органа машины с прочностными характеристиками применяемого материала. Поэтому при выполнении ремонтных работ по устранению выбоин на дорожных покрытиях с применением битумоминеральных смесей и струйно-инъекционного метода, для доуплотнения уложенного материала за счет движения транспортных средств, необходимо контролировать интенсивность движения и осевую нагрузку на дорожное покрытие.

5.1. ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С УЧЕТОМ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА

Интенсивность движения транспортных средств является величиной, на основе которой определяется техническая категория автомобильной дороги и расчетные параметры дороги, а также конструктивные элементы сооружений. Данный показатель характеризует число автомобилей, проходящих по дороге или ее участку в конкретном поперечнике за единицу времени в обоих направлениях. В зависимости от цели расчета интенсивности движения транспортных средств, учитывают разные параметры, отражающие интенсивность воздействия подвижной нагрузки на конструктивные элементы автомобильной дороги.

Для общей оценки воздействия интенсивности транспортного потока на дорожную конструкцию и определения технической категории дороги используют приведенную интенсивность, которая основана на пересчете осевой нагрузки любого транспортного средства к стандартному автомобилю, в качестве которого принят легковой автомобиль (табл. 5.1) [30]. Приведенная интенсивность движения определяется по формуле

$$N_{\text{пр}} = k_1 N_1 + k_2 N_2 + \dots + k_n N_n, \quad (5.1)$$

где k_1, k_2, \dots, k_n – коэффициенты приведения транспортного средства к легковому автомобилю; N_1, N_2, \dots, N_n – количество автомобилей в очереди.

Назначение категории автомобильной дороги зависит от интенсивности движения (табл. 5.2). С учетом принятой технической категории дороги рассчитываются геометрические параметры автомобильной дороги [28, 30].

При расчете числа полос движения, а также оценки пропускной способности, в зависимости от категории дороги, определяется часовая интенсивность движения $N_{\text{ч}}$, приведенная к легковому автомобилю. В этом случае расчетная часовая интенсивность движения определяется по формуле

$$N_{\text{ч}} = N_{\text{с}} \alpha_{\text{ч}}, \quad (5.2)$$

где $N_{\text{с}}$ – среднегодовая суточная интенсивность движения, авт/сут; $\alpha_{\text{ч}}$ – доля всех автомобилей, прошедших за 1 час «пик», от общего суточного числа автомобилей, $\alpha_{\text{ч}} = 0,076 \dots 0,10$.

5.1. Коэффициент приведения транспортных средств к легковому автомобилю

Транспортные средства	Коэффициент приведения
Легковой автомобиль	1,0
Грузовой автомобиль грузоподъемностью до 2 т	1,2
Грузовой автомобиль грузоподъемностью 2...6 т	1,5
Грузовой автомобиль грузоподъемностью более 6 т	1,6
Микроавтобус	1,1
Автобус малой вместимости	1,4
Автобус большой вместимости	1,8
Автопоезд	2,2

5.2. Категории автомобильных дорог

Назначение автомобильной дороги	Категория дороги	Расчетная интенсивность движения, прив. ед./сут
Магистральные федеральные дороги	I-а (автомагистраль)	Св. 14 000
	I-б (скоростная дорога)	Св. 14 000 Св. 6000
Прочие федеральные дороги РФ, связывающие административные центры краев и областей	I-б (скоростная дорога)	Св. 14 000
	II	Св. 6000
	III	Св. 2000 до 6000
Республиканские, краевые, областные дороги и дороги автономных образований.	II	Св. 6000 до 14 000
	III	Св. 2000 до 6000
	IV	Св. 200 до 2000
Дороги местного значения	IV	Св. 200 до 2000
	V	До 200

5.3. Зависимость числа полос движения от интенсивности движения

Рельеф местности	Интенсивность движения, прив. ед./сут	Число полос движения
Равнинный и пересеченный	Св. 14 000 до 40 000	4
	40 000...80 000	6
	Свыше 80 000	8
Горный	Св. 14 000 до 34 000	4
	34 ...70 000	6
	Свыше 70 000	8

В зависимости от интенсивности движения транспортных средств и рельефа местности, согласно нормативному документу, устанавливается число полос движения (табл. 5.3) [29].

Количество полос движения может быть определено с учетом интенсивности движения по формуле [29]

$$n = \frac{\alpha K_n N_p \varepsilon}{z P \gamma}, \quad (5.3)$$

где n – число полос движения; α – коэффициент перехода от суточной интенсивности движения к часовой ($\alpha = 0,1$); $K_n N_p$ – приведенная интенсивность движения, прив. ед./сут ($K_n N_p = \text{прив. } N_p$); ε – коэффициент сезонной неравномерности изменения интенсивности движения ($\varepsilon = 1$); z – расчетный коэффициент загрузки дороги движением, зависящий от уровня удобства движения ($z = 0,3 \dots 0,5$); γ – коэффициент, зависящий от рельефа местности (для равнинного рельефа – 1,0; пересеченного – 0,8; сильно пересеченного – 0,6); P – пропускная способность одной полосы движения.

Среднегодовая суточная интенсивность движения (N_c) на определенной дороге или ее участка определяется на основе результатов измерений, установленных по данным весовой станции и рассчитывается по формуле

$$N_c = \frac{QK}{Dq_{\text{ср}}\beta\gamma}, \quad (5.4)$$

где Q – грузонапряженность перегона, т·км/км; K – коэффициент, учитывающий в составе потока автомобили, не перевозящие грузы, ори-

ентировочно принимаемый равным $1,15 \dots 1,25$; D – число дней в году; $q_{\text{ср}}$ – средняя грузоподъемность автомобилей, т; β – коэффициент использования пробега; γ – коэффициент использования грузоподъемности; $q_{\text{ср}}\beta\gamma$ – производительность автомобиля на 1 км пробега в год.

Динамика развития транспортных средств показала, что ежегодно наблюдается увеличение транспорта 4...6% от общего количества при незначительном темпе ввода в эксплуатацию автомобильных дорог. В то же время имеются регионы страны, где наблюдается бурное развитие промышленности и значительный рост экономических отношений в производстве. В таких регионах количество транспортных средств увеличивается более интенсивно, что влияет на интенсивность движения транспортных средств на автомобильных дорогах. С учетом перспективы развития транспортных средств на срок службы дороги определяют перспективную (общую среднесуточную) интенсивность движения с учетом прогноза на конец срока службы дороги по формуле

$$N(t) = N(0)(1 + mt)$$

или

$$N(t) = N(0)(1 + m)^t, \quad (5.5)$$

где $N(t)$ – ожидаемая интенсивность движения в расчетный год, авт./сут; $N(0)$ – исходная интенсивность движения, авт./сут; m – коэффициент среднегодового прироста интенсивности движения, в долях от начальной интенсивности $N(0)$; t – перспективный период, лет.

5.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

При движении транспортного средства по проезжей части дорожного покрытия осевая нагрузка от колес транспорта передается на слои дорожной одежды. В зависимости от грузоподъемности транспорта, количества осей, давления в шине и конструктивной схемы машины, в зоне контакта шины с поверхностью покрытия возникают напряжения, влияющие на работоспособность дорожного покрытия. Процесс движения транспортных средств, а, следовательно, и воздействие нагрузки на дорожную конструкцию, можно характеризовать как случайный процесс, зависящий от многих факторов. К числу таких факторов можно отнести число осей, грузоподъемность, давление в шине, массу транспортного средства и др.

Осевая нагрузка на дорожное покрытие при движении транспортных средств зависит от массы машины и перевозимого им груза,

колесной схемы машины и площади контактной поверхности шины с покрытием. Для грузового автомобильного транспорта осевая нагрузка может быть рассчитана по формуле

$$Q_{\text{осев}} = (Q_{\text{маш}} + Q_{\text{груз}})K/n, \quad (5.6)$$

где $Q_{\text{маш}}$ – масса транспортного средства, кН; $Q_{\text{груз}}$ – масса перевозимого груза, кН; K – коэффициент распределения массы машины между осями, безразмерная величина; n – количество осей машины. Считается, что на заднюю ось двухосного автомобиля приходится 75% от массы машины. Конструктивное решение грузового транспорта с тремя и более осями позволяет распределить равномерно осевую нагрузку между осями грузовой тележки, что уменьшит нагрузку на дорожное покрытие. Нормативная осевая нагрузка принимается в зависимости от капитальности дорожной одежды [30]:

при капитальной дорожной одежде	115 кН
при облегченном и переходном типах дорожной одежды	100 кН
для маршрутов (дорог), предназначенных для следования тяжеловесных транспортных средств, осуществляющих международные перевозки	130 кН

При движении транспортного потока, в зависимости от грузо-подъемности и конструктивной схемы машины, воздействие транспортного потока на дорожную конструкцию, будет разное. Поэтому при расчете дорожной одежды на прочность определяют приведенную интенсивность воздействия транспортных средств на последний год срока службы к среднесуточной расчетной нагрузке с учетом числа проездов всех колес, расположенных с одной стороны автомобиля, в пределах одной полосы проезжей части (N_p) и суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности покрытия за срок службы автомобильной дороги ($\sum N_p$). Состав потока при этом делится на группы, в зависимости от назначения транспортного средства и нормативной статической нагрузки на ось [28].

Величина N_p приведенной интенсивности на последний год срока службы определяют по формуле

$$N_p = f_{\text{пол}} \sum_1^n N_m S_{m\text{сум}}, \text{ ед./сут}, \quad (5.7)$$

где $f_{\text{пол}}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним (табл. 5.4); n – общее число различных

марок транспортных средств в составе транспортного потока; N_m – число проездов в сутки в обоих направлениях транспортных средств m -й марки; $S_{m\text{сум}}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства m -й марки к расчетной нагрузке $Q_{\text{расч}}$.

Значение суммарного коэффициента приведения определяется по формуле

$$S_{m\text{сум}} = \sum_1^n S_{\Pi}, \quad (5.8)$$

где n – число осей у данного транспортного средства, для приведения которого определяется коэффициент $S_{m\text{сум}}$; S_{Π} – коэффициент приведения эквивалентной нагрузки Q_{Π}^3 от колеса n -й оси движущегося транспортного средства к расчетной нагрузке $Q_{\text{расч}}$, определяемый по формуле

$$S_{\Pi} = (Q_{\text{дп}}/Q_{\text{расч}})^P, \quad (5.9)$$

где $Q_{\text{дп}}$ – номинальная динамическая нагрузка от колеса на покрытие; $Q_{\text{расч}}$ – расчетная динамическая нагрузка от колеса на покрытие; P – показатель степени, принимаемый равным:

- 4,4 – для капитальных дорожных одежд;
- 3,0 – для облегченных дорожных одежд;
- 2,0 – для переходных дорожных одежд.

Коэффициенты S_{Π} определяются для нагрузки, менее расчетной, а также для нагрузки, превышающей расчетную, не более, чем на 20%.

5.4. Значение коэффициента от числа полос движения и распределение движения по ним

Число полос движения	Значение коэффициента $f_{\text{пол}}$ для полосы с номером от обочины		
	1	2	3
1	1,00	–	–
2	0,55	–	–
3	0,50	0,50	–
4	0,35	0,20	–
6	0,30	0,20	0,05

При расчете коэффициента приведения S_{Π} для колеса данной n -й оси определяется эквивалентная нагрузка Q_{Π}^3 (с учетом влияния колес других осей) и ее отношение к расчетной нагрузке $Q_{\text{расч}}$. Эквивалентная нагрузка от колес n -й оси двухосного автомобиля

$$Q_{\Pi}^3 = K_{\text{дин}} Q_n, \quad (5.10)$$

где $K_{\text{дин}}$ – коэффициент динамичности, учитывающий повышение нагрузки на покрытие при колебаниях автомобиля и принимаемый равным 1,30; Q_n – номинальная статическая нагрузка на колесо данной оси ($n = 1; 2$).

При движении трехосного автомобиля эквивалентная нагрузка на колесо определяется

$$Q_{\Pi}^3 = K_{\text{дин}} Q_n (g_{n-1} + 1 + g_{n+1}), \quad (5.11)$$

где Q_n – как и в формуле (3.4), номинальная статическая нагрузка на колесо n -й оси ($n = 1; 2; 3$); g_{n-1} – коэффициент, учитывающий влияние колеса оси, идущей впереди n -й, на напряженно-деформированное состояние дорожной одежды под колесом n -й оси; g_{n+1} – коэффициент, учитывающий влияние колеса оси, идущей позади n -й.

Коэффициенты g_{n-1} , g_{n+1} определяются по графикам на рис. 5.1 и 5.2 [28].

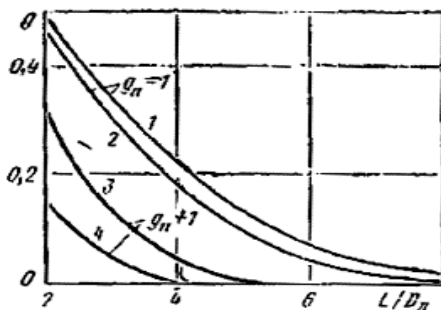


Рис. 5.1. Зависимость коэффициентов g , учитывающих влияние колес других осей транспортного средства, от отношения расстояния L между осями к диаметру D_n следа заданного колеса:

1, 2 – значения g_{n-1} для дорожных одежд, удовлетворяющих требованиям интенсивного движения автомобилей соответственно группы А и Б;

3, 4 – то же, g_{n+1}

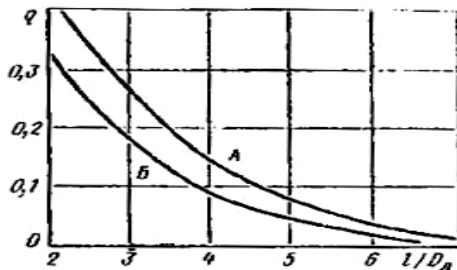


Рис. 5.2. Зависимость коэффициентов q , учитывающих влияние других колес данной оси транспортного средства, от отношения расстояния l между центрами отпечатков рассматриваемого колеса и других колес (в поперечном направлении) к диаметру D_d следа заданного колеса для дорожных одежд, удовлетворяющих требованиям интенсивного движения автомобилей группы А и Б

Нагрузки Q_n^3 для многоколесных транспортных средств (специализированные прицепы, полуприцепы-тяжеловозы и т.д.) находятся – по формуле (3.5). Номинальная динамическая нагрузка $Q_{дп}$ определяется по паспортным данным на транспортное средство с учетом распределения статических нагрузок на каждую ось

$$Q_{дп} = K_{дин} Q_n \quad (5.12)$$

При определении расчетного значения номинальной статической нагрузки для многоосных автомобилей фактическую номинальную нагрузку на колесо, определяемую по паспортным данным, следует умножить на коэффициент K_c , вычисляемую по формуле

$$K_c = a - b\sqrt{B_m} - c, \quad (5.13)$$

где B_m – расстояние в метрах между крайними осями автотранспортного средства; a , b , c – параметры, определяемые в зависимости от капитальности дорожной одежды и числа осей тележки по табл. 5.5.

5.5. Значение коэффициентов от капитальности дорожной одежды и числа осей тележки

Тележки	a	b	c
Двухосные	1,7/1,52	0,43/0,36	0,5/0,5
Трехосные	2,0/1,6	0,46/0,28	1,0/1,0

Примечание. В числителе – для капитальных и облегченных типов дорожных одежд, в знаменателе – для переходных.

Следовательно, в зависимости от конструктивных параметров автомобиля по данным зависимостям можно определить нагрузку от транспортного средства на дорожное покрытие.

В целях обеспечения дорожной одеждой заданного срока службы определяют суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности конструкции за весь срок службы дороги. Расчетное число приложений расчетной нагрузки определяют по формуле

$$\sum N_p = f_{\text{пол}} \sum_{m=1}^n (N_{1m} K_c T_{\text{рдг}} \cdot 0,7) S_{m\text{сум}} k_n, \quad (5.14)$$

или по формуле

$$\sum N_p = 0,7 N_p \frac{K_c}{q(T_{\text{сл}} - 1)} T_{\text{рдг}} k_n, \quad (5.15)$$

где n – число марок автомобилей; N_{1m} – суточная интенсивность движения автомобилей m -й марки в первый год службы (в обоих направлениях), авт./сут; N_p – приведенная интенсивность на последний год срока службы, авт./сут; $T_{\text{рдг}}$ – расчетное число расчетных дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости дорожной конструкции; k_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого (табл. 5.6).

С учетом принятой технической категории дороги рассчитываются геометрические параметры автомобильной дороги [30]. В зависимости от технической категории дороги и суммарного минимального расчетного числа приложения нагрузки на наиболее нагруженной полосе покрытия принимается требуемый модуль упругости дорожной одежды.

5.6. Значение k_n от отклонения суммарного движения транспортных средств для разных типов дорожной одежды

Тип дорожной одежды	Значение коэффициента k_n при различных категориях дорог				
	I	II	III	IV	V
Капитальный	1,49	1,49	1,38	1,31	–
Облегченный	–	1,47	1,32	1,26	1,06
Переходный	–	–	1,19	1,16	1,04

5.7. Требуемый модуль упругости дорожной одежды в зависимости от числа приложений нагрузки на наиболее нагруженную полосу

Категория дороги	Суммарное минимальное расчетное число приложений расчетной нагрузки на наиболее нагруженную полосу	Требуемый модуль упругости одежды, МПа		
		капитальной	облегченной	переходной
I	750 000	230	–	–
II	500 000	220	210	–
III	375 000	200	200	–
IV	110 000	–	150	100
V	40 000			

Принимаемый модуль упругости дорожной одежды должен быть не менее (табл. 5.7) [30].

K_c – коэффициент суммирования, определяемый по формуле

$$K_c = \frac{qT_{\text{сл}} - 1}{q - 1}, \quad (5.16)$$

где q – показатель изменения интенсивности движения данного типа автомобиля по годам; $T_{\text{сл}}$ – расчетный срок службы дороги.

Следовательно, в зависимости от конструктивных параметров автомобиля по данным зависимостям можно определить нагрузку от транспортного средства на дорожное покрытие.

5.3. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА ШИНЫ С ДОРОЖНЫМ ПОКРЫТИЕМ

При движении машины осевая нагрузка и сила тяги передается на колесо, которое распределяет приложенные к нему силы через контактную поверхность в виде напряжений сжатия и сдвига на поверхность дорожного покрытия. Анализ конструктивных параметров пневматических шин для автомобильного транспорта показал, что они находятся в широких пределах. В соответствии с ГОСТ Р 52899–2007 для каждой марки шины нормированы эксплуатационные режимы (нагрузка и давление). Установлено, что площадь контакта пневматической шины, а также распределение напряжений в зоне контакта шины с поверхностью покрытия зависит также от конструктивных параметров шины, нагрузки и внутреннего давления в шине.

5.8. Предельные нагрузки на ось расчетного двухосного автомобиля

Группа расчетной нагрузки	Нормативная статическая нагрузка на ось, кН	Нормативная статическая нагрузка на поверхность покрытия от колеса расчетного автомобиля, $Q_{расч}$, кН	Расчетные параметры нагрузки	
			P, МПа	D, см
A1	100	50	0,60	37/33
A2	110	55	0,60	39/34
A3	130	65	0,60	42/37

Примечание. В числителе – для движущегося колеса, в знаменателе – для неподвижного.

При расчете дорожных конструкций на прочность, в целях обеспечения работоспособности дорожных конструкций автомобильных дорог, среднее удельное давление в зоне контакта шины с поверхностью покрытия определено нормативным документом ОДН 218.046-01 и принимается, с учетом расчетной нагрузки (A1, A2 и A3) и давления в шине, в пределах 0,6 МПа (табл. 5.8).

Анализ методов расчета напряжений в зоне контакта шины с поверхностью покрытия, согласно нормативным документам [28 – 30] показал, что имеется общий подход к расчету напряжений в зоне контакта шины с дорожным покрытием. С учетом деформации шины, зависящей от осевой нагрузки и давления в шине в основу расчета принят отпечаток шины с поверхностью покрытия, выраженный через условный диаметр, который определяют по формуле [28, 30]

$$D = \sqrt{\frac{40Q}{\pi p}}, \quad (5.17)$$

где Q – расчетная нагрузка, передаваемая колесом на поверхность покрытия, кН; p – давление воздуха в шине, МПа.

Анализ параметров пневматических шин для транспортных средств (ГОСТР 52899–2007) показал, что согласно нормам эксплуатационных режимов шин нормируемая нагрузка находится ниже нормативной статической нагрузки на поверхность покрытия от колеса. В то же время давление в шине для грузового транспорта отличается от расчетных параметров нагрузки при расчете дорожных конструкций на прочность (табл. 5.9).

5.9. Расчет напряжений в зоне контакта пневматической шины с поверхностью покрытия

Обозначение шины	Нормы эксплуатационных режимов		Давление, МПа	Расчетный диаметр площади контакта, см	Контактная поверхность шины с покрытием, см ²	Расчетное среднее давление на покрытие, МПа
	Нормируемая нагрузка, Н					
	одинарная	сдвоенная				
<i>Легковые грузовые шины, радиальные</i>						
185/80R15C	8581	–	0,44	15,8	195	0,44
225/75R16C	14 220	–	0,59	17,5	241	0,59
<i>Легковые грузовые шины, диагональные</i>						
5,90-13C	4168	–	0,2	16,3	209	0,20
6,40-13C	4903	–	0,25	15,8	196	0,25
<i>Грузовые шины, диагональные</i>						
7,50-20	17 660	17 170	0,68	18,2	260	0,68
12,00-24	39 240	35 810	0,77	25,5	510	0,77
<i>Грузовые шины, радиальные камерные</i>						
10,00R20	29 430	26 730	0,80	21,6	368	0,80
12,00R20	36 790	31 880	0,85	23,5	433	0,85
<i>Грузовые шины, радиальные бескамерные</i>						
295/80R22,5	32 860	30 170	0,85	22,2	387	0,85
11/70R22,5	29 430	27 470	0,87	20,8	338	0,87
<i>Легкие грузовые шины</i>						
165/55R14C	(1380)	2600	0,575	31,3	768	0,18
205/55R16C	1500	2840	0,375	26,3	544	0,27
225/55R17C	1800	3400	0,375	28,8	653	0,27
175/70R14C	1380	2600	0,375	25,2	501	0,27
195/70R14C	1650	3100	0,475	31,1	758	0,21

Анализ данных, представленных в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

- метод расчета напряжений в зоне контакта шины с поверхностью покрытия позволяет рассчитать среднее значение напряжения по площади контакта;

- для некоторых транспортных средств эксплуатационные режимы рассчитаны на высокое давление в шинах, а, следовательно, среднее значение напряжения по площади контакта выше допустимой расчетной нагрузки на дорожную одежду;

- величина среднего давления на контактную поверхность покрытия зависит не только от нагрузки на колесо и давления воздуха в шине, но и конструктивных характеристик шины.

Контактная поверхность пневматической шины зависит от нагрузки на шину и внутреннего давления воздуха в шине. При передаче осевой нагрузки транспортного средства на дорожное покрытие в зоне контакта возникают напряжения сжатия и сдвига, величина которых зависит от осевой нагрузки и скорости движения машины. При недостаточном давлении воздуха в шине, за счет деформации шины, площадь контакта возрастает, что способствует понижению среднего контактного давления в зоне контакта. В то же время, за счет упругости боковой части корда равномерность распределения среднего давления нарушается и на боковой поверхности зоны контакта напряжения превышают среднее значение на 10...15%. Наличие протектора на шине уменьшает площадь контакта на 25...40% от первоначальной площади [4, 25]

Площадь контактной поверхности шины с покрытием зависит от типа и радиуса шины, давления воздуха в шине и осевой нагрузки (рис. 5.3) [25].

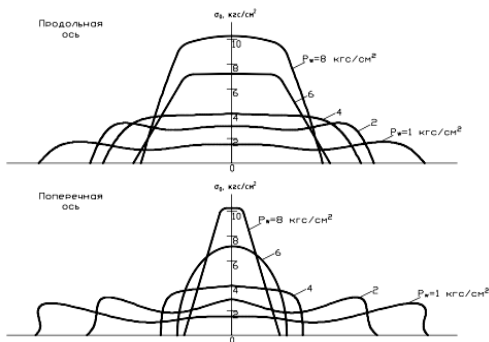


Рис. 5.3. Влияние давление воздуха в шине на эпюру распределения напряжений в зоне контакта шины с поверхностью покрытия

Из представленных данных на рис. 5.3 видно, что в зависимости от внутреннего давления воздуха в шине площадь контакта, а следовательно, и величина напряжений в зоне контакта, меняются в широких пределах. В процессе эксплуатации транспортных средств, для повышения их эффективности при транспортировке грузов, обеспечивают коэффициент использования машины по грузоподъемности близко к единице, а в некоторых случаях и выше. Выполнение таких условий способствует росту осевой нагрузки на шины, а, следовательно, и напряжений в зоне контакта шины с поверхностью покрытия дороги. При повышении осевой нагрузки выше нормированной или при уменьшении внутреннего давления, шина деформируется. Величина деформации шины зависит от конструктивных параметров (числа слоев) шины. В процессе движения транспортного средства, за счет деформации шины, возрастает сопротивление движению машины. При деформировании шины происходит повышение температуры шины, что влияет на ее работоспособность. Поэтому при эксплуатации транспортных средств постоянно контролируется давление в шине.

Согласно предъявляемым требованиям к эксплуатации транспортных средств давление воздуха в шине и осевая нагрузка на колесо не должны превышать предельно допустимые величины. Превышение указанных параметров способствует быстрому износу шины и преждевременному их разрушению.

Установлено, что на процесс уплотнения материала влияет время действия нагрузки. Движение транспортных средств осуществляется с более высокими скоростями по отношению к движению катков в процессе уплотнения уложенного материала в выбоину покрытия. Скорость перемещения транспортных средств влияет на время действия нагрузки на уплотняемый материал. Поэтому время воздействия на уложенный материал при движении транспортных средств значительно меньше и требуется значительное увеличение количества приложения нагрузки для достижения более высокой прочности уложенного материала в выбоину.

Установлено, что площадь контакта пневматической шины зависит конструктивных характеристик шины, определяемых модулем упругости шины и способностью материала сопротивляться внешней нагрузке (модуль упругости дорожного покрытия). При укладке битумо-минеральной смеси в выбоину дорожного покрытия и воздействия на нее нагрузки от транспортных средств, площадь контакта зависит от соотношения модуля упругости шины и модуля деформации уложенного материала. При модуле упругости шины выше модуля деформации смеси, шина не деформируется и может быть представле-

на как шина с постоянным радиусом, при этом деформируется слой смеси в выбоине. С повышением модуля деформации уплотняемой смеси происходит деформация шины и слоя материала. При достижении модуля деформации выше модуля упругости шины, происходит деформация шины. В зависимости от этого распределение и величина напряжений по площади контактной поверхности шины будет иметь разное значение. За величину напряжений в зоне контакта шины с поверхностью уплотняемого материала принимается величина среднего контактного напряжения, которое определяется как отношение общей нагрузки на шину (P) к контактной поверхности. Для установления влияния давления в шине на значения среднего давления в шине проведены расчеты для шин 11.00R20 и 12.00. R20 для серийного ряда автомобиля КАМАЗ моделей 43253, 43255, 53229, 55111, 65115, 65116, 65117, 6540 при нормируемой нагрузке на шину 29,4 и 32,86 кН, которые представлены на рис. 5.4.

Из представленных данных на рис. 5.4 видно, что между давлением воздуха в шине и средним давлением в зоне контакта шины с поверхностью покрытия имеется прямо пропорциональная зависимость, что подтверждается результатами других авторов [3, 4]. Численное значение среднего давления в зоне контакта шины с поверхностью от давления в шине (в абсолютных значениях) можно определить по формуле

$$\sigma_{\text{ср}} = 1,02P, \text{ МПа}, \quad (5.18)$$

где P – давление в шине, МПа. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Анализ технических характеристик автомобильных шин, согласно ГОСТ Р 52899–2007 показал, что между давлением воздуха в шине и допустимой нагрузкой на колесо существует определенная связь, зависящая также от конструктивных параметров шины (рис. 5.5).

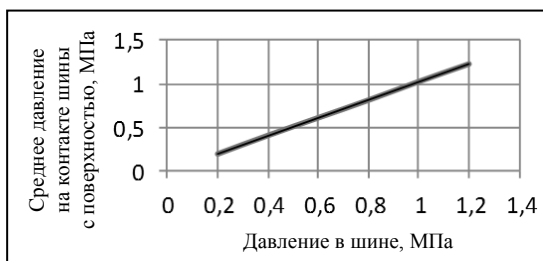


Рис. 5.4. Зависимость средних давлений в зоне контакта шины с поверхностью от давления в шине (в абсолютных значениях)

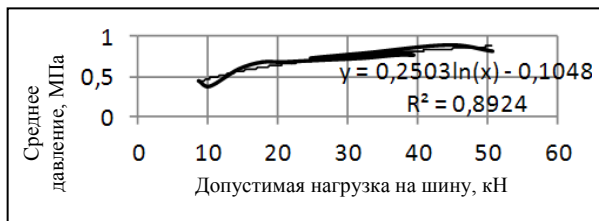


Рис. 5.5. Зависимость давления воздуха в шине от допустимой нагрузки на шину

Из представленных данных на рис. 5.5 видно, что величина среднего давления в шине зависит не только от давления в шине, но и конструктивных параметров, связанных с применением определенного количества слоев резины. Такое конструктивное решение позволяет повысить модуль деформации шины, что влияет на несущую способность и обеспечивает большую нагрузку на шину.

Величина среднего контактного давления в зоне контакта зависит от упругих свойств шины. Чем выше жесткость шины, тем меньше контактная поверхность и выше контактные напряжения. На рисунке 5.6 представлены зависимости контактных напряжений в зоне соприкосновения шины с поверхностью покрытия от осевой нагрузки, представленной в относительной величине. За единицу принята нормативная статическая нагрузка на поверхность покрытия от колеса расчетного автомобиля.

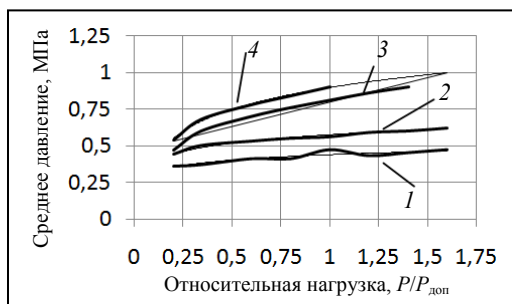


Рис. 5.6. Зависимость средних давлений в зоне контакта шины с жесткой поверхностью покрытия от нагрузки (по данным Н. Я. Хархута, В. А. Смоленцовой):
 1 – 0,3 МПа; 2 – 0,5 МПа; 3 – 0,7 МПа; 4 – 0,9 МПа

Из представленных зависимостей видно, что они характеризуются логарифмической зависимостью и могут быть определены, в зависимости от относительной нагрузки, следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ср}} &= 0,05 \ln(P/P_{\text{доп}}) + 0,44; \\ \sigma_{\text{ср}} &= 0,08 \ln(P/P_{\text{доп}}) + 0,57; \\ \sigma_{\text{ср}} &= 0,033 \ln(P/P_{\text{доп}}) + 0,46; \\ \sigma_{\text{ср}} &= 0,21 \ln(P/P_{\text{доп}}) + 0,89.\end{aligned}\tag{5.19}$$

Коэффициент корреляции уравнений равен 0,85 до 0,99.

Численные значения средних давлений в зоне контакта шины с жесткой поверхностью покрытия в абсолютных значениях с учетом относительной нагрузки представлены в табл. 5.10.

Представим значения средних давлений в зоне контакта шины с жесткой поверхностью покрытия в относительных величинах от нагрузки, принимая за единицу значения средних напряжений при разной относительной нагрузке (табл. 5.11).

Из представленных данных в табл. 5.11 можно сделать вывод, что между относительной нагрузкой на шину и средним давлением в зоне контакта шины с поверхностью имеется зависимость, которая представлена на рис. 5.8.

5.10. Значения среднего давления в зоне контакта шины с уплотняемой поверхностью при разных значениях относительной нагрузки на шину

Относительная нагрузка	Значения среднего напряжения в зоне шины с поверхностью, МПа			
	0,2	0,36	0,44	0,47
0,4	0,37	0,50	0,60	0,68
0,6	0,41	0,53	0,70	0,78
0,8	0,41	0,55	0,76	0,84
1,0	0,47	0,56	0,81	0,90
1,2	0,43	0,59	0,86	0
1,4	0,45	0,60	0,90	–
1,6	4,7	6,2	0	0

**5.11. Значения относительного среднего давления
в зоне контакта шины с уплотняемой поверхностью
при разных значениях относительной нагрузки на шину**

Относительная нагрузка	Значения среднего напряжения в зоне шины с поверхностью в зоне контакта шины с поверхностью				$\Sigma n/n$
0,2	0,86	0,71	0,58	0,6	0,69
0,4	0,88	0,9	0,74	0,75	0,81
0,6	0,95	0,95	0,86	0,86	0,91
0,8	0,98	0,98	0,94	0,93	0,96
1,0	1,	1,0	1,0	1,0	1,0
1,2	1,05	1,07	1,06	–	1,06
1,4	1,07	1,09	1,1	–	1,09
1,6	1,12	1,13	–	–	1,125

Численное значение коэффициента, устанавливающего связь между средним напряжением в зоне контакта шины с уплотняемой поверхностью от относительной нагрузки определяется зависимостью

$$\sigma_{cp} = 0,21 \ln(P/P_{доп}) + 1,02. \quad (5.20)$$

Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Из представленных данных на рис. 5.7 видно, что площадь контакта шины с уплотняемой поверхностью материала зависит от давления воздуха в шине, а следовательно, зависит и величина среднего контактного давления.

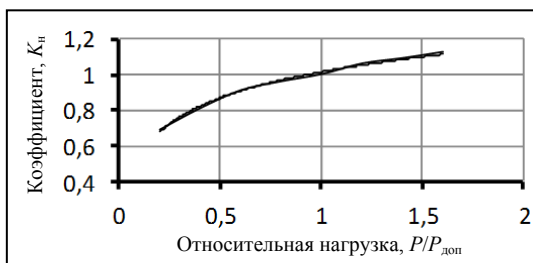


Рис. 5.7. Зависимость средних давлений в зоне контакта шины с жесткой поверхностью покрытия от нагрузки (в относительных значениях)

Следует заметить, что при взаимодействии автомобильной шины с уплотняемым материалом, за счет рисунка протектора шины, величина контактных напряжений в зоне контакта увеличивается за счет уменьшения контактной поверхности шины. Согласно исследованиям, увеличение напряжений в зоне контакта может увеличиваться на 30...70%.

Установлено, что распределение средних напряжений в зоне контакта поверхности, имеющей форму эллипсоида, зависит от максимального давления и определяется по формуле

$$\sigma_{cp} = 2\sigma_{max}/3. \quad (5.21)$$

На основании экспериментальных исследований получена зависимость для определения максимальных контактных напряжений при взаимодействии пневматической шины с уплотняемым материалом, которая имеет вид [25]:

$$\sigma_{max} = K_m \sqrt{q/R\pi^2(v_1 + v_2)}, \text{ кг/см}^2, \quad (5.22)$$

где K_m – поправочный коэффициент, зависящий от давления воздуха в шине. Значение коэффициента определяется по табл. 5.12; q – линейное давление, кг/см; R – радиус шины, см; v_1 – коэффициент упругости шины, кг/см²; v_2 – коэффициент упругости поверхности уплотняемого материала, учитывающего упругую и остаточную деформации материала, кг/см². Численное значение коэффициента определяется по формуле

$$v_2 = 0,4/E, \text{ см}^2/\text{кгс}, \quad (5.23)$$

где E – модуль деформации материала.

5.12. Значение поправочного коэффициента

Давление воздуха в шине, кгс/см ²	Поправочный коэффициент
Менее 3	1,3
4...7	1,0
8...9	0,9

Коэффициент упругости шины, с учетом параметров и нагрузки на шину ($\text{кг}/\text{см}^2$) рассчитывается по формуле [32]

$$v_1 = [0,055/p_w] \sqrt{[P\sqrt{DB}]} / p_w D^2 B, \text{ см}^2/\text{кг}, \quad (5.24)$$

где P – нагрузка на площадь контакта, кгс ; D – диаметр шины, см ; p_w – давление в шине, $\text{кг}/\text{см}^2$; B – ширина зоны контакта шины, см .

Тогда величина среднего контактного напряжения под пневматической шиной, с учетом характеристик пневматической шины, в зоне контакта с поверхностью будет определяться

$$p_w \sigma_{\max} = \left[2K_m \sqrt{q/R\pi^2(v_1 + v_2)} \right] / 3, \text{ кг}/\text{см}^2. \quad (5.25)$$

5.4. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА ЧАСТИЦ СМЕСИ ПРИ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ ОТ ШИНЫ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В процессе движения транспортных средств нагрузка через контактную поверхность шины передается дорожному покрытию, в том числе и битумоминеральной смеси, уложенной в выбоину дорожного покрытия (рис. 5.8).

При воздействии на частицу нагрузки, равной величине среднего напряжения в зоне контакта шины с поверхностью покрытия, происходят разные процессы, зависящие от состояния уложенного материала в выбоину дорожного покрытия. На рисунке 5.9 представлено напряженное состояние частицы материала при воздействии на нее шины транспортного средства.

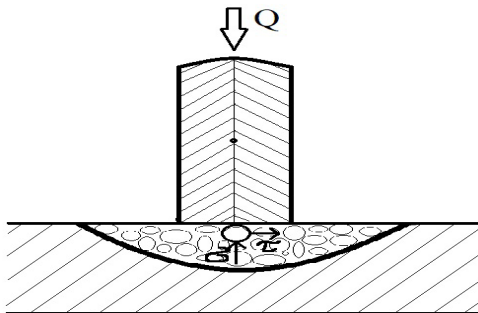


Рис. 5.8. Взаимодействие шины с частицей смеси в выбоине покрытия

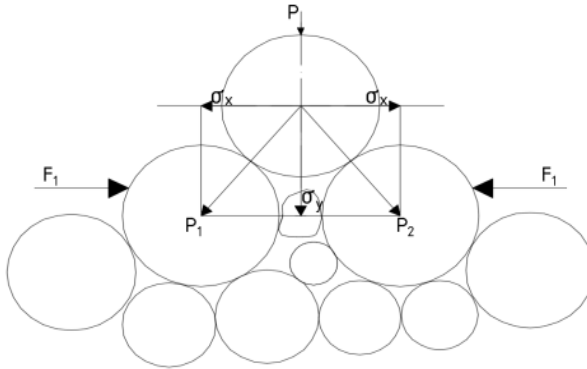


Рис. 5.9. Напряженное состояние частицы материала при воздействии колеса транспортного средства

При передаче нагрузки на частицу уложенного материала в выбоину дорожного покрытия возникают напряжения сжатия (нормальные) за счет осевой нагрузки и сдвига (касательные), за счет силы тяги. В зависимости от свойств уложенного материала в выбоину покрытия при инъекционно-струйном методе и передаваемой нагрузке от транспортных средств возможно развитие упругих или пластических или упруго-вязко-пластических деформаций, что характеризует процесс доуплотнения уложенного материала. Условие протекания процесса восприятия нагрузки уложенным материалом в выбоине покрытия можно представить в виде:

- упругая деформация

$$\sigma_y + \tau_y \geq \sigma_{\text{конт}};$$

- пластическая деформация

$$\sigma_{\text{конт}} \geq \sigma_y + \tau_y;$$

- уплотнение

$$\sigma_y + \tau_y = (0,9 - 1,0)[\sigma]_{\text{пр}};$$

- сдвиг частиц относительно друг друга,

$$\sigma_x + \tau_x = [\tau_{\text{сд}}], \quad (5.26)$$

где σ_y, τ_y – напряжения от действия нагрузки транспортных средств;
 $\sigma_{\text{конт}}$ – напряжения в зоне контакта шины с частицей материала, МПа;
 $[\sigma]_{\text{пр}}$ – предел прочности на сжатие, МПа; $[\tau_{\text{сд}}]$ – предел прочности материала на сдвиг, МПа.

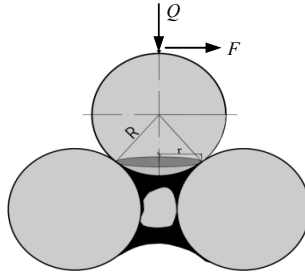


Рис. 5.10. Образование площадки распределения напряжений при контактировании частиц между собой

При передаче нагрузки на частицу уложенного в выбоину покрытия материала она передает нагрузку через зоны контакта другим частицам. Отмечалось, что в этом случае возникает контактная площадка, по которой равномерно распределяются напряжения (рис. 5.10).

Размеры контактной площадки представлены в табл. 5.13.

В отличие от рассмотренной ранее схемы контактирования частиц при укладке частиц смеси струйным методом, при действии нагрузки на частицу от транспортных средств возникают касательные напряжения, способствующие, при соответствующих условиях, перемещению частиц в горизонтальной плоскости, что способствует более плотной укладке частиц материала и повышению прочностных характеристик. Установлено, что радиус площади распределения среднего напряжения частицы укладываемого материала, определяется выражением (3.38) и зависит от диаметра минеральной частицы (табл. 5.13). На рисунке 5.11 представлено распределение напряжений в зоне контакта частицы под действием нагрузки от пневматической шины.

Аналогично рассмотренной ранее схемы при выводе зависимости распределения напряжений в зоне контакта частиц принимаем степенную функцию вида

$$\sigma = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3 + a_4\varphi^4, \quad (5.27)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты ряда.

5.13. Влияние диаметра частицы на параметры контактной площадки

Диаметр частицы, мм	2,5	5,0	10,0	15,0	20,0
Радиус r , мм	0,35	0,51	0,72	0,91	1,04
Угол z , рад	0,28	0,204	0,144	0,121	0,104

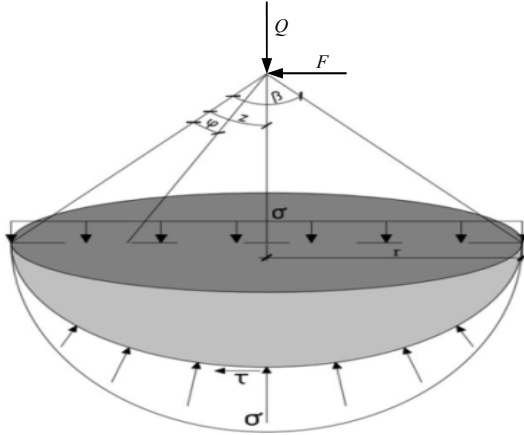


Рис. 5.11. Схема взаимодействия шины с уплотняемым материалом:
 Q – нагрузка от шины; T – сила сопротивления; β – угол контактной площадки частицы; z – угол между краем площадки и осью частицы; φ – переменная величина, характеризующая величину напряжения в зоне контакта; $\bar{\sigma}$, $\bar{\tau}$ – нормальные и касательные напряжения в уплотняемом материале; r – радиус частицы

Напряженное состояние частицы материала в зоне контакта будет определяться

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_x + \tau_y + \tau_x, \text{ МПа}, \quad (5.28)$$

где $\sigma_y, \sigma_x, \tau_y, \tau_x$ – составляющие общего напряжения в частице от действия вертикальных и горизонтальных силовых факторов.

Взаимодействие колеса с уплотняемым материалом, при условии равновесия действующих сил в зоне контакта, можно представить в виде системы уравнений

$$\begin{aligned} \sum X = 0 &= \int_0^z F\sigma \sin(z - \varphi) d\varphi - \int_z^\beta F\sigma \sin(\varphi - z) d\varphi + \\ &+ \int_0^z \mu F\bar{\sigma} \cos(z - \varphi) d\varphi - \int_z^\beta F\bar{\sigma}\mu \cos(\varphi - z) d\varphi = T; \\ \sum Y = 0 &= \int_0^z F\sigma \cos(z - \varphi) d\varphi + \int_z^\beta F\sigma \cos(\varphi - z) d\varphi + \\ &+ \int_0^z \mu F\bar{\sigma} \sin(z - \varphi) d\varphi - \int_z^\beta F\bar{\sigma}\mu \sin(\varphi - z) d\varphi + Q = 0. \end{aligned} \quad (5.29)$$

Начальные условия имеют вид:

$$\text{при } \varphi = 0 \rightarrow \sigma_x = \sigma_y = \tau_y = \tau_x = 0;$$

$$\varphi = \beta \rightarrow \sigma_x = \sigma_y = \tau_y = \tau_x = 0. \quad (5.30)$$

Граничные условия можно представить в виде

$$\varphi = z d\sigma_y / d\varphi = 0; \quad d\tau_x / d\varphi = 0; \quad \sigma_x + \tau_y = 0. \quad (5.31)$$

Анализ характера распределения напряжений в зоне контакта частицы с дорожным покрытием показал, что степенная зависимость более точно отражает физику процесса взаимодействия с уплотняемым материалом и соответствует характеру экспериментальных данных. Поэтому при выводе зависимости распределения напряжений по дуге контакта частицы с поверхностью выбоины, в качестве аппроксимирующей зависимости, принята функция вида

$$\sigma = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3 + a_4\varphi^4, \quad (5.32)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты ряда; φ – переменная величина, характеризующая рассматриваемую точку на дуге контакта частицы с поверхностью материала в выбоине. С учетом начальных условий определяем значение коэффициента a_0 , которое равно нулю.

Данная система уравнений, с учетом начальных и граничных условий, в конечном виде имеет решение

$$\begin{aligned} \sigma_k = & (A_{11} + B_{11} + D_{11} + \Phi_{11})\varphi/\Delta + (A_{21} + B_{21} + D_{21} + \Phi_{21})\varphi^2/\Delta + \\ & + (A_{31} + B_{31} + D_{31} + \Phi_{31})\varphi/\Delta + (A_{41} + B_{41} + D_{41} + \Phi_{41})\varphi^4/\Delta, \end{aligned} \quad (5.33)$$

где φ – угол, характеризующий рассматриваемую точку на контактной поверхности частицы с материалом, град; A_i, B_i, D_i, Φ_i – коэффициенты, зависящие от параметров машины и свойств уплотняемого материала, численное значение которых определяется из выражений:

$$\begin{aligned} A_{11} &= R\beta^2[\beta y_2(C - \beta N) + y_3(\beta^2 M - C) + y_4(N - \beta M)]; \\ B_{11} &= R\beta^2\mu[\beta y_2(E - \beta W) + y_3(\beta^2 V - E) + y_4(W - \beta V)]; \\ D_{11} &= F\beta^2[\beta y_2(\beta W - E) + y_3(E - \beta^2 V) + y_4(\beta V - W)]; \\ \Phi_{11} &= F\beta^2\mu[\beta y_2(C - \beta N) + y_3(\beta^2 M - C) + y_4(N - \beta M)]; \\ A_{21} &= R\beta[\beta^2 y_1(\beta N - C) + y_3(C - \beta^3 K) + y_4(\beta^2 K - N)]; \\ B_{21} &= R\beta\mu[\beta^2 y_1(\beta W - E) + y_3(E - \beta^3 U) + y_4(\beta^2 U - W)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{21} &= F\beta[\beta^2 y_1(E - \beta W) + y_3(\beta^3 U - E) + y_4(W - \beta^2 U)]; \\
\Phi_{21} &= F\beta\mu[\beta^2 y_1(\beta N - C) + y_3(C - \beta^3 K) + y_4(\beta^2 K - N)]; \\
A_{31} &= R\beta[\beta y_1(C - \beta^2 M) + y_2(\beta^3 K - C) + y_4(M - \beta K)]; \\
B_{31} &= R\beta\mu[\beta y_1(E - \beta^2 V) + y_2(\beta^3 U - E) + y_4(V - \beta U)]; \\
D_{31} &= F\beta[\beta y_1(\beta V - E) + y_2(E - \beta^3 U) + y_4(\beta U - V)]; \\
\Phi_{31} &= F\beta\mu[\beta y_1(C - \beta M) + y_2(\beta^3 K - C) + y_4(M - \beta K)]; \\
A_{41} &= R\beta[\beta y_1(\beta M - N) + y_2(N - \beta^2 K) + y_3(\beta K - M)]; \\
B_{41} &= R\beta\mu[\beta y_1(\beta V - W) + y_2(W - \beta^2 U) + y_3(\beta U - V)]; \\
D_{41} &= F\beta[\beta y_1(W - \beta V) + y_2(\beta U - W) + y_3(V - \beta U)]; \\
\Phi_{41} &= F\beta\mu[\beta y_1(\beta M - N) + y_2(N - \beta K) + y_3(\beta K - M)], \quad (5.34)
\end{aligned}$$

где K, U, M, V, N, W, C, E – коэффициенты, зависящие от параметров контакта частицы с уплотняемым материалом. Численное значение коэффициентов определяется выражениями:

$$\begin{aligned}
K &= -\beta \cos(\beta - z) + \sin(\beta - z) + \sin z; \quad U = \beta \sin(\beta - z) + \cos(\beta - z) - \cos z; \\
M &= -\beta^2 \cos(\beta - z) + 2U; \quad V = \beta^2 \sin(\beta - z) - 2K; \\
N &= -\beta^3 \cos(\beta - z) + 3V; \quad W = \beta^3 \sin(\beta - z) - 3M; \\
C &= -\beta^4 \cos(\beta - z) + 4W; \quad E = \beta^4 \sin(\beta - z) - 4N; \quad (5.35)
\end{aligned}$$

Δ – определитель системы уравнений, значение которого определяется из выражения

$$\begin{aligned}
\Delta &= \beta[y_2(l_3 l_8 - l_4 l_7) + y_3(l_4 l_6 - l_2 l_8) + y_4(l_2 l_7 - l_3 l_6)] - \\
&\quad - \beta^2[y_1(l_3 l_8 - l_4 l_7) + y_3(l_4 l_5 - l_1 l_8) + y_4(l_1 l_7 - l_3 l_5)] + \\
&\quad + \beta^3[y_1(l_2 l_8 - l_4 l_6) + y_2(l_4 l_5 - l_1 l_8) + y_4(l_1 l_6 - l_2 l_5)] + \\
&\quad + \beta^4[y_1(l_2 l_7 - l_3 l_6) + y_2(l_3 l_5 - l_1 l_7) + y_3(l_1 l_6 - l_2 l_5)], \quad (5.36)
\end{aligned}$$

где $l_1 = K + \mu U$; $l_2 = M + \mu V$; $l_3 = N + \mu W$; $y_4 = C + \mu E$; $l_5 = U - \mu K$; $l_6 = V - \mu M$; $l_7 = W - \mu N$; $l_8 = E - \mu C$; R и F – величины, характеризующие силовые параметры пневматической шины. Численное значение определяется по формулам: $R = Q/S$, кН/м²; $F = -T/S$, кН/м²; S – площадь контакта, м².

5.14. Результаты расчета контактных напряжений

Диаметр частицы, мм	Среднее напряжение, МПа	Контактные напряжения, МПа					
		угол контакта, град					
		z		z/2		z/4	
		σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y
2,5	0,025	0	0,067	0,05	0,065	0,029	0,058
5,0	0,020	0	0,07	0,06	0,010	0,03	0,087
10,0	0,012	0	0,062	0,05	0,11	0,03	0,10
15,0	0,01	0	0,061	0,05	0,14	0,03	0,12
20,0	0,009	0	0,06	0,05	0,17	0,03	0,15

Составляющие общего напряжения при возникновении контактов между частицами определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Q_y} &= (A_{11}\varphi + A_{21}\varphi^2 + A_{31}\varphi^3 + A_{41}\varphi^4) / \Delta; \\
 \tau_{F_y} &= (D_{11}\varphi + D_{21}\varphi^2 + D_{31}\varphi^3 + D_{41}\varphi^4) / \Delta; \\
 \sigma_{Q_x} &= (B_{11}\varphi + B_{21}\varphi^2 + B_{31}\varphi^3 + B_{41}\varphi^4) / \Delta; \\
 \tau_{F_x} &= (\Phi_{11}\varphi + \Phi_{21}\varphi^2 + \Phi_{31}\varphi^3 + \Phi_{41}\varphi^4) / \Delta.
 \end{aligned}
 \tag{5.37}$$

При условии $\varphi = 0$ и $\varphi = \beta$ составляющие общего напряжения равны нулю. Из полученных уравнений видно, что напряжения в зоне контакта частицы зависят от силового воздействия на частицу и свойств вяжущего. Результаты расчетов напряжения в зависимости от размера частиц смеси представлены в табл. 5.14.

5.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНОЙ

При укладке битумоминеральной смеси в выбоину дорожного покрытия с применением струйно-инъекционного метода процесс укладки и уплотнения осуществляется за счет перемещения частиц смеси под действием кинетической энергии, полученной частицей материала при движении воздушного потока, образуемого воздушодувным агрегатом применяемого оборудования. Проведенные исследования по определению прочностных характеристик уложенных смесей в выбои-

ну покрытия показали, что прочность материала и его водонасыщение не соответствуют предъявляемым требованиям к уплотненному материалу (коэффициент уплотнения смеси после укладки смеси равен 0,5...0,6; водонасыщение свыше 10%). Поэтому в дальнейшем процесс уплотнения смеси происходит за счет воздействия нагрузки от колес транспортных средств. Силовое воздействие при контакте колеса с уложенным материалом в выбоине покрытия способствует развитию деформации, которую можно представить в виде двух составляющих: упругую (обратимую) – ε_y и остаточную (необратимую) – ε_o (рис. 5.12).

В зависимости от свойств уплотняемого материала соотношения составляющих полную деформацию материала изменяются в определенных интервалах. Экспериментально установлено, что в процессе уплотнения материала отношение между упругой и остаточной деформациями находится в пределах 0,2...0,5 [16]. Величина полной деформации материала при уплотнении зависит от соответствия величины контактных напряжений пределу прочности материала, времени действия нагрузки и скорости изменения напряженного состояния материала [25]. В зависимости от этого в уплотняемом материале возникают упругие, упруго-пластичные, упруго-вязкие или вязко-пластичные деформации.

Напряженно-деформированное состояние материала зависит от скорости приложения нагрузки, т.е. скорости движения транспортного средства, которое характеризует время действия нагрузки на материал. Численное значение скорости изменения напряженного состояния определяется зависимостью

$$v_{cp} = \sigma_{cp} / t_k, \quad (5.38)$$

где σ_{cp} – среднее контактное напряжение в зоне контакта шины с поверхностью смеси, МПа; t_k – время действия контактных напряжений, с.

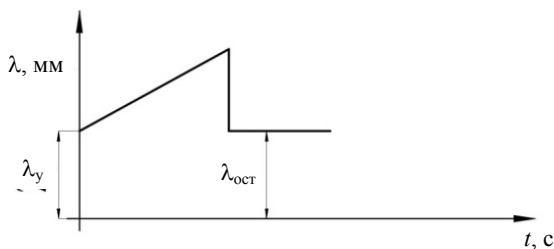


Рис. 5.12. Развитие деформации при действии нагрузки

Под действием напряжений в зоне контакта шины с уложенной смесью и скорости изменения напряженного состояния материала возникающая необратимая деформация возрастает, значение которой определяется уравнением

$$\varepsilon_o = \varepsilon_n t_1, \quad (5.39)$$

где ε_n – необратимая деформация материала, возникающая при действии одного цикла нагрузки, мм; t_1 – суммарное время действия нагрузки, с.

При действии нагрузки на уплотняемый материал соотношение между деформациями меняется в зависимости от свойств материала. С повышением плотности материала прирост остаточной деформации материала уменьшается. При этом упругая деформация материала также понижается, но не столь интенсивно как остаточная. На заключительной стадии уплотнения полная деформация равняется упругой. При действии определенной нагрузки процесс уплотнения заканчивается.

Рассмотрим процесс взаимодействия шины транспортного средства с уложенным материалом в выбоине дорожного покрытия с применением модели, описывающей свойства материала методами реологии. Применение реологических моделей позволяет прогнозировать накопление остаточных деформаций при разных условиях действия нагрузки на материал. При разработке приняты следующие допущения:

- битумоминеральная смесь является вязкопластической, сжимаемой средой;
- необратимая деформация является вязкопластической;
- модель обладает упругопластическими свойствами;
- напряжения релаксируют по определенному закону;
- деформации увеличиваются до конечного значения;
- при разгрузке происходит частичное восстановление упруго-вязко-пластичных деформаций;
- с ростом плотности в материале меняется соотношение между обратимой и необратимой деформациями.

Анализ работ по моделированию уплотнения материала показал, что в основном модели описывают процесс уплотнения асфальто-бетонных смесей вибрационными катками [23]. Применяемые реологические модели описывают свойства уплотняемого материала: упругость – моделью Гука, вязкость – моделью Ньютона, трение – моделью Сен-Венана. Однако ввиду отсутствия реологических характеристик моделей, они не нашли широкого практического применения.

На рисунке 5.13 представлена реологическая модель, моделирующая процесс взаимодействия пневматического колеса с уложенной в выбоину покрытия битумоминеральной смесью, представленной моделью упруго-вязкого тела Максвелла, состоящей из пружины и последовательно соединенного с ней вязкого элемента. Необратимая деформация представлена телом Сен-Венана. Пружина подчиняется закону Гука, а упруго-вязкий элемент моделируется амортизатором, представляющим собой поршень, который перемещается в жидкости и подчиняется закону Ньютона [4].

На поверхность материала в выбоине покрытия действует сила Q , которая представляет собой осевую нагрузку транспортного средства на шину. Распределение нагрузки по контактной поверхности шины с материалом выбоины создает напряженное состояние материала, способствующее развитию деформации материала. Невесомая пробка 3 перемещается вместе с площадкой 2 и моделирует остаточную деформацию материала после снятия при действии нагрузки. Пробка 1 перемещается вместе с площадкой 2 вниз с условием, что $x_1 - x_2 = 0$. При перемещении плиты вверх вместе с ним, до верхнего упора пробки 1, перемещается площадка 2. Скорость подъема определяется скоростью перемещения в вертикальной плоскости вибрационной плиты.

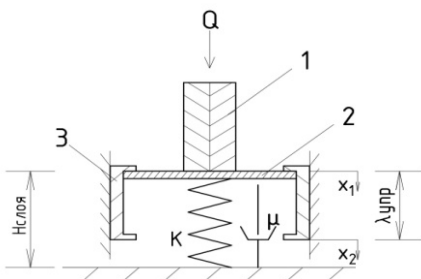


Рис. 5.13. Реологическая модель уплотнения битумоминеральной смеси в выбоине дорожного покрытия пневматической шиной:

- 1 – пневматическая пробка; 2 – поверхность уплотняемой смеси;
 3 – невесомая пробка; Q – сила тяжести, передаваемая от транспортного средства на шину, кН; K_1 – коэффициент жесткости (коэффициент упругости) материала, Н/мм; η – коэффициент вязкого сопротивления (модуль вязкости), Нс/мм; $\lambda_{упр}$ – деформация (перемещение невесомой пробки), характеризующее упругую деформацию материала, мм;
 X_1 – перемещение поверхности покрытия выбоины под действием нагрузки, мм; X_2 – перемещение пробки, характеризующее остаточную деформацию, или воздействие на материал вибрационной плитой, мм

Начальные условия перемещения плиты и пробки имеют вид

$$t = t_0; x_1 = 0; x_2 = x_0. \quad (5.40)$$

Q – сила, действующая на частицу материала, кН

$$Q = \begin{cases} k_1 x_1 + c x_2 & \text{при } x_2 - x_1 \leq x_0; \\ x_2 = x_0 & \text{при } x_2 - x_1 > x_0; \\ x_2 = x_{2\max} - v_0 t & \text{при } x_2 - x_1 > x_0; \end{cases} \quad (5.41)$$

$$x_2 \gg x_0,$$

где v_0 – скорость перемещения пробки.

Реологическое состояние материала определяется выражением

$$\varepsilon = \sigma_K / K, \text{ мм}, \quad (5.42)$$

где ε – относительная необратимая деформация; K – коэффициент пропорциональности, КПа

Уруго-вязкие свойства материала описываются уравнением

$$\partial\sigma/\partial t = E\partial S/\partial t - \sigma/\tau, \quad (5.43)$$

где E – модуль упругости, Н/мм; τ – время релаксации вязкого элемента, с; σ – напряжение, МПа; S – относительная деформация, мм.

Численное значение модуля упругости определяется выражением

$$E = \sigma/\varepsilon, \text{ Н/мм}. \quad (5.44)$$

ε – деформации, включая мгновенно-упругую и эластичную деформацию.

Время релаксации можно определить из выражения

$$\tau = \eta/E, \text{ с}. \quad (5.45)$$

При чисто упругой деформации величина напряжения определяется выражением

$$\sigma = ES. \quad (5.46)$$

Скорость изменения напряжения при упругой деформации пропорциональна скорости изменения деформации

$$d\sigma/dt = EdS/dt - A\sigma, \quad (5.47)$$

где A – коэффициент пропорциональности, численное значение которого определяется зависимостью

$$A = E/\eta. \quad (5.48)$$

Подставляя значение A в формулу (5.47), получим

$$d\sigma/dt = E(dS/dt - \sigma/\eta). \quad (5.49)$$

Из данной зависимости видно, что при условии $dS/dt \geq \sigma/\eta$ материал проявляет только упругие свойства и при $dS/dt \leq \sigma/\eta$ вязкие свойства.

При движении транспортного средства по дорожному покрытию осевая нагрузка на материал, уложенный в выбоину покрытия, воспринимается через контактную поверхность шины. Через некоторый промежуток времени, зависящий от колесной формулы машины и скорости его движения, развитие деформации можно представить в виде

$$dS/dt = d\sigma/dt/E + A\sigma/E. \quad (5.50)$$

Интегрируя по времени и вместо коэффициента A подставляя его значения, получаем

$$S_t = \sigma_0/E + \sigma_0 t/E\tau. \quad (5.51)$$

Из полученного уравнения видно, что первый член выражения определяет только упругую деформацию, а второй отражает остаточную (вязкую) деформацию. Следовательно, чем меньше время релаксации материала и больше напряжения в зоне контакта, тем интенсивнее рост остаточной деформации.

Величина остаточной деформации при многократном приложении нагрузки будет определяться [7]

$$S_n = n\sigma t_n/\eta, \quad (5.52)$$

где n – число циклов приложения нагрузки на уплотняемый материал; σ – напряжения в зоне контакта шины с частицей смеси, МПа; t_n – время действия нагрузки на материал, с; η – коэффициент вязкости битумоминеральной смеси, Нс/мм.

5.6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШИН С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВЫБОИНЫ

Для определения деформации слоя битумоминеральной смеси в выбоине покрытия использована программа для расчета деформации от действующей нагрузки [15]. Используя данные испытаний реологических характеристик битумоминеральных смесей, с учетом действия нагрузки, на рис. 5.14 представлено численное значение деформации слоя смеси 0,05 м при действии напряжения в зоне контакта шины с поверхностью выбоины 0,6 МПа и коэффициенте жесткости смеси 0,3 Н/мм.

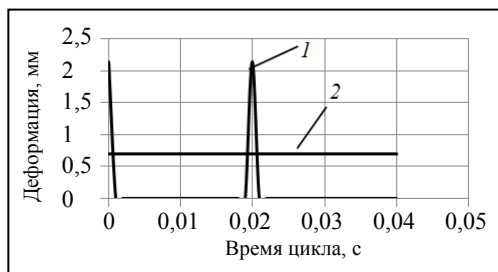


Рис. 5.14. Деформации смеси в выбоине покрытия при действии нагрузки от шины:
1 – полная деформация; *2* – упругая деформация

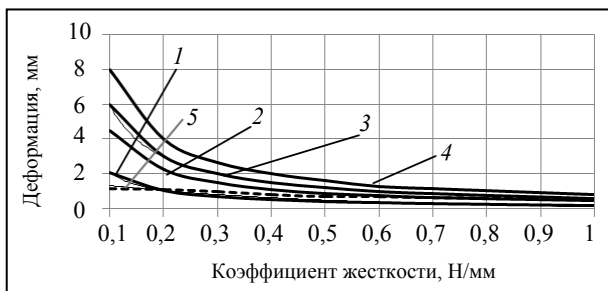


Рис. 5.15. Напряжение под шиной в зоне контакта с материалом выбоины, МПа:
1 – 0,21; *2* – 0,45; *3* – 0,6; *4* – 0,8; *5* – упругая деформация

Результаты моделирования деформаций битумоминеральной смеси в выбоине дорожного покрытия при действии осевой нагрузки от транспортных средств с учетом нормативной нагрузки на шины согласно ГОСТ Р 52899–2007 представлены на рис. 5.15.

Из представленных на рис. 5.15 данных видно, что в процессе движения транспортного средства с одинаковой нагрузкой на дорожное покрытие, деформация материала в выбоине покрытия уменьшается за счет увеличения жесткости смеси. Увеличение жесткости смеси приводит к повышению плотности, коэффициента уплотнения смеси, модуля деформации и модуля упругости дорожной одежды. При увеличении нагрузки от транспортного средства, с учетом характеристики смеси, возрастает деформация слоя смеси в выбоине, что может привести к разрушению слоя и понижению прочностных характеристик смеси. По результатам реологических испытаний битумоминеральной смеси установлены зависимости модуля упругости и модуля деформации смеси от коэффициента жесткости, которые представлены на рис. 5.16.

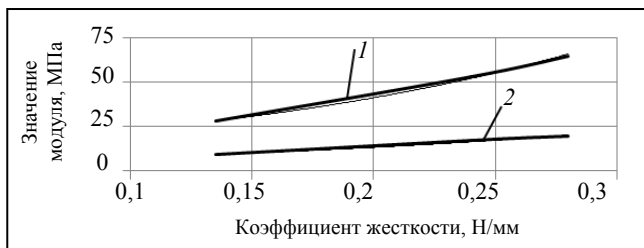


Рис. 5.16. Зависимость модуля упругости и модуля деформации смеси от коэффициента жесткости:

1 – модуль упругости; 2 – модуль деформации

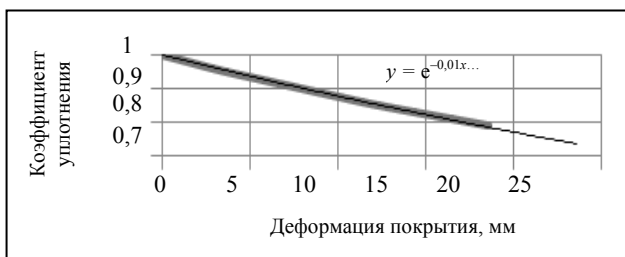


Рис. 5.17. Зависимость коэффициента уплотнения от деформации битумоминеральной смеси при толщине слоя 0,05 м

Установлено, что численное значение модуля упругости при заданной величине коэффициента жесткости может быть определено по формуле

$$E_y = 12,75e^{5,863K_{ж}}, \text{ МПа.} \quad (5.53)$$

Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Значение модуля деформации смеси в зависимости от коэффициента жесткости определяется по формуле

$$E_d = 4,83e^{5,11K_{ж}}, \text{ МПа.} \quad (5.54)$$

Коэффициент корреляции уравнения равен 0,987.

По результатам исследований установлено, что между коэффициентом уплотнения и деформацией слоя смеси существует зависимость, которая представлена на рис. 5.17.

Следовательно, определив реологические характеристики битумоминеральной смеси, на основании полученных зависимостей можно определить прочностные характеристики смеси выбоине покрытия,

а также коэффициент уплотнения после воздействия нагрузки на уложенный материал в выбоину покрытия. По результатам моделирования взаимодействия пневматической шины со слоем битумоминеральной смеси можно сделать следующие выводы:

- установлена зависимость деформации уложенного слоя битумоминеральной смеси от коэффициента жесткости смеси с учетом напряжения в зоне контакта шины с поверхностью выбоины. Данная зависимость позволяет рассчитать допустимую нагрузку от транспортных средств, обеспечивающую процесс уплотнения смеси в выбоине. Это позволяет организовать движение транспортного потока до момента окончания формирования структуры материала в выбоине покрытия;

- установлена зависимость модуля упругости и модуля деформации битумоминеральной смеси от коэффициента жесткости смеси с учетом толщины слоя материала в выбоине;

- повышение осевой нагрузки (напряжения в зоне контакта шины с поверхностью выбоины) в период формирования структуры смеси в выбоине по отношению к коэффициенту жесткости (модулю упругости) способствует развитию пластических деформаций в слое материала выбоины, что приводит к понижению коэффициента уплотнения смеси.

6. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ УКЛАДКИ БИТУМОМИНЕРАЛЬНОЙ СМЕСИ СТРУЙНО-ИНЪЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ НА КАЧЕСТВО РЕМОНТА ВЫБОИН ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Повышение интенсивности движения и рост осевой нагрузки на дорожные одежды от транспортных средств приводит к понижению работоспособности дорожных покрытий и способствует образованию дефектов на покрытиях в виде выбоин. Для повышения срока службы покрытия и обеспечения безопасности движения транспорта требуется оперативный уход за дорожными покрытиями, направленный на устранение возникающих дефектов покрытия в процессе эксплуатации дороги. Несвоевременное проведение работ приводит к ухудшению состояния покрытия и в дальнейшем, как следствие, к удорожанию работ по приведению его в нормативное состояние. Доказано, что несвоевременное устранение дефектов на дорожных покрытиях, в виде выбоин и просадок, в течение 2–3 лет приводит к росту затрат на их устранение в 2 раза [2]. Применение струйно-инъекционного метода позволяет оперативно осуществлять работы по устранению дефектов на покрытиях нежесткого типа, в том числе и устранение выбоин без всяких подготовительных работ. Поэтому его относят к скоростному методу ремонта покрытий. Он характеризуется значительно меньшим временем на подготовку и проведение работ по устранению дефектов по сравнению с традиционными способами ямочного ремонта покрытий (с применением литых и горячих смесей). Установлено, что применение данного метода, с экономической точки зрения, более выгодно по отношению к другим применяемым методам ремонта выбоин покрытия нежесткого типа [23]. Согласно рекомендациям, к преимуществам данного метода, помимо отсутствия подготовительных работ, является устранение дополнительной операции уплотнения при укладке материала в выбоину. Предусматривается, что дополнительное уплотнение смеси в выбоине происходит при движении транспортных средств, и только в случае невозможности уплотнения допускается применение малого самоходного катка, вибротрамбующей плиты или другого способа [32]. Анализ рекомендаций показал что они имеют общий характер, отсутствуют практические рекомендации по технологическим режимам укладки и уплотнения битумоминеральных смесей, обеспечивающим качественный ремонт выбоин на дорожных покрытиях. В качестве обоснования отсутствия потребности в уплотнении уложенной битумоминеральной смеси принимается тот факт, что

битумоминеральная смесь укладывается в выбоину покрытия скоростью 30...32 м/с с высоты от поверхности покрытия 0,6 м. За счет кинетической энергии частицы смеси при ударе с поверхностью выбоины происходит равномерное распределение и уплотнение укладываемого материала в выбоину.

В целях определения прочностных характеристик материала в выбоине покрытия, с учетом воздействия нагрузки при движении транспортных средств, были взяты образцы из покрытия, отремонтированные в 2014 и 2015 гг. При визуальном осмотре внешних повреждений на поверхности отремонтированных выбоин обнаружено не было. Установлено, что предел прочности на сжатие образцов находится в пределах от 1,2 до 1,7 МПа, что ниже минимального значения по требованию ГОСТ 9128–2009. В то же время предел прочности переформованных образцов при температуре 20 °С находится в пределах прочности от 2,1 до 2,3 МПа, что соответствует требованию ГОСТ 9128–2009. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что уплотнение битумоминеральной смеси, даже под действием нагрузки от транспортных машин, не всегда обеспечивает достижение максимальных характеристик уплотняемой смеси.

В целях уточнения влияния технологических режимов при укладке битумоминеральной смеси с применением струйно-инъекционного метода в процессе ремонта выбоин проведены экспериментальные исследования в производственных условиях с использованием дорожного ремонтера Мадпатчер (Madpatcher) МР 6,5 WD). С этой целью осуществлялось приготовление битумоминеральной смеси оптимального гранулометрического состава из гранитного щебня фракции 2,5...10 мм, имеющего марку по прочности не менее 1200, марку по износу И-1 с содержанием пылеватых и глинистых частиц не более 1%. Для получения качественных характеристик смеси при выполнении ремонтных работ использовался чистый, промытый и подогретый до 50 °С гранитный щебень. В качестве вяжущего материала применялась быстрораспадающаяся катионная битумная эмульсия ЭБК-1 60%-ной концентрации. Оптимальная температура битумной эмульсии во время проведения работ была принята равной 71...80 °С.

Для определения прочностных характеристик уложенного материала в выбоину покрытия были изготовлены специальные формы с соотношением высоты и стороны периметра, равным единице. В производственных условиях формы заполнялись смесью. После выдерживания образцов в течение двух недель проводилось определение предела прочности. Установлено, что предел прочности образцов соответствует значениям от 0,4 до 0,5 МПа.



Рис. 6.1. Внешний вид образцов в выбоине дорожного покрытия, отобранного в производственных условиях:

а – после укладки смеси без воздействия транспортных средств;

б – при действии транспортных средств в течение года

В целях уточнения временного фактора на характеристики асфальтобетона (плотности, водонасыщения и предела прочности) с применением битумоминеральных смесей были взяты образцы из выбоины покрытия через 90 – 100 дней после укладки. Испытания образцов проводились в соответствии с ГОСТ 12801–98. Полученные значения характеристик сравнивались с нормативными по ГОСТ 9128–2009. Установлено, что определить предел прочности таких образцов практически невозможно вследствие их разрушения (расслоения материала) (рис. 6.1).

Из представленных рисунков видно, что образец битумоминеральной смеси в выбоине, взятый после укладки струйно-инъекционным методом без дополнительного уплотнения после распределения, имеет высокую пористость, не обеспечивает требуемую прочность материала в выбоине покрытия. Следовательно, для обеспечения более высоких характеристик смеси и достижения требуемых характеристик материала при укладке смеси в выбоину, требуется дополнительное воздействие на уложенный материал в выбоину, что позволит повысить качество ремонтных работ и эффективность струйно-инъекционного метода.

В целях уточнения влияния технологических режимов на качество укладки смеси в выбоину дорожного покрытия проведены исследования в производственных условиях. Для уточнения влияния толщины укладываемого слоя и высоты подачи материала при укладке на коэффициент уплотнения и водонасыщение асфальтобетона были отфрезерованы выбоины разной глубины (3, 5, 7, 10 и 13 см) при высоте подачи смеси 0,3, 0,6 и 0,80 м (рис. 6.2).



а)



б)

Рис. 6.2. Подготовка участков покрытия и укладка смеси струйно-инъекционным методом

Процентное содержание эмульсии в смеси, согласно принятым рекомендациям, составляло 20%. Для определения характеристик асфальтобетона в выбоине покрытия (плотность, водонасыщение и предел прочности), при рекомендованных режимах укладки смеси в выбоину, через 90 – 100 дней после укладки смеси были взяты образцы. Испытания образцов проводились в соответствии с ГОСТ 12801–98. Полученные значения сравнивались с нормативными характеристиками по ГОСТ 9128–2009.

Обработка полученных результатов исследования проводилась с применением полного факторного эксперимента (ПФЭ). За факторы, влияющие на полученные характеристики асфальтобетона после укладки без уплотнения, при постоянных параметрах машины, приняты высота подачи материала из сопла патрубка до поверхности покрытия и толщина укладываемого слоя битумоминеральной смеси. Согласно плану экспериментальных исследований задавалось количество опытов и число повторностей с учетом влияющих факторов. В соответствии с полученными значениями устанавливалась зависимость влияния переменных факторов на конечный результат уплотнения [10].

В качестве примера представлена методика определения зависимости плотности смеси (ρ , г/см³) при укладке в выбоину покрытия при переменных значениях толщины слоя укладки (x_1) и высоты подачи материала в выбоину (x_2). Принято количество опытов $n = 4$, число повторений $m = 3$ при количестве влияющих факторов – 2. Для каждого образца определялись: плотность ρ (г/см³), водонасыщение r (%) и

коэффициент уплотнения k . Исходная матрица планирования представлена в табл. 6.1.

1. Для рассматриваемых факторов определяем центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной z_i от натуральной x_i (табл. 6.2).

2. Средние выборочные результаты $\bar{\rho}_j$ и матрица планирования с учетом всех взаимодействий и средних значений отклика представлены в табл. 6.3.

Коэффициенты уравнения регрессии имеют значения (табл. 6.4).

6.1. Исходная матрица планирования ПФЭ

№ эксперимента	Изучаемый фактор		Результаты опытов		
	x_1	x_2	ρ_1	ρ_2	ρ_3
1	–	–	1,89	1,92	1,91
2	+	–	1,81	1,74	1,78
3	–	+	1,90	1,94	1,94
4	+	+	1,78	1,78	1,79

6.2. Кодирование факторов

Факторы	Верхний уровень x_i^+	Нижний уровень x_i^-	Центр $x_i^0 = \frac{x_i^+ + x_i^-}{2}$	Интервал варьирования $\lambda_i = \frac{x_i^+ - x_i^-}{2}$	Зависимость кодированной переменной от натуральной $z_i = \frac{x_i - x_i^0}{\lambda_i}$
x_1	13	3	8	5	$z_1 = \frac{x_1 - 8}{5}$
x_2	80	60	70	10	$z_2 = \frac{x_2 - 70}{10}$

6.3. Матрица планирования для обработки результатов

№ эксперимента	Факторы		Взаимодействия	Результаты опытов			$\Sigma n/n$
	z_1	z_2	$z_1 z_2$	ρ_1	ρ_2	ρ_3	$\bar{\rho}_j$
1	–	–	+	1,89	1,92	1,91	1,91
2	+	–	–	1,81	1,74	1,78	1,78
3	–	+	–	1,90	1,94	1,94	1,93
4	+	+	+	1,78	1,78	1,79	1,78

6.4. Коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициенты	Формула	Значение
b_0	$\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \bar{\rho}_j$	1,85
b_1	$\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{j1} \bar{\rho}_j$	–0,07
b_2	$\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{j2} \bar{\rho}_j$	0,007
b_{12}	$\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{j1} z_{j2} \bar{\rho}_j$	–0,003

Дисперсия воспроизводимости и среднее квадратическое отклонение коэффициентов имеют значения:

$$S_{\{f\}}^2 = 0,0006 ; S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S_{\{f\}}^2}{nm}} = \sqrt{\frac{0,0006}{12}} = 0,02.$$

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n(m-1) = 8$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{\text{кр}} = 2,3$. Следовательно, $t_{\text{кр}} S_{\text{коэф}} = 2,3 \cdot 0,02 = 0,046$. При сравнении полученных

значений с коэффициентами уравнения регрессии, представленными в табл. 6.4, видно, что значимыми являются коэффициенты b_0 , b_1 , и b_2 . Уравнение регрессии в кодированных переменных имеет вид:

$$\rho = 1,85 - 0,07z_1 + 0,007z_2. \quad (6.1)$$

Проверим полученное уравнение на адекватность по критерию Фишера. Для определения расчетного значения критерия $F_{\text{расч}}$ определим остаточную дисперсию $S_{\text{ост}}^2$. Для этого определим значения исследуемого параметра по полученному уравнению регрессии, подставляя +1 или -1 вместо z_j в соответствии с номером j эксперимента (табл. 6.3)

$$\tilde{\rho}_1 = 1,9 \quad \tilde{\rho}_2 = 1,77 \quad \tilde{\rho}_3 = 1,93 \quad \tilde{\rho}_4 = 1,79.$$

Тогда остаточная дисперсия равна

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{3}{4-3} \sum_{j=1}^4 (\tilde{\rho}_j - \bar{\rho})^2 = 0,0009.$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{расч}}$ определяем по формуле

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\{f\}}^2}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{0,0006}{0,0009} = 0,67.$$

Табличное значение критерия $F_{\text{табл}}$ находим из таблицы критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по соответствующим степеням свободы $k_1 = n - r = 4 - 3 = 1$ и $k_2 = n(m - 1) = 4 \cdot 2 = 8$, т.е. $F_{\text{табл}} = 5,32$. Поскольку расчетное значение критерия Фишера меньше табличного ($F_{\text{расч}} = 0,67 < F_{\text{табл}} = 5,32$), то уравнение регрессии (6.1) адекватно.

Из уравнения (6.1) видно, что наибольшее влияние оказывает фактор z_1 (скорость подачи материала), так как он имеет коэффициент, наибольший по абсолютной величине. Наименьшее влияние оказывает фактор z_2 (высота подачи материала). Так как коэффициент при z_1 отрицателен, то с увеличением этого фактора уменьшается отклик, т.е. скорость подачи материала. При факторе z_2 коэффициент положителен, это значит, что при увеличении данного фактора увеличивается и отклик, т.е. высота подачи материала.

Запишем уравнение регрессии (1) в натуральных переменных, подставляя вместо z_i выражения через x_i , которые берем из последнего столбца табл. 6.2:

$$\rho = 1,85 - 0,07 \frac{x_1 - 8}{5} + 0,007 \frac{x_2 - 70}{10}. \quad (6.2)$$

После преобразования получаем уравнение относительно натуральных переменных

$$\rho = 1,91 - 0,014x_1 + 0,0007x_2. \quad (6.3)$$

Аналогичным образом получены уравнения для функции водонасыщения. Уравнение регрессии в натуральных переменных имеет вид

$$r = 3,07 - 0,32 \frac{x_1 - 8}{5} + 0,047 \frac{x_2 - 70}{10}. \quad (6.4)$$

После выполнения преобразования получаем уравнение относительно натуральных переменных

$$r = 3,25 - 0,064x_1 + 0,0047x_2, \quad (6.5)$$

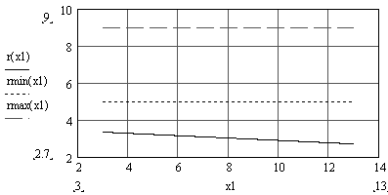
где r – водонасыщение материала, %.

На рисунке 6.3 показано поведение функции водонасыщения от фактора x_1 (толщины слоя выбоины, см), при фиксированном значении фактора x_2 (высоты подачи материала, см), а на рис. 6.4 – от фактора x_2 (высоты подачи материала, см), при фиксированном значении фактора x_1 (толщины слоя выбоины, см).

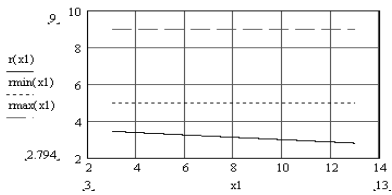
Из представленных рис. 6.3 и 6.4 видно, что полученное значение показателя водонасыщения материала соответствует требуемому нормативному значению по ГОСТ 9128–2009, которое для данного типа пористых смесей должно быть в интервале от 4 до 10% по объему. При 20% эмульсии по объему значение показателя водонасыщения ниже нормативного (смесь чрезмерно подвижная). Изменение толщины слоя выбоины и высоты подачи материала не оказывают существенного влияния на показатель водонасыщения битумоминеральной смеси.

Аналогичным образом получена зависимость для коэффициента уплотнения, которое имеет вид

$$k = 0,798 - 0,006x_1 + 0,001x_2. \quad (6.6)$$



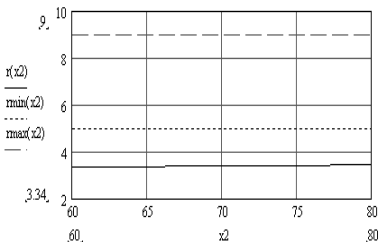
a)



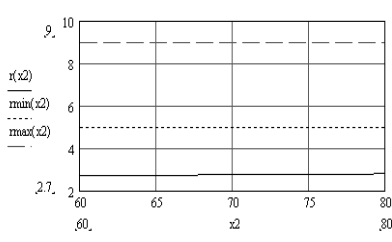
б)

Рис. 6.3. Функция водонасыщения:

$$a - x_2 = 60 \text{ см}; \quad \bar{b} - x_2 = 80 \text{ см}$$



a)

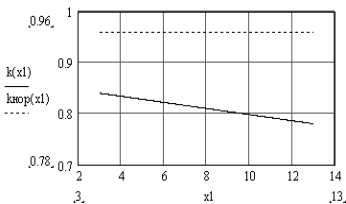


б)

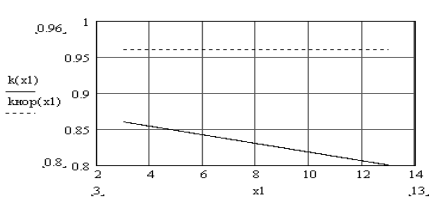
Рис. 6.4. Функция водонасыщения:

$$a - x_1 = 3 \text{ см}; \quad \bar{b} - x_1 = 13 \text{ см}$$

На рисунке 6.5 показано поведение функции коэффициента уплотнения от фактора x_1 (толщины слоя выбоины, см), при фиксированном значении фактора x_2 (высоты подачи материала, см), а на рис. 6.6 – от фактора x_2 (высоты подачи материала, см), при фиксированном значении фактора x_1 (толщины слоя выбоины, см).



a)



б)

Рис. 6.5. Функция коэффициента уплотнения:

$$a - x_2 = 60 \text{ см}; \quad \bar{b} - x_2 = 80 \text{ см}$$

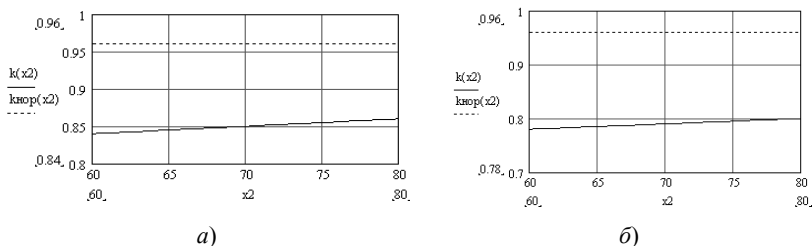


Рис. 6.6. Функция коэффициента уплотнения:
 $a - x_1 = 3; \bar{b} - x_2 = 13$

Из графиков на рис. 6.5 и 6.6 видно, что полученный коэффициент уплотнения материала не соответствует требуемому нормативному значению по ГОСТ 9128–2009, которое для асфальтобетона из холодных смесей должно быть не ниже – 0,99.

Вычисленные значения параметров отличаются от средних в допустимых пределах (табл. 6.5).

Таким образом, результаты проведенного полного факторного эксперимента по принятой модели эксперимента являются достоверными.

Для уточнения влияния уплотняющей нагрузки на характеристики уложенной битумоминеральной смеси в выбоину покрытия смесь уплотнялась вибрационной плитой (ZITREK Z3K), автомобилем (Газель) и трамбующей машиной (DiamVN-75) (рис. 6.7).

Технические характеристики применяемого оборудования представлены в табл. 6.6.

6.5. Результаты проверки уравнений

Вычисленные значения параметров			Средние значения параметров		
ρ_j	r_j	k_j	$\tilde{\rho}_j$	\tilde{r}_j	\tilde{k}_j
1,91	3,10	0,84	1,91	3,33	0,837
1,77	2,46	0,78	1,78	2,71	0,783
1,92	3,11	0,86	1,93	3,44	0,863
1,78	2,47	0,80	1,78	2,79	0,797



а)



б)



в)

Рис. 6.7. Оборудование для уплотнения смеси в выбоине:
а – трамбующая машина; *б* – вибрационная плита;
в – автомобиль (ГАЗ-3302 Газель)

6.6. Технические характеристики оборудования для уплотнения смеси

Трамбующая машина: марка Diam VN-75	Число ударов – 650...695 уд./мин; сила удара – 1400 кг; подошва – 330×285 мм; вес – 75 кг
Вибрационная плита ZITREK Z3K	Мощность двигателя – 2,8 л.с.; ширина рабочей плиты – 320 мм; центробежная сила вибратора – 8,2 кН; масса – 53 кг; размеры – 650×385×465 мм
Автомобиль (ГАЗ-3302 Газель)	Масса автомобиля, кг: снаряженная – 1850...1900; полная – 3500; шины – 175R16С или 185R16С; количество осей – 2; колесная формула – 2...4



Рис. 6.8. Зависимость коэффициента уплотнения от расстояния сопла до поверхности покрытия, м

Установлено, что коэффициент уплотнения смеси при укладке зависит от расстояния сопла шланга машины до поверхности выбоины (рис. 6.8). Установленная связь подчиняется экспоненциальной зависимости и может быть представлена выражением

$$K_{\text{упл}} = 1,01e^{-0,36H}, \quad (6.7)$$

где H – расстояние сопла до поверхности покрытия, м. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Анализ данной зависимости показал, что с увеличением расстояния подачи смеси из сопла до укладываемой поверхности выбоины плотность материала понижается. Это объясняется тем обстоятельством, что процесс уплотнения происходит за счет энергии частицы материала при контакте друг с другом. В отличие от метода торкретирования, где частицы материала перемещаются с большой скоростью (120 м/с), при рассматриваемой технологии скорость частиц материала значительно меньше (5...7 м/с). Битумная пленка на поверхности минеральных частиц обладает определенным сопротивлением вдавливанию, для преодоления которого необходима кинетическая энергия. При небольшом расстоянии от сопла до поверхности выбоины, за счет полученной энергии частицей от потока воздуха, происходит более плотная упаковка минеральных частиц. Ввиду большого диаметра сопла (100 мм), при увеличении расстояния до поверхности выбоины, энергия уменьшается, что приводит к уменьшению плотности материала.

Установлено также, что с увеличением толщины укладываемого слоя материала в выбоину наблюдается понижение коэффициента уплотнения (рис. 6.9).

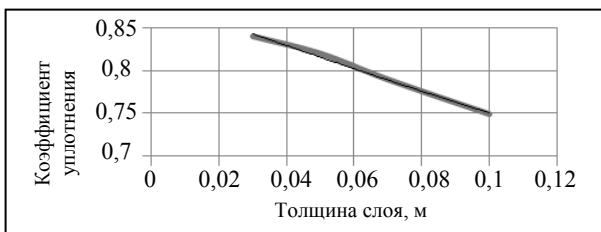


Рис. 6.9. Зависимость коэффициента уплотнения от толщины слоя укладки, м

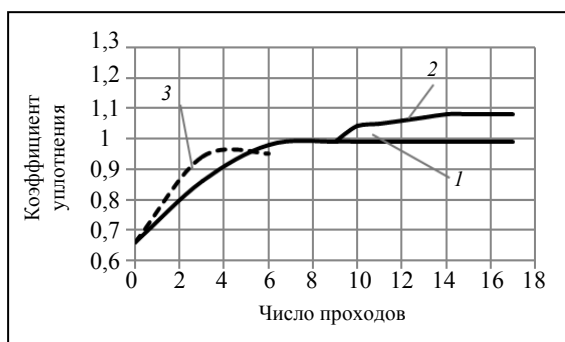


Рис. 6.10. Зависимость коэффициента уплотнения от числа проходов при толщине слоя 0,05 м:

1 – вибрационная плита; *2* – машина ударного действия; *3* – автомобиль

Аналогичная закономерность наблюдается и при укладке горячих асфальтобетонных смесей. На основании экспериментальных исследований доказано, что достичь более высокой плотности материала можно за счет дополнительного уплотнения (рис. 6.10).

Из представленных на рис. 6.10 данных видно, что за счет дополнительного уплотнения достигается более высокий коэффициент уплотнения смеси. Более низкий коэффициент уплотнения смеси при действии осевой нагрузки автомашины (Газель) по отношению к вибрационной плите и машине трамбующего действия можно объяснить недостаточными напряжениями в зоне контакта колеса с поверхностью материала в выбоине. Применение машин динамического действия позволяет достичь более высокого коэффициента уплотнения при условии начала выполнения работ после полного распада эмульсии (рис. 6.11).

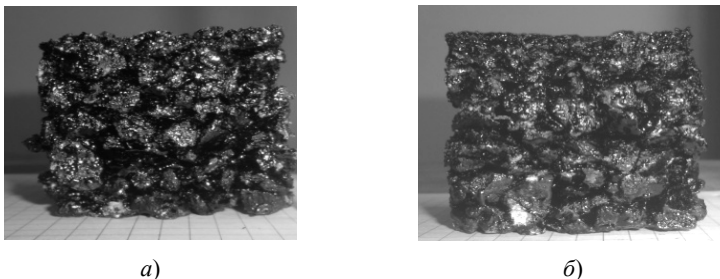


Рис. 6.11. Вид образцов с выбоины покрытия:

a – без дополнительного уплотнения;

б – с дополнительным уплотнением вибрационной плитой

На основании полученных результатов в производственных условиях можно сделать выводы:

– полученные экспериментальные данные подтверждают результаты теоретических исследований о необходимости введения в технологический процесс укладки битумоминеральной смеси при ремонте выбоин с применением струйно-инъекционного метода процесса уплотнения.

– существующее мнение производителей и пользователей оборудования об отсутствии дополнительного процесса уплотнения при укладке струйно-инъекционным методом материала в выбоине ошибочно.

– получены аналитические зависимости влияния технологических режимов подачи смеси (толщины слоя, высоты подачи смеси) на качество укладки в выбоину (коэффициент уплотнения, плотность, водонасыщение).

6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗКИ НА ДОРОЖНЫЕ ПОКРЫТИЯ НЕЖЕСТКОГО ТИПА ПРИ ДВИЖЕНИИ ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА С ПОЛНОЙ ЗАГРУЗКОЙ

В процессе эксплуатации автомобильных дорог с нежесткими покрытиями возникают дефекты в виде выбоин, которые, как правило, связаны с технологическими нарушениями при укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей. Наиболее часто это проявляется на дорогах с интенсивным движением транспорта и превышением осевой нагрузки на дорожные покрытия, что способствует понижению работоспособности дорожных покрытий.

Из представленного в главе 1 анализа применения струйно-инъекционного метода при ремонте выбоин на дорожных покрытиях

нежесткого типа видно, что данный метод хорошо зарекомендовал себя на автомобильных дорогах с малой интенсивностью движения и осевой нагрузкой. Его успешно применяют при ремонте дефектов в виде трещин, шелушения на поверхности покрытия, незначительных выбоин (0,01...0,02 м), когда толщина укладываемого слоя незначительна. Результаты экспериментальных исследований показали, что с увеличением толщины слоя смеси при укладке выше 0,03 м, характеристики смеси меняются, и с повышением нагрузки возникают пластические деформации, что влияет на качество ремонтных работ. Поэтому возникает вопрос о возможности его применения при ремонте выбоин на дорогах 1 и 2 технических категорий с высокой интенсивностью движения транспортных средств и значительной осевой нагрузкой. В целях уточнения применения струйно-инъекционного метода для ремонта выбоин на асфальтобетонных покрытиях с высокой интенсивностью движения и повышенной осевой нагрузкой, в производственных условиях проведены исследования, позволяющие уточнить результаты ремонтных работ по устранению выбоин с учетом условий эксплуатации дороги. Исследования проводились при ремонте выбоин на покрытиях нежесткого типа автомобильной дороги 2-й технической категории с интенсивным движением транспорта с применением дорожного ремонтера MADROG-MADPATCHER (рис. 6.12). Рассматриваемый участок автомобильной дороги относится ко 2-й технической категории с нагрузкой на дорожные конструкции А3 с максимальным напряжением под пневматическим колесом транспортного средства выше 0,6 МПа. Приведенная суточная интенсивность транспортного потока на данном участке составляет порядка 20 000 авт./сут.

Согласно принятым рекомендациям был произведен подбор оптимального гранулометрического состава гранитного щебня фракции 2,5...10 мм, имеющего марку по прочности не менее 1200, марку по износу И-1 и содержание пылеватых и глинистых частиц не более 1%.



Рис. 6.12. Дорожный ремонтер MADROG-MADPATCHER

Для приготовления битумоминеральной смеси использовался чистый, промытый и подогретый до 50 °С гранитный щебень. В качестве вяжущего материала использовалась быстрораспадающаяся катионная битумная эмульсия ЭБК-1 на битуме БНД 60/90 с пересчетом на битум 70%. Оптимальная температура битумной эмульсии во время проведения работ принималась равной 71...80 °С.

Для обеспечения заданной толщины слоя при укладке битумоминеральной смеси в выбоину дорожного покрытия и устранения влияния неровности основания выбоины на характеристики материала при его уплотнении в процессе движения транспортных средств место укладки смеси фрезеровали холодной фрезой. После фрезерования поверхность выбоины очищали струей воздуха под давлением, после чего укладывали смесь струйно-инъекционным методом (рис. 6.13). Толщина слоя смеси в выбоине равнялась 0,05 м.

Коэффициент предварительного уплотнения материала в выбоине покрытия после укладки смеси и в процессе движения транспортных средств определяется неразрушающим методом с использованием плотномера ПАБ-1, позволяющим определять плотность материала и коэффициент уплотнения после воздействия нагрузки (рис. 6.14).



Рис. 6.13. Подготовка места к ремонту выбоины и заполнение выбоины смесью



Рис. 6.14. Плотномер ПАБ-1



Рис. 6.15. Транспортный поток на участке ремонта покрытия

Движение транспортного потока на участке производства ремонтных работ покрытия фиксировалось в автоматическом режиме и представлено на рис. 6.15.

Параметры транспортных машин, перемещающиеся по ремонтному участку за установленное время, и параметры контакта шины с дорожным покрытием для данной группы машин (легковых длиной от 4 до 6 м и малых грузовых (6...9 м), грузовых (9...13 м) машин и автопоездов представлены в табл. 6.7. Из представленных данных в табл. 6.7 видно, что передаваемая нагрузка при движении транспортных средств на дорожное покрытие по ремонтному участку дороги, в частности на уложенный материал в выбоине покрытия, изменяется в широком интервале нагрузок в зависимости от осевой нагрузки автомобиля.

6.7. Параметры контакта шины автомобиля с дорожным покрытием

Марка машины	Обозначение шины	Нагрузка, кН	Давление в шине, МПа	Диаметр отпечатка, см
DAF XF 95	385/65R22,5	44,15	0,90	25
SCHMITZ CARGOBUL	295/80R22,5	32,86	0,85	22,19
КамАЗ	10,00R20	29,43	0,80	21,65
Газель	185/80R16C	8,58	0,44	15,7
Chevrolet Niva	205/75R15	5,05	0,21	17,5

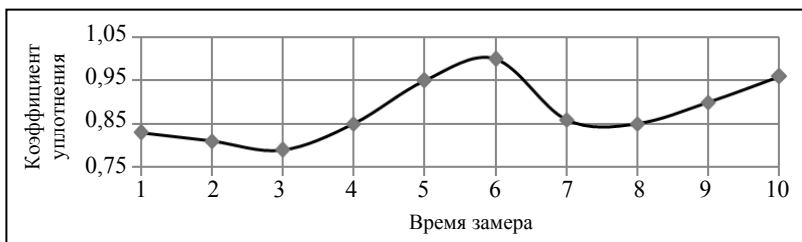


Рис. 6.16. Изменение коэффициента уплотнения битумоминеральной смеси в выбоине дорожного покрытия при движении транспортных средств во времени

Анализ транспортного потока на участке выполнения ремонтных работ показал, что на долю грузового транспорта, со значительной нагрузкой на дорожные одежды, приходится от 25 до 35% от общего количества транспортных средств. Для уточнения влияния нагрузки на коэффициент уплотнения смеси при воздействии осевой нагрузки от транспортных средств, через определенные промежутки времени, с учетом фиксации движения транспорта, замерялся коэффициент уплотнения. Результаты измерения коэффициента уплотнения смеси в выбоине покрытия представлены на рис. 6.16.

Установлено, что после укладки смеси в выбоину покрытия коэффициент уплотнения составляет 0,81. При движении транспорта коэффициент уплотнения, в зависимости от осевой нагрузки, имеет разные значения. После проезда легковых (до 6 м), малых грузовых (6...9 м), грузовых (9...13 м) машин и автопоездов значение коэффициента увеличивается до единицы, а после проезда большегрузного транспорта снижается до 0,79 (рис. 6.15). По истечении 10 ч после выполнения ремонтных работ, коэффициент уплотнения материала выбоины составил 0,85. Образцы материала, взятые с места производства ремонтных работ через два месяца после окончания работ, имеют коэффициент уплотнения 0,96 и водонасыщения в процентах по объему 9,3, что не соответствует требованиям ГОСТ 9128–2009. Часовая интенсивность движения транспортного потока с 9 до 19 ч находится в пределах от 680 до 800 авт./ч.

Такое изменение коэффициента уплотнения смеси в выбоине покрытия можно объяснить тем, что формирование структуры битумоминеральной смеси, в отличие от горячей асфальтобетонной смеси, происходит в течение сравнительно длительного промежутка времени [18]. В асфальтобетонных смесях при понижении температуры повышается вязкость битума на поверхности минерального материала, что способствует увеличению сил сцепления между частицами смеси и

росту прочности материала. При укладке битумоминеральной смеси в выбоину покрытия струйно-инъекционным методом (более 0,03 м), образуется высокопористая структура слоя смеси (рис. 6.11). Битумо-минеральная смесь, уложенная в выбоину покрытия, представляет собой замкнутое пространство, которое ограничено размерами выбоины, поверхность которого обработана гидроизоляционным материалом (битумом). Образовавшаяся вода при распаде битумной эмульсии заполняет поры между частицами смеси в слое выбоины, тем самым влияя на силы сцепления между частицами смеси, что сказывается на прочностных характеристиках слоя материала в выбоине. Уменьшение сил сцепления между частицами смеси способствует, при передаче нагрузки от шины на поверхность выбоины, развитию деформации в горизонтальной плоскости, что характеризуется незначительным изменением коэффициента жесткости слоя смеси (рис. 2.20). При движении транспорта, под действием напряжения в зоне контакта шины с поверхностью выбоины, происходит уплотнение смеси в выбоине покрытия. В зависимости от величины напряжения в контактной зоне и свойств уплотняемого материала может происходить как повышение коэффициента уплотнения материала, так и его уменьшение за счет развиваемой деформации материала (рис. 6.16).

Способность материала воспринимать внешнюю нагрузку, без разрушения слоя, характеризуется модулем упругости (E_y). При уплотнении материала, связанном с развитием необратимой деформации и образованием прочной структуры, свойства материала характеризуются модулем деформации (E_d) и коэффициентом упругости (K_j).

Экспериментально установлено, что между характеристиками материала воспринимать внешнюю нагрузку (E_y , E_d , K_j), имеются закономерности, которые представлены на рис. 6.17.

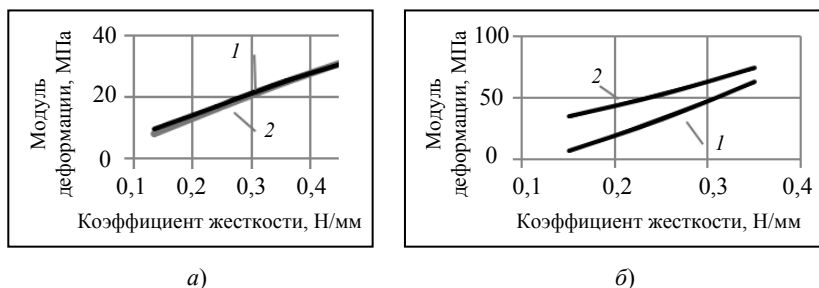


Рис. 6.17. Зависимость модуля упругости (а) и модуля деформации (б) от коэффициента жесткости слоя смеси:

1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,07 м

Анализ представленных данных на рис. 6.17 позволяет сделать вывод, что между параметрами E_y , E_d и $K_{ж}$ существует линейная зависимость. При незначительном изменении толщины укладываемого слоя модуль деформации уплотняемого материала в меньшей степени зависит от коэффициента жесткости по отношению к модулю упругости. Для установления общих закономерностей между характеристиками смеси (E_y и $K_{ж}$) принимаем значения модулей упругости при толщине слоя материала 0,05 м за единицу и обозначим полученную относительную величину через коэффициенты влияния толщины слоя на модуль упругости и модуль деформации (рис. 6.18).

Численное значение K_n определяется по формуле

$$K_n = 132,5H^2 - 82,9H + 13,96, \quad (6.8)$$

где H – толщина уплотняемого слоя битумоминеральной смеси, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 1,0.

Из представленного рисунка видно, что с повышением коэффициент жесткости смеси при действии нагрузки выше 0,25, значение стабилизируется и остается постоянным (1,0). Зависимости для расчета модулей упругости и деформации материала от коэффициента жесткости смеси имеют вид

$$E_y = K_n(278,95K_{ж} - 35,7), \text{ МПа};$$

$$E_d = 67,1K_{ж} + 0,8, \text{ МПа}. \quad (6.9)$$

Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

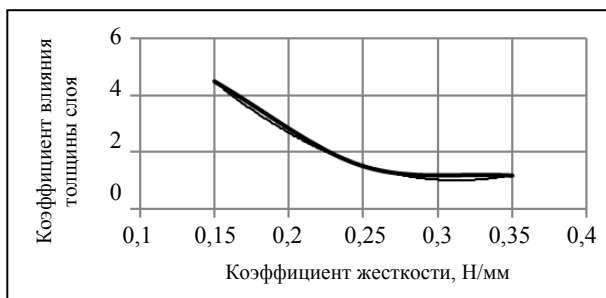


Рис. 6.18. Зависимость коэффициента K_n от жесткости слоя покрытия при разной толщине слоя покрытия

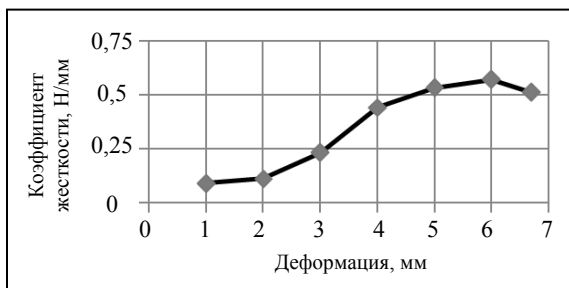


Рис. 6.19. Зависимость коэффициента жесткости от деформации

Экспериментально доказано, что под действием контактных напряжений под шиной автомобиля возникают деформации в слое материала. Превышение контактных напряжений по отношению к пределу прочности материала приводит к возникновению пластических деформаций, что характеризуется увеличением деформации материала и снижению коэффициента жесткости смеси. На рисунке 6.19 представлено изменение коэффициента жесткости битумоминеральной смеси от деформации, полученное экспериментально при нагружении слоя смеси толщиной 0,07 м.

Численное значение коэффициента жесткости смеси от деформации материала при действии нагрузки может быть определено по формуле

$$K_{ж} = -0,009\lambda^3 + 0,099\lambda^2 - 0,193\lambda + 0,18, \quad (6.10)$$

где λ – деформация слоя материала, мм. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

На основании экспериментальных данных, полученных в производственных условиях при проведении ремонтных работ с применением струйно-инъекционного метода, установлена зависимость между деформацией материала в выбоине покрытия и коэффициентом уплотнения смеси при действии транспортной нагрузки, которая представлена на рис. 6.20.

Численное значение деформации битумоминеральной смеси в выбоине покрытия, при толщине слоя смеси 0,05 м, с учетом коэффициента уплотнения смеси после воздействия транспортного средства, можно определить по формуле

$$\lambda = -56,26 \ln K_y - 0,183, \text{ мм}, \quad (6.11)$$

где K_y – коэффициент уплотнения смеси в выбоине. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,999.

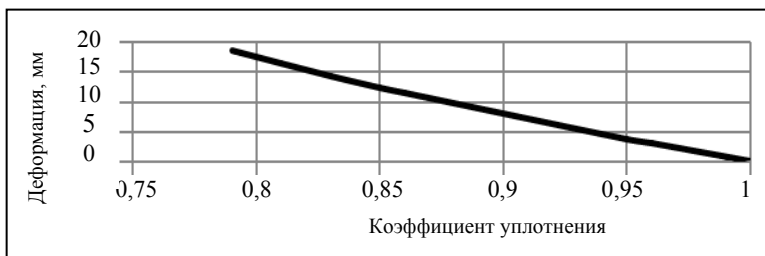


Рис. 6.20. Зависимость деформации битумоминеральной смеси в выбоине при разных значениях от коэффициента уплотнения

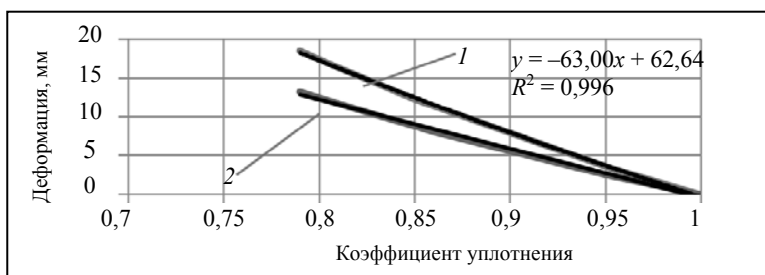


Рис. 6.21. Зависимость деформации смеси от уплотнения (K_y):
 1 – высота образца 70 мм; 2 – высота 50 мм

Аналогичные зависимости получены при лабораторных испытаниях битумоминеральной смеси (рис. 6.21).

Установлено, что величина деформации уплотняемого материала зависит от толщины слоя при укладке смеси. При толщине слоя укладки смеси 0,07, что соответствует размеру стандартного образца, зависимость имеет вид

$$\lambda = -78,79 \ln K_y - 0,2527, \text{ мм.} \quad (6.12)$$

Коэффициент корреляции уравнения равен 0,999.

Для расчета деформаций битумоминеральной смеси в выбоине дорожного покрытия при действии напряжений в зоне контакта шины с поверхностью выбоины от осевой нагрузки транспортного средства разработана программа на ЭВМ [4]. Расчет деформации смеси при действии нагрузки 0,6 МПа и коэффициенте жесткости 0,13 представлен на рис. 6.22.

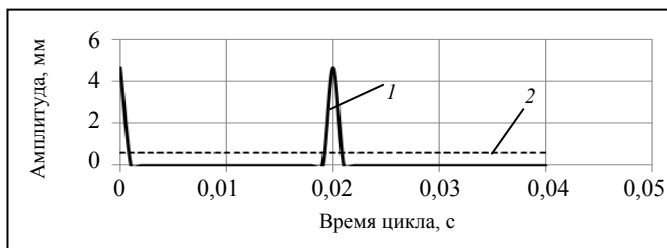


Рис. 6.22. Деформации смеси в выбоине покрытия при действии нагрузки от шины:
 1 – полная деформация; 2 – упругая деформация

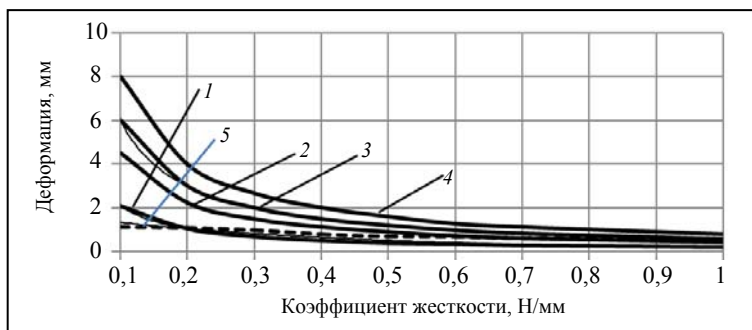


Рис. 6.23. Напряжение под шиной в зоне контакта с материалом выбоины, МПа:
 1 – 0,21; 2 – 0,45; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – упругая деформация

На рисунке 6.23 представлены результаты моделирования деформаций битумоминеральной смеси в выбоине дорожного покрытия при действии осевой нагрузки от транспортных средств с учетом нормативной нагрузки на шины согласно ГОСТ Р 52899–2007.

Из представленных на рис. 6.23 данных видно, что в процессе движения транспортного средства с одинаковой нагрузкой на дорожное покрытие деформация материала в выбоине покрытия уменьшается за счет возрастания жесткости смеси. Величина остаточной деформации при действии нагрузки будет определяться [26]

$$S_n = n\sigma t_n / \eta, \quad (6.13)$$

где σ – напряжения в зоне контакта, МПа; t_n – суммарное действие нагрузки на уложенный материал, с; n – число циклов приложения нагрузки на уплотняемый материал; η – коэффициент вязкости смеси, Нс/мм.

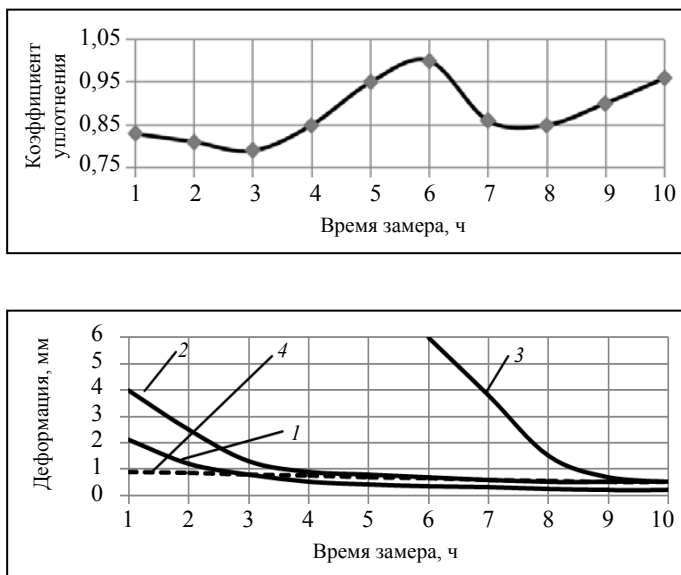


Рис. 6.24. Деформация слоя смеси при действии осевой нагрузки при движении транспортных средств:
 1 – 0,21 МПа; 2 – 0,45 МПа; 3 – 0,6 МПа; 4 – упругая деформация, мм

Развитие деформации материала под действием нагрузки приводит к повышенной способности смеси сопротивляться внешней нагрузке, т.е. увеличению коэффициента жесткости смеси.

Увеличение жесткости смеси характеризуется повышением плотности, коэффициента уплотнения, модуля деформации и модуля упругости дорожной одежды.

На рисунке 6.24 представлены совмещенные графики изменения коэффициента уплотнения материала в выбоине покрытия и деформации слоя смеси с разной осевой нагрузкой при движении транспортных средств.

Из рисунка 6.24 видно, что с увеличением напряжения в зоне контакта шины с поверхностью выбоины возрастает деформация в слое смеси. При движении в транспортном потоке машин с осевой нагрузкой выше допустимой, в зоне контакта шины с поверхностью выбоины возникают напряжения, превышающие предел прочности материала и, как следствие, происходит разуплотнение уложенного материала, что и является причиной понижения коэффициента уплотнения. Разуплот-

нение структуры материала (разрушение) будет происходить при условии

$$\sigma_k \geq [\sigma], \quad (6.14)$$

где σ_k – величина контактных напряжений под пневматической шиной, МПа; $[\sigma]$ – предел прочности уплотняемого материала, МПа.

При движении транспортного потока с разными осевыми нагрузками и с учетом процесса формирования структуры битумоминеральной смеси величина деформации слоя смеси будет зависеть от нагрузки на верхний слой выбоины, что влияет на значение коэффициента уплотнения. Изменение коэффициента уплотнения слоя смеси будет происходить до момента окончательного формирования структуры асфальтобетона, связанного с полным удалением влаги из слоя смеси.

Используя полученные зависимости (5.38), в табл. 6.8 представлены численные значения напряжений в зоне контакта частиц.

Из представленных данных таблицы видно, что с увеличением нагрузки на дорожные одежды напряжения в зоне контакта частиц слоя возрастают, что подтверждается результатами моделирования и экспериментальными исследованиями. На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

- при движении транспортных средств с нагрузкой на дорожные одежды до 0,5 МПа обеспечивается процесс уплотнения при выполнении ремонтных работ битумоминеральной смеси фракции 5...10 мм в выбоине покрытия после укладки струйно-инъекционным методом;

6.8. Напряжения в зоне контакта частиц при действии нагрузки от шины автомобиля

Диаметр частицы, мм	Напряжения под шиной автомобиля, МПа									
	0,21		0,45		0,6		0,8	1,0		
	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y
2,5	-0,02	0,6	-0,05	1,2	-0,06	1,6	-0,09	2,7	-0,11	2,7
5,0	-0,04	0,8	-0,08	1,6	-0,10	2,2	-0,15	2,9	-0,18	3,7
10,0	-0,05	1,1	-0,11	2,3	-0,15	3,1	-0,20	4,2	-0,25	5,2
15,0	-0,12	1,3	-0,26	2,8	-0,35	3,7	-0,46	4,9	-0,58	6,2
20,0	-0,11	1,5	-0,25	3,2	-0,33	4,3	-0,45	5,8	-0,56	7,2

– повышение плотности и коэффициента уплотнения смеси обеспечивается за счет вертикальной деформации частиц слоя под нагрузкой, поскольку касательные напряжения не обеспечивают перемещения частиц в горизонтальной плоскости ($\tau < \tau_{сд}$). Коэффициент уплотнения и водонасыщение образцов не соответствуют требованиям нормативных документов ($K_y = 0,94...0,95$; водонасыщение более 10%), что подтверждено результатами моделирования и экспериментальными исследованиями;

– движение транспорта с нагрузкой на дорожные одежды более 0,5 МПа приводит к развитию пластических деформаций в слое смеси выбоины покрытия, что влияет на коэффициент уплотнения. Пластические деформации материала в выбоине возникают за счет сжимающих и сдвиговых напряжений, величина которых достаточна для преодоления сил сцепления между частицами;

– при укладке битумоминеральных смесей с фракциями 5...15 и 5...20 мм, повышение плотности происходит при движении транспорта с нагрузкой на дорожные одежды до 0,35 МПа. При дальнейшем повышении нагрузки на поверхность выбоины возникают пластические деформации в слое смеси, поскольку контактные напряжения между частицами превышают предел прочности материала ($\sigma_k > [\sigma_{пр}]$ и $\tau \gg \tau_{сд}$). Для обеспечения требуемого качества ремонтных работ струйно-инъекционным методом, после укладки смеси такие смеси требуется дополнительно уплотнять вибрационными плитами или регулировать нагрузку на ремонтные участки за счет движения транспортных машин.

6.2. ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Возникновению дефектов на дорожных покрытиях нежесткого типа способствует не только нагрузка на дорожные одежды, но и интенсивность движения транспортных средств. Наиболее часто образование дефектов на дорожных покрытиях проявляется на дорогах с интенсивным движением и превышением к расчетной нагрузке осевой нагрузки

транспортных средств. За величину, характеризующую прочность дорожной одежды, принят модуль длительной упругости, значение которого определяется выражением [28, 30]

$$E = pD(1 - \mu^2)/l, \quad (6.15)$$

где p – удельное давление колеса на поверхность дорожного покрытия, МПа; D – диаметр круга, равновеликого отпечатку колеса, м; l – упругий прогиб, м; μ – коэффициент бокового расширения (коэффициент Пуассона), $\mu = 0,3$.

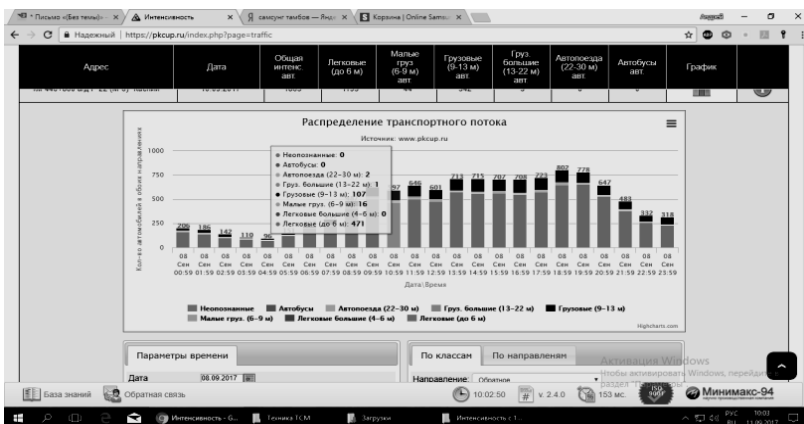
Для уточнения применения струйно-инъекционного метода при ремонте выбоин на покрытиях нежесткого типа с интенсивным движением транспортных средств и значительной осевой нагрузкой в производственных условиях проведены исследования, позволяющие уточнить качество укладки битумоминеральной смеси в выбоину на результаты ремонтных работ. Исследования проводились при ремонте выбоин на покрытиях нежесткого типа автомобильной дороги 2-й технической категории с интенсивным движением транспорта с применением дорожного ремонтера MADROG-MADPATCHER. Часовая и суточная интенсивность движения транспортных средств на участке ремонтных работ представлены на рис. 6.25.

Результаты расчетов показали, что на данном участке суточная приведенная интенсивность движения составляет около 20 000 автомобилей в сутки. При действии нагрузки на дорожные покрытия возникает деформация и для обеспечения долговечности дорожной конструкции необходимо обеспечить такую прочность дорожной одежды, чтобы возникающая деформация при движении транспортных средств не превышала предельно допустимый прогиб дорожных покрытий. Установлено, что величина упругого прогиба зависит не только от осевой нагрузки, но и от интенсивности движения транспортных средств [4, 5, 24, 30]. Зависимость предельно допустимого прогиба дорожных покрытий от интенсивности движения для дорожных покрытий капитального типа представлена на рис. 6.26. Данная зависимость соответствует приведенной интенсивности к расчетному автомобилю с нагрузкой 10^5 Н [28].

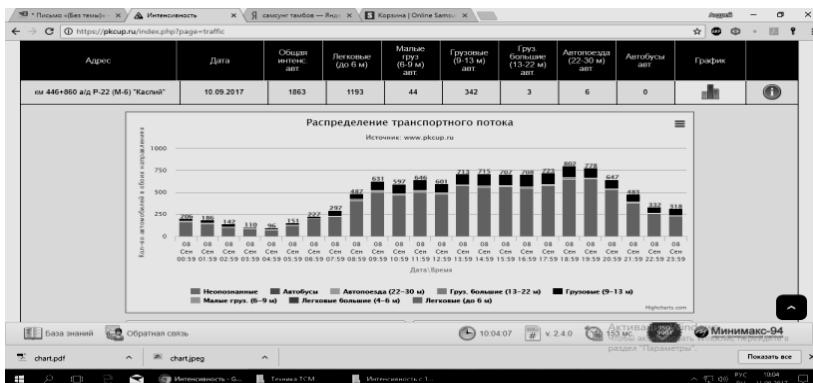
Величина предельного прогиба дорожного покрытия, с учетом интенсивности движения и приведенная к расчетному автомобилю с нагрузкой 10^5 Н, может быть определена по формуле

$$\lambda_{\text{пр}} = 0,84N^{-0,088}, \text{ мм}, \quad (6.16)$$

где $\lambda_{\text{пр}}$ – величина предельного прогиба дорожного покрытия, мм;
 N – интенсивность движения, 10^3 авт./сут. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.



а)



б)

Рис. 6.25. Интенсивность движения транспортных средств на участке производства ремонтных работ по устранению выбоин:

a – часовая; *б* – суточная

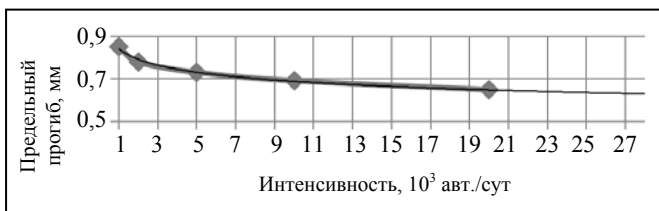


Рис. 6.26. Зависимость предельного прогиба дорожного покрытия от интенсивности движения, приведенная к расчетному автомобилю и нагрузке 10^5 Н

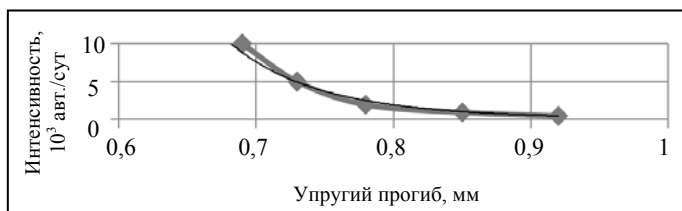


Рис. 6.27. Зависимость интенсивности движения транспортных средств от величины упругого прогиба

Исходя из условия обеспечения требуемого упругого прогиба дорожной одежды, можно спрогнозировать интенсивность движения транспорта (рис. 6.27).

Интенсивность движения, приведенная к расчетному автомобилю и нагрузке 10^5 Н, с учетом предельного прогиба дорожного покрытия может быть определена по формуле

$$N = 0,1896\lambda_{\text{пр}}^{-10,36}, \quad (6.17)$$

где $\lambda_{\text{пр}}$ — допускаемый предельный прогиб дорожной одежды, мм. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Для уточнения влияния интенсивности движения транспорта на величину упругого прогиба дорожного покрытия представим влияние интенсивности движения в относительных величинах, принимая прогиб допускаемый прогиб покрытия при интенсивности движения 10 тыс. автомобилей в сутки за единицу. Обозначим данную величину через коэффициент влияния интенсивности движения (K_N). На рис. 6.28 представлена зависимость коэффициента K_N от интенсивности движения.



Рис. 6.28. Зависимость коэффициента K_N от интенсивности движения, 10^3 авт./сут

$$K_N = 0,0794 \ln N + 0,819, \quad (6.18)$$

где N – интенсивность движения транспортных средств 10^3 авт./сут. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Установлено, что между допустимым прогибом дорожного покрытия и его модулем длительной упругости существует связь, которая представлена в виде графика (рис. 6.29) [29].

Численное значение модуля длительной упругости асфальтобетонного покрытия в зависимости от упругого прогиба можно определить по формуле

$$E_y = 399,17e^{-0,824\lambda_{упр}}, \text{ МПа}, \quad (6.19)$$

где $\lambda_{упр}$ – упругий прогиб покрытия, мм. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Аналогичная закономерность имеется между модулем деформации упругим прогибом дорожного покрытия (рис. 6.30).

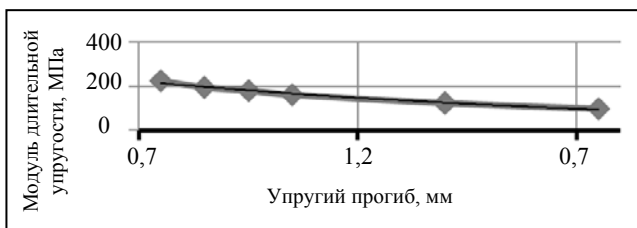


Рис. 6.29. Зависимость модуля длительной упругости асфальтобетонного покрытия в зависимости от упругого прогиба, требуемого по интенсивности движения транспортных средств, модулей деформации и модуля длительной упругости, МПа



Рис. 6.30. Зависимость модуля деформации асфальтобетонного покрытия от упругого прогиба с учетом интенсивности движения транспортных средств

Численное значение модуля деформации материала в зависимости от упругого прогиба определяется по формуле

$$E_d = 122,9e^{-0,822\lambda_{\text{упр}}}, \quad (6.20)$$

где $\lambda_{\text{упр}}$ – упругий прогиб покрытия, мм. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Представленные зависимости получены при расчетной нагрузке A_1 . В настоящее время нагрузки на дорожные покрытия возрастают, что влияет на величину упругого прогиба дорожной одежды. В соответствии с нормативным документом МОДМ 2-2001 нагрузки на ось автомобиля распределены на группы расчетной нагрузки (табл. 6.9).

6.9. Расчетные нагрузки на поверхности покрытия от колеса автомобиля

Группа расчетной нагрузки	Нормативная статическая нагрузка, кН		Расчетные параметры нагрузки	
	на ось	на поверхность покрытия от колеса расчетного автомобиля $Q_{\text{расч}}$	P , МПа	D , см
A_1	100	50	0,60	37/33
A_2	110	55	0,60	39/34
A_3	130	65	0,60	42/37



Рис. 6.31. Зависимость модуля упругости дорожной конструкции от категории дороги при разных группах нагрузки:
 1 – расчетная нагрузка 1 – A₃; 2 – A₂; 3 – A₁

В зависимости от категории автомобильной дороги, при интенсивности менее 40 000 авт./сут, требуемый модуль упругости дорожной конструкции, с учетом группы расчетной нагрузки (рис. 6.31), можно определить по формулам:

для группы нагрузки A₁ :

$$E_{\text{упр}} = 254,2e^{-0,08K_{\text{кат}}} ;$$

для группы нагрузки A₂ :

$$E_{\text{упр}} = 301,8e^{-0,09K_{\text{кат}}} ;$$

для группы нагрузки A₃ :

$$E_{\text{упр}} = 349,73e^{-0,11K_{\text{кат}}} , \quad (6.21)$$

где $K_{\text{кат}}$ – категория дороги. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,97.

Из представленных данных на рис. 6.31 и зависимостей (6.21) видно, что зависимости модуля упругости дорожной конструкции от категории дороги, независимо от типа нагрузки, подчиняются общей закономерности. Для получения общей зависимости представим зависимости (6.21) в относительных значениях, принимая модуль упругости для группы нагрузки A₁ за единицу, обозначив принятую величину через коэффициент влияния категории дороги на модуль упругости ($K_{\text{к}}$). На рисунке 6.32 представлена зависимость $K_{\text{к}}$ от категории дороги.

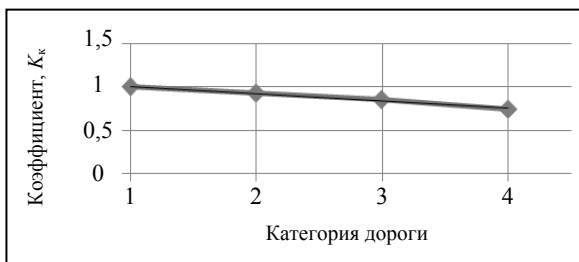


Рис. 6.32. Зависимость коэффициента влияния категории дороги от категории дороги

Численное значение K_k определяется зависимостью

$$K_k = -0,09K + 1,09, \text{ безразмерная величина,} \quad (6.22)$$

где K – категория дороги. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

На рисунке 6.33 представлена зависимость модуля упругости от группы нагрузки. Численное значение определяется

$$E_{\text{упр}} = 40A + 190, \text{ МПа,} \quad (6.23)$$

где A – группа нагрузки. Коэффициент корреляции уравнения равен 1,0.

Следовательно, полученная зависимость позволяет определить модуль упругости покрытия в зависимости от категории дороги и группы нагрузки. Толщина слоя дорожного покрытия, с применением битумных материалов, влияет на величину модуля упругости дорожной одежды. Установлено, что толщина слоя дорожного покрытия, с применением битумных материалов, влияет на величину модуля упругости дорожной одежды (табл. 6.10) [37].

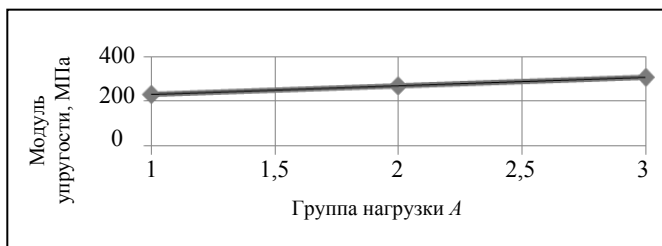


Рис. 6.33. Зависимость модуля упругости от группы нагрузки

**6.10. Значения требуемого модуля упругости $E_{тр}$
от толщины слоя, содержащего органическое вяжущее**

Требуемый модуль упругости $E_{тр}$, МПа	До 125	Св. 125 до 180	Св. 180 до 220	Св. 220 до 250	Св. 250
Толщина слоя, м	0,04...0,06	0,07...0,12	0,13...0,18	0,19...0,24	Св. 0,25

Из представленных данных видно, что с увеличением толщины слоя, содержащего органическое вяжущее, требуемый модуль упругости $E_{тр}$ дорожного покрытия возрастает. На рисунке 6.34 представлена зависимость требуемого модуля упругости от толщины слоя покрытия [1].

Численное значение требуемого модуля упругости с учетом толщины верхнего слоя покрытия определяется по формуле

$$E_{ту} = 631,3H_{сл} + 102,2, \text{ МПа}, \quad (6.24)$$

где $H_{сл}$ – толщина слоя покрытия, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Представим данную зависимость в относительных значениях, принимая требуемый модуль упругости при толщине слоя покрытия 0,05 м за единицу, обозначим его через K_H (рис. 6.35).

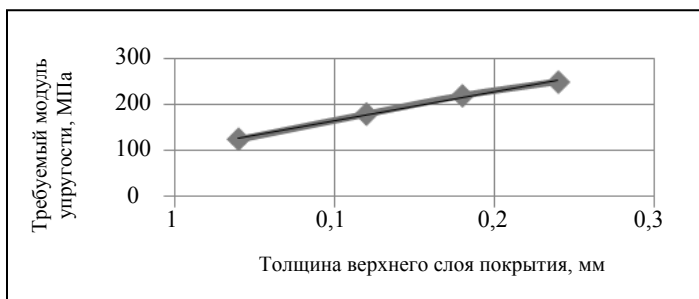


Рис. 6.34. Зависимость требуемого модуля упругости ($E_{тр}$, МПа) от толщины верхнего слоя покрытия

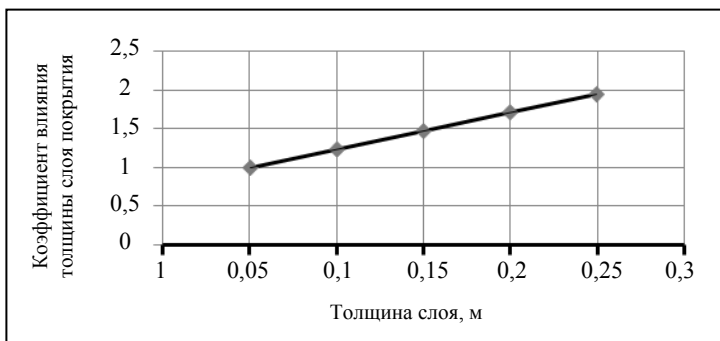


Рис. 6.35. Зависимость коэффициента K_n от толщины слоя покрытия

Из представленных данных на рис. 6.35 видно, что между коэффициентом K_n и толщиной слоя покрытия имеется прямо пропорциональная зависимость, которая имеет вид

$$K_n = 4,71H_{сл} + 0,76. \quad (6.25)$$

В общем виде зависимость требуемого модуля упругости, с учетом толщины слоя дорожного покрытия, категории дороги и группы нагрузки и интенсивности движения транспортных средств имеет вид

$$E_{тy} = K_N K_n K_k (40A + 190), \text{ МПа}. \quad (6.26)$$

На рисунке 6.36 представлены зависимости предельного модуля упругости дорожного покрытия от интенсивности движения транспортных средств для второй категории дороги при толщине слоя покрытия 0,13 м и разных группах нагрузки.

Величина предельного прогиба дорожного покрытия, с учетом данных на рис. 6.36, представлена на рис. 6.37.

Из представленных на рис. 6.37 данных видно, что независимо от группы нагрузки, значение предельного прогиба существенно меняется в интервале интенсивности движения до 15 000 авт./сут (от 5,5 до 13,6%), при дальнейшем повышении интенсивности, значение предельного прогиба изменяется в пределах от 3,5 до 4,7%.

Следовательно, полученная зависимость позволяет оценить требуемый модуль упругости для конкретной дороги по результатам замера модуля упругости дорожной одежды отремонтированного участка дороги, что является объективной оценкой качества ремонтных работ.

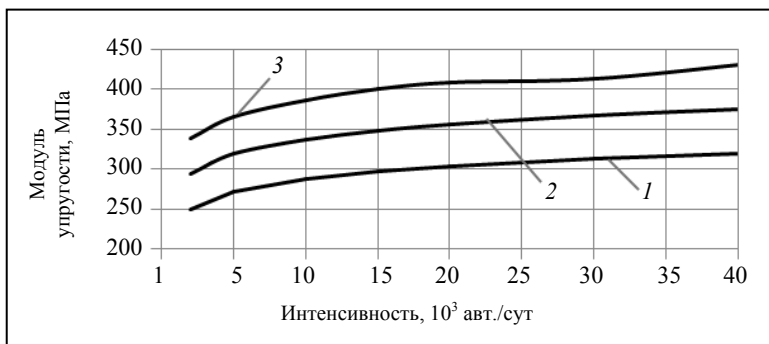


Рис. 6.36. Зависимость модуля упругости от интенсивности движения с учетом группы нагрузки:
1 – группа нагрузки A_1 ; *2* – A_2 ; *3* – A_3

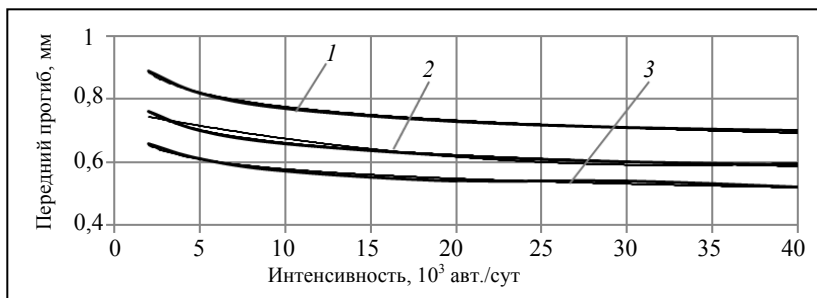


Рис. 6.37. Зависимость предельного прогиба от интенсивности движения с учетом нагрузки

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением интенсивности движения транспортных средств модуль упругости возрастает. Наиболее интенсивно увеличение модуля упругости происходит с ростом интенсивности движения до 15 000 авт./сут. При дальнейшем росте интенсивности движения рост замедляется.
2. Численное значение модуля упругости при расчете дорожной одежды в большей степени зависит от группы нагрузки.
3. Установленная зависимость позволяет объективно оценить качество ремонтных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе эксплуатации автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями под действием осевых нагрузок от транспортных средств и погодных условий на покрытиях возникают дефекты, способствующие ухудшению транспортно-эксплуатационных показателей и снижению срока эксплуатации автомобильной дороги.

Для устранения образовавшихся дефектов применяются разные технологии, зависящие от применяемого материала и средств механизации. Критерием выбора метода ремонта является качество выполненных работ, влияющее на безопасность движения и срок службы дорожных покрытий. Любой применяемый метод при ремонте выбоин на асфальтобетонных покрытиях имеет как положительные, так и отрицательные моменты. Применение струйно-инъекционного метода позволяет оперативно устранять такие дефекты. Однако практика использования данного метода при ремонте выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа показала, что качество ремонта выбоин не всегда отвечает предъявляемым требованиям нормативных документов (прочность, коэффициент уплотнения, водонасыщение).

Предложенная в работе технология ремонта выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа позволяет обосновать нагрузку на дорожные одежды при применении струйно-инъекционного метода. В результате проведенных исследований решены задачи, позволяющие более эффективно применять данный метод для ремонта дорожных покрытий:

- с экономической стороны струйно-инъекционный метод для ямочного ремонта выбоин является эффективным и перспективным;
- получены аналитические зависимости влияния технологических режимов укладки смеси в выбоину дорожного покрытия (высоты подачи, скорости подачи материала и процентного содержания битумной эмульсии) на коэффициент уплотнения, прочность, плотность и водонасыщение уложенного материала в выбоине;
- величина контактных напряжений при соударении частицы с поверхностью выбоины в процессе укладки смеси струйно-инъекционным методом не соответствует прочностным характеристикам битумоминеральной смеси, что не позволяет достичь требуемой плотности и прочности укладываемого материала в выбоину покрытия;

– предположения о возможности уплотнения битумоминеральной смеси без дополнительного уплотнения являются необоснованными. Доказано, что для достижения требуемых характеристик смеси при ремонте выбоин применением данного метода необходимо дополнительно уплотнять с использованием уплотняющих машин;

– достижение требуемого коэффициента уплотнения смеси вибрационной плитой, при соответствующих параметрах плиты, обеспечивается за 3–4 прохода по одному следу. Применение вибрационных плит с значительной массой и высокой относительной вынуждающей силой способствует развитию значительных деформаций уплотняемого слоя на начальной стадии уплотнения, что характеризует процесс разуплотнения слоя смеси;

– установлена зависимость деформации уложенного слоя битумоминеральной смеси от коэффициента жесткости смеси с учетом напряжения в зоне контакта шины с поверхностью выбоины. Данная зависимость позволяет рассчитать допускаемую нагрузку от транспортных средств, обеспечивающую процесс уплотнения смеси в выбоине. Это позволяет организовать движение транспортного потока до момента окончания формирования структуры материала в выбоине покрытия;

– установлена зависимость модуля упругости и модуля деформации битумоминеральной смеси от коэффициента жесткости смеси с учетом толщины слоя материала в выбоине;

– повышение осевой нагрузки в период формирования структуры смеси в выбоине по отношению к коэффициенту жесткости способствует развитию пластических деформаций в слое материала выбоины, что приводит к понижению коэффициента уплотнения смеси;

– при движении транспортных средств с нагрузкой на дорожные одежды до 0,5 МПа, обеспечивается процесс уплотнения при выполнении ремонтных работ битумоминеральной смеси фракции 5...10 мм в выбоине покрытия после укладки струйно-инъекционным методом;

– повышение плотности и коэффициента уплотнения смеси обеспечивается за счет вертикальной деформации частиц слоя под нагрузкой, поскольку касательные напряжения не обеспечивают перемещения частиц в горизонтальной плоскости ($\tau < \tau_{сд}$). Коэффициент уплотнения и водонасыщение образцов не соответствуют требованиям нормативных документов ($K_y = 0,94...0,95$; водонасыщение более

10%), что подтверждено результатами моделирования и экспериментальными исследованиями;

– движение транспорта с нагрузкой на дорожные одежды более 0,5 МПа приводит к развитию пластических деформаций в слое смеси выбоины покрытия, что влияет на коэффициент уплотнения. Пластические деформации материала в выбоине возникают за счет сжимающих и сдвиговых напряжений, величина которых достаточна для преодоления сил сцепления между частицами;

– при укладке битумоминеральных смесей с фракциями 5...15 и 5...20 мм, повышение плотности происходит при движении транспорта с нагрузкой на дорожные одежды до 0,35 МПа. При дальнейшем повышении нагрузки на поверхность выбоины возникают пластические деформации в слое смеси, поскольку контактные напряжения между частицами превышают предел прочности материала ($\sigma_k > [\sigma_{пр}]$ и $\tau \gg \tau_{сд}$). Для обеспечения требуемого качества ремонтных работ струйно-инъекционным методом, после укладки смеси такие смеси требуется дополнительно уплотнять вибрационными плитами или регулировать нагрузку на ремонтные участки за счет движения транспортных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алферов, В. И.** Дорожные материалы на основе битумных эмульсий / В. И. Алферов. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2003. – 1542 с.
2. **Апестин, В. К.** О расхождении проектных и нормативных сроков службы дорожных одежд / В. К. Апестин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 18 – 20.
3. **Бабков, В. Ф.** Методика оценки безопасности движения и транспортных качеств автомобильных дорог / В. Ф. Бабков. – М. : Высшая школа, 1971. – 127 с.
4. **Бируля, А. К.** Проектирование автомобильных дорог : в 2-х ч. : учебник / А. К. Бируля. – 4-е изд. – М. : Автотрансиздат, 1961. – 498 с.
5. **Строительство и реконструкция автомобильных дорог. СЭД** / А. П. Васильев и др. ; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. П. Васильева. – М. : Информавтодор, 2004. – 505 с.
6. **Веренько, В. А.** Влияние параметров транспортной нагрузки на развитие деформаций дорожных покрытий / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. А. Макаревич // Вестник ХНАДУ. – Минск, : БНТУ, 2006.
7. **Гезецвей, Л. Б.** Дорожный асфальтобетон / под ред. Л. Б. Гезецвей. – М. : Транспорт, 1976. – 326 с.
8. **Дорожно-строительные материалы** / И. М. Глушко, И. В. Королев, И. М. Борщ, Г. М. Мищенко. – М. : Транспорт, 1983.
9. **Ереско, С. П.** Технология ремонта асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / С. П. Ереско, С. Ф. Зяблов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 1. – С. 28 – 30.
10. **Ермаков, С. М.** Математическая теория планирования эксперимента / С. М. Ермаков. – М. : Наука, 1983. – 392 с.
11. **Зубков, А. Ф.** Технология ремонта дорожных покрытий автомобильных дорог с применением горячих асфальтобетонных смесей / А. Ф. Зубков, В. Г. Однолько, Е. Ю. Евсеев. – М. : Издательский дом «Спектр», 2013. – С. 9–10.
12. **Технология строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей** / А. Ф. Зубков, К. А. Андрианов, А. И. Антонов, В. Г. Однолько. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – 315 с.
13. **Зубков, А. Ф.** Влияние технологии работ на эксплуатационные показатели асфальтобетонного покрытия / А. Ф. Зубков // Механизация строительства. – 2011. – № 1. – С. 25–26.

14. **Зубков, А. Ф.** Анализ применения вибрационных плит при ремонте дорожных покрытий нежесткого типа / А. Ф. Зубков // Механизация строительства. – 2011. – № 6. – С. 28 – 31.

15. **Свид.** о гос. рег. программы для ЭВМ. Расчет деформаций материала при действии динамической нагрузки / Зубков А. Ф., Андрианов К. А., Макаров А. М., Пилецкий М. Э. – № 2017663676. – М., 08.12.2017.

16. **Зубков, А. Ф.** Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / А. Ф. Зубков В. Г. Однолько. – М. : Машиностроение, 2009. – 223 с.

17. **Зубков, А. Ф.** Расчет контактных напряжений при укладке и уплотнении битумоминеральных смесей при ремонте дорожных покрытий / А. Ф. Зубков, К. А. Андрианов, М. Э. Пилецкий // Приволжский научный журнал. – Нижний Новгород. – 2018. – № 1. – С. 64 – 71.

18. **Калгин, Ю. И.** Перспективные технологии строительства и ремонта дорожных покрытий с применением модифицированных битумов / Ю. И. Калгин, А. С. Строкин, Е. Б. Тюков. – Воронеж : Воронежская областная типооафия, 2014. – 224 с.

19. **Касаткин, А. Г.** Основные процессы и аппараты химических технологий / А. Г. Касаткин. – 7-е изд. – М. : Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961. – 830 с.

20. **Костельов, М. П.** Современные методы и средства ямочного ремонта дорожных покрытий [Электронный ресурс] / М. П. Костельов // Еженедельник «Стройка», Информационно-строительный портал, Санк-Петербург ; опубли. 30.09.03. – URL : <http://www.stroit.ru> (дата обращения : 21.11.2014).

21. **Максименко, А. А.** Исследование нормальных напряжений при упругопластичном контактном взаимодействии / А. А. Максименко, Н. В. Котенков, А. Д. Перфильева // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 264 – 266.

22. **Протодьяконов, М. М.** Методика рационального планирования экспериментов / М. М. Протодьяконов, Р. И. Теллер. – М. : Наука. – 25 с.

23. **Пилецкий, М. Э.** Анализ состояния автомобильных дорог Тамбовской области и выбор технологии для ремонта выбоин на покрытиях нежесткого типа / М. Э. Пилецкий, А. Ф. Зубков // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. – 2016. – Вып. 1(41). – С. 74 – 82.

24. **Сильянов, В. В.** Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог городских улиц / В. В. Сильянов, Э. Р. Домке. – 2-е из., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 368 с.

25. **Хархута, Н. Я.** Машины для уплотнения грунтов / Н. Я. Хархута. – Л. : Машиностроение, 1973. – 173 с.

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

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

28. **МОДМ 2–2001.** Проектирование нежестких дорожных одежд. – М., 2002

29. **Методические** рекомендации по ремонту и содержанию автомобильных дорог общего пользования (приняты письмом Росавтодора от 17 марта 2004 г. № ОС-28/1270-ис).

30. **ОДН 218.046–01.** Проектирование нежестких дорожных одежд. Дата введения 2001-01-01. – М., 2001.

31. **Правила** диагностики и оценки состояния автомобильных дорог: ОДН 218.0.006–2002 / Минтранс РФ, Гос. служба дор. хоз-ва (Росавтодор). – М. : ГП «Информавтодор», 2002.

32. **Методические** рекомендации по технологии заделки поврежденных асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог струйно-инъекционным методом. – М. : Министерство транспорта РФ. Федеральное дорожное агентство. – 06.02.2004 г. – 24 с.

33. **СТО АВТОДОР 10.2–2014.** Методы оценки соответствия. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния дорожных одежд автомобильных дорог Государственной компании «АВИРДОР» на период выполнения гарантированных обязательств подрядными организациями. Дата принятия 20 января 2015.

34. **ОДМ 218.4.005–2010.** Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах.

35. «**ИТД ИНВЕСТ**» (официальный сайт) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.idt-invest.ru/inekcionniy.htm> (дата обращения : 21.11.2014).

36. **Improved** Winter Pothole Patching. State Planing And Research Project Number 538 // by Andrew Griffith, P.E. for Oregon Department of Transportation Research Unit200 Hawthorne SE, Suite B-240 Salem OR 97301-5192. August 1998. – P. 3, 11 – 13.

37. **Evaluation** of Winter Pothole Patching Methods Repor. Final Report // Prepared by: Munir D. Nazzal, Ph. D., P. E. Sang-Soo Kim, Ph. D., P. E. Department of Civil Engineering Ohio University Ala R. Abbas, Ph. D. Department of Civil Engineering The University of Akron Prepared for: The Ohio Department of Transportation, Office of Statewide Planning & ResearchState Job Number 134724. January 2014. – P. 13 – 17.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Современное состояние автомобильных дорог и применяемые технологии для ремонта выбоин на покрытиях нежесткого типа ...	5
1.1. Анализ состояния автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа	5
1.2. Требования нормативных документов к транспортно-эксплуатационному состоянию автомобильных дорог	7
1.3. Влияние свойств материала на выбор технологии ремонта покрытий нежесткого типа	8
1.4. Факторы, влияющие на процессы разрушения дорожных покрытий нежесткого типа	13
1.5. Анализ технологий для ремонта выбоин на покрытиях дорог нежесткого типа	16
1.6. Технология ремонта дорожных покрытий струйно-инъекционным методом в Российской Федерации	23
1.7. Анализ технологий ямочного ремонта покрытий нежесткого типа с учетом зарубежного опыта	29
1.8. Техничко-экономическое обоснование ямочного ремонта дорожных покрытий струйно-инъекционным методом	32
2. Применение битумных эмульсий в дорожном строительстве	34
2.1. Требования к материалам	38
2.2. Определение характеристик битумоминеральных смесей при укладке в выбоину дорожного покрытия	40
2.3. Влияние состава битумоминеральной смеси на прочностные характеристики асфальтобетона	47
2.4. Определение реологических характеристик битумоминеральной смеси	61
2.5. Экспериментальное определение реологических характеристик битумоминеральной смеси	63
3. Моделирование технологических процессов при ремонте выбоин на дорожных покрытиях нежесткого типа	70
3.1. Моделирование процесса укладки и уплотнения битумоминеральной смеси струйно-инъекционным методом	72
3.2. Расчет зоны распределения смеси при укладке струйно-инъекционным методом	73

3.3. Обоснование процесса уплотнения смеси при укладке струйно-инъекционным методом	88
3.4. Определение напряжений в зоне контакта частиц при укладке битумоминеральной смеси в выбоину дорожного покрытия	91
3.5. Расчет напряжений в зоне контакта частицы с основанием покрытия	94
4. Уплотнение битумоминеральных смесей вибрационными плитами	97
4.1. Моделирование процесса уплотнения вибрационными плитами ...	98
4.2. Расчет напряжений в зоне контакта вибрационной плиты с уплотняемым материалом	106
4.3. Сравнительный анализ коэффициентов превышения контактных напряжений под вибрационной плитой при разных методах определения	117
5. Взаимодействие транспортного потока с дорожным покрытием нежесткого типа	121
5.1. Влияние интенсивности движения на конструктивные параметры автомобильных дорог с учетом безопасности движения транспорта	122
5.2. Воздействие транспортного потока на выбор параметров дорожной конструкции	125
5.3. Расчет напряжений в зоне контакта шины с дорожным покрытием	131
5.4. Расчет напряжений в зоне контакта частиц смеси при действии нагрузки от шины транспортного средства	141
5.5. Моделирование процесса уплотнения битумоминеральных смесей пневматической шиной	147
5.6. Результаты моделирования взаимодействия шины с поверхностью выбоины	152
6. Влияние технологических режимов укладки битумоминеральной смеси струйно-инъекционным методом на качество ремонта выбоин дорожных покрытий	156
6.1. Определение параметров нагрузки на дорожные покрытия нежесткого типа при движении грузового транспорта с полной загрузкой	169
6.2. Влияние интенсивности движения транспортных средств на транспортно-эксплуатационные характеристики автомобильных дорог	181
Заключение	192
Список литературы	195

Научное издание

ЗУБКОВ Анатолий Федорович
АНДРИАНОВ Константин Анатольевич
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич
ПИЛЕЦКИЙ Михаил Эдуардович

ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА СТРУЙНО-ИНЪЕКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Монография

Редактор И. В. Калистратова
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

Подписано в печать 30.08.2018.
Формат 60 × 84 / 16. 11,62 усл. печ. л.
Тираж 400 экз. (1-й з-д 50). Заказ № 203

ISBN 978-5-8265-1928-8



Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.
Телефон (4752) 63-81-08, 63-81-33.
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А
Телефон (4752) 63-07-46
E-mail: типо_tstu68@mail.ru