

**А. Ф. ЗУБКОВ, В. Г. ОДНОЛЬКО,
Р. В. КУПРИЯНОВ**

А. Ф. ЗУБКОВ, В. Г. ОДНОЛЬКО, Р. В. КУПРИЯНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА



**Москва
2015**

**А. Ф. ЗУБКОВ, В. Г. ОДНОЛЬКО,
Р. В. КУПРИЯНОВ**

**ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ
ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА**



Москва, 2015

УДК 625.7/8
ББК 0311-044
DOI 10.14489/4442-0081-0
3-91

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация
автомобильных дорог» ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
архитектурно-строительный университет»

В. П. Подольский

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

В. В. Леденёв

Зубков А. Ф., Однолько В. Г., Куприянов Р. В.

3-91 Технология строительства многополосных дорожных по-
крытий нежесткого типа. – М.: Издательский дом «Спектр»,
2015. – 232 с. – ISBN 978-5-4442-0105-3.

Рассмотрены вопросы технологии строительства многополосных асфальтобетонных дорожных покрытий. В связи с ростом количества транспортных средств и увеличением интенсивности движения для обеспечения безопасности движения транспортных средств на автомобильных дорогах возникает необходимость строительства автомобильных дорог с увеличенным количеством полос движения, что способствует повышению безопасности движения. Представлен анализ современных технологий укладки асфальтобетонных смесей при устройстве многополосных покрытий нежесткого типа. Рассмотрены вопросы технологии устройства стыков сопряженных полос покрытия с учетом температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси при разных способах укладки асфальтобетонной смеси.

Книга предназначена для работников дорожных и проектных организаций, преподавателей, аспирантов, магистров и студентов дорожно-строительных специальностей.

УДК 625.7/8
ББК 0311-044

ISBN 978-5-4442-0105-3

© Зубков А. Ф., Однолько В. Г.,
Куприянов Р. В., 2015

ВВЕДЕНИЕ

Повышение интенсивности движения на автомобильных дорогах требует решения вопросов, связанных с повышением скоростных режимов транспортных потоков и обеспечения безопасности движения при одновременном увеличении работоспособности и срока службы дорожных покрытий нежесткого типа, которые составляют в настоящий момент свыше 95 % от общей протяженности дорог. Одним из путей решения данной проблемы является устройство многополосных дорожных покрытий, которые позволяют увеличить пропускную способность дороги и обеспечивают более высокую безопасность движения транспортных средств при одновременном увеличении скоростных режимов транспорта.

В зависимости от условий производства работ по устройству таких покрытий применяются разные технологические схемы укладки и уплотнения сопряженных полос покрытия. Эксплуатация многополосных покрытий нежесткого типа показала, что в зоне стыка сопряженных полос часто возникают дефекты в виде разрушения покрытия на стыке сопряженных полос. Образование дефектов в этой зоне связано с нарушением технологии при устройстве стыка полос, и, как правило, с нарушением температурных режимов асфальтобетонной смеси при укладке и уплотнении полос покрытия. Температурные режимы горячей смеси зависят от применяемого материала, типа смеси и марки вяжущего. В зависимости от материала и условий производства работ температура смеси при укладке и уплотнении может иметь разную величину, что необходимо учитывать при устройстве дорожного покрытия.

Производительность механизированного звена машин при устройстве асфальтобетонного покрытия зависит от эффективности работы асфальтоукладчика, который определяет состав и производительность звена машин. В зависимости от заданного темпа строительства автомобильной дороги принимается технология устройства покрытия, влияющая на эффективность работы механизированного звена применяемых машин. С учетом принятой технологии устройства многополосного покрытия применяются разные схемы укладки асфальтобетонной смеси, что влияет на длину захватки при укладке и уплотнении смеси. Нормативными документами, в зависимости от температуры воздуха, установлены длины захваток при укладке горячей смеси. Однако при установлении длины захватки при укладке и уплотнении асфальтобетонных горячих смесей необходимо учитывать темп охлаждения смеси, влияющего на продолжительность нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале, с учетом теплофизических свойств применяемого материала и конструктивных параметров дорожного покрытия.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

1.1. РАЗВИТИЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ПАРКА СТРАНЫ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Ежегодное увеличение количества транспортных средств в стране приводит к повышению интенсивности движения и при несоответствии дорожного покрытия интенсивности движения способствует снижению пропускной способности автомобильных дорог. Анализ количества автомобильного парка страны показал, что ежегодно парк транспортных средств увеличивается более чем на 4...5 % при одновременном росте их грузоподъемности. Наиболее интенсивно наблюдается рост легкового транспорта, что способствует увеличению их скоростных режимов, реализация которых зависит от состояния дорожной сети (рис. 1.1).

Повышение интенсивности движения при одновременном увеличении осевой нагрузки транспортных средств влияет на эксплуатационное состояние автомобильных дорог, что проявляется в снижении работоспособности и долговечности дорог. Мониторинг состояния автомобильных дорог, проведенный разными исследователями, показал, что в настоящий момент около 30 % из них перегружены [4, 50, 51, 52]. Значительная часть федеральных дорог не в полной мере отвечают нормативным требованиям по транспортно-эксплуатационным показателям, предъявляемым к автомобильным дорогам. Свыше 67 % от об-

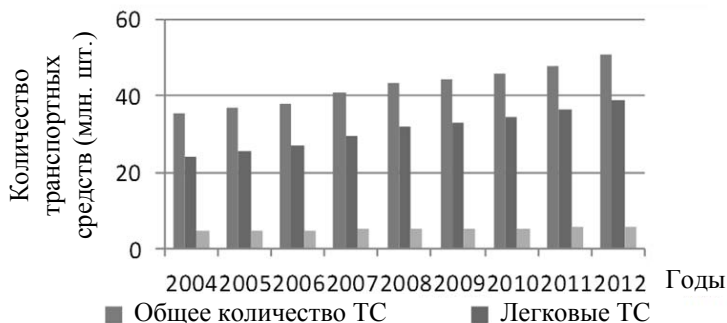


Рис. 1.1. Динамика роста автомобильного парка России

щей протяженности дорог имеют недостаточную прочность дорожных одежд и более 37 % имеют неудовлетворительную ровность дорожных покрытий. Превышение допустимой нагрузки от транспортных средств на дорожные одежды (53 %) способствует быстрому износу дорожных конструкций, что приводит к значительному сокращению сроков службы автомобильных дорог (в 1,5 раза). В результате, свыше 35 % автомобильных дорог федерального значения требуют реконструкции и модернизации для обеспечения пропускной способности современных транспортных средств. Такое состояние дорожной сети приводит к снижению безопасности движения транспортных средств, что проявляется в увеличении дорожно-транспортных происшествий (ДТП). По данным статистического анализа ДТП, проведенного ГИБДД РФ, показал, что неблагоприятные дорожные условия до 2000 г. не превышали 12 % от общего количества ДТП. Однако с 2000 года наметилась тенденция к росту ДТП, связанных с несоответствием параметров дорог современным требованиям. Так, если количество ДТП по дорожным условиям в 1998 г. составляло 5,8 %, то в 2002 г. это количество составляет 17 %. Такая тенденция сохраняется до настоящего времени, и по данным Центра стратегических исследований (ЦСИ) «Росгосстраха», свыше 20 % автомобильных аварий в России происходит из-за плохого качества дорожного полотна. Так, за 2010 г. в Российской Федерации было зарегистрировано 199 431 ДТП (42 000 случилось из-за некачественных дорог), что на 10 % меньше по сравнению с 2009 г.

Одним из направлений повышения безопасности движения на дорогах с повышенной интенсивностью при условии обеспечения высокого качества строительства и ремонта является строительство дорог с многополосными дорожными покрытиями. Практика строительства дорог с многополосными дорожными покрытиями показала, что увеличение количества полос движения в одном направлении способствует резкому снижению ДТП с одновременным обеспечением скоростных режимов транспортных средств, что способствует пропускной способности автомобильных дорог. В то же время понижение пропускной способности дороги и снижение скоростных режимов транспортного потока влияет на стоимость транспортных операций, что отражается на экономике регионов и в страны в целом.

Из представленных на рис. 1.1 данных видно, что одновременно с увеличением количества легкового транспорта наблюдается рост грузовых транспортных средств. Одним из направлений в развитии грузового транспорта является увеличение их грузоподъемности, что приводит к повышению осевой нагрузки на дорожные одежды. Одновре-

менное воздействие на дорожные покрытия роста интенсивности движения и повышенной осевой нагрузки от транспортных средств приводит к снижению работоспособности и долговечности автомобильных дорог. С учетом повышенной осевой нагрузки, при строительстве новых и реконструируемых дорог, применяют новые дорожные материалы, отвечающие современным требованиям. Анализ результатов исследований, проведенных в научных организациях страны и за рубежом, показал, что в большинстве случаев, для улучшения характеристик вяжущего материала, применяемого для приготовления горячих асфальтобетонных смесей, используют различные модификаторы, влияющие на свойства битума. Зарубежный опыт строительства автомобильных дорог с покрытиями нежесткого типа, а в последние годы и отечественный опыт, показал, что применение горячих асфальтобетонных смесей с модифицирующими добавками при устройстве покрытий нежесткого типа требует учета изменения свойств вяжущего на технологические режимы укладки и уплотнения таких смесей. Существующими нормативными документами и рекомендациями при применении горячих асфальтобетонных смесей в качестве основного параметра при укладке и уплотнении горячих смесей принята температура смеси, влияющая на качество выполняемых работ по строительству дорожных покрытий нежесткого типа. Поэтому применение новых дорожных материалов на основе битумного вяжущего требует уточнения температурных режимов укладки и уплотнения таких смесей при устройстве покрытия.

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

При определении конструктивных параметров автомобильной дороги основным фактором является интенсивность движения, которая определяется с учетом прогноза развития транспортной сети на определенный промежуток времени. Такой подход к определению параметров автомобильной дороги, с учетом планируемой интенсивности движения транспортных средств на несколько лет вперед, способствует обеспечению требуемых параметров дороги на определенный промежуток времени без их изменения в процессе эксплуатации. Нормативным документом определено число полос движения на покрытиях в зависимости от интенсивности движения, а также на участках автомобильных дорог I-а, I-б и II категорий, в местах пересечений, при

мыканий и съездов предусматривается устройство на обочинах остановочных полос шириной 2,5 м на расстоянии не менее 100 м в обе стороны. Этим же документом предусмотрено устройство дополнительных полос проезжей части для грузового движения в сторону подъема при смешанном составе транспортного потока на участках дорог II категории, при интенсивности движения свыше 4000 приведенных ед/сут, также III категории при продольном уклоне более 30 % и длине участка свыше 1 км, а при уклоне более 40 % – при длине участка свыше 0,5 км. При соответствующем обосновании допускается устройство четырехполосной проезжей части с шириной полосы движения 3,5 м при расчетной скорости движения не более 100 км/ч на дорогах II категории [40]. Следует заметить, что устройство полос уширений, как правило, производится отдельно от основной полосы движения.

Расчет интенсивности движения между двумя пунктами может быть определен из выражения [46]

$$N_{ij} = \frac{P_p K_c Q_l V_l \tau_l K_l}{1000 L_{пр}^2} + \frac{P_p K_c Q_a V_a \tau_a K_a}{1000 L_{пр}^2} + \frac{P_p K_c Q_r V_r \tau_r K_r}{1000 L_{пр}^2}, \quad (1.1)$$

где N_{ij} – ожидаемая среднегодовая суточная интенсивность движения между i -м и j -м населенными пунктами, авт./сут; P_p – суммарная приведенная численность населения в i -м и j -м населенных пунктах, жит.; K_c – коэффициент связанности i -го и j -го населенных пунктов, определяемый в зависимости от их административной значимости и подчиненности; Q_l – существующий или перспективный уровень насыщения территории легковыми автомобилями, авт./1000 жит.; V_l – средняя скорость движения легковых автомобилей в эталонных условиях, принимается равной 83 км/ч; τ_l – средняя продолжительность работы в течение суток легковых автомобилей, ч/сут; K_l – коэффициент, характеризующий пользование легковыми автомобилями; $L_{пр}$ – приведенное расстояние между i -м и j -м населенными пунктами, км; Q_a – существующий или перспективный уровень насыщения территории автобусами, авт./1000 жит.; V_a – средняя скорость движения автобусов в эталонных условиях, принимается равной 60 км/ч; t_a – средняя продолжительность работы в течение суток автобусов, ч/сут; K_a – коэффициент, характеризующий использование автобусов; Q_r – существующий или перспективный уровень насыщения территории грузовыми автотранспортными средствами, авт./1000 жит.; V_r – средняя скорость движения грузовых автотранспортных средств в эталонных условиях, принимается равной 75 км/ч; τ_r – средняя продолжительность работы в течение суток грузовых автотранспортных средств, ч/сут; K_r – коэффициент, характеризующий использование грузовых автотранспортных средств;

a – показатель степени, используемый при расчете интенсивности движения грузовых автотранспортных средств.

При использовании метода экстраполяции прогнозирование интенсивности движения на автомобильной дороге можно определить по формуле

$$N_t = N_0 (1 + B)^t, \quad (1.2)$$

где N_t – прогнозируемая интенсивность движения на t -й год, авт./сут; N_0 – исходная интенсивность движения, авт./сут; B – среднегодовой прирост интенсивности движения; t – перспективный период, лет.

Расчет прироста интенсивности, с учетом перспективного периода времени, рассчитывается по зависимостям [58]:

до 6 лет:
$$N_t = N_0 (1 + B_k)^{t-6}, \quad (1.3)$$

после 6 лет:
$$N_t = (N_0 (1 + B_k)^6) (1 + B)^{t-6}. \quad (1.4)$$

Назначение автомобильной дороги зависит от интенсивности движения и делится на категории (табл. 1.1).

1.1. Категории автомобильных дорог

Назначение автомобильной дороги	Категория дороги	Расчетная интенсивность движения, приведенных ед./сут
Магистральные федеральные дороги	I-а (автомагистраль)	Св. 14 000
	I-б (скоростная дорога)	Св. 14 000
	II	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

1.2. Определение количества полос движения

Рельеф местности	Интенсивность движения, приведенных 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
	34 000 – 70 000	6
	Свыше 70 000	8

От интенсивности движения транспортных средств зависит количество полос движения. Число полос движения на дорогах I категории следует устанавливать в зависимости от интенсивности движения и рельефа местности по табл. 1.2 [40].

При определении конструктивных параметров автомобильной дороги количества полос движения, в зависимости от интенсивности движения, при проектировании необходимое количество полос движения может быть определено по расчетной зависимости [42]

$$n = \frac{\alpha K_n N_p \varepsilon}{z P \gamma}, \quad (1.5)$$

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. Результаты расчета количества полос от интенсивности представлены на рис. 1.2.

За последние годы, несмотря на прогнозы ООН и Бюро цензов (США), численность населения увеличивается. Этому способствует снижение смертности и увеличение рождаемости, повышение уровня жизни и здравоохранения. Повышение экономического развития страны и рост численности населения способствуют увеличению транспортных

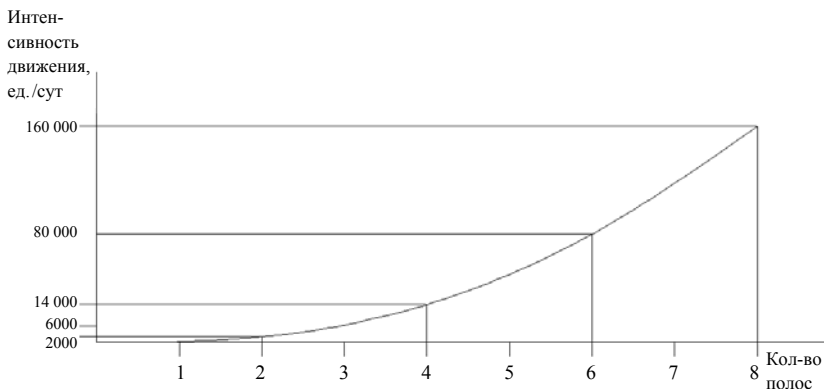


Рис. 1.2. Зависимость количества полос от интенсивности движения

средств и грузоперевозок, что приведет к увеличению интенсивности движения на дорогах страны. Следовательно, для обеспечения пропускной способности автомобильных дорог и повышения безопасности движения транспортных средств потребность в строительстве автомобильных дорог с многополосными покрытиями будет возрастать.

1.3. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Завершающей стадией строительства автомобильных дорог является устройство дорожного покрытия. Работоспособность и долговечность дорожного покрытия нежесткого типа в значительной степени зависит от принятой технологии укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей. Наличие вяжущего материала, свойства которого зависят от температуры, влияют на температурные режимы укладки и уплотнения слоев покрытия. Темп охлаждения горячих асфальтобетонных смесей зависит не только от конструктивных параметров покрытия, но и погодных условий строительства, а также свойств асфальтобетонных смесей. Поэтому при устройстве покрытия предъявляются повышенные требования к технологии укладки и уплотнения применяемого материала. В зависимости от требуемого темпа строительства покрытия, свойств применяемого материала, конструкции покрытия и условий производства работ принимается технология производства работ, с учетом которой определяется механизированное звено машин и назначаются технологические режимы их работы. Существующими нормативными материалами, в зависимости от конструктивных параметров покрытия, предусматривается укладка дорожных покрытий в один или два слоя. В настоящее время в дорож-

ной практике строительства покрытий нежесткого типа используются три технологии укладки асфальтобетонных смесей [3]:

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

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

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

При одновременной укладке слоев покрытия с разными по составу смесями применяется немецкая технология «компактасфальт» – т.е. «горячее по горячему» [8, 16]. Применение такой технологии укладки смесей позволяет производить уплотнение покрытия как одного слоя с повышенной толщиной. В зависимости от заданного темпа строительства производится выбор параметров асфальтоукладчика. Установлено, что в зависимости от конструкции и режимов работы уплотняющих органов асфальтоукладчика, коэффициент предварительного уплотнения горячей смеси находится в широких пределах, что влияет на дальнейший выбор уплотняющих машин [3, 8, 26, 31].

Темп охлаждения горячей смеси зависит от толщины укладываемого слоя материала. Минимальная толщина дорожного покрытия в уплотненном состоянии принимается в пределах 0,03...0,07 м [40]. Принято считать, что при значительной толщине слоя нижняя часть покрытия не доуплотняется и поэтому ограничивают толщину слоя. Результаты экспериментальных исследований показали, что при уплотнении слоями на стыке слоев покрытия наблюдается снижение плотности асфальтобетона. При укладке и уплотнении покрытия толстыми слоями понижение плотности асфальтобетона на стыке слоев покрытия не наблюдается (рис. 1.3) [19].



Рис. 1.3. Распределение плотности асфальтобетона по толщине слоя:

1 – два слоя по 7,5 см; 2 – один слой толщиной 15 см

Средняя пористость асфальтобетона, уложенного за один прием, составляет 6,6 %, а покрытия в два приема – 9,8 %. Понижение плотности на стыке слоев покрытия можно объяснить тем, что при уплотнении в два приема на стыке слоев происходит резкое снижение температуры смеси, что и влияет на плотность материала покрытия.

Под действием усилий, возникающих при взаимодействии вальца катка с уплотняемым материалом, минеральные частицы сближаются между собой. При этом происходит частичное вытеснение защемленного воздуха и некоторое перераспределение свободного битума, заполняющего поры уплотняемой смеси. В результате такого воздействия повышается объемная масса уплотняемого материала, прочность и водоустойчивость покрытия. Известно, что эффективность уплотняющих машин при устройстве покрытий нежесткого типа зависит от температуры смеси при уплотнении, которая определяется теплофизическими свойствами материала и влияет на прочностные характеристики асфальтобетона. Обеспечить заданные показатели уплотнения возможно при условии, если величина контактных напряжений под вальцем катка будет близка пределу прочности уплотняемого материала [37]. Поэтому выбор уплотняющих машин необходимо производить с учетом свойств материала и технических возможностей катков.

В связи с увеличением грузоподъемности и интенсивности движения транспортных средств для повышения работоспособности дорожных одежд и увеличения прочности покрытия применяют смеси с повышенным содержанием щебня, процентное содержание которого достигает 80 % [21]. Такие смеси обладают большей жесткостью и уплотнять их катками статического действия неэффективно. Наиболее эффективно такие смеси уплотняют вибрационными катками или звеном катков, состоящим из вибрационных и катков на пневматических шинах. Экспериментально установлено, что параметры современных катков обеспечивают требуемую плотность покрытия при условии соблюдения температурных режимов и соответствия параметров применяемых машин свойствам материала [8, 31, 37].

В настоящее время для уплотнения асфальтобетонных покрытий широкое применение получили вибрационные катки. При динамическом воздействии на уплотняемый материал интенсивнее пробуждаются вяжущие свойства у активных минеральных материалов, чем при статическом уплотнении, что позволяет получить более высокую плотность и меньшую водопроницаемость. Значительное влияние на уплотняемость асфальтобетонных смесей, помимо температуры, оказывает гранулометрический состав. Известно, что чем выше содержание крупных каменных составляющих в смеси, тем больше должна быть уплотняющая нагрузка. Установлено, что при применении смесей с содержанием щебня 65 и 70 % и звена уплотняющих машин, состоящего из гладковальцовых катков массой 6 и 10 т, и катка на пнев-

матических шинах массой 16 т, требуемые плотности покрытия не были достигнуты [19]. При уплотнении таких смесей целесообразно применять вибрационные катки.

Выбор технологии строительства покрытий нежесткого типа зависит от ряда факторов, к которым можно отнести свойства уплотняемого материала, конструкцию покрытия, погодноклиматические условия строительства и наличие парка машин. В зависимости от конкретных условий строительства выбор уплотняющих машин может быть разным. Для каждого типа и массы катка существуют эффективные границы их применения, зависящие от температурных режимов, типа смеси и марки битума, в которых достигается наибольший эффект уплотнения. Назначение звена катков при укладке асфальтобетонных смесей асфальтоукладчиками зависит от возможности обеспечения требуемого коэффициента предварительного уплотнения горячей смеси. Применение асфальтоукладчика с активным уплотняющим рабочим органом при распределении горячей смеси с высоким содержанием щебня (тип А и Б) позволяет уменьшить количество уплотняющих машин, и механизированное звено может состоять из среднего и тяжелого катков, а также катка на пневматических шинах с совместной работой вибрационного катка (при соответствующих силовых параметрах и скорости укладки смеси). При строительстве покрытий из смесей типа В, Г и Д, а также при высоких скоростях укладки, из звена уплотняющих машин необходимо вводить легкий каток. Применение в технологических звеньях уплотняющих машин вибрационных катков, в зависимости от технических характеристик, позволяет осуществлять замену легких и средних катков по одинаковому уплотняющему эффекту.

Достижение требуемых характеристик асфальтобетона зависит не только от качества исходного материала и обоснованного состава асфальтобетона, но и особенностей применяемой технологии при приготовлении, укладке и уплотнении асфальтобетонной смеси. Проведенными исследованиями Н. Н. Иванова, Л. Б. Гезенцева, Н. В. Горельшева, А. М. Богуславского, И. В. Королева установлено, что при устройстве дорожного покрытия можно выделить три периода, оказывающих влияние на формирование структуры асфальтобетона [5]:

- на стадии приготовления горячей смеси в момент перемешивания битума с минеральным материалом;
- на стадии укладки и уплотнения горячей смеси в дорожное покрытие;
- в процессе эксплуатации асфальтобетонного покрытия, когда происходит стабилизация структуры асфальтобетона.

С технологической точки зрения, определенный интерес представляет второй период структурообразования, так как именно в этот

период формируется структура асфальтобетона, характеризующая требуемые эксплуатационные показатели асфальтобетонного покрытия (плотность, пористость, водонепроницаемость), влияющие на эксплуатационные показатели асфальтобетонного покрытия. На этом этапе, за счет воздействия рабочего органа уплотняющей машины, происходит перемещение частиц материала относительно друг друга, вытесняется заземленный воздух, возникают новые контакты между частицами материала и происходит перераспределение свободного битума в зонах контакта. За счет сближения материала между собой повышается плотность смеси, которая пропорциональна росту уплотняющей нагрузки. С повышением плотности смеси на перемещение минеральных частиц оказывает влияние прочность битумных пленок в зоне контакта, что требует повышения уплотняющей нагрузки. Плотность характеризует деформативные, прочностные свойства, структуру асфальтобетона и его долговечность. Плотность асфальтобетона обеспечивается подбором гранулометрического состава минерального материала с целью получения остова с минимальной остаточной пористостью, оптимальным содержанием битума в смеси и достижением требуемого коэффициента уплотнения асфальтобетона в процессе устройства покрытия. В связи с вытеснением объемного битума из зон контакта частиц материала и повышения прочности битумных пленок процесс деформирования прекращается. При дальнейшем понижении температуры горячего асфальтобетона, за счет увеличения вязкости битума, происходит возрастание связей между частицами материала, и прочность асфальтобетона повышается.

Величиной, характеризующей плотность, является водонасыщение и пористость асфальтобетона. Установлено, что снижение пористости на 1 % повышает усталостную долговечность асфальтобетонного покрытия на 10...30 % [20]. Увеличение коэффициента уплотнения на 0,01 в пределах 0,98 до 1,00 аналогично увеличению толщины слоя покрытия на 5...10 мм.

Обеспечение заданных свойств асфальтобетона зависит от особенностей технологии приготовления горячих смесей. Температурный режим приготовления горячей асфальтобетонной смеси зависит от применяемой марки битума и влажности минеральных материалов. Температура битума при перемешивании должна обеспечивать требуемую вязкость, необходимую для хорошего обволакивания минеральных зерен. Превышение температуры нагрева битума выше предельного значения приводит к ухудшению свойств битума и снижению долговечности асфальтобетона, что связано с усилением термоокислительных процессов при приготовлении смесей.

Качество горячей смеси в значительной степени зависит от процесса перемешивания минеральных материалов с вяжущим. При не-

достаточном перемешивании часть битума образует некоторые объемы вяжущего материала, заполняющего пространство между минеральными частицами, образуя агрегаты. Установлено, что время перемешивания компонентов смеси влияет на физико-механические свойства горячей смеси [5]. В наибольшей степени продолжительность перемешивания влияет на достижение требуемых свойств в течение первых 2–3 минут, затем интенсивность изменения свойств смеси снижается. С увеличением времени перемешивания уменьшается требуемое количество вяжущего материала, что объясняется распределением битума более тонкими слоями на поверхности минерального материала. Экспериментально доказано, что максимальную прочность (при заданном оптимальном количестве битума) асфальтобетона можно получить только при определенной интенсивности перемешивания.

Укладка и уплотнение горячих асфальтобетонных смесей в дорожные покрытия является заключительным этапом строительства автомобильных дорог, в процессе которого происходит формирование структуры асфальтобетона. В результате воздействия рабочего органа уплотняющей машины на горячую асфальтобетонную смесь обеспечивается требуемое уплотнение асфальтобетонного покрытия и достигаются его эксплуатационные показатели – плотность, прочность, пористость и водоустойчивость. По данным Н. В. Горелышева и К. Я. Лобзовой, увеличение плотности асфальтобетона повышает сдвигустойчивость и трещиностойкость асфальтобетонного покрытия. По данным И. В. Королева, асфальтобетон при одном и том же коэффициенте уплотнения может иметь разную прочность [5]. Это объясняется формированием разных структурных связей при разных технологиях и способах уплотнения. Поэтому выбор технологии устройства дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей, без учета конкретных условий производства работ, приводит к увеличению дефектов структуры асфальтобетона. Как показывает практика, одной из основной причин снижения работоспособности и долговечности автомобильной дороги является нарушение технологии при устройстве покрытия, и, как следствие, недостаточное уплотнение асфальтобетонного покрытия.

При взаимодействии рабочего органа уплотняющей машины с материалом в нем возникает необратимая деформация, характеризующая эффективность воздействия машины на уплотняемый материал. Установлено, что величина необратимой деформации зависит от величины контактных напряжений под рабочим органом машины, времени действия нагрузки и скорости изменения напряженного состояния материала, зависящего от режимов работы машины. При контакте органа

машины с материалом в зоне контакта возникает также упругая деформация, зависящая от состояния и свойств уплотняемого материала. При высоких температурах и малой вязкости битума горячая асфальтобетонная смесь по своим свойствам приближается к пластическим телам. С понижением температуры смеси преобладают упругие свойства.

Известно, что выбор уплотняющих машин при устройстве дорожных покрытий нежесткого типа зависит от характеристик асфальтоукладчика, который определяет не только темп строительства, но и состав машин для уплотнения покрытий [3, 5, 9, 26]. Анализ современных конструкций асфальтоукладчиков показал, что в настоящее время они оборудуются уплотняющими рабочими органами, работающими в динамическом режиме. Это позволяет, одновременно с распределением горячей смеси, производить и предварительное уплотнение при высокой температуре смеси, поставляемой к месту производства работ, обеспечивая при этом сравнительно высокий коэффициент предварительного уплотнения.

Установлено, что коэффициент предварительного уплотнения горячей смеси зависит от типа смеси, температуры при укладке, режимов работы уплотняющего органа и рабочей скорости асфальтоукладчика [9, 16, 26]. Наибольший эффект воздействия нагрузки на горячую смесь достигается при малой вязкости битума, что соответствует высокой температуре смеси. Экспериментально доказано, что увеличение температуры горячей смеси до 135...150 °С позволяет достичь максимального значения коэффициента предварительного уплотнения, зависящего от характеристики асфальтоукладчика. При дальнейшем увеличении температуры она не влияет на коэффициент предварительного уплотнения [45]. При постоянных параметрах асфальтоукладчика и температуре смеси величина коэффициента предварительного уплотнения зависит от типа смеси. Следует отметить, что на практике встречаются мнения, согласно которым можно достичь коэффициент предварительного уплотнения ($K_{п.упл}$) горячей смеси после укладки смеси асфальтоукладчиком, равным единице. Анализ результатов исследований, посвященных данному вопросу, показал, что если для смесей с высоким содержанием минерального материала (тип А), за счет выбора режимов укладки можно обеспечить коэффициент предварительного уплотнения смеси 0,96 и выше, то для других типов смесей значение $K_{п.упл}$ составляет 0,85...0,90 [26]. Значение $K_{п.упл}$ смеси зависит от скорости укладки смеси. В таблице 1.3 представлены значения коэффициента предварительного уплотнения смеси, характеризующие его зависимость от скорости укладки смеси, при совместной работе трамбуемого бруса и вибрационной плиты. Данные получены при частоте вибрации вибрационной плиты 50 Гц и трамбуемого бру-

1.3. Зависимость коэффициента предварительного уплотнения от скорости укладки смеси в дорожное покрытие

Тип смеси	$K_{п.упл}$ при рабочей скорости асфальтоукладчика, м/мин			
	1	2	3	5
А	0,98	0,94	0,93	0,92
Б	0,87	0,87	0,83	0,92
В	0,88	0,87	0,87	0,84
Г	0,83	0,88	0,82	0,82

са 12 Гц. Значения получены на основе данных, представленных в работе [26]. Из данных таблицы видно, что независимо от типа смеси, с увеличением рабочей скорости асфальтоукладчика, $K_{п.упл}$ смеси уменьшается, и для достижения требуемого коэффициента уплотнения асфальтобетонного покрытия необходимо применение уплотняющих машин. Типы катков и их количество зависит от скорости укладки смеси и качества работы уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчика, что влияет на технологию производства работ по устройству дорожных покрытий.

Для обеспечения качества работ по устройству дорожного покрытия, в том числе и в зоне стыка сопряженных полос, необходимо обоснованно выбирать скорость укладки асфальтобетонной смеси и длину рабочей захватки укладчика, зависящей не только от температуры воздуха, но и других параметров. При назначении скорости укладчика необходимо учитывать производственные мощности асфальтобетонных заводов и дальность транспортировки горячей смеси, интенсивность охлаждения слоя смеси, уложенной в покрытие; влияние скорости укладки на эффективность работы уплотняющих брусьев асфальтоукладчика, характеристики уплотняющих машин и их рабочие скорости, а также требуемое количество проходов по одному следу.

1.4. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ УСТРОЙСТВЕ МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Отмечалось, что при ежегодном увеличении количества транспортных средств и незначительном росте ввода в эксплуатацию новых и реконструируемых автомобильных дорог, повышается интенсивность

движения транспортных средств, что приводит к возникновению заторов на определенных участках дороги. Поэтому в современных условиях, с целью повышения пропускной способности, возникает необходимость увеличивать ширину дорожного покрытия, при строительстве и реконструкции которого предусматривается укладка и уплотнение горячих асфальтобетонных смесей несколькими полосами движения транспорта в одном направлении. В зависимости от ширины укладываемой полосы покрытия, а также конкретных условий производства работ, могут быть использованы разные методы организации работ по распределению асфальтобетонной смеси: одним или несколькими асфальтоукладчиками [3]:

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

Существующие конструкции асфальтоукладчиков, при наличии уширителей, позволяют увеличивать ширину укладываемой полосы асфальтобетонной смеси. В то же время стандартная ширина укладки асфальтоукладчика рассчитана на укладку смеси шириной 3,5...3,75 м. С учетом условий производства работ устройство многополосных покрытий может осуществляться отдельными полосами при незначительном (до 0,4 км/смену) темпе строительства, а также со смещением асфальтоукладчика с одной полосы на другую. При высоких темпах устройства покрытия, а также значительной ширине, укладка горячей смеси может производиться несколькими асфальтоукладчиками. В этом случае они располагаются уступом относительно друг друга при соблюдении определенной дистанции между ними. Такая организация процесса укладки асфальтобетонной смеси обеспечивает высокий темп строительства при условии обеспечения материалом.

Известно, что требуемые характеристики асфальтобетона при устройстве покрытия можно достичь при условии соблюдения температурных режимов в процессе уплотнения, что и регламентируется нормативными документами [41, 42, 45, 47]. Поэтому при строительстве многополосных покрытий необходимо обеспечить температурные режимы асфальтобетонной смеси не только в слое покрытия, но и в зоне стыка укладываемых полос, зависящие от свойств применяемого материала и условий производства работ. Независимо от принятой организации работ по устройству дорожного покрытия, при укладке асфальтобетонной смеси происходит понижение температуры смеси по времени, что оказывает влияние на ее свойства. После распределения горячей смеси тепло от слоя горячей смеси передается нижележа-

щему слою дорожной одежды и в окружающую среду, что приводит к неравномерности распределения температуры по толщине уложенного слоя [8, 19, 39]. Аналогичные потери тепла происходят и на боковой поверхности уложенного слоя покрытия, что способствует повышению интенсивности охлаждения горячей смеси в зоне стыка уложенной полосы покрытия. Минимальная температура горячей асфальтобетонной смеси регламентирована нормативными документами при укладке на подготовленное основание в зависимости от типа смеси и марки битума [45, 47]. Температура горячей смеси после ее укладки определяется темпом охлаждения, зависящим как от свойств смеси, так и от конструктивных параметров покрытия. Существующими рекомендациями по устройству асфальтобетонных покрытий установлены оптимальные длины сопряженных полос при укладке горячей смеси, обеспечивающие качественный продольный шов сопряжения двух полос, зависящих от температуры окружающего воздуха [3, 16]. Установлено, что темп охлаждения смеси зависит не только от температуры воздуха, но и других параметров (толщины слоя, скорости ветра, теплофизических характеристик смеси и др.). Следует заметить, что температура асфальтобетонной смеси в зоне стыка сопряженных полос зависит также от температуры смеси при укладке и времени укладки сопрягаемого слоя покрытия.

Известно, что для обеспечения безопасных условий работы катка при уплотнении горячей смеси (с учетом разгона и торможения) длина рабочей захватки должна быть в пределах 3,0–3,5 длины самого катка. Анализ технических характеристик уплотняющих машин показал, что длина катка находится в пределах 5...6 м. Следовательно, длина захватки при работе одного катка составляет 15...20 м. С учетом захватки укладчика смеси минимальная общая длина захватки всего отряда машин принимается не менее 60...65 м. При благоприятных погодных условиях длина общей захватки может составлять 130...150 м. При одновременной работе двух асфальтоукладчиков монолитность продольного шва обеспечивается при смещении одной машины относительно другой на расстоянии 25...50 м [3, 16].

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



Рис. 1.4. Дефект дорожного покрытия на стыке двух полос

исследованиями доказано, что качество уплотнения горячей смеси зависит от ее температуры. Поэтому понижение температуры горячей смеси в зоне сопряжения уложенных полос ниже предельной, за счет низкой температуры смеси при укладке или увеличенной длины захватки, приводит к понижению показателей асфальтобетона при уплотнении покрытия (прочности, плотности, водонепроницаемости), что приводит к разрушению дорожного покрытия в процессе эксплуатации (рис. 1.4).

На практике для устранения дефекта в зоне стыка сопряженных полос предусматривается дополнительный прогрев слоя смеси первой полосы с помощью различных разогревателей или наложения на край слоя горячей смеси следующей полосы на предыдущий с последующим устранением горячей смеси на стыке [1]. Следует заметить, что применение разогревателей асфальтобетона требует использования дополнительного оборудования и оказывает влияние на технико-экономические показатели работы механизированного звена. Кроме того, в зависимости от типа смеси и марки битума, температура нагрева с учетом эффективных температурных режимов смеси должна быть разной. Поэтому необходимо конкретизировать температуру нагрева асфальтобетона в зоне стыка ранее уложенной полосы. Наложение горячей смеси на ранее уложенную полосу покрытия не всегда дает положительный эффект, поскольку не известно, до какой температуры прогревается ранее уложенный слой покрытия.

Установлено, что качество работ при устройстве многополосных покрытий зависит от температурных режимов асфальтобетонной смеси на стыке смежных полос и возможности обеспечения одинакового

коэффициента уплотнения катками. Нарушение этих условий приводит к недоуплотнению или разуплотнению дорожного покрытия в зоне стыка полос. Процесс укатки сопряженных полос регламентирован нормативным документом [45, 47], согласно которому «при уплотнении первой полосы вальцы катка не должны приближаться более чем на 0,1 м к кромке сопряжения. Уплотнение следующей полосы необходимо начинать по продольному сопряжению. Сопряжение должно быть ровным и плотным. Расстояние между асфальтоукладчиком и дорожными катками должно быть минимальным» [42, 45]. Следует заметить, что при укладке сопряженных полос наблюдается охлаждение одного и нагрев другого слоя покрытия, которые проходят в течение определенного времени. Это указывает на то обстоятельство, что в зависимости от принятой организации работ по укладке горячей смеси процесс уплотнения необходимо выполнять через определенный промежуток времени, а не сразу после укладки горячей смеси сопряженной полосы покрытия.

Экспериментально установлено, что наиболее интенсивно процесс охлаждения горячей смеси после ее укладки на нижележащий слой основания происходит, в зависимости от конкретных условий производства работ, в пределах незначительного промежутка времени. За этот промежуток времени происходят значительные потери тепла горячей смесью, связанные с протеканием нестационарных тепловых процессов внутри уложенного слоя смеси, способствующие понижению температуры слоя смеси на 10...30 °С в зависимости от условий производства работ. Анализ распределения температуры в слое горячей смеси показал, что наиболее интенсивно температура горячей смеси изменяется в краевых точках слоя, характерных для боковой поверхности уложенного слоя горячей смеси полосы покрытия. В процессе эксплуатации дорожных покрытий нежесткого типа такие участки покрытия являются наиболее слабым местом покрытия и подвергаются интенсивному разрушению под влиянием погодных условий.

Для устранения таких дефектов необходимо исследовать влияния разных факторов на процесс охлаждения горячей смеси в зоне стыка сопряженных полос с учетом применяемых технологий укладки асфальтобетонных смесей, в том числе научно обосновать длину захваток при работе механизированного звена машин с учетом продолжительности нахождения горячей смеси в заданном интервале температуры и рабочей скорости укладки смеси асфальтоукладчиком.

Целью данной работы является обоснование технологических режимов на стыке сопряженных полос при строительстве многополосных покрытий нежесткого типа, позволяющих обеспечить срок службы покрытия в зоне стыка сопряженных полос покрытия.

2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

2.1. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

В связи с ростом интенсивности движения и увеличения нагрузки на дорожные одежды от транспортных средств, к транспортно-эксплуатационным показателям асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог предъявляют повышенные требования, которые можно обеспечить только в процессе строительства. Величина достигаемых параметров асфальтобетона в процессе устройства покрытия зависит от качества применяемого материала и принятой технологии строительства. Нарушение требований технологии при приготовлении, транспортировании, укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей, а также назначение режимов работы механизированного звена машин, без учета конкретных условий производства работ, приводит к снижению эксплуатационных характеристик асфальтобетонного покрытия. К основным параметрам, характеризующими эксплуатационные показатели асфальтобетона, относятся теплоустойчивость, прочность, водонасыщение, сдвигоустойчивость и трещиностойкость. В процессе эксплуатации дорожного покрытия транспортно-эксплуатационные показатели зависят также от температуры окружающего воздуха. В летний период, за счет солнечной радиации, температура асфальтобетонного покрытия может достигать температуры 50...60 °С, что приводит к снижению прочностных и деформативных характеристик асфальтобетона. Под действием нагрузок от транспортных средств на дорожных покрытиях возникают пластические деформации, способствующие образованию волн и колеи на поверхности покрытия. Поэтому применяемые смеси должны обладать определенной теплоустойчивостью к температуре, характерной для района строительства дорожного покрытия. В зимний период эксплуатации автомобильной дороги, при низких температурах окружающего воздуха, в асфальтобетонных покрытиях возникают температурные деформации, что способствует образованию трещин на поверхности покрытия. В зависимости от места строительства автомобильной дороги, нормативными документами определены конкретные марки битума, которые рекомендуются для приготовления горя-

чих асфальтобетонных смесей с учетом дорожно-климатической зоны [41, 43]. По вязкости применяемого битума и температуры смеси различают:

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

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

В зависимости от размера минеральных зерен асфальтобетонные смеси делят на:

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

С учетом остаточной пористости асфальтобетонные смеси делят на:

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

В зависимости от содержания щебня горячие смеси подразделяются на типы:

А – с содержанием щебня свыше 50 до 60 %;

Б – с содержанием щебня свыше 40 до 50 %;

В – с содержанием щебня свыше 30 до 40 %.

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

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

Асфальтобетонные смеси с учетом физико-механических свойств и применяемых материалов подразделяются на марки (табл. 2.1).

Существующими технологиями строительства дорожных покрытий нежесткого типа для обеспечения высоких прочностных показателей асфальтобетона, обладающими устойчивостью к воздействию погодно-климатических факторов в процессе эксплуатации, применяют высокоплотные и плотные марки 1. При устройстве покрытия в два слоя применяется раздельная укладка горячей смеси. В этом случае материал слоя покрытия регламентирован нормативным документом и зависит от категории дороги (табл. 2.2) [3, 42].

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

Дорожно-климатическая зона	Вид асфальтобетона	Категория автомобильной дороги											
		I, II				III				IV			
		марка смеси	марка битума	марка смеси	марка битума	марка смеси	марка битума	марка смеси	марка битума	марка смеси	марка битума		
I	Плотный и высокоплотный	I	БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300	II	БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300	III	БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 СТ 130/200 МГ 130/200 МГО 130/200	III	БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 БН 60/90 БН 90/130 БН 130/200 БН 200/300	IV	БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 БН 60/90 БН 90/130 БН 130/200 БН 200/300 СТ 130/200 МГ 130/200 МГО 130/200		
II, III	Плотный и высокоплотный	I	БНД 60/90 БНД 90/130 БНД 130/200 БН 90/130	II	БНД 60/90 БНД 90/130 БНД 130/200	III	БНД 60/90 БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 БН 60/90 БН 90/130 БН 130/200 БН 200/300	III	БНД 60/90 БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 БН 60/90 БН 90/130 БН 130/200 БН 200/300	IV	БНД 60/90 БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 БН 60/90 БН 90/130 БН 130/200 БН 200/300 СТ 130/200 МГ 130/200 МГО 130/200		
IV, V	Плотный	I	БНД 40/60 БНД 60/90 БН 40/60 БН 60/90	II	БНД 40/60 БНД 60/90 БН 40/60 БН 60/90	III	БНД 40/60 БНД 60/90 БНД 90/130 БН 40/60 БН 60/90 БН 90/130	III	БНД 40/60 БНД 60/90 БНД 90/130 БН 40/60 БН 60/90 БН 90/130	IV	БНД 40/60 БНД 60/90 БНД 90/130 БН 40/60 БН 60/90 БН 90/130		

Примечания: 1. Для городских скоростных и магистральных улиц и дорог следует применять асфальтобетоны из смесей видов и марок, рекомендуемых для дорог I и II категорий; для дорог промышленно-складских районов – рекомендуемые для дорог III категории; для остальных улиц и дорог – рекомендуемые для дорог IV категории.

2. Битумы марок БН рекомендуются применять в мягких климатических условиях, характеризующихся средними температурами самого холодного месяца года выше –10 °С.

2.2. Материал слоя покрытия при раздельной укладке покрытия

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

Примечания: 1. Асфальтобетонные смеси должны отвечать требованиям ГОСТ 9128–2009.

2. Для однослойных покрытий применяются материалы, указанные для верхнего слоя покрытия.

3. В районах I дорожно-климатической зоны не следует предусматривать устройство покрытий из холодных асфальтобетонных смесей.

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

4. В населенных пунктах при устройстве покрытий с применением каменноугольных дегтей и смол на них обязательно должен быть устроен защитный слой из асфальтобетонной смеси толщиной не менее 4 см или двойной поверхностной обработки с применением битума.

2.3. Минимальная толщина асфальтобетонных слоев

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

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

Толщина дорожной одежды определяется расчетом. Установлено, что минимальная толщина дорожной одежды в плотном состоянии, в зависимости от категории дороги и размера минеральных зерен, должна быть не менее данных, представленных в табл. 2.3 [40].

В настоящее время, с учетом повышенной интенсивности движения транспортных средств и роста осевой нагрузки на дорожные одежды, наблюдается тенденция к применению асфальтобетонов с применением различных модификаторов, которые влияют на свойства вяжущего и способствуют повышению долговечности дорожных покрытий по отношению к покрытиям с горячим асфальтобетоном на основе вязких битумов. Установлено, что независимо от состава асфальтобетона, достижение требуемых характеристик дорожного покрытия зависит от соблюдения температурных режимов при укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей. Доказано, что в зависимости от применяемой марки битума при приготовлении горячей асфальтобетонной смеси, а также применяемых модификаторов, температурные режимы смесей при укладке и уплотнении покрытий имеют разные значения [5, 8, 33].

2.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Технологические свойства дорожно-строительных материалов с применением битумных материалов зависят от их температуры и регламентированы нормативными документами [3, 41, 42, 47]. Температурные режимы зависят от теплофизических свойств асфальтобетон-

ных смесей, которые влияют на тепловые процессы, происходящие в слое асфальтобетонной смеси при укладке и уплотнении, в процессе выполнения работ по устройству дорожных покрытий. Качество выполнения работ, особенно при пониженных температурах окружающего воздуха, зависит от распределения температуры в уложенном объеме горячего материала и влияет на достижение эксплуатационных характеристик асфальтобетона, а также на срок службы дорожного покрытия. Установлено, что при укладке и уплотнении горячих смесей ее температура по толщине слоя распределяется неравномерно. Доказано, что процесс охлаждения слоя горячей смеси относится к нестационарным тепловым процессам и расчет температурных режимов при устройстве дорожных покрытий необходимо производить по средней температуре слоя смеси, за которую принята температура смеси на глубине одной третьей толщины укладываемого слоя от поверхности покрытия [8, 13].

Анализ применяемых технологий при устройстве покрытий нежесткого типа показал, что в зависимости от условий производства работ и применяемого материала, применяются разные схемы производства работ. Достижение требуемых параметров при устройстве покрытия с применением горячих смесей зависит от многих факторов, каждый из которых влияет на технологию производства работ и выбор технологических режимов. Экспериментально доказано, что достигаемая плотность асфальтобетона при уплотнении, а следовательно, водонепроницаемость, пористость и коэффициент уплотнения, независимо от типа смеси, может быть достигнута в определенном температурном интервале (рис. 2.1) [3, 6, 45].

Из представленных данных видно, что обеспечить требуемый коэффициент уплотнения горячей асфальтобетонной смеси можно только в определенном интервале температур, который зависит от марки вяжущего [4, 6, 28, 38].

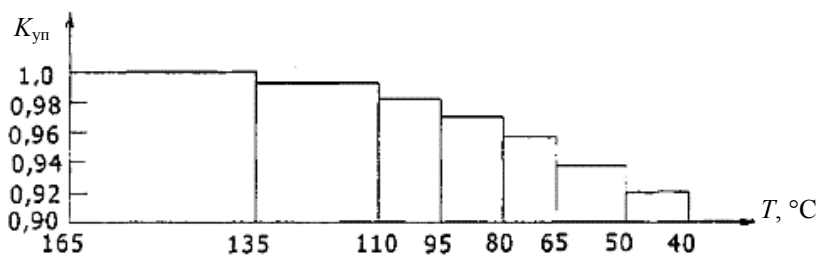


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента уплотнения горячей асфальтобетонной смеси от температуры смеси

Установлено, что температура горячей смеси влияет на прочность и деформативную способность материала на всем интервале температур. Изменение температуры горячего асфальтобетона от 150 °С до 50 °С приводит к увеличению предела прочности в 2,0–2,5 раза и модуля деформации материала в 4 раза [35]. Наибольший эффект уплотнения достигается при высокой температуре смеси, когда битум, а следовательно, и смесь, имеют наименьшую вязкость и малую способность сопротивляться внешней нагрузке. С понижением температуры смеси увеличивается вязкость битума. За счет этого связи между частицами материала усиливаются, что приводит к повышению способности материала сопротивляться внешней нагрузке при уплотнении. Поэтому для достижения более высоких характеристик асфальтобетона и обеспечения требуемого качества дорожного покрытия необходимо в процессе уплотнения материала увеличивать нагрузку на рабочий орган машины.

Установлено, что каждому типу уплотняющей машины соответствует оптимальный температурный интервал смеси [22, 31, 37]. Вязкость битума и температура горячей смеси в начале уплотнения смеси влияет на получаемую плотность асфальтобетонного покрытия. Чем больше вязкость битума, тем в большей степени температура начала уплотнения горячей смеси влияет на плотность асфальтобетона. Однако увеличение температуры смеси при уплотнении выше определенной величины, зависящей от марки битума, не дает положительного эффекта и способствует снижению получаемой плотности. Связано это с разрушением структуры битума. При высокой температуре смеси, в процессе уплотнения, частицы материала сближаются между собой под действием нагрузки от вальца катка и вытесняют битум в зонах контакта частиц минерального материала. При снятии внешней нагрузки пленка вяжущего, за счет расклинивающего давления, восстанавливает начальную толщину, уменьшая тем самым получаемую плотность смеси. Чем меньше вязкость битума, тем быстрее протекает этот процесс. С понижением температуры смеси увеличивается вязкость битума, что приводит к увеличению сопротивления при сжатии частиц материала и ухудшению уплотняемости смеси при действии постоянной нагрузки [3, 5]. Следует заметить, что при снижении температуры вяжущего материала увеличиваются силы адгезии между минеральной составляющей и вяжущим материалом асфальтобетона. Поэтому в тех случаях, когда силы адгезии между компонентами смеси превышают предел прочности минерального материала, использование уплотняющих машин с высокими контактными напряжениями способствует процессу разрушению минерального материала и снижению прочностных характеристик асфальтобетона, что подтверждено

экспериментальными исследованиями [5]. Экспериментальными исследованиями установлено, что асфальтобетонная смесь, независимо от марки битума, лучшим образом уплотняется в диапазоне вязкости битумов от 10 до 25 Па·с, что позволяет определить температурные границы эффективного уплотнения горячих смесей разных марок битумов [5]. Температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси влияют на организацию и продолжительность работ. Продолжительность работ, с учетом технологических режимов горячей смеси, определяется темпом охлаждения и зависит от разных факторов. Установлено, что охлаждение горячей асфальтобетонной смеси, независимо от состава, температуры воздуха и скорости ветра, подчиняется экспоненциальному закону [17]. Доказано, что темп охлаждения асфальтобетонной смеси зависит от температуры основания, на которую укладывают горячую смесь. В работах Б. И. Ладыгина и Н. В. Горельшева влияние температуры нижележащего слоя дорожной одежды, при укладке горячей смеси на длину захватки асфальтоукладчика, учитывается введением в аналитическую зависимость коэффициента влияния температуры основания [5, 8, 24,]. По результатам моделирования тепловых процессов в слое горячей асфальтобетонной смеси установлено, что закономерность влияния температуры основания на процессы укладки и уплотнения слоя смеси носит общий характер, и значение коэффициента влияния температуры основания зависит от разницы температуры основания и воздуха [8].

Горячая асфальтобетонная смесь при укладке в покрытие зависит от дальности транспортировки, температуры окружающего воздуха, организации производства работ, марки битума и типа смеси. Применение асфальтобетонных смесей с пониженной температурой характеризуется изменением теплофизических и деформационно-прочностных характеристик, что необходимо учитывать при производстве работ с применением горячих асфальтобетонных смесей.

2.3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Обеспечение качества строительства дорожных покрытий нежесткого типа в значительной степени зависит от теплофизических свойств материала, которые определяются температурой горячей асфальтобетонной смеси при укладке и уплотнении асфальтобетона. При распределении горячей смеси по основанию дорожной одежды происходит ее интенсивное охлаждение, которое характеризуется темпом охлаждения. Темп охлаждения слоя горячей смеси зависит от парамет-

ров укладываемого слоя (толщина, плотность) и теплофизических характеристик асфальтобетона, к которым относятся удельная теплоемкость ($c_{см}$), коэффициент теплоотдачи (α) и коэффициент теплопроводности (λ). Установлено, что процесс охлаждения асфальтобетонной смеси относится к нестационарным тепловым процессам. Характер охлаждения зависит от способности материала перераспределять тепло внутри тела, а также передавать другому материалу или в окружающую среду, которая характеризуется коэффициентом теплоотдачи в окружающую среду (α) и коэффициентом теплопроводности (λ) [25, 27, 34]. Исследованиями Л. Б. Гезенцева, Н. В. Горельшева, А. М. Богуславского, И. В. Королева и других авторов установлено, что теплоемкость асфальтобетона зависит от состава смеси, при этом удельная теплоемкость каменных материалов в два раза ниже удельной теплоемкости битума [6]. Величина коэффициента теплоотдачи (α) зависит от теплового излучения горячей смеси и скорости перемещения воздушных масс. Численное значение коэффициента теплоотдачи за счет теплового излучения, зависящего от температуры воздуха и смеси, определяется выражением [25]

$$\alpha_{изл} = \{\xi c_0 [(t/100)^4 - (t_b/100)^4]\} / (t - t_b), \quad (2.1)$$

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

Численное значение коэффициента теплоотдачи смеси за счет теплового излучения можно принять на основании данных, представленных на рис. 2.2 [18].

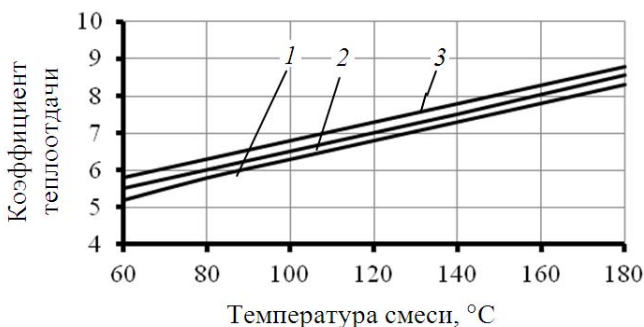


Рис. 2.2. Зависимость коэффициента теплоотдачи за счет теплового излучения слоя асфальтобетонной смеси от температуры смеси:

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

Из представленного графика видно, что с увеличением температуры асфальтобетонной смеси коэффициент теплоотдачи за счет теплового излучения возрастает. Зависимость имеет линейный характер независимо от температуры смеси.

Коэффициент теплоотдачи за счет конвективного обмена с окружающей средой зависит от скорости ветра, и его расчетное значение может быть определено на основе эмпирической зависимости [23]

$$\alpha = 4,23v + 3,25e^{-1,28v}, \quad (2.2)$$

где v – скорость ветра, м/с.

Влияния разных факторов (плотности материала, температуры основания, толщины слоя, состава смеси) на процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси исследовалось А. А. Иноземцевым [17]. Установлено, что общий коэффициент теплоотдачи асфальтобетонной смеси не зависит от толщины слоя и находится в пределах от 15,6 до 20,4 Вт/(м·°С). Установлено также влияние скорости перемещения воздушных масс на охлаждение слоя смеси. С возрастанием скорости ветра на 1 м/с коэффициент теплоотдачи горячей асфальтобетонной смеси увеличивается на 2,236 Вт/(м·°С) [17].

На основании экспериментальных исследований установлено, что охлаждение слоя горячей асфальтобетонной смеси, независимо от ее состава, температуры воздуха, толщины укладываемого слоя и скорости ветра подчиняется экспоненциальному закону, согласно которому [17]

$$\ln(t_n - t_b) / (t_p - t_b) = m\tau, \quad (2.3)$$

где t_n – начальная температура смеси, °С; t_p – температура смеси в расчетный момент времени, °С; t_b – температура воздуха, °С; τ – время, час; m – скорость охлаждения (темп охлаждения), 1/ч, которая зависит от свойств горячей асфальтобетонной смеси и определяется зависимостью

$$m = 2\alpha / (\gamma C_{cm} h), \quad 1/\text{ч}, \quad (2.4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи смеси; γ – объемная масса смеси, кг/м³; h – толщина укладываемого слоя смеси, м; C_{cm} – удельная теплоемкость смеси, которая зависит от состава смеси, кДж/(кг·°С).

В зависимости от процентного содержания минерального материала (щебня) в асфальтобетонной смеси, они делятся на типы А, Б, В, Г, Д, что влияет на их удельную теплоемкость [3, 41, 43]. Следовательно, продолжительность охлаждения слоя смеси, при прочих равных условиях, зависит и от типа смеси. Значение удельной теплоемкости смеси, в зависимости от ее типа, может быть определено из зависимости [23]

$$C_{\text{см}} = 0,01[(100 - z)c_{\text{б}} + zc_{\text{агр}}], \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}), \quad (2.5)$$

где z – процент массы агрегатов от общей массы смеси; $c_{\text{агр}}$ – удельная теплоемкость агрегатов смеси, кДж/(кг·°C); $C_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость битума, которая зависит от температуры и определяется зависимостью [8]

$$C_{\text{б}} = 1,1386e^{0,3553(t/100)}, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}); \quad (2.6)$$

где t – температура битума, °C.

Значение удельной теплоемкости при разном содержании минерального материала и температуре асфальтобетонной смеси, представлено в табл. 2.4.

Из представленных данных видно, что с ростом температуры удельная теплоемкость асфальтобетона повышается, в то же время с увеличением минерального материала (щебня) она снижается, что подтверждается результатами экспериментальных исследований. В общем виде значение удельной теплоемкости асфальтобетона, в зависимости от температуры и содержания минерального материала, можно представить в виде функции

$$C_{\text{см}} = f(t_{\text{см}}; M), \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}), \quad (2.7)$$

где $t_{\text{см}}$ – температура горячего асфальтобетона, °C; M – содержание минерального материала (щебня) в асфальтобетоне, %.

Представим данные табл. 2.4 в относительных величинах, принимая за единицу значения теплоемкость асфальтобетона при 100 °C и разном содержании щебня (табл. 2.5).

2.4. Удельная теплоемкость асфальтобетонной смеси при разном содержании минерального материала и температуре смеси

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

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

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

Из данных табл. 2.5 видно, что в относительных значениях удельная теплоемкость зависит от температуры смеси, и для практических расчетов в общем виде на рис. 2.3 представлена коэффициентами влияния температуры смеси на удельную теплоемкость асфальтобетонной горячей смеси.

Численное значение коэффициента определяется из выражения

$$C_{см} = 0,7975 e^{0,0023t_{см}}, \quad (2.8)$$

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

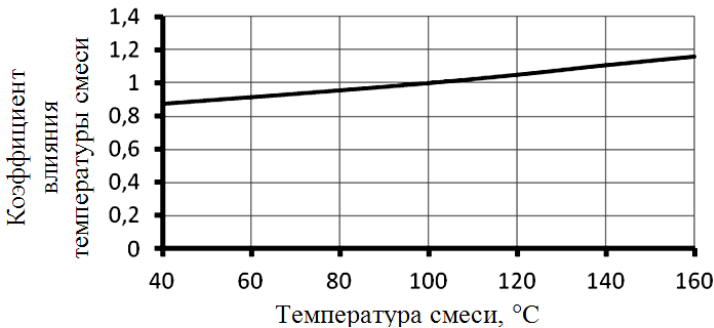


Рис. 2.3. Зависимость удельной теплоемкости асфальтобетона от температуры

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

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

Из представленных данных табл. 2.5 видно, что с увеличением процентного содержания минеральных агрегатов в смеси удельная теплоемкость снижается. Для уточнения влияния содержания минерального материала на удельную теплоемкость асфальтобетона представим данные табл. 2.4 в относительных величинах, принимая условно удельную теплоемкость асфальтобетона при содержании щебня в смеси 50 % за единицу при разной температуре (табл. 2.6). Обозначим принятую величину через коэффициент влияния содержания каменного материала на удельную теплоемкость асфальтобетона – $K_{щ}$ (рис. 2.4).

Зависимость коэффициент влияния содержания каменного материала на удельную теплоемкость асфальтобетона представлена на рис. 2.4.

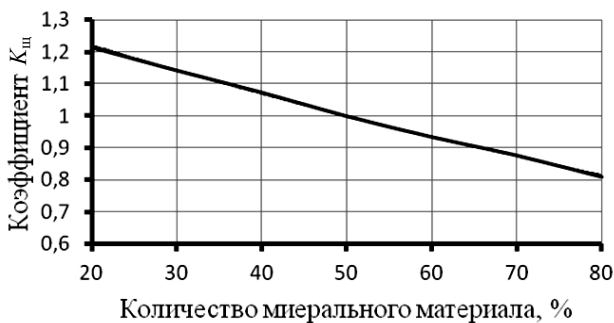


Рис. 2.4. Зависимость коэффициента $K_{щ}$ от содержания минерального материала

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

$$K_{щ} = 1,3983e^{-0,007щ}, \quad (2.9)$$

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

С учетом зависимости (2.8) и полученных значений коэффициентов влияния температуры горячей смеси и процентного содержания минерального материала, удельную теплоемкость асфальтобетонной смеси в общем виде можно определить из выражения

$$C_{см} = 1,371 e^{0,0023t_{см} - 0,007щ}. \quad (2.10)$$

При распределении горячей асфальтобетонной смеси по основанию в слое покрытия происходят сложные тепловые процессы, которые характерны для нестационарных теплопередач. За счет разницы температуры основания и слоя горячей смеси происходит передача тепла основанию, за счет которого происходит его нагрев до определенной температуры. Часть тепла передается через поверхность слоя в окружающую среду. Это приводит к снижению температуры на поверхности границы слоя уложенного покрытия с окружающей средой, что приводит к охлаждению верхнего слоя смеси. Потери тепла на границе покрытия восполняются за счет теплового потока из средней части уложенного слоя. Величиной, характеризующей передачу тепла из средней части к основанию и поверхности слоя, является коэффициент теплопроводности смеси (λ), который зависит от температуры смеси и плотности уложенного материала. Следовательно, в общем виде зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и плотности материала можно представить в виде функции

$$\lambda = f(t; \gamma). \quad (2.11)$$

На рисунке 2.5 представлена зависимость коэффициента теплопроводности асфальтобетона от плотности материала при разных температурах [18]. Из имеющихся данных видно, что между коэффициентом теплопроводности (λ) и плотностью при постоянной температуре смеси существует зависимость, которая при температуре 120 °С может быть выражена уравнением

$$\lambda = 0,334e^{0,578\gamma}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}, \quad (2.12)$$

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

В таблице 2.7 представлены данные, характеризующие влияние температуры смеси на численное значение коэффициента теплопроводности при разной плотности материала.

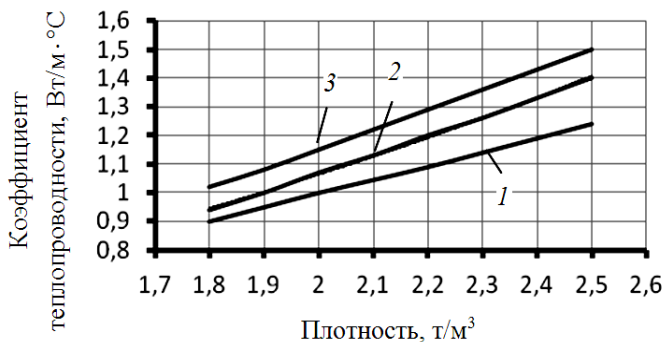


Рис. 2.5. Зависимость коэффициента теплопроводности (λ) асфальтобетонных смесей от плотности при разных температурах:
 1 – при температуре 20 °C; 2 –120 °C; 3 –170 °C

2.7. Влияние температуры смеси на величину коэффициента теплопроводности

Плотность, т/м³	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	
Температура, °C	20	0,94	1,0	1,05	1,10	1,175	1,225
	120	1,02	1,075	1,15	1,21	1,275	1,35
	170	1,06	1,125	1,2	1,25	1,325	1,42

Представим данные таблицы в относительных величинах, принимая λ при температуре смеси 120 °C за единицу. Тогда данные таблицы будут иметь следующие значения (табл. 2.8):

2.8. Влияние температуры смеси на величину коэффициента теплопроводности (в относительных значениях)

Плотность, т/м³	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	$\Sigma n/n$
Температура, °C	20	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,915
	120	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	170	1,04	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04

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

$$K_T = 0,895e^{0,0898(t/100)}, \quad (2.13)$$

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

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

$$\lambda = 0,298e^{0,578\gamma+0,0898(t/100)}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}. \quad (2.14)$$

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ УПЛОТНЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

В зависимости от дорожно-климатической зоны строительства дороги, для приготовления асфальтобетонных смесей применяют разные марки битумов, свойства которых зависят от температуры, а, следовательно, имеют разные температурные интервалы при производстве работ. Существующие рекомендации по температурным режимам уплотнения учитывают только тип смеси, в соответствии с которым определяются рациональные температурные режимы уплотнения горячих асфальтобетонных смесей катками разных типов [3, 16, 41, 42].

Установленные температурные интервалы при укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей получены из условия обеспечения плотности асфальтобетона при приложении 30 циклов нагрузки. В то же время, согласно СНиП 3.06.03–85 «Автомобильные дороги», количество проходов катков для обеспечения требуемой плотности асфальтобетона соответствует 18 – 21 проходам. На рисунке 2.6 представлены зависимости числа циклов приложения нагрузки к горячей смеси от ее температуры при условии получения заданной плотности асфальтобетона с учетом марки битума. Зависимости представлены на основе данных, опубликованных в работе [5].

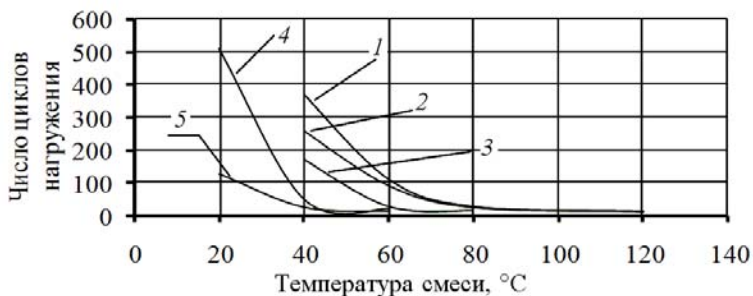


Рис. 2.6. Зависимость числа циклов приложения нагрузки от температуры смеси:

1 – для смесей с маркой битума БНД 60/90; 2 – БНД 90/130;
3 – БНД 130/200; 4 – БНД 200/300; 5 – СГ 130/200

На основании представленных данных получены зависимости, позволяющие определить температуру смеси, которая характеризует резкое снижение уплотняемости асфальтобетонной смеси. Полученные зависимости и результаты расчетов по определению нижнего интервала температуры уплотнения смесей (t), в пределах которого обеспечивается заданная плотность асфальтобетона с учетом марки битума, при разном числе циклов нагрузки (n) представлены в табл. 2.9.

2.9. Зависимость температуры смеси от числа циклов нагрузки

Марка битума	Зависимость $t = f(n)$	Коэффициент корреляции	Число циклов нагрузки	
			20	30
БНД 60/90	$t = 245,27n^{-0,307}$	0,97	97	86
БНД 90/130	$t = 258,1n^{-0,335}$	0,97	94	82
БНД 130/200	$t = 151,9n^{-0,263}$	0,96	69	62
БНД 200/300	$t = 217,03n^{-0,396}$	0,97	66	56
СГ 130/200	$t = 202,21n^{-0,481}$	0,98	48	39

2.10. Рекомендуемая температура окончания уплотнения горячих асфальтобетонных смесей

Марка битума	Температура укладки, °С	Тип смеси				
		А	Б	В	Г	Д
БНД 40/60	150...160	105–100	100–95	95–90	100–95	95–100
БНД 60/90	145...155	100–95	95–90	90–85	95–90	90–85
БНД 90/130	140...150	95–90	90–85	85–80	90–85	85–80
БНД 130/200	130...140	85–80	80–75	75–70	80–75	75–70
БНД 200/300	120...130	75–70	70–65	65–60	70–65	65–60

Из представленных зависимостей видно, что температура окончания процесса уплотнения асфальтобетонного покрытия зависит от марки битума. При достижении в процессе уплотнения нижнего интервала температуры смеси, характерного для каждой марки битума и для дальнейшего достижения требуемой плотности асфальтобетона, требуется увеличение числа проходов катка, что свидетельствует о снижении уплотняемости смеси. Можно полагать, что температура, при которой происходит изменение уплотняемости смеси, является критической, ниже которой уплотнение становится неэффективным. На основании установленных зависимостей рекомендуются температуры окончания уплотнения покрытий с учетом типа смеси и марки битума, которые представлены в табл. 2.10. Анализ полученных значений температуры окончания процесса уплотнения асфальтобетонных смесей при разных марках битума показывает, что для смесей с битумами марок БНД 40/60, 60/90 и 90/130 необходимо увеличить температуру окончания эффективного уплотнения.

2.5. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ СМЕСИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Качество строительства автомобильных дорог с покрытиями жесткого типа в значительной степени зависит от температуры смеси при выполнении технологических процессов укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси, которая влияет на прочностные характеристики асфальтобетона. Изменение прочности асфальтобетона, связанное с температурой, происходит не только на этапе строительства покрытия, но и в процессе эксплуатации автомобильных дорог. Установлено, что достижение требуемой плотности и прочности асфальтобе-

тона зависит от соблюдения температурных режимов при устройстве покрытия [3, 5, 6, 9, 26]. В качестве одного из критериев, характеризующего качество строительства, принят коэффициент уплотнения (K_y), который характеризует относительную величину достигнутой плотности материала к стандартной плотности образца. Опыт строительства дорожных покрытий нежесткого типа показал, что в некоторых случаях для достижения высокого коэффициента уплотнения, при пониженных температурах горячей смеси (нарушение температурных режимов), применяют тяжелые катки и обеспечивают при этом коэффициент уплотнения 0,995 – 0,996. Однако при этом прочность асфальтобетонного покрытия, в зависимости от типа смеси, снижается от 17 до 31 % [31].

Многочисленными исследованиями доказано, что предел прочности асфальтобетона, а также деформативная способность горячей смеси, при одном и том же составе зависит от температуры [3, 6, 8]. Понижение температуры асфальтобетонной смеси в пределах от 150 °С до 50 °С способствует возрастанию предела прочности асфальтобетона в 2,0–2,5 раза. При этом деформативная способность материала (способность материала сопротивляться внешней нагрузке) увеличивается в 4 раза [35]. Поэтому, согласно существующим нормативным документам и рекомендациям, на всем этапе строительства асфальтобетонных покрытий, независимо от типа смеси, необходим контроль за температурой горячей смеси. Отмечалось, что для строительства дорожных покрытий применяют разные типы смесей, каждая из которых имеет свои прочностные характеристики. На рисунке 2.7 представлены пределы прочности разных типов асфальтобетонов, полученные другими авторами [6, 8, 22, 31]. Из представленных данных видно, что численные значения предела прочности асфальтобетонной смеси зависят от типа смеси и температуры на протяжении всего процесса уплотнения.

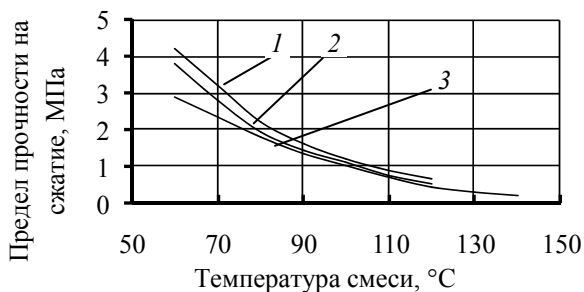


Рис. 2.7. Влияние температуры смеси на предел прочности при сжатии:
 1 – смеси типа А; 2 – смеси типа В; 3 – по данным [8]

Установлено, что предел прочности смеси зависит не только от содержания битума и щебня, но и марки битума [5, 22]. Зависимость между пределом прочности и температурой носит нелинейный характер. Если на начальной стадии уплотнения значения пределов прочности, в зависимости от типа смеси, отличаются незначительно, то в конце процесса уплотнения эти различия существенны. На основании этого можно сделать вывод, что для обеспечения качества работ необходимо знать температуру окончания процесса уплотнения, которая зависит не только от типа смеси, но и марки битума (табл. 2.10).

Толщина дорожного покрытия, в том числе дорожных слоев, определяется на стадии проектирования и ограничивает минимальную толщину слоя [40]. Качество уплотнения и предел прочности асфальтобетона определяют на основании испытаний образцов, взятых с дорожных покрытий. За сравнимую величину принимают результаты испытания стандартных образцов, у которых отношение диаметра и высоты цилиндра равно единице. На практике толщина слоя покрытия может иметь разное значение. Поэтому для объективности получаемых результатов испытаний необходимо уточнить влияние высоты образца на прочностные характеристики асфальтобетона в покрытии. Данное обстоятельство влияет также на выбор средств механизации при уплотнении слоев с малой толщиной, в также слоев износа. Анализ зависимостей предела прочности и модуля деформации асфальтобетонных смесей от температуры показывает, что модуль деформации возрастает более интенсивно со снижением температуры, чем предел прочности смеси. Это обстоятельство говорит о том, что при уплотнении асфальтобетонных покрытий попытки увеличения плотности смеси за счет повышения давления на контакте рабочего органа катка приведут к появлению пластических деформаций и, следовательно, к снижению качества покрытия. Поэтому для обеспечения требуемых показателей при строительстве покрытий необходим контроль за соответствием деформационно-прочностных характеристик смеси и параметрами машин в процессе укладки и уплотнения.

Установлено, что предел прочности горячего асфальтобетона зависит от температуры, типа смеси, степени уплотнения и толщины уплотняемого слоя. В общем виде зависимость предела прочности асфальтобетона, с учетом отмеченных параметров, может быть представлена в виде функции

$$\sigma_{\text{пр}} = f(t_{\text{см}}; K_y; h/d), \quad (2.15)$$

где $t_{\text{см}}$ – температура смеси, °С; K_y – коэффициент уплотнения; h/d – отношение толщины слоя к дуге контакта вальца катка с материалом [9, 44].

На основании проведенных исследований предложена зависимость для определения предела прочности горячей асфальтобетонной смеси, которая имеет вид [8]

$$\sigma_{\text{пр}} = 0,08e^{[5,876K_y - 0,697(h/d) - 0,025t_{\text{см}}]}, \quad (2.16)$$

где K_y – коэффициент предварительного уплотнения; e – основание натурального логарифма; h – толщина слоя, м; d – диаметр штампа, соответствующий длине дуги контакта рабочего органа машины с материалом, м; $t_{\text{см}}$ – температура горячей смеси, °С.

2.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Перспективным дорожным материалом для устройства покрытий, с учетом повышенной осевой нагрузки на дорожные конструкции, является щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА). Зарубежный и отечественный опыт применения ЩМА для строительства дорожных покрытий показал, что его эффективно применяют как при устройстве нижних, так и верхних слоев дорожного покрытия. Толщина укладываемого слоя составляет 0,03...0,06 м. ЩМА является одной из разновидностей горячего асфальтобетона. В отличие от горячих асфальтобетонных смесей, в состав которых входит щебень до 60 % от общей массы, в составе ЩМА содержится 70...80 % щебня с улучшенной кубовидной формой зерен, способствующий созданию устойчивого каркаса при уплотнении покрытия. Более высокое содержание вяжущего материала (от 5,5 до 7,5 % по массе) и минерального порошка (8...15 %) обеспечивает низкий уровень пустот в уплотненном слое покрытия. В качестве стабилизирующих добавок применяют коротковолокнистый минеральный материал, чаще всего, волокна целлюлозы, длиной от 0,5 до 1,9 мм [26]. Этот тип асфальтобетона характеризуется более высокими показателями по сдвигоустойчивости, водонепроницаемости и шероховатости слоя покрытия. Согласно нормативным документам, ЩМА применяют также для слоев износа, с толщиной слоя от 20 до 40 мм. По отношению к горячим асфальтобетонным смесям ЩМА обладает более высокой долговечностью, пониженным уровнем шума при движении транспортных средств, высоким коэффициентом сцепления шины с поверхностью покрытия, а также более высоким сопротивлением колееобразованию. Применение модифицирующих добавок влияет на температурные режимы ЩМА, что необходимо учитывать при его применении.

Как показывает практика строительства покрытий с использованием ЩМА, при его применении не всегда учитываются особенности материала, и при производстве работ используют те же температурные интервалы, как и при применении горячих асфальтобетонных смесей.

Анализ температуры приготовления и укладки щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (ЩМАС) показал, что рекомендованные значения для этого типа асфальтобетонной смеси выше по отношению к горячим асфальтобетонным смесям. Температура приготовления ЩМА, в зависимости от марки вяжущего, находится в интервале 175...160 °С, что значительно выше температуры приготовления горячих асфальтобетонных смесей типа А [44]. В то же время рекомендуемая температура окончания уплотнения для ЩМА имеет диапазон от 120 до 80 °С, что влияет на качество уплотнения и организацию работ по устройству покрытия. Анализ существующих рекомендаций по температурным режимам укладки и уплотнения ЩМА показал, что температура укладки смеси зависит от марки битума и находится в пределах 175...140 °С. С точки зрения организации работ и обеспечения требуемых параметров уплотнения, важным параметром является эффективная температура окончания уплотнения, обеспечивающая высокие параметры уплотнения покрытия. Существующий разброс численных значений температуры окончания уплотнения ЩМА (120...80 °С) требует обоснованного подхода к этому параметру. Практика строительства дорожных покрытий с использованием ЩМАС показала, что при температуре смеси 100 °С практически уплотнить его невозможно. Наличие повышенного содержания вяжущего способствует образованию более толстой пленки на поверхности минерального материала, а более высокий процент минерального материала способствует изменению теплофизических характеристик смеси, что влияет на темп охлаждения температуры при устройстве дорожного покрытия и температурные режимы смеси. Повышенное содержание вяжущего в ЩМА ограничивает применение стандартных технологий уплотнения покрытий. Отсутствие научно обоснованных температурных границ эффективного применения ЩМА не позволяет обосновать эффективные технологические режимы при строительстве покрытий.

2.6.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭФФЕКТИВНОГО ОКОНЧАНИЯ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ НА УПЛОТНЯЕМЫЙ СЛОЙ ПОКРЫТИЯ

Обеспечение требуемых характеристик асфальтобетона при устройстве дорожного покрытия в значительной степени зависит от температурных режимов укладки и окончания уплотнения слоя покрытия.

Поэтому научно обоснованный выбор температурных режимов технологии устройства асфальтобетонных покрытий позволяет регулировать процесс формирования макроструктуры при устройстве дорожного покрытия с применением ЩМА.

Известно, что обеспечить требуемые характеристики асфальтобетонного покрытия в процессе уплотнения возможно при соблюдении условия, когда контактные напряжения под вальцом катка близки пределу прочности уплотняемого материала, который зависит от температуры смеси. При выполнении данного условия необратимая деформация материала происходит за счет сближения частиц между собой, что приводит к снижению пористости уплотняемого материала и повышению его плотности.

Экспериментально установлено, что плотность материала, при действии уплотняющей нагрузки, зависит от соответствия уплотняющей нагрузки свойствам материала, скорости изменения напряженного состояния материала и времени действия нагрузки [37]. Принимая в качестве критерия время действия нагрузки, при формировании образца с учетом заданной плотности асфальтобетона, определена нижняя температурная граница при уплотнении, ниже которой эффект уплотнения снижается. Полученные результаты представлены на рис. 2.8. Каждая точка на графике соответствует среднему значению полученных результатов при испытании трех образцов. Из представленных результатов видно, что с понижением температуры горячей смеси ниже 110 °С время для достижения заданной плотности возрастает. В интервале температуры 170...110 °С требуемое время для обеспечения заданной плотности образца остается постоянным.

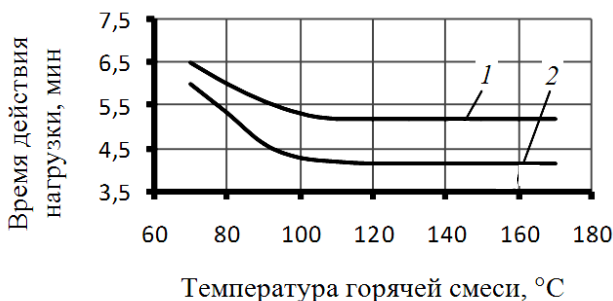


Рис. 2.8. Зависимость времени действия нагрузки для достижения требуемой плотности асфальтобетона от температуры:

1 – ЩМА-20, 2 – ЩМА-10 и ЩМА-15, битум марки БНД 60/90

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что минимальная температура эффективного уплотнения горячей ЩМАС соответствует температуре в пределах 110...115 °С. Установлено также, что изменение толщины слоя и типа ЩМАС не влияет на характер зависимости. Следовательно, температура эффективного окончания уплотнения ЩМАС выше, чем при использовании горячих асфальтобетонных смесей. Для сравнения – температура окончания эффективного уплотнения для горячего асфальтобетона с битумом марки БНД 60/90 равна 85...90 °С.

2.6.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Известно, что предел прочности горячего асфальтобетона зависит от температуры смеси. Анализ нормативных документов по устройству дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей и щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей показал, что имеются различия в пределах прочности горячего асфальтобетона в зависимости от его температуры [43, 44]. Так, если при температуре испытания на сжатие при 50 °С предел прочности для горячего асфальтобетона должен быть не менее 0,9...1,0 МПа, то для ШМА он составляет 0,6...0,7 МПа. В то же время пределы прочности на сжатие при температуре испытания 20 °С практически одинаковы (2,0 – 2,5). Это указывает на то, что прочностные характеристики горячего ЩМА в большей степени зависят от температуры. Представленные значения в нормативных документах соответствуют эксплуатационным температурам дорожного покрытия. При устройстве дорожного покрытия асфальтобетон имеет более высокую температуру при распределении и уплотнении, что влияет на его прочностные характеристики. С учетом основного условия уплотнения необходимо, чтобы контактные напряжения под рабочим органом уплотняющей машины были близки к пределу прочности уплотняемого материала [37].

Для установления зависимости влияния температуры на прочность ЩМАС были проведены исследования в лабораторных условиях. Зависимость предела прочности на сжатие от температуры представлена на рис. 2.9. Каждая точка на графике соответствует среднему значению полученного результата при испытании трех образцов.

Анализ установленной зависимости предела прочности ЩМА на сжатие от температуры смеси, в отличие от горячих асфальтобетонных смесей, характеризуется более низкими значениями. Это можно объяснить наличием более высокого процентного содержания вяжущего в составе смеси. С понижением температуры значение предела

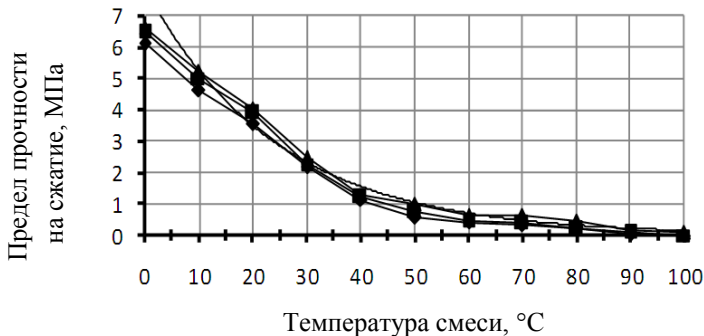


Рис. 2.9. Зависимость предела прочности при сжатии от температуры (ЩМА-10, ЩМА-15, ЩМА-20)

прочности возрастает по экспоненциальной зависимости. В общем виде зависимость предела прочности ЩМА от температуры можно аппроксимировать выражением

$$[\sigma] = 11,74e^{-0,408t_{см}}, \text{ МПа}, \quad (2.17)$$

где $t_{см}$ – температура асфальтобетона, °C. Коэффициент корреляции равен 0,97.

Полученные результаты зависимости предела прочности от температуры смеси позволяют сделать вывод, что при уплотнении ЩМА, особенно на начальной стадии, необходимо применять катки статического действия. Применение катков динамического действия (вибрационных) будет способствовать отделению битума от минеральной составляющей смеси и его миграции на поверхность покрытия.

Известно, что ЩМА обладает высокими характеристиками на сдвиг, что характеризуется высоким процентным содержанием минерального материала и его формой. Сдвигоустойчивость ЩМА определяется в соответствии с рекомендациями по оценке сдвигоустойчивости асфальтобетона [30, 49]. Данный метод (метод Ю. Е. Никольского) основан на том, что в процессе испытания центральная часть образца сдвигается относительно остального объема. Зависимость предела прочности при сдвиге от температуры смеси представлена на рис. 2.10.

Из представленных данных видно, что с повышением температуры асфальтобетона его прочностные характеристики на сдвиг значительно меняются. Независимо от типа, смеси характеризуются экспонен-

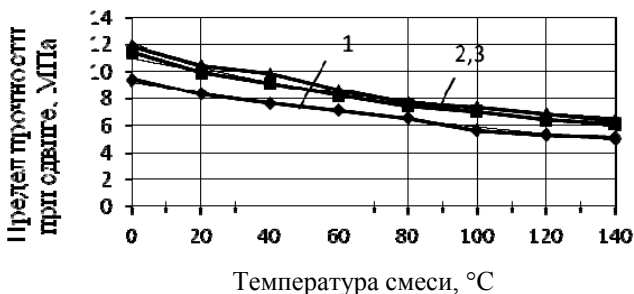


Рис. 2.10. Зависимость предела прочности при сдвиге от температуры:
 1 – ЩМА-10; 2 – ЩМА-15; 3 – ЩМА-20

циальной зависимостью. Численное значение предела прочности ЩМА на сдвиг можно определить по формулам:

$$\text{ЩМА-10} \quad [\tau] = 10,1e^{-0,09t_{\text{см}}}, \text{ МПа}; \quad (2.18)$$

$$\text{ЩМА-15, ЩМА-20} \quad [\tau] = 11,95e^{-0,089t_{\text{см}}}, \text{ МПа}, \quad (2.19)$$

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

Анализ полученных значений предела прочности на сдвиг ЩМА с данными, полученными другими исследователями при определении предела прочности горячего асфальтобетона (БНД60/90), по стандартной методике показали, что их значения значительно ниже (при 50 °С предел прочности равен 1,94 МПа) [43]. Следовательно, при устройстве дорожных покрытий с применением ЩМА эту особенность необходимо учитывать при выборе звена уплотняющих машин.

2.6.3. ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ УКЛАДЫВАЕМОГО СЛОЯ НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЩМАС

В зависимости от конструктивных параметров дорожной одежды толщина укладываемого слоя материала может быть принята от 0,03 до 0,06 м. Нормативными документами при применении горячих смесей установлены пределы прочности на сжатие, которым должны отвечать применяемые материалы. С учетом типа смеси размеры ядер разные, но в то же время высота образца равняется его диаметру. С целью уточнения влияния толщины слоя на предел прочности на сжатие асфальтобетона были изготовлены образцы с разной высотой (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Образцы ЦМА для определения влияния толщины слоя одежды на прочностные параметры

За единицу принято значение предела прочности стандартного керна (диаметр равен высоте образца). На рисунке 2.12 представлены результаты испытания образцов, где за единицу принято значение предела прочности стандартного керна (диаметр равен высоте образца).

Из представленных данных видно, что предел прочности на сжатие зависит от толщины слоя покрытия, и независимо от типа смеси, характер кривых подчиняется логарифмической зависимости. В результате обработки данных эксперимента получены зависимости предела прочности ЦМА от толщины слоя покрытия, которые представлены в табл. 2.11.

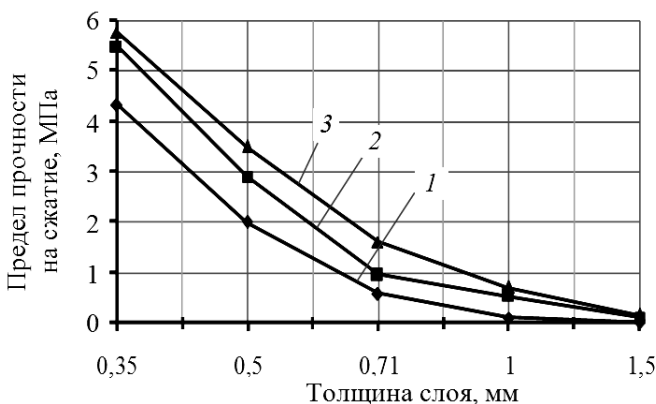


Рис. 2.12. Зависимость предела прочности на сжатие (1 – ЦМА-10, 2 – ЦМА-15, 3 – ЦМА-20) от относительной толщины слоя ((1 – ЦМА-10, 2 – ЦМА-15, 3 – ЦМА-20, температура 80 °С)

2.11. Зависимость предела прочности на сжатие от относительной толщины слоя

Вид ЩМА	Зависимость	Величина достоверности аппроксимации, R^2
ЩМА-10	$[\sigma] = -2,81 \ln(h) + 4,1$	0,96
ЩМА-15	$[\sigma] = -3,47 \ln(h) + 5,3$	0,97
ЩМА-20	$[\sigma] = -3,61 \ln(h) + 5,8$	0,99

С учетом суперпозиции значение предела прочности ЩМА от температуры смеси и толщины слоя покрытия имеет вид

$$\text{ЩМА-10} \quad [\sigma] = 11,74e^{-0,408t_{\text{см}}} (-2,81 \ln(h) + 4,1);$$

$$\text{ЩМА-15} \quad [\sigma] = 11,74e^{-0,408t_{\text{см}}} (-3,47 \ln(h) + 5,3);$$

$$\text{ЩМА-20} \quad [\sigma] = 11,74e^{-0,408t_{\text{см}}} (-3,61 \ln(h) + 5,8).$$

(2.20)

Изменение предела прочности на сжатие ЩМА от относительной толщины слоя покрытия можно объяснить тем, что с учетом кубовидной формы минерального материала, в зависимости от типа смеси, размер фракций минерального материала разный. Следовательно, при укладке тонких слоев дорожной одежды, при выборе параметров уплотняющих машин, необходимо учитывать толщину слоя, поскольку от этого зависит обеспечение требуемого условия уплотнения.

3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ПОКРЫТИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Работоспособность и долговечность дорожного покрытия нежесткого типа в значительной степени зависит от качества выполнения технологических операций по укладке и уплотнению горячих асфальтобетонных смесей, которые регламентируются температурными режимами применяемых смесей. В таблицах 3.1 – 3.4 представлены рекомендуемые температурные режимы уплотнения асфальтобетона разных типов в зависимости от марки битума [3, 16, 23, 41, 45].

В таблице 3.3 приведены примеры рекомендуемого времени производства работ [16].

Анализ представленных рекомендаций по допустимой продолжительности работ с горячей асфальтобетонной смесью показал, что допускаемые диапазоны изменения входящих величин довольно существенны и требуют уточнения. По результатам исследований установлены температурные режимы горячих смесей в зависимости от марки битума, которые различаются режимами укладки и уплотнения для одного и того же типа смеси и представлены в табл. 3.5 [6, 8, 9].

3.1. Температура укладываемой асфальтобетонной смеси

Толщина слоя, см	Минимальная температура горячей смеси при температуре воздуха °С					
	30	20	15	10	5	0
До 5	115/120	125/135	130/140	135/145	140/150	145/155
5...10	105/110	115/120	120/125	125/130	130/135	135/140

3.2. Ориентировочная температура асфальтобетонной смеси начала уплотнения

Вид смеси (содержание щебня, % по массе)	Тип	Температура, °С
Щебеночная (от 50 до 60)	А	130...150
Щебеночная (от 40 до 50)	Б	120...140
Щебеночная (от 30 до 40)	В	100...130
Песчаная на дробленом песке	Г	130...140
Песчаная на природном песке	Д	110...130
Смеси для основного (нижнего) слоя	–	120...150

**3.3. Допустимое время (мин) укладки и уплотнения смеси
в зависимости от погодных условий**

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

**3.4. Изменение времени уплотнения смеси
в зависимости от условий работы**

Факторы	Диапазон величин	Увеличение (+) или уменьшение (–) времени уплотнения, мин
Скорость ветра, км/ч	0...20	–26
Температура воздуха, °С	0...20	+19
Солнечная погода, °С	0+10	+15
Толщина слоя, мм	35...45	+57
Температура укладываемой смеси, °С	140...160	+40
Минимальная температура уплотнения, °С	90...100	+30

**3.5. Рекомендуемые температурные режимы укладки
и окончания уплотнения асфальтобетона разных типов
в зависимости от марки битума**

Марка битума	Температура укладки, °С	Температура окончания уплотнения горячих смесей				
		А	Б	В	Г	Д
БНД 40/60	150...160	105...100	100...95	95...90	100...95	95...90
БНД 60/90	145...155	100...95	95...90	90...85	95...90	90...85
БНД 90/130	140...150	95...90	90...85	85...80	90...85	85...80
БНД 130/200	130...140	85...80	80...75	75...70	80...75	75...70
БНД 200/300	120...130	75...70	70...65	65...60	70...65	65...60

Уплотнение горячей смеси необходимо начинать при максимально высокой температуре смеси, при которой не образуются деформации в процессе укатки слоя покрытия. Соблюдение температурных режимов горячих асфальтобетонных смесей при укладке и уплотнении позволяет обеспечить требуемые характеристики асфальтобетона при устройстве дорожных покрытий нежесткого типа, в том числе и в зоне стыка сопрягаемых полос при строительстве многополосных дорожных покрытий.

3.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

В современных условиях, с целью повышения пропускной способности автомобильной дороги, возникает необходимость строительства дорожных покрытий с увеличенной шириной, при устройстве которых предусматривается укладка и уплотнение горячих асфальтобетонных смесей несколькими полосами в одном направлении.

При устройстве многополосных дорожных покрытий могут применяться разные способы организации укладки асфальтобетонной смеси:

1. Одним асфальтоукладчиком, при распределении смеси на всю ширину проезжей части за один проход (рис. 3.1).

2. При такой организации распределения асфальтобетонной смеси укладка производится во всю ширину проезжей части одним асфальтоукладчиком, при этом продольный шов отсутствует, а край укладываемой полосы находится вблизи бордюрного камня, что делает минимальной возможность нагрузки на краевую часть укладываемой полосы. В процессе эксплуатации дороги не возникают вопросы, связанные с наличием продольного шва.

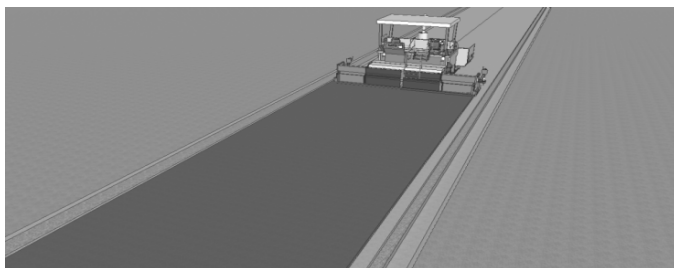


Рис. 3.1 Укладка горячей асфальтобетонной смесью одним асфальтоукладчиком при строительстве автомобильных дорог с увеличенной шириной полосы

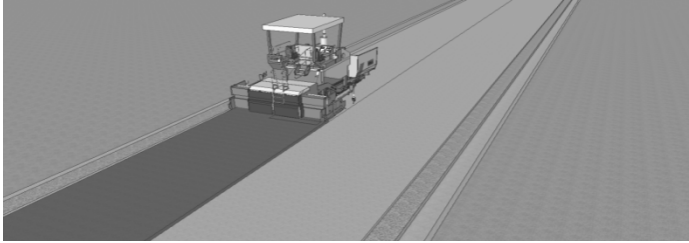


Рис. 3.2. Укладка части покрытия одним асфальтоукладчиком.

3. Одним асфальтоукладчиком, распределяющим горячую асфальтобетонную смесь в пределах сменной захватки. Следующие параллельные полосы укладываются через продолжительное время (рис. 3.2).

Такой способ устройства покрытия находит применение при уширении покрытия, ремонте, реконструкции, а также при недостаточной производственной мощности асфальтобетонных заводов. При такой технологии устройства покрытия обеспечивается возможность движения транспортного потока за счет возможности движения транспорта по параллельной полосе покрытия. При этом способе устройства дорожного покрытия имеется продольный шов. Нарушение температурных режимов в зоне стыка сопряженных полос способствует образованию дефектов на поверхности покрытия в процессе эксплуатации автомобильной дороги.

4. Одним асфальтоукладчиком с переходом его с одной полосы на другую. При такой технологии асфальтобетонная смесь укладывается в пределах захватки, длина которой зависит от температуры воздуха. При этом принято считать, что рекомендованная длина захватки обеспечивает температуру асфальтобетонной смеси в зоне стыка сопряженных полос в соответствии с температурными режимами применяемых смесей (рис. 3.3).

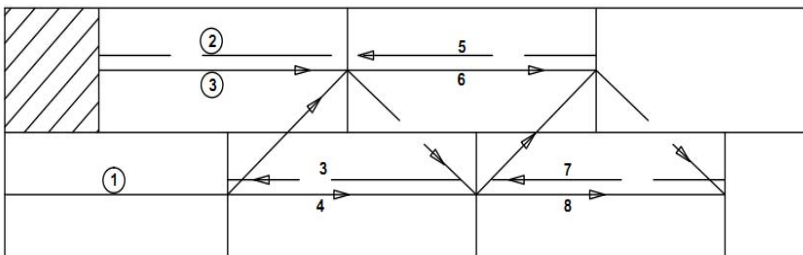


Рис. 3.3. Технологическая схема укладки асфальтобетонной смеси одним асфальтоукладчиком с перемещением его с одной полосы на другую

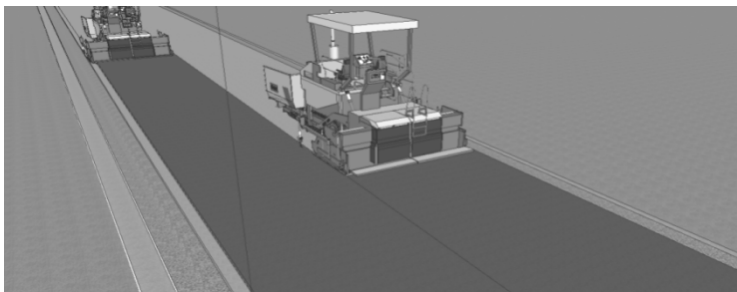


Рис. 3.4. Укладка двумя асфальтоукладчиками

Такая технология устройства покрытия применяется при укладке смеси на всю ширину покрытия при строительстве, реконструкции и ремонте дороги.

Особенностью данной технологии является образование не только продольных швов, но и поперечных.

5. Двумя и более асфальтоукладчиками, смещенными в плане относительно друг друга на некоторое расстояние (рис. 3.4).

Данный способ укладки применяется при устройстве многополосных дорожных покрытий во всю ширину, когда ширина укладки одним асфальтоукладчиком недостаточна. При этой технологии образуется только продольный шов.

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

от транспортных средств передается на стык сопряженных полос покрытия, что значительно понижает срок эксплуатации таких покрытий.

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

В зависимости от конструктивных параметров дорожного покрытия, длина захватки с учетом температурных режимов горячей смеси, может быть разной. Существующие конструкции асфальтоукладчиков, при наличии уширителей, позволяют укладывать горячую асфальтобетонную смесь с увеличенной шириной полосы укладки. В то же время стандартная ширина укладки асфальтоукладчика рассчитана на укладку смеси шириной 3,5 – 3,75 м. Существующими технологиями строительства дорожных покрытий с несколькими полосами движения предусматривается выполнение строительных процессов. В зависимости от конкретных условий производства работ, укладку горячей смеси производят одним или несколькими асфальтоукладчиками. При строительстве покрытий несколькими укладчиками, для обеспечения качественного сопряжения параллельных полос, необходимо обеспечить на стыке укладываемых полос дорожного покрытия температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси, соответствующие укладке и уплотнению зависящие от свойств применяемого материала. Определение длины захватки при устройстве полосы покрытия одним асфальтоукладчиком со смещением с одной полосы на другую и обеспечении условия температурных режимов горячей смеси при укладке и одновременном уплотнении двух смежных полос рассмотрено в работе [6]. Для определения длины захватки предложена зависимость

$$l_y = \frac{[(t_0 - t_k) - T_p m] v_1 v_2}{(v_1 + v_2) m}, \quad (3.1)$$

где l_y – длина хода асфальтоукладчика, обеспечивающая сопряжение новой полосы с ранее уложенной при температуре не ниже 80 °С; t_0 – температура асфальтобетонной смеси в момент укладки, °С; t_k – нижний предел температуры смеси, при котором еще обеспечивается качественное сопряжение смежных полос, °С; T_p – продолжительность разворота асфальтоукладчика после окончания укладки полосы, с; m – интенсивность остывания асфальтобетонной смеси в покрытии, °С/с (для неуплотненной смеси 0,083...0,1 °С/с, для уплотненной – 0,017...0,025 °С/с); v_1 – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/с; v_2 – транспортная скорость асфальтоукладчика, м/с.

Анализ представленной зависимости показал, что она не учитывает влияния конкретных условий производства работ и не позволяет учитывать их при определении длины захватки. Следует заметить, что температура воздуха, толщина укладываемого слоя полосы покрытия, скорость ветра и теплофизические свойства горячей смеси влияют на темп охлаждения горячей смеси, которая в предложенной зависимости носит обобщенный характер. Учесть влияние отмеченных факторов в данной зависимости на практике не представляется возможным, и поэтому данная зависимость требует дальнейшего уточнения.

Известно, что для обеспечения безопасных условий работы катков, при уплотнении горячей смеси, длина рабочей захватки должна быть в пределах 3,0...3,5 длины самого катка. Поэтому расстояние между ними, при совместной укладке горячей смеси в сопряженные полосы покрытия несколькими асфальтоукладчиками, принимается в пределах 10...30,0 м. Минимальная общая длина захватки всего отряда машин принимается не менее 60...65 м. При благоприятных погодных условиях длина общей захватки может составлять 130...150 м. При работе одним укладчиком длина укладываемой полосы, обеспечивающая качественный продольный шов сопряжения двух полос, согласно рекомендациям, принимается по табл. 3.6 [3].

При одновременной работе двух асфальтоукладчиков монолитность продольного шва обеспечивается при смещении одной машины относительно другой на расстояние 25...50 м (рис. 3.5).

При работе двух и более укладчиков длина укладываемой полосы, обеспечивающая качественный продольный шов сопряжения двух полос, согласно рекомендациям, принимается по табл. 3.7 [3, 16].

3.6. Оптимальная длина сопрягаемых полос при укладке смеси одним асфальтоукладчиком

Температура воздуха при отсутствии ветра, °С	Длина укладываемой полосы, м	
	Горячие смеси	
	на защищенных от ветра участках	на открытых участках
5...10	30...60	25...30
10...15	60...100	30...50
15...20	100...150	50...70
20...25	80...100	70...80
Свыше 25	150...200	80...100

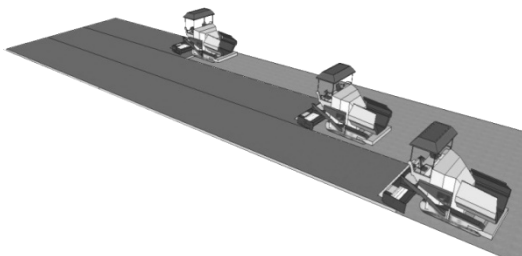


Рис. 3.5. Технология укладки смеси несколькими асфальтоукладчиками

При такой технологии устройства покрытия в процессе укатки первой полосы вальцы катка не должны приближаться более чем на 10 см к кромке полосы сопряжения. Вторая полоса укладки смеси дополнительно прогревает кромку первой полосы и сохраняет температуру смеси на стыке более 100 °С. Уплотнение катками смеси соприкасающейся полосы следует начинать по продольному шву сопряжения [45]. Установлено, что после укладки горячей смеси происходит интенсивное охлаждение слоя покрытия, которое характеризуется сравнительно высоким темпом охлаждения. Темп охлаждения зависит от теплофизических свойств асфальтобетонной смеси, толщины слоя покрытия и условий производства работ. Доказано, что характер охлаждения горячей смеси относится к нестационарным тепловым процессам и подчиняется экспоненциальной зависимости [8, 13]. После распределения горячей смеси по ширине полосы покрытия тепло от горячей смеси передается нижележащему слою дорожной одежды и в окружающую среду, что приводит к неравномерности распределения температуры по толщине уложенного слоя [9, 20, 38]. Аналогичные потери тепла происходят и на боковой поверхности уложенного слоя покрытия.

3.7. Оптимальная длина сопрягаемых полос при укладке смеси двумя асфальтоукладчиками

Температура воздуха при отсутствии ветра, °С	Длина укладываемой полосы, м,
5...10	60...70
10...15	70...80
15...20	80...100
20...25	100...150
Свыше 25	150...200

Температура горячей асфальтобетонной смеси регламентирована нормативными документами при укладке на подготовленное основание в зависимости от типа смеси и марки битума.

При одновременном устройстве покрытия с несколькими полосами движения укладка горячей смеси осуществляется за счет смещения асфальтоукладчиков относительно друг друга на определенное расстояние, зависящее от скорости укладки и временем между распределением смеси в сопрягаемых полосах покрытия. При этом в первой полосе покрытия, охлаждение горячей асфальтобетонной смеси происходит не только на поверхности слоя, но и на боковых поверхностях слоя, что влияет на температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси, а, следовательно, и качество работ по устройству стыков сопряженных полос покрытия. Интенсивность охлаждения смеси на боковой поверхности слоя зависит от конкретных условий производства работ и продолжительности между укладками смежных полос покрытия. Экспериментально доказано, что качество уплотнения горячей смеси зависит от ее температуры. Поэтому понижение температуры горячей смеси в зоне сопряжения уложенных полос ниже предельной, приводит к понижению показателей асфальтобетона при уплотнении покрытия (прочности, плотности, водонепроницаемости), что приводит к разрушению дорожного покрытия в процессе эксплуатации.

Для устранения данного дефекта существующими технологиями по устройству асфальтобетонных покрытий предусматривается перед укладкой второй полосы дорожного покрытия осуществлять дополнительный прогрев сопряженного слоя смеси первой полосы с помощью различных разогревателей или наложение на край слоя горячей смеси следующей полосы на предыдущий, с последующим устранением горячей смеси на стыке, что позволяет повысить температуру смеси на стыке. Следует заметить, что применение разогревателей асфальтобетона требует использования дополнительного оборудования и оказывает влияние на технико-экономические показатели работы механизированного звена. Наложение горячей смеси на сопрягаемую полосу покрытия не всегда дает эффект, так как прогрев ранее уложенного слоя покрытия не прогревается до оптимальных температур.

Установлено, что качество работ при устройстве асфальтобетонных покрытий зависит от температурных режимов горячей смеси, поэтому понижение температуры горячей смеси в зоне сопрягаемых полос покрытия, при определенных значениях, будет способствовать снижению качества уплотнения асфальтобетона. На практике для устранения дефектов, возникающих в зоне стыка параллельных полос, увеличивают ширину полосы укладки горячей смеси за один проход асфальтоукладчика с учетом технических возможностей применяемого асфальтоукладчика. Современные конструкции машин позволяют уве-

личить ширину укладки горячей асфальтобетонной смеси за один проход машины до 12 м.

Выбор способа укладки горячей смеси по ширине покрытия зависит не только от технических характеристик асфальтоукладчика, но и производственной возможности доставки заданных объемов асфальтобетонных смесей [3]. В соответствии с типоразмерами асфальтобетонных заводов производительность их находится в пределах от 25 до 400 тонн в час [3]. В соответствии с технологией устройства дорожного покрытия асфальтоукладчик должен непрерывно вести процесс укладки горячей смеси и при недостатке смеси он вынужден прекращать укладку горячей смеси. Современные асфальтоукладчики имеют высокую производительность и диапазон рабочих скоростей от 0,8 до 21,8 м/мин. Однако на практике скорости укладки незначительны из возможностей непрерывной доставки горячей смеси. Поэтому темп строительства дорожного покрытия, а также режимы работы асфальтоукладчиков зависят от возможности получения горячей асфальтобетонной смеси.

Исследованиями установлено, что качество уплотнения асфальтобетона зависит от соблюдения температурных режимов при уплотнении горячих смесей, которые зависят от типа смеси и марки битума, времени воздействия на материал контактных напряжений в соответствии с прочностными характеристиками уплотняемого материала. Время укладки и уплотнения определяется температурой слоя покрытия, которая зависит от темпа охлаждения горячей смеси. С учетом этих условий определяется длина захватки для уплотняющих машин, в пределах которой, с учетом прочностных характеристик, принимается определенный тип катка. По условию разгона и торможения длину рабочей захватки легкого, среднего и тяжелого катков рекомендуется принимать не менее 3...3,5 длины самого катка. Анализ технических характеристик отечественных и зарубежных катков показал, что они имеют длину от 3,5 до 7 м, поэтому захватку назначают не менее 12...15 м при работе легкого катка, 18...22 м среднего и 25...28 м тяжелого. С учетом захватки укладчика L_v , общую минимальную длину захватки всего отряда машин рекомендуется принимать не менее 60...65 м. В благоприятных погодных условиях рациональная длина общей захватки составляет 130...150 м [3, 16].

Отмечалось, что современные конструкции асфальтоукладчиков позволяют укладывать асфальтобетонную смесь при разной ширине полосы укладки за один проход асфальтоукладчика. В зависимости от рабочих режимов асфальтоукладчика коэффициент предварительного уплотнения горячей смеси находится в пределах от 0,90 до 0,96 [6, 15, 20, 22]. При этом принято считать, что асфальтобетонная смесь при укладке асфальтоукладчиком равномерно уплотняется по всей ширине уложенного слоя. Однако измерения коэффициента предварительного

уплотнения горячей смеси по ширине полосы укладки показали, что наблюдается неравномерное распределение, что требует учета при назначении режимов работы уплотняющих машин. На рисунке 3.6 представлены полученные результаты измерения коэффициента предварительного уплотнения при укладке горячей смеси дорожного покрытия шириной 7,5 м за один проход асфальтоукладчика Marini MF 805 при работе трамбующего бруса и вибрационной выглаживающей плите [7]. На основании этого можно сделать вывод, что при увеличении ширины полосы распределения горячей асфальтобетонной смеси необходим контроль за качеством предварительного уплотнения смеси и в соответствии с этим назначать режимы работы уплотняющих машин.

Из представленных данных на рис. 3.6 видно, что с увеличением расстояния от оси покрытия наблюдается понижение $K_{пр}$. Аналогичные результаты были получены и при укладке покрытия шириной 3,5 м асфальтоукладчиком производства РФ.

Процесс укатки сопряженных полос регламентирован нормативным документом, согласно которому «при уплотнении первой полосы вальцы катка не должны приближаться более чем на 0,1 м к кромке сопряжения. Уплотнение следующей полосы необходимо начинать по продольному сопряжению. Сопряжение должно быть ровным и плотным. Расстояние между асфальтоукладчиком и дорожными катками должно быть минимальным» [42, 45]. Для обеспечения безопасности работы машин при строительстве асфальтобетонных покрытий принимают расстояние, в зависимости от базы катков и температуры воздуха, между асфальтоукладчиком и катками в пределах от 10 до 30 м [45].

Исследования, проведенные в США и Европе, показывают, что основной причиной возникновения дефектов является недостаточная плотность и избыточная пористость асфальтобетона в зоне швов со-



Рис. 3.6. Распределение $K_{пр}$ горячей смеси по ширине укладки слоя горячей асфальтобетонной смеси (температура воздуха 15 и 22 °С, толщина слоя укладки 0,09 м):

1 – скорость укладки 1,4 м/мин; 2 – 2,0 м/мин

пряжения. Так, в работах [53, 54, 55] отмечается, что даже при проведении специальных мероприятий по повышению надежности швов сопряжения, плотность асфальтобетона в зоне швов практически всегда оказывается ниже, чем в основном покрытии [56].

Качество строительства дорожных покрытий нежесткого типа в значительной степени зависит от соблюдения температурных режимов при укладке и уплотнении горячих асфальтобетонных смесей. Для расчетов температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий нежесткого типа разработаны программы, позволяющие рассчитать температуру асфальтобетона в покрытии с момента укладки горячей смеси на нижележащий слой дорожной одежды и до окончания процесса уплотнения [10, 11, 12]. Разработанные программы рассчитаны для определения температуры асфальтобетона в одной плоскости (основание – верхний слой покрытия). В зависимости от принятой технологии устройства многополосных дорожных покрытий применяются разные схемы укладки горячей смеси: одним асфальтоукладчиком последовательно от одной полосы к другой или с переходом с полосы на полосу, при этом длина полосы ограничивается с учетом температурных режимов смеси, а также одновременно укладывать полосы несколькими укладчиками, смещенными относительно друг друга на определенное расстояние.

При последовательной укладке полос покрытия одним укладчиком температура горячей смеси слоя, в том числе край полосы, охлаждается во времени за счет отдачи тепла в окружающую среду и нижерасположенный слой дорожной одежды. При этом интенсивность охлаждения края полосы происходит более интенсивно за счет отдачи на захватке тепла через боковую поверхность полосы. Для обеспечения температурных режимов на стыке сопряжения смежных полос технологией работ предусматривается дополнительный прогрев слоя смеси перед укладкой параллельной полосы покрытия с использованием разогревателей асфальтобетона (КР-53А или КР-10), а также за счет температуры слоя горячей смеси смежной полосы покрытия. С этой целью при укладке смежной полосы край новой полосы накладывают на уложенный ранее слой полосы, и за счет теплопередачи от слоя горячей смеси происходит нагрев асфальтобетонной смеси края ранее уложенного слоя смеси. Следует заметить, что применение такой технологии научно не обосновано, отсутствуют рекомендации по его применению и влиянию разных факторов на процесс нагрева ранее уложенного слоя покрытия.

При использовании технологии распределения горячей смеси с полосы на полосу одним асфальтоукладчиком снижается производительность применяемого звена машин, поскольку асфальтоукладчик вынужден перемещаться с одной полосы на другую, теряя время на перемещение холостым ходом. При одновременном устройстве

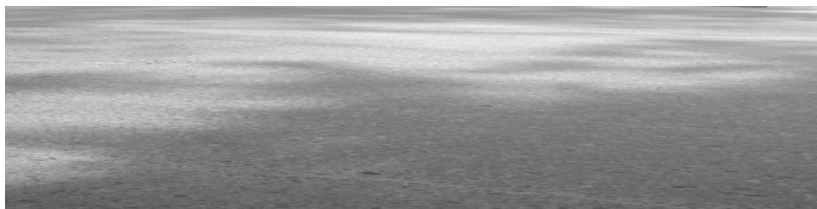


Рис. 3.7. Динамика развития разрушения покрытия в зоне стыка полос дорожного покрытия

смежных полос покрытия несколькими асфальтоукладчиками они смещаются относительно друг друга на определенное расстояние. Такое смещение укладчиков смеси связано с условиями обеспечения безопасности работы уплотняющих. За счет разницы во времени укладки горячей смеси на смежных полосах происходит понижение температуры горячей смеси в месте сопряжения полос покрытия. В зависимости от условий производства работ разница в температуре асфальтобетонной смеси, уложенной в смежные полосы покрытия, может достигать разных значений. Это способствует достижению низкого коэффициента уплотнения, снижению прочности асфальтобетона, повышенному водонасыщению в зоне сопряжения смежных полос покрытия и преждевременному разрушению дорожного покрытия в процессе эксплуатации автомобильной дороги. Динамика развития разрушения покрытия в зоне стыка полос представлена на рис. 3.7.

Поэтому для обеспечения требуемой плотности асфальтобетона в зоне стыка полос, их смещение относительно друг друга должно быть обосновано с учетом обеспечения температурных режимов горячей смеси при уплотнении.

С целью уточнения влияния производственных факторов на процесс охлаждения горячих асфальтобетонных смесей, уложенных в дорожное покрытие при устройстве многополосных покрытий, в данной главе представлены результаты исследований, позволяющие уточнить влияние разных факторов на температурные режимы горячих смесей при устройстве многополосных дорожных покрытий с учетом принятой технологии. Полученные результаты позволяют обосновать технологические режимы при устройстве многополосных дорожных покрытий нежесткого типа с учетом погодных условий и принятой технологии работ.

3.2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МНОГОПОЛОСНЫХ ПОКРЫТИЙ

С целью исследования влияния различных факторов (конструктивных, климатических технологических и свойств материалов) на длительность процесса укладки и уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей рассмотрена расчетная модель, которая представлена на рис. 3.8.

Расчетная модель принята с учетом следующих предпосылок:

- процесс строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей ограничен во времени температурным интервалом 180...50 °С;
- в начальный момент времени укладки смеси температура по толщине слоя имеет одинаковую величину;
- материал в укладываемом слое однородный;

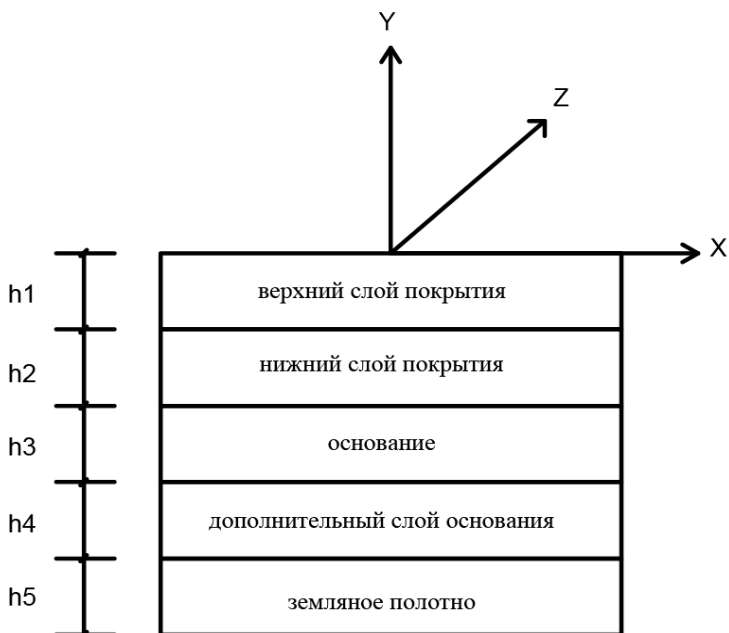


Рис. 3.8. Расчетная схема «покрытие–основание дороги»

- потери тепла через боковые грани слоя незначительны и ими можно пренебречь;
- потери тепла происходят через верхнюю поверхность слоя за счет теплового излучения и конвективного обмена в атмосферу;
- дополнительная тепловая энергия сообщается через верхнюю поверхность слоя путем поглощения энергии солнечного излучения;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярным к поверхности слоя;
- потери тепла в нижележащие слои происходят через нижнюю поверхность слоя за счет теплопроводности материала;
- сцепление слоев обеспечивает достаточный термоконттакт;
- процесс укладки осуществляется самоходными катками на пневматических шинах и с жесткими металлическими вальцами с обеспечением контроля за расходом жидкости для смачивания поверхности вальца;
- температура окружающей среды и скорости воздушных масс с момента укладки слоя смеси и до окончания процесса уплотнения остаются постоянными.

Принятые расчетные модели можно описать системой дифференциальных уравнений, отражающих процесс нестационарной теплопроводности в слоях с различными физико-механическими и теплотехническими свойствами, лежащими на бесконечной полуограниченной стенке из однородного материала.

В общем виде системы дифференциальных уравнений в частных производных имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \partial t_1 / \partial \tau &= (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2) - \text{для верхнего слоя;} \\
 \partial t_2 / \partial \tau &= (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2) - \text{для нижнего слоя;} \\
 \partial t_3 / \partial \tau &= (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2) - \text{для основания;} \\
 \partial t_4 / \partial \tau &= (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2) - \text{для дополнительного} \\
 &\quad \text{слоя основания;} \\
 \partial t_5 / \partial \tau &= (\lambda_5 / c_5 \gamma_5) (\partial^2 t_5 / \partial x^2 + \partial^2 t_5 / \partial y^2 + \partial^2 t_5 / \partial z^2) - \text{для грунта,}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

где x, y, z – координатные оси; h – толщина слоя, м; λ_{1-5} – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(кг·°C); c_{1-5} – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°C); γ_{1-5} – объемная плотность, кг/м³; τ – время, с.

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

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

Начальные условия имеют вид:

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

где $t_1, t'_1, t_2, t'_2, t_3, t'_3, t_4, t'_4, t_5, t'_5$ – температура в начале и на глубине слоя дорожной конструкции, °C; e – основание натурального логарифма; μ_i – коэффициент, характеризующий свойства материала;

$\Delta t_i e^{-\lambda y}$ – перепад температуры между поверхностью слоя и рассматриваемой точкой на глубине y .

Граничные условия приняты на основе следующих допущений:

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

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

– условие равенства тепловых потоков на границах слоев имеет вид

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

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

$$t'_4 \Big|_{\tau=0}^{y=h_4=\infty} < \infty (t_{\text{осн}}),$$

здесь h_i – толщины слоев дорожной конструкции, м; τ – время, с; t_b – температура воздуха, °С; $t_{\text{осн}}$ – температура грунта на заданной глубине, °С; $t(0; \tau)$ – температура смеси в момент укладки, °С; α – коэффициент теплоотдачи горячей смеси.

Решение задачи по моделированию тепловых процессов в слоях дорожной одежды дорог осуществлялось с помощью разработанной программы для расчета температуры по толщине конструктивных слоев дороги с учетом ее распределения во времени [14]. Для решения систем уравнений (7–8) был использован метод сеток и принята неявная разностная схема [31, 41]. Заменяем производные разностями аналогов:

$$\begin{aligned} (y_{i+1,j-1} - y_{i,j}) / \Delta \tau &= \lambda / c\gamma [(y_{i+1,j+1} - 2y_{i+1,j} + y_{i+1,j-1}) / (\Delta h)^2], \quad i = 1, n - 1; \\ \lambda (y_{i+1,1} - y_{i+1,0}) / (\Delta h) &= 2(y_{i+1,0} - t_0); \\ y_{i+1,n} &= t \Big|_{y=h}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Таким образом, задача свелась к решению системы $(n + 1)$ линейного уравнения с $(n + 1)$ неизвестной с трехдиагональной матрицей.

При решении системы уравнений использовался метод прогонки. Система уравнений приведена к виду

$$y_{i+1,j} = c_j (\alpha_j + y_{i+1,j+1}), \quad j = 0, n - 1. \quad (3.5)$$

Введя обозначения

$$P = \alpha \Delta h / \lambda; \quad S = [c\gamma (\Delta h)^2] / \lambda \Delta \tau, \quad (3.6)$$

получено выражение для вычисления коэффициентов c_j и d_j (прямой ход):

$$c_0 = 1 / (1 + P); \quad d_0 = P t_b; \quad c_j = 1 / (2 + S - c_{j-1});$$

$$d_j = c_{j-1} d_{j-1} + S \cdot y_{i,j}; \quad i = 1, n - 1.$$

Из граничных условий находится температура в нижней точке:

$$y_{i+1,n} = t \Big|_{y=h}. \quad (3.7)$$

Обратный ход дает возможность определить значения температур во всех точках слоя:

$$y_{i+1,j} = c_j(d_j + y_{i+1,j+1}); \quad j = n - 1, 0. \quad (3.8)$$

Введя обозначения

$$P = \alpha \Delta h / \lambda; \quad S = [c\gamma(\Delta h)^2] / \lambda \Delta t,$$

получено выражение для вычисления коэффициентов c_j и d_j (прямой ход)

$$c_0 = 1 / (1 + P); \quad d_0 = Pt_b; \quad c_j = 1 / (2 + S - c_{j-1}); \quad (3.9)$$

$$d_j = c_{j-1}d_{j-1} + Sy_{i,j}; \quad I = 1, n - 1.$$

Из граничных условий находится температура в нижней точке:

$$y_{i+1,n} = t \Big|_{y=h}.$$

Обратный ход дает возможность определить значения температур во всех точках слоя

$$y_{i+1,j} = c_j(d_j + y_{i+1,j+1}); \quad j = n - 1, 0. \quad (3.10)$$

Таким образом, данный метод позволяет найти значения температур на новом (по времени) слое и перейти к расчету на следующий слой. Результаты моделирования распределения температуры в дорожном покрытии во времени, при толщине укладываемого слоя горячей асфальтобетонной смеси 0,05 м, представлено на рис. 3.9, что соответствует значениям, полученным при экспериментальных исследованиях распределения температуры в асфальтобетонном слое покрытия. Из представленных данных видно, что температура смеси по толщине слоя покрытия во времени распределяется неравномерно за счет протекания сложных тепловых процессов внутри слоя. Продолжительность нахождения горячей смеси в определенном температурном интервале зависит от ряда факторов, к которым можно отнести толщину слоя, температуру смеси при укладке, температуру окружающего воздуха и основания, теплофизические свойства смесей, теплообмен на поверхности слоя.

Распределение температуры по толщине слоя также неравномерно, что определяется теми же факторами, что и распределение во времени. Экспериментально установлено, что разница температуры поверхности уплотняемого слоя горячей асфальтобетонной смеси и средней части слоя может достигать 10...20 °С, а нижележащий слой покрытия может прогреться до температуры 30...70 °С в зависимости от климатических условий, принятой технологии строительства и температуры смеси при укладке.

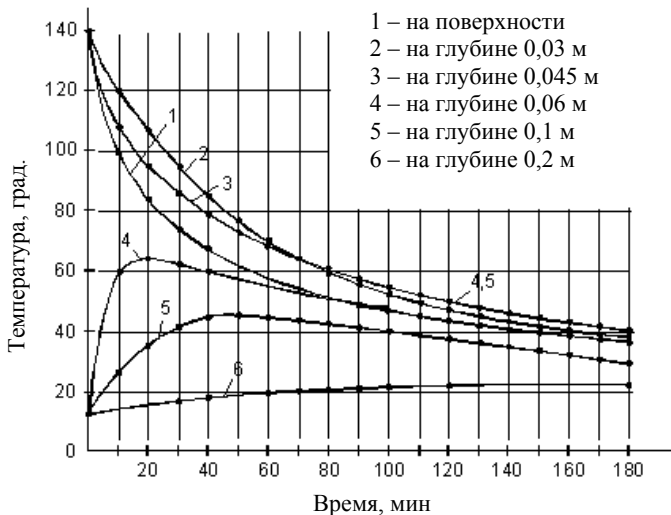


Рис. 3.9. Распределение температуры в конструктивных слоях дорожной одежды при укладке верхнего слоя из горячей асфальтобетонной смеси:
 (толщина слоя – 0,05 м; температура смеси при укладке – 140 °С;
 температура воздуха – 15 °С)

Результаты экспериментальных исследований показывают, что процессы укладки и уплотнения горячих смесей в дорожное покрытие меньше, чем рассчитанные критические значения согласно закономерностям нестационарных теплопередач. Следовательно, процесс охлаждения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей можно отнести к нестационарным теплопередачам. Поэтому можно принимать, что результаты расчетов температуры в укладываемых слоях покрытий основаны на законах нестационарных теплопередач.

3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ

Качество строительства дорожных покрытий нежесткого типа зависит от свойств применяемого материала и соблюдения технологии при выполнении производственных процессов по укладке и уплотнению горячих асфальтобетонных смесей. Основным фактором, влияющим на качество устройства дорожного покрытия, является температура горячей смеси при укладке и уплотнении дорожного покрытия.

Анализ технологий, применяемых при строительстве дорожных покрытий, показал, что выбор звена машин и их режимов работы зависит от свойств материала, которые характеризуются температурой горячей смеси [4, 9, 12, 21, 29]. Нормативными документами и существующими рекомендациями определена температура приготовления, укладки и уплотнения горячих смесей при строительстве асфальтобетонных покрытий [52, 53, 55].

Практика строительства автомобильных дорог показывает, что в зависимости от конкретных условий производства работ и погодных условий темп охлаждения слоя горячей смеси в покрытии может иметь разные значения, что влияет на продолжительность работы по укладке и уплотнению, а, следовательно, и на конечный результат работы. Существующие рекомендации по определению температуры горячей смеси в зависимости от погодных условий и конструктивных параметров дорожного покрытия основаны на экспериментальных данных и не позволяют учитывать влияние температуры смеси в конкретный момент времени производства работ с учетом погодных и производственных факторов.

Экспериментальными исследованиями установлено, что охлаждение горячей асфальтобетонной смеси в слое покрытия, независимо от состава, температуры воздуха и скорости ветра, подчиняется экспоненциальному закону [17]. Известно, что за счет солнечной радиации происходит нагрев дорожного покрытия, и его температура может быть определена по формуле [24]

$$t_{\text{п}} = 1,3t_{\text{в}} + 7, \quad (3.11)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С.

Данная зависимость позволяет определить температуру поверхности покрытия в процессе эксплуатации дороги. В работах Б. И. Ладыгина и Н. В. Горельшева при работе асфальтоукладчика это учитывается за счет введения коэффициента, учитывающего влияние температуры основания [6, 30].

Продолжительность строительства покрытий нежесткого типа с учетом температуры окружающего воздуха и толщины слоя представлена в работе [3, 16]. Предложенные значения продолжительности технологических операций учитывают определенную температуру смеси при укладке, хотя при производстве работ она может меняться в значительных интервалах, в том числе и от момента начала выполнения работ (табл. 3.8). Представленные данные учитывают одновременное действие всех факторов, влияющих на строительство при определенных фиксированных значениях температуры воздуха. На практике влияющие факторы могут колебаться в широких пределах, что будет влиять на продолжительность.

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

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

Отсутствие аналитической зависимости по расчету температуры горячей смеси, с учетом одновременного влияния разных факторов, не дает возможности конкретизировать продолжительность технологических процессов строительства дорожных покрытий нежесткого типа. Поэтому для правильной организации строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, а также процессов укладки и уплотнения в заданных температурных интервалах, необходимо установить зависимость, которая позволяет определять температуру горячей смеси с учетом действия всех перечисленных факторов.

В общем виде зависимость температуры горячей смеси от погодных и производственных факторов можно представить в виде

$$t_{см} = f(t_{в}; t_{б}; \tau; h; v), \quad (3.12)$$

где $t_{в}$ – температура воздуха, °С; $t_{см}$ – температура смеси, °С; τ – время измерения смеси, мин; h – толщина слоя горячей смеси, см; v – скорость ветра, м/с.

Установлено, что процесс охлаждения горячих смесей относится к нестационарным тепловым процессам. Наиболее интенсивно отдача тепла происходит непосредственно сразу после распределения горячей смеси по основанию дороги за счет отдачи тепла в нижележащий слой и в окружающую среду. В этот период тепло интенсивно передается в нижележащий слой за счет коэффициента теплопередачи и в окружающую среду за счет коэффициента теплоотдачи. Потери тепла восполняются за счет передачи тепла из средней части слоя, что приводит к перераспределению тепла внутри слоя и способствует интенсивному охлаждению слоя покрытия. Производство работ выполняют при положительной температуре воздуха и их продолжительность зависит от температуры окружающего воздуха.

Для выявления закономерностей охлаждения горячей асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий и установлении общей зависимости температуры горячей смеси от разных факторов проведено моделирование тепловых процессов с применением программ [10, 11, 12].

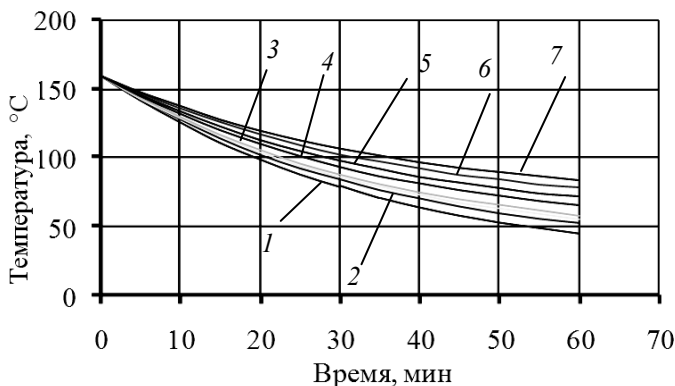


Рис. 3.10. Изменение температуры горячей асфальтобетонной смеси во времени (тип смеси Б, марка битума БНД 60/90; толщина слоя 5 см; температура окружающего воздуха:
1 – 10 °С; 2 – 0 °С; 3 – 5 °С; 4 – 10 °С; 5 – 20 °С; 6 – 30 °С; 7 – 40 °С

На рисунке 3.10 и в табл. 3.9 представлены результаты моделирования изменения температуры горячей смеси с учетом временного фактора при разных температурах воздуха.

Из представленных данных видно, что независимо от температуры воздуха, характер распределения температуры по времени подчиняется общей закономерности и может быть описан экспоненциальной зависимостью. Коэффициент корреляции для всех представленных уравнений находится в пределах 0,98...0,99.

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

Время, мин		0	5	10	20	30	40	50	60	Зависимость
Температура воздуха, °С	-10	160	142	126	99	79	64	53	45	$t = 160e^{-0,022\tau}$
	0	160	143	128	102	84	70	59	52	$t = 160e^{-0,020\tau}$
	5	160	143	129	104	86	73	63	55	$t = 160e^{-0,019\tau}$
	10	160	144	130	106	88	75	66	58	$t = 160e^{-0,018\tau}$
	20	160	145	132	110	93	81	72	65	$t = 160e^{-0,016\tau}$
	30	160	146	134	113	98	86	78	72	$t = 160e^{-0,0147\tau}$
	40	160	147	136	117	102	92	84	78	$t = 160e^{-0,0133\tau}$
	50	160	148	138	120	107	97	90	84	$t = 160e^{-0,0119\tau}$

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

Время, мин	0	5	10	20	30	40	50	60	
Температура воздуха, °С	-10	1	0,979	0,954	0,9	0,849	0,79	0,736	0,692
	0	1	0,986	0,969	0,927	0,903	0,864	0,819	0,8
	5	1	0,986	0,977	0,945	0,924	0,901	0,875	0,846
	10	1	0,993	0,984	0,963	0,946	0,925	0,916	0,892
	20	1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	30	1	1,006	1,015	1,027	1,053	1,061	1,083	1,107
	40	1	1,013	1,03	1,063	1,096	1,135	1,166	1,2
	50	1	1,02	1,045	1,09	1,15	1,197	1,25	1,292

Для установления общей закономерности влияния температуры воздуха на температуру горячей смеси представим данные табл. 2 в относительных величинах. Экспериментально установлено, что наиболее интенсивно изменение температуры горячей смеси после распределения по основанию происходит в зависимости от толщины слоя в пределах 5 – 10 мин с момента ее укладки. Принимаем за начало отсчета температуру смеси после укладки 10 мин (табл. 3.10).

Обозначим полученную величину через коэффициент влияния температуры воздуха на температуру горячей смеси и обозначим через K_b . На рисунке 3.11 представлена зависимость коэффициента влияния температуры воздуха на температуру горячей смеси, численное значение которого определяется выражением

$$K_b = 0,799e^{0,0018t_b}, \quad (3.13)$$

где K_b – коэффициент влияния температуры воздуха, безразмерная величина, коэффициент корреляции 0,99; t_b – температура окружающего воздуха, °С.

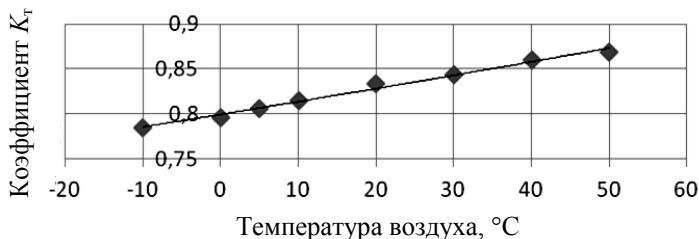


Рис. 3.11. Зависимость коэффициент влияния температуры воздуха с течением времени

3.11. Распределение температуры горячей смеси во времени при разной температуре смеси при укладке

Время, мин	0	5	10	20	30	40	50	60
Температура смеси при укладке, °С	180	162	147	120	100	87	77	69
	160	144	131	107	90	78	70	63
	140	126	115	95	80	70	63	57
	120	109	99	82	70	62	55	51
	100	91	83	70	60	53	48	44

Из представленного рис. 3.11 видно, что с повышением температуры окружающего воздуха влияние K_v возрастает, что способствует понижению темпа охлаждения горячей смеси. Отмечалось, что в зависимости от типа смеси и марки битума температура приготовления и укладки регламентирована нормативными документами. Однако в зависимости от дальности расположения объекта строительства дороги, температура асфальтобетонной смеси при доставке к месту производства работ может иметь минимальные значения, допускаемые нормативными документами. Численные значения температуры смеси при ее охлаждении во времени, в зависимости от температуры доставки на объект, представлены в табл. 3.11.

Для установления общей закономерности влияния температуры поставляемой смеси на место производства работ введем коэффициент ($K_{см}$), учитывающий температуру горячей смеси при доставке к месту производства работ и представим численные значения температуры в относительных величинах. Примем условно температуру смеси при доставке 160 °С за единицу. Значения температуры смеси в относительных величинах представлены в табл. 3.12.

3.12. Распределение температуры горячей смеси во времени при разной температуре смеси при укладке (в относительных величинах)

Время, мин	0	5	10	20	30	40	50	60	$\Sigma n/n$	
Температура смеси при укладке, °С	180	1,13	1,122	1,118	1,112	1,107	1,108	1,04	1,1	1,12
	160	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0
	140	0,87	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89	0,90	0,9	0,87
	120	0,75	0,75	0,76	0,77	0,77	0,78	0,80	0,8	0,75
	100	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,64	0,65	0,65	0,62

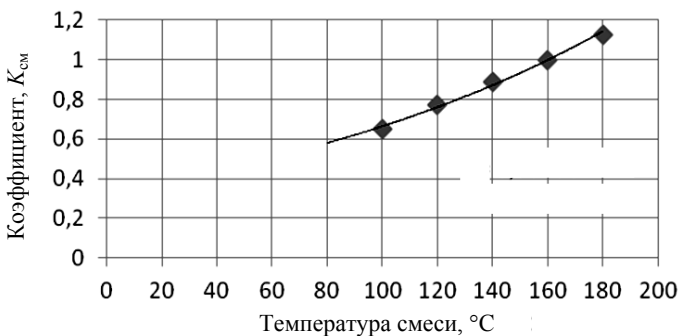


Рис. 3.12. Зависимость $K_{см}$ от температуры смеси при распределении по основанию дороги

Из представленных данных видно, что независимо от температуры поставляемой смеси к месту производства работ, существует общая закономерность охлаждения смеси по времени, которую можно учесть введением коэффициента ($K_{см}$), который представлен на рис. 3.12. Численное значение коэффициента $K_{см}$ определяется выражением

$$K_{см} = 0,336 e^{0,0068t}, \quad (3.14)$$

где $t_{см}$ – температура смеси при укладке, коэффициент корреляции равен 0,99.

При выполнении работ с применением асфальтобетонных смесей темп охлаждения, а, следовательно, и продолжительность выполнения работ, зависят от скорости ветра. Существующими рекомендациям введены ограничения на производство работ в зависимости от температуры воздуха и скорости ветра [3]. При пониженной температуре воздуха существующими рекомендациями разрешается укладывать горячую асфальтобетонную смесь на подготовленное основание при условии, что скорость ветра не превышает пределов, указанных в табл. 3.13.

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

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

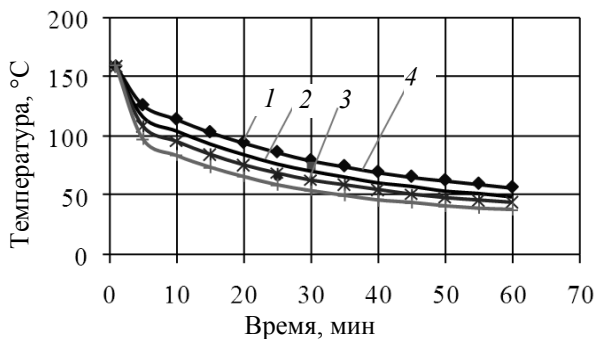


Рис. 3.13. Влияние скорости ветра на темп охлаждения асфальтобетонной смеси:

1 – скорость ветра – 0 м/с; 2 – 4 м/с; 3 – 8 м/с; 4 – 15 м/с

Ограничение производства работ, в зависимости от скорости ветра, связано с интенсивной отдачей тепла в окружающую среду при распределении горячей смеси небольшим слоем на значительной поверхности покрытия, что способствует повышению темпа охлаждения горячей смеси и снижению продолжительности устройства покрытия. Установлено, что коэффициент теплоотдачи зависит от скорости ветра [17].

В результате моделирования тепловых процессов в асфальтобетонных смесях установлено, что скорость ветра в значительной степени влияет на темп охлаждения смеси. На рисунке 3.13 представлен характер охлаждения горячей смеси при разных значениях скорости ветра и в табл. 3.14 значения температуры с учетом времени.

С целью уточнения влияния скорости ветра на процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси представим данные табл. 3.14 в относительных величинах (табл. 3.15).

3.14. Изменение температуры горячей смеси по времени при разных скоростях ветра

Время, мин		0	5	10	20	30	40	50	60
Скорость ветра, м/с	0	160	127	115	95	80	70	63	57
	2	160	122	110	89	75	65	58	53
	4	160	117	105	85	71	61	54	49
	6	160	113	100	80	67	58	51	46
	8	160	109	96	76	63	55	48	44
	10	160	106	92	73	60	52	46	42
	15	160	98	84	66	54	46	41	38

3.15. Изменение температуры горячей смеси по времени при разных скоростях ветра (в относительных величинах)

Время, мин	0	5	10	20	30	40	50	60	$\Sigma n/n$	
Скорость ветра, м/с	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
	2	1	0,96	0,96	0,94	0,94	0,93	0,92	0,93	0,936
	4	1	0,92	0,91	0,89	0,89	0,87	0,86	0,86	0,885
	6	1	0,89	0,87	0,85	0,84	0,83	0,81	0,81	0,84
	8	1	0,86	0,83	0,8	0,79	0,79	0,76	0,77	0,795
	10	1	0,83	0,8	0,77	0,75	0,74	0,73	0,74	0,76
	15	1	0,77	0,73	0,69	0,68	0,66	0,65	0,67	0,685

Из представленных данных видно, что скорость ветра влияет на процесс охлаждения горячей смеси, и с увеличением перемещения воздушных масс темп охлаждения возрастает. Характер охлаждения смеси подчиняется экспоненциальной зависимости и носит общий характер. Принимая значение температуры смеси при нулевой скорости за единицу, получена зависимость влияния скорости ветра на охлаждение горячей асфальтобетонной смеси (рис. 3.15).

Численное значение коэффициента определяется уравнением

$$K_v = 0,986 e^{-0,027v}, \quad (3.15)$$

v – скорость ветра, м, коэффициент корреляции равен 0,99.

В зависимости от принятой конструкции дорожного покрытия, толщина укладываемого слоя может иметь разное значение. Минимальная толщина, согласно нормативным документам, принимается для верхнего слоя покрытия 0,03 м и нижнего слоя 0,08 м. С учетом этого продолжительность охлаждения горячей смеси, а, следовательно, и продолжительность технологических операций, будет разная. На рисунке 3.15 представлено распределение температуры горячей



Рис. 3.14. Значение коэффициента K_v , учитывающего влияние скорости ветра

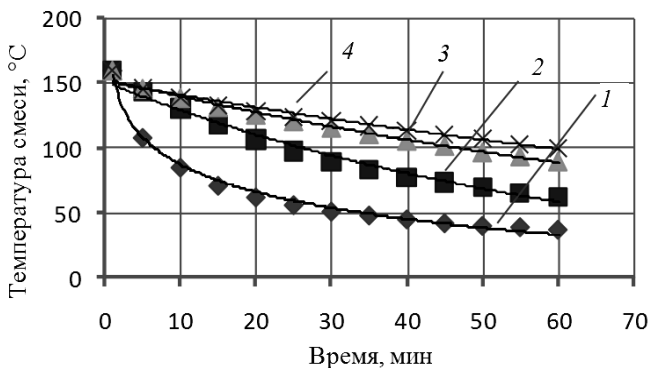


Рис. 3.15. Распределение температуры смеси в зависимости от толщины слоя покрытия:

1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,1 м

смеси в зависимости от толщины укладываемого слоя покрытия при температуре смеси при укладке 160 °С.

Из представленных данных видно, что в зависимости от толщины слоя покрытия, характер распределения температуры различен. При толщине слоя 0,03 м охлаждение слоя горячей смеси при распределении по снованию происходит более интенсивно, что объясняется незначительным количеством тепла в единице поверхности покрытия и малой толщиной слоя. Наиболее интенсивно отдача тепла происходит после укладки в пределах 5 – 10 мин, который характеризуется нестационарным тепловым режимом. С увеличением толщины слоя покрытия в асфальтобетонной смеси происходят аналогичные процессы, но за счет увеличения количества тепла в единице объема материала эти процессы протекают более плавно, продолжительность которых может достигать 10 – 20 минут. В таблице 3.16 представлены уравнения, описывающие распределение температуры с течением времени.

Численные значения температуры горячей асфальтобетонной смеси с учетом времени представлены в табл. 3.16.

3.16. Зависимости для определения температуры горячей смеси во времени

Толщина слоя, м	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
0,03	$t_{\text{см}} = -30,2 \ln \tau + 156,3$	0,99
0,05	$t_{\text{см}} = 151,3e^{-0,01\tau}$	0,99
0,08	$t_{\text{см}} = 153,7e^{-0,009\tau}$	0,99
0,1	$t_{\text{см}} = 151,5e^{-0,007\tau}$	0,97

3.17. Распределение температуры горячей смеси во времени при разной толщине слоя

Время, мин	0	5	10	20	30	40	50	60
Толщина 0,03 м	160	108	85	62	51	45	40	37
Толщина 0,05 м	160	144	131	107	90	78	70	63
Толщина 0,08 м	160	146	139	126	116	106	97	90
Толщина 0,10 м	160	146	139	129	121	113	107	100

Для установления общей закономерности влияния толщины слоя горячей смеси на распределение температуры во времени, представим данные табл. 3.17 в относительных величинах (табл. 3.18). Обозначим влияние толщины слоя покрытия на распределение температуры через коэффициент влияния толщины слоя (K_h).

Принимая значение температуры смеси при толщине слоя укладки 0,05 м за единицу, установлена зависимость влияния толщины слоя покрытия на охлаждение горячей асфальтобетонной смеси (рис. 3.16).

Численное значение коэффициента влияния толщины слоя покрытия (K_h) на распределение температуры в слое горячей асфальтобетонной смеси определяется выражением

$$K_h = -195h^2 + 33,88h - 0,244, \quad (3.16)$$

где h – толщина слоя покрытия, м; коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

В общем виде температура горячей асфальтобетонной смеси с момента укладки и начала производства работы может быть определена выражением

$$t_{см} = 160 K_T K_{см} K_V K_h e^{-0,019t}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (3.17)$$

3.18. Распределение температуры горячей смеси во времени при разной толщине слоя (в относительных величинах)

Время, мин	0	5	10	20	30	40	50	60
Толщина 0,03 м	1	0,75	0,65	0,58	0,57	0,57	0,57	0,58
Толщина 0,05 м	1	1	1	1	1	1	1	1
Толщина 0,08 м	1	1,01	1,06	1,18	1,29	1,36	1,38	1,42
Толщина 0,10 м	1	1,01	1,06	1,21	1,34	1,45	1,53	1,59

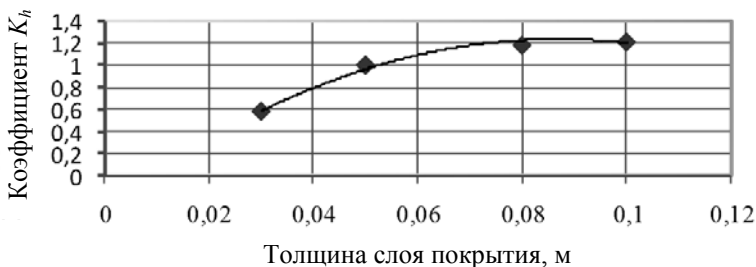


Рис. 3.16. Зависимость K_h от толщины слоя покрытия

Подставляя численные значения коэффициентов K_b , K_{cm} , K_v в уравнение (3.17), получим зависимость для определения температуры горячей асфальтобетонной смеси в виде

$$t_{cm} = 42,266K_h e^{0,0018t_b + 0,0068t_{cm} - 0,025v - 0,019\tau}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.18)$$

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ

Качество строительства дорожных покрытий нежесткого типа зависит от соблюдения температурных режимов при укладке и уплотнении горячих асфальтобетонных смесей. Для расчетов температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий нежесткого типа разработаны программы, которые позволяют рассчитать температуру асфальтобетона в покрытии с момента укладки горячей смеси. Принято считать, что температура горячей смеси после ее укладки на основание равномерно распределяется по ширине полосы покрытия. С учетом этого разработанные программы рассчитаны для определения температуры асфальтобетона в одной плоскости (основание – верхний слой покрытия). Анализ результатов исследований показал, что распределение плотности, а также коэффициента уплотнения асфальтобетона по ширине полосы покрытия неравномерно [58, 60]. В зависимости от принятой технологии устройства дорожного покрытия, укладка горячей смеси может производиться асфальтоукладчиком разными способами.

При последовательной укладке полос покрытия одним укладчиком температура горячей смеси слоя, в том числе край полосы, охлаждается во времени за счет отдачи тепла в окружающую среду и ниже-расположенный слой дорожной одежды. При этом интенсивность

охлаждения края полосы происходит более интенсивно за счет отдачи тепла через боковую поверхность полосы. Для обеспечения температурных режимов на стыке сопряжения смежных полос технологией работ предусматривается дополнительный прогрев слоя смеси перед укладкой параллельной полосы покрытия с использованием разогревателей асфальтобетона (КР-53А или КР-10), а также за счет температуры слоя горячей смеси смежной полосы покрытия. С этой целью при укладке смежной полосы край новой полосы накладывают на уложенный ранее слой полосы, и за счет теплопередачи от слоя горячей смеси происходит нагрев асфальтобетонной смеси края ранее уложенного слоя смеси. Следует заметить, что применение такой технологии научно не обосновано, отсутствуют рекомендации по его применению и влиянию разных факторов на процесс нагрева ранее уложенного слоя покрытия.

При одновременном устройстве смежных полос покрытия несколькими асфальтоукладчиками, для обеспечения безопасности работы уплотняющих машин, укладчики горячей смеси смещаются относительно друг друга на определенное расстояние. Такое смещение укладчиков смеси относительно друг друга связано с условиями обеспечения безопасности работы уплотняющих машин и возможности уплотнения горячей смеси на уложенной полосе покрытия для обеспечения требуемой плотности материала с учетом температурных режимов горячей смеси. За счет разницы во времени укладки горячей смеси смежных полос происходит понижение температуры горячей смеси в зоне стыка полос покрытия. В зависимости от условий производства работ разница в температурах асфальтобетонной смеси, уложенной в смежные полосы покрытия, может достигать разных значений. Это способствует достижению низкого коэффициента уплотнения, снижению прочности асфальтобетона, повышенному водонасыщению в зоне сопряжения смежных полос покрытия и преждевременному разрушению дорожного покрытия в процессе эксплуатации автомобильной дороги.

Отсутствие зависимости по расчету температуры горячей смеси, с учетом понижения температуры в зоне стыка сопряженных полос, не позволяет конкретизировать продолжительность технологических процессов строительства дорожных покрытий нежесткого типа. Для организации процессов укладки и уплотнения, с учетом температурных интервалов смеси, необходимо установить зависимость, которая позволяет определять температуру горячей смеси с учетом действия производственных факторов.

С целью исследования влияния производственных факторов на процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси при устройстве многополосных покрытий рассмотрены математические модели, позволяющие исследовать влияние разных факторов на температурные режимы горячих смесей при устройстве многополосных дорожных

покрытий с учетом принятой технологии. Полученные результаты позволяют обосновать технологические режимы при устройстве многополосных дорожных покрытий нежесткого типа с учетом погодных условий и принятой технологии работ.

3.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ

В зависимости от технологии устройства дорожного покрытия укладка горячей асфальтобетонной смеси производится разными способами: отдельными, со смещением асфальтоукладчика с одной полосы на другую или несколькими укладчиками одновременно. Независимо от этого, горячая смесь, уложенная в полосу дорожного покрытия, с течением времени охлаждается. Принято считать, что температура слоя асфальтобетонной смеси равномерно распределяется по ширине полосы покрытия. В действительности, температура смеси понижается не только по центру, но и по краю уложенной полосы покрытия, что необходимо учитывать при определении температурных режимов горячих смесей при устройстве многополосных покрытий. С целью исследования тепловых процессов на стыке сопряженных полос при укладке горячей смеси в дорожное покрытие, разработана математическая модель, позволяющая моделировать тепловые процессы в слое покрытия. Охлаждение асфальтобетонной смеси описывается дифференциальным уравнением теплопроводности без внешнего источника тепла, которое позволяет установить зависимость между температурой, временем и координатами в объеме материала [25, 27, 28, 34, 41]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T, \quad (3.19)$$

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

При разработке математической модели приняты следующие допущения:

- температура асфальтобетонной смеси в начальный момент времени постоянна, т.е. $T(x, y, 0) = T_0 = \text{const}$;
- коэффициент температуропроводности асфальтобетонной смеси постоянен и не зависит от температуры смеси;
- внутренние источники тепла в слое асфальтобетона отсутствуют.

С учетом принятых допущений уравнение модели двумерного теплообмена имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (3.20)$$

начальные условия имеют вид

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

Краевые условия первого рода имеют вид

$$T(0, y, \tau) = T(y); \quad (3.21)$$

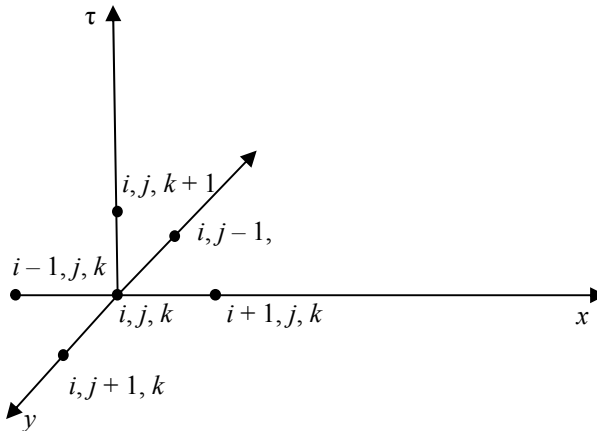
$$T(L, y, \tau) = T(y); \quad (3.22)$$

$$T(x, 0, \tau) = T_{\text{воздуха}}; \quad (3.23)$$

$$T(x, h, \tau) = T_{\text{грунта}}. \quad (3.24)$$

При решении уравнения использовался метод сеток.

Производные заменяем конечными разностями в соответствии с шаблоном



$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{\Delta \tau}; \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}}{\Delta x^2}; \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}}{\Delta y^2}. \quad (3.27)$$

Подставляя уравнения (3.16 – 3.18) в уравнение (3.15), и, выражая неизвестное значение по времени, получаем (3.19)

$$T_{i,j,k+1} = T_{i,j,k} + \Delta \tau \alpha \left(\frac{T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} \right), \quad (3.28)$$

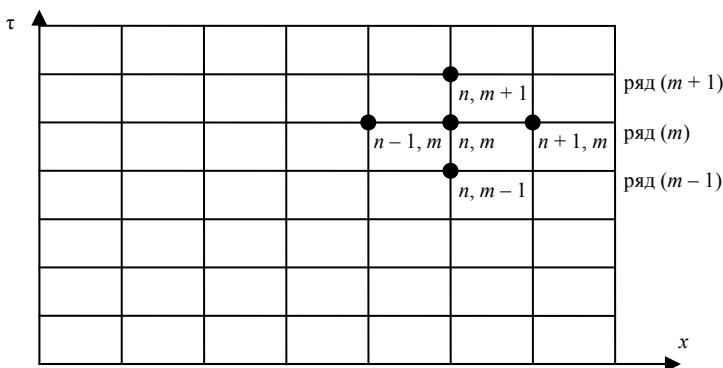


Рис. 3.17. Схема расчета по сетке прямоугольного типа

устойчивость разностной схемы обеспечивается при значении

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} a \leq \frac{1}{2}. \quad (3.29)$$

Так как функция зависит от двух переменных, то используем сетку прямоугольного типа (рис. 3.17). На оси абсцисс откладываем отрезок длиной L (ширина полосы укладки) и делим его на n равных частей. По оси ординат отложим значения времени τ через равные промежутки. Проводим через полученные узлы на осях ординат прямые, параллельные координатным осям, которые образуют прямоугольную сетку. Значения T в узлах, лежащих на осях координат и на прямой, параллельной оси ординат и расположенной от нее на расстоянии L , находится из начального и граничных условий.

Задача приближенного численного интегрирования уравнения (1) по методу сеток состоит в нахождении приближенного значения функции T в каждом узле сетки. Данная программа позволяет определять температуру горячей смеси в любой точке полосы покрытия с учетом временного фактора. Расчетная схема представлена на рис. 3.18.

Результаты расчета температуры горячей смеси по ширине полосы, при начальной температуре смеси, равной 160°C , представлены в табл. 3.19.

Полученные результаты представлены в виде графика на рис. 3.19.

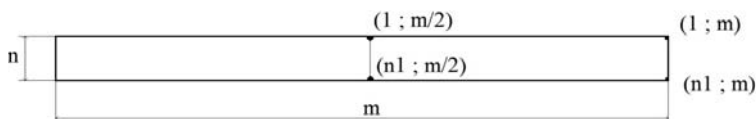


Рис. 3.18. Расчетная схема для определения температуры по ширине полосы покрытия

3.19. Результаты расчета температуры в разных точках покрытия

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

Из графика видно, что температура смеси охлаждается неравномерно относительно оси и края полосы, причем с течением времени разница в температурах становится существенной. Для установления общей закономерности изменения температуры в зоне стыка полосы покрытия представим данные табл. 3.18 в относительных величинах, принимая за единицу температуру оси полосы покрытия. Обозначим данную величину через коэффициент влияния ширины зоны стыка полосы ($K_{ш}$). На рисунке 3.19 представлено сравнение изменения температуры в зоне стыка полосы в верхней и нижней точках покрытия. Краевые участки полосы с пониженной температурой являются продольным швами покрытия.

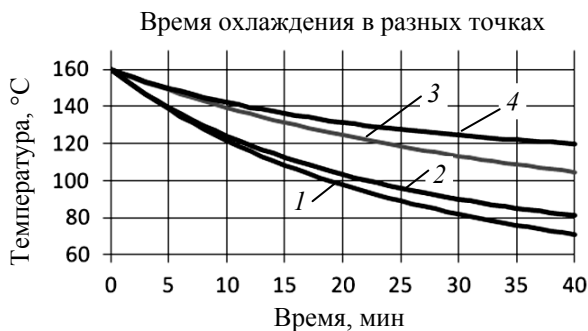


Рис. 3.19. Зависимость температуры смеси в зоне стыка сопряженных полос от времени:

1 – верхняя точка края полосы; 2 – нижняя точка края полосы;
3 – верхняя точка по оси полосы; 4 – нижняя точка на оси слоя покрытия

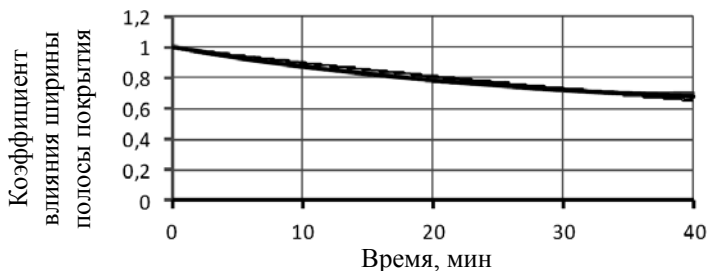


Рис. 3.20. Изменение температуры горячей смеси в зоне стыка полосы покрытия от времени

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

$$K_{ш} = e^{-0,01\tau}, \quad (3.30)$$

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

Краевые участки полосы с пониженной температурой являются продольными швами покрытия.

3.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ

С целью уточнения полученных результатов моделирования распределения температуры горячей смеси по ширине покрытия в производственных условиях были проведены измерения температуры по ширине полосы покрытия. С помощью тепловизионной камеры (testo 880) производилось измерение температуры асфальтобетонной смеси на разных участках укладываемого покрытия. На рисунках 3.19 – 3.23 представлен снимок и результаты измерения температуры при укладке и уплотнении слоя горячего асфальтобетона. Съемка производилась при укладке верхнего слоя покрытия на автомобильной дороге Пенза–Тамбов.



Рис. 3.21. Съемка тепловизионной камерой температуры асфальтобетона при устройстве покрытия

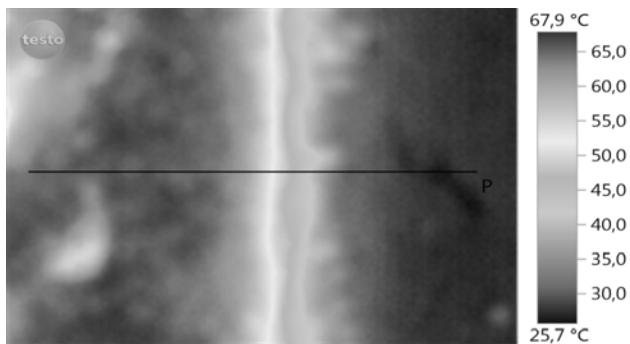


Рис. 3.22. Распределение температуры асфальтобетонной смеси по ширине полосы

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

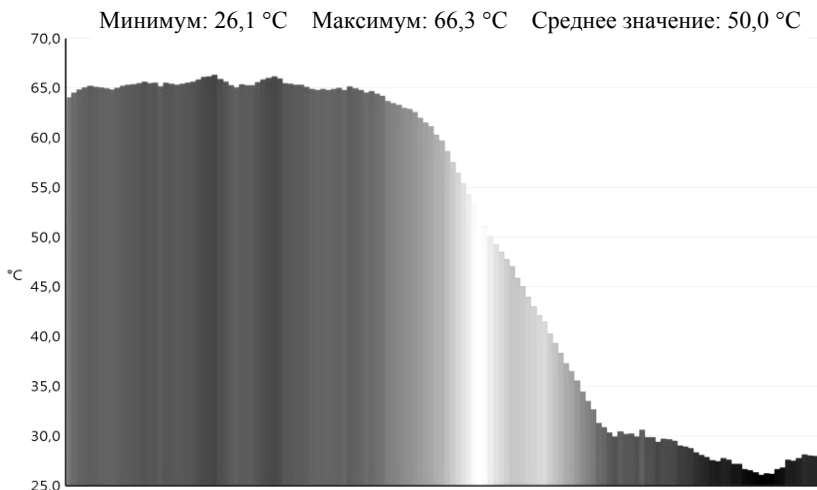


Рис. 3.23. Графический анализ результатов съемки

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

Строительство дорожных покрытий нежесткого типа производится звеном машин, состоящим из асфальтоукладчика, осуществляющего распределение и предварительное уплотнение асфальтобетонной смеси и звеном катков, выполняющих операцию уплотнения горячей смеси в установленных температурных интервалах и обеспечивающих требуемые характеристики асфальтобетона. При строительстве новых, а также при реконструкции автомобильных дорог, в зависимости от условий производства работ и производственных возможностей асфальтобетонных заводов по производству горячей асфальтобетонной смеси, при ширине полосы от 1,0 до 12,0 м укладка горячей смеси может выполняться одним асфальтоукладчиком (рис. 4.1).

Установлено, что требуемые показатели качества уплотнения (плотность, водонепроницаемость, коэффициент уплотнения) могут быть получены при определенных температурах, зависящих от применяемого вяжущего материала. Повышение температуры битума выше максимальной величины приводит к снижению плотности уплотняемой смеси. Это связано с тем, что при высоких температурах битум обладает свойствами жидкости и имеет малую клеящую способность. Под действием нагрузки от рабочего органа машины частицы смеси сжимаются и вытесняют битум в зонах контакта. Однако при снятии нагрузки пленка вяжущего восстанавливает первоначальную толщину, что приводит к уменьшению получаемой плотности смеси. Вести процесс уплотнения катками при такой температуре с существующими



Рис. 4.1. Технологический процесс строительства покрытия нежесткого типа

параметрами практически не эффективно из-за недостаточной деформативной способности асфальтобетонных смесей. Применение катков с малыми линейными давлениями является нерациональным ввиду незначительного времени их использования. Учитывая, что температура смеси оказывает значительное влияние на качество покрытия, температура укладки и уплотнения регламентированы нормативными документами в зависимости от марки битума и должны иметь значения, приведенные в табл. 4.1 [3, 5, 33]. Известно, что для достижения требуемых показателей качества уплотнения асфальтобетона (плотность, коэффициент уплотнения, водонепроницаемость) необходимо иметь не только заданную температуру горячей смеси, но и возможное время действия требуемой нагрузки на уплотняемый материал [37].

Продолжительность укладки и уплотнения горячей смеси зависит от теплофизических свойств смеси, влияния погодных условий строительства и конструктивных параметров дорожного покрытия и характеризуется температурой укладки горячей смеси и температурой окончания уплотнения, ниже которой достичь требуемых показателей уплотнения практически невозможно. Нормативными документами температура окончания уплотнения не регламентирована. Существующие рекомендации по температуре окончания уплотнения покрытия ориентированы на тип смеси без учета марки вяжущего [3, 41, 42, 45]. В то же время образование связей между минеральным материалом в асфальтобетоне осуществляется за счет вязкости битума, зависящей от температуры. Поэтому температура окончания уплотнения при укладке должна определяться не только типом смеси, но и маркой битума. Исследованиями Н. В. Горельшева установлено, что асфальтобетонные смеси, в зависимости от марки битума, имеют границы эффективного уплотнения, и снижение температуры уплотнения за пределы нижней температурной границы не дает эффекта при уплотнении. Поэтому при определении продолжительности устройства покрытия нежесткого типа необходимо учитывать температуру при укладке горя-

4.1. Влияние марки битума на температуру укладки смеси [6]

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

чей смеси и окончании уплотнения с учетом типа смеси и марки битума. Продолжительность строительства покрытия определяется темпом охлаждения слоя горячей смеси и зависит от толщины укладываемого слоя покрытия, температуры смеси при укладке, погодноклиматических условий, теплофизических свойств и применяемого звена машин. Установлено, что характер охлаждения не зависит от состава смеси, температуры воздуха, скорости ветра и подчиняется экспоненциальному закону [17]. Толщина дорожной одежды из горячих асфальтобетонных смесей регламентирована нормативным документом [40]. В зависимости от принятой конструкции дороги дорожное покрытие может устраиваться в один или два слоя, что влияет на продолжительность работ по их устройству.

4.1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МНОГОПОЛОСНЫХ ПОКРЫТИЙ ОДНИМ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОМ

С целью исследования влияния различных факторов (конструктивных, климатических технологических и свойств материалов) на длительность процесса укладки и уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей рассмотрена расчетная модель конструкций дорог, которые представлены на рис. 4.2.

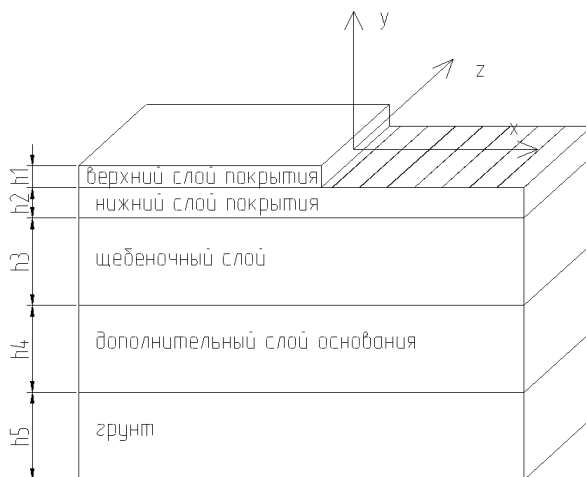


Рис. 4.2. Расчетная схема «покрытие–основание дороги»
(h – толщина слоя, м)

Расчетная модель принята с учетом следующих предпосылок:

- процесс строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей ограничен во времени температурным интервалом 180...50 °С;
- в начальный момент времени укладки смеси температура по толщине слоя имеет одинаковую величину;
- материал в укладываемом слое однородный;
- потери тепла через боковые грани слоя незначительны и ими можно пренебречь;
- потери тепла происходят через верхнюю поверхность слоя за счет теплового излучения и конвективного обмена в атмосферу;
- дополнительная тепловая энергия сообщается через верхнюю поверхность слоя путем поглощения энергии солнечного излучения;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярным к поверхности слоя;
- потери тепла в нижележащие слои происходят через нижнюю поверхность слоя за счет теплопроводности материала;
- сцепление слоев обеспечивает достаточный термоконттакт;
- процесс укладки осуществляется самоходными катками на пневматических шинах и с жесткими металлическими вальцами с обеспечением контроля за расходом жидкости для смачивания поверхности вальца;
- температура окружающей среды и скорости воздушных масс с момента укладки слоя смеси и до окончания процесса уплотнения остаются постоянными.

Принятые расчетные модели можно описать системой дифференциальных уравнений, отражающих процесс нестационарной теплопроводности в слоях с различными физико-механическими и теплотехническими свойствами, лежащими на бесконечной полуограниченной стенке из однородного материала.

В общем виде системы дифференциальных уравнений в частных производных имеют вид:

$$\begin{aligned} \partial t_1 / \partial \tau &= (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2) - \text{для верхнего слоя;} \\ \partial t_2 / \partial \tau &= (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2) - \text{для основания;} \\ \partial t_3 / \partial \tau &= (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2) - \text{для дополнительного} \\ &\hspace{15em} \text{слоя основания;} \\ \partial t_4 / \partial \tau &= (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2) - \text{для грунта,} \end{aligned} \quad (4.1)$$

где x, y, z – координатные оси; λ_{1-5} – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(кг·°С); c_{1-5} – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С); γ_{1-5} – объемная плотность, кг/м³; τ – время, с.

С учетом допущений и данных экспериментальных исследований принимаем, что температура укладываемого слоя смеси и ее распределение в нижерасположенных слоях имеет одинаковое значение в двух плоскостях (x ; z) и меняется во времени в зависимости от различных факторов практически в одной плоскости (y). Поэтому решение данной задачи сводится к определению распределения температуры в одной плоскости, т.е. к решению плоской задачи. С учетом выражений (4.1) и (4.2) можно представить

$$\partial t_i / \partial \tau = (\lambda_i / c_i \rho_i) (\partial^2 t_i / \partial y_i^2), \quad \tau > 0, \quad 0 < y_i < h_i, \quad i = 1 - 5. \quad (4.2)$$

Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} t_1 \Big|_{\tau=0}^{y=h_1=0} &= t_1; & t_1 \Big|_{\tau=0}^{y=h_1} &= t_1'; \\ t_1' \Big|_{\tau=0}^{y=h_1} &= t_2 \Big|_{\tau=0}^{y=h_2=0}; & t_2' \Big|_{\tau=0}^{y=h_2} &= t_2 + \Delta t_2 e^{-\mu_2 y}; \\ t_2' \Big|_{\tau=0}^{y=h_2} &= t_3 \Big|_{\tau=0}^{y=h_3=0}; & t_3' \Big|_{\tau=0}^{y=h_3} &= t_3 + \Delta t_3 e^{-\mu_3 y}; \\ t_3' \Big|_{\tau=0}^{y=h_3} &= t_4 \Big|_{\tau=0}^{y=h_4=0}; & t_4' \Big|_{\tau=0}^{y=h_4} &= t_4 + \Delta t_4 e^{-\mu_4 y}, \end{aligned}$$

где $t_1, t_1', t_2, t_2', t_3, t_3', t_4, t_4', t_5, t_5'$ – температура в начале и на глубине слоя дорожной конструкции, °С; e – основание натурального логарифма; μ_i – коэффициент, характеризующий свойства материала; $\Delta t_i e^{-\mu_i y}$ – перепад температуры между поверхностью слоя и рассматриваемой точкой на глубине y .

Граничные условия приняты на основе следующих допущений:

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

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

– условие равенства тепловых потоков на границах слоев имеет вид

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

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

$$h_4' \Big|_{\tau=0}^{y=h_4=\infty} < \infty (t_{\text{осн}}),$$

здесь h_i – толщины слоев дорожной конструкции, м; τ – время, с; t_b – температура воздуха, °С; $t_{\text{осн}}$ – температура грунта на заданной глубине, °С; $t(0; \tau)$ – температура смеси в момент укладки, °С; α – коэффициент теплоотдачи горячей смеси.

Решение задачи по моделированию тепловых процессов в слоях дорожной одежды дорог осуществлялось с помощью разработанной

программы для расчета температуры по толщине конструктивных слоев дороги с учетом ее распределения во времени [10]. Для решения систем уравнений (7–8) был использован метод сеток и принята неявная разностная схема [35]. Заменяем производные разностями аналогов:

$$\begin{aligned} (y_{i+1,j-1} - y_{i,j}) / \Delta\tau &= \lambda / c\gamma [(y_{i+1,j+1} - 2y_{i+1,j} + y_{i+1,j-1}) / (\Delta h)^2], \quad i = 1, n - 1; \\ \lambda(y_{i+1,1} - y_{i+1,0}) / (\Delta h) &= 2(y_{i+1,0} - t_0); \\ y_{i+1,n} &= t \Big|_{y=h}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Таким образом, задача свелась к решению системы $(n + 1)$ линейного уравнения с $(n + 1)$ неизвестной с трехдиагональной матрицей.

При решении системы уравнений использовался метод прогонки. Система уравнений приведена к виду

$$y_{i+1,j} = c_j(\alpha_j + y_{i+1,j+1}), \quad j = 0, n - 1. \quad (4.4)$$

Введя обозначения

$$P = \alpha\Delta h / \lambda; \quad S = [c\gamma(\Delta h)^2] / \lambda\Delta\tau,$$

получено выражение для вычисления коэффициентов c_j и d_j (прямой ход)

$$\begin{aligned} c_0 &= 1 / (1 + P); \quad d_0 = Pt_b; \quad c_j = 1 / (2 + S - c_{j-1}); \\ d_j &= c_{j-1}d_{j-1} + Sy_{i,j}; \quad i = 1, n - 1. \end{aligned}$$

Из граничных условий находится температура в нижней точке

$$y_{i+1,n} = t \Big|_{y=h}.$$

Обратный ход дает возможность определить значения температур во всех точках слоя

$$y_{i+1,j} = c_j(d_j + y_{i+1,j+1}); \quad j = n - 1, 0. \quad (4.5)$$

Введя обозначения

$$P = \alpha\Delta h / \lambda; \quad S = [c\gamma(\Delta h)^2] / \lambda\Delta\tau,$$

получено выражение для вычисления коэффициентов c_j и d_j (прямой ход):

$$\begin{aligned} c_0 &= 1 / (1 + P); \quad d_0 = Pt_b; \quad c_j = 1 / (2 + S - c_{j-1}); \\ d_j &= c_{j-1}d_{j-1} + Sy_{i,j}; \quad i = 1, n - 1. \end{aligned}$$

Из граничных условий находится температура в нижней точке

$$y_{i+1,n} = t \Big|_{y=h}. \quad (4.6)$$

Обратный ход дает возможность определить значения температур во всех точках слоя

$$y_{i+1,j} = c_j(d_j + y_{i+1,j+1}); \quad j = n - 1, 0. \quad (4.7)$$

Таким образом, данный метод позволяет найти значения температур на новом (по времени) слое и перейти к расчету на следующий слой.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Анализ работ, посвященных изучению процесса охлаждения асфальтобетонных смесей, а также проведенные экспериментальные исследования по строительству дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, показали, что продолжительность строительства дорожных покрытий нежесткого типа зависит от ряда факторов, каждый из которых влияет на время строительства. Известно, что процесс охлаждения асфальтобетонной смеси подчиняется экспоненциальной зависимости. На рисунке 4.3 представлен процесс охлаждения слоя асфальтобетонной смеси по времени при устройстве дорожного покрытия. Общее время строительства покрытия определяется продолжительностью укладки и уплотнения слоя асфальтобетонной смеси при соответствующих температурных режимах, зависящих от свойств применяемой смеси асфальтобетонной смеси при соответствующих температурных режимах, зависящих от свойств применяемой смеси.

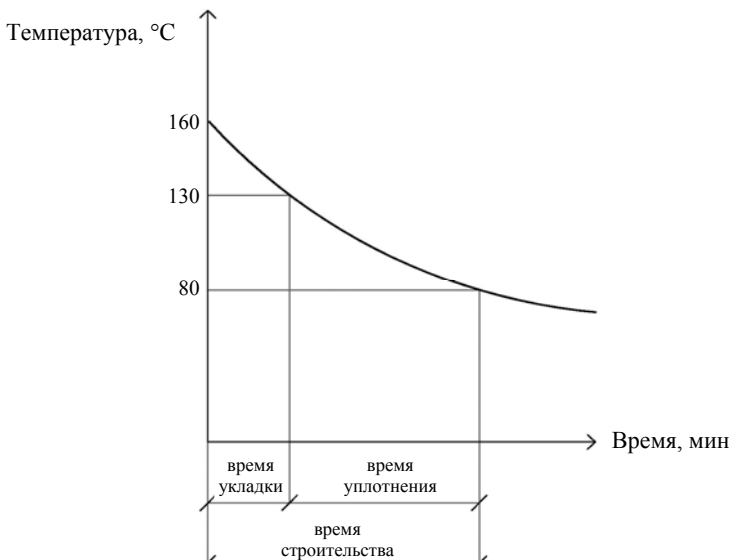


Рис. 4.3. Распределение температуры горячей асфальтобетонной смеси в слое покрытия по времени и технологические операции по устройству покрытия. (температура смеси при укладке 160 °C; толщина слоя покрытия 0,05 м; скорость ветра 0 м/с; смесь типа А, марка битума 90/130):
1 – изменение температуры горячей смеси по времени; 2 – температура смеси при укладке, °C; 3 – температура смеси при окончании укладки, °C;
4 – температура смеси при окончании процесса уплотнения покрытия, °C

С учетом одновременного влияния производственных факторов на процесс охлаждения горячей смеси время строительства покрытий нежесткого типа можно представить как функцию, зависящую от ряда переменных факторов. Такими переменными факторами являются: температура укладываемой смеси, толщина слоя, температура воздуха и основания, скорость ветра, теплофизические свойства применяемого материала. При установлении зависимости допустимой продолжительности строительства покрытий нежесткого типа использована методика рационального планирования экспериментов [32]. В общем виде время строительства покрытия можно представить в виде

$$\tau_{\text{стр}} = f(t_{\text{см}}; h_{\text{сл}}; t_{\text{в}}; t_{\text{осн}}; v_{\text{в}}; M_{\text{с}}), \quad (4.8)$$

где $\tau_{\text{стр}}$ – продолжительность строительства, мин; $t_{\text{см}}$ – температура укладываемой смеси; $h_{\text{сл}}$ – толщина слоя; $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха; $t_{\text{осн}}$ – температура основания; $v_{\text{в}}$ – скорость ветра; $M_{\text{с}}$ – теплофизические свойства смеси.

Каждая переменная величина оказывает определенное влияние на общее допустимое время устройства покрытия нежесткого типа. Для установления общей закономерности необходимо знать влияние каждого фактора на допустимую продолжительность нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале горячей смеси при устройстве дорожной полосы покрытия.

Как отмечалось, в качестве основного параметра при устройстве дорожного покрытия нежесткого типа принята температура асфальтобетонной смеси, которая контролируется с момента загрузки транспортного средства и до окончания процесса ее уплотнения [41, 42]. Время доставки к месту укладки горячей смеси нормативными документами не регламентировано и зависит от конкретных производственных условий. Поэтому температура смеси может быть разной, что влияет на продолжительность работ по укладке горячей смеси и ее уплотнению. В то же время этими документами отмечается, что температура поставляемой смеси должна быть не ниже 120 °С, что определяет дальность транспортировки горячей смеси с учетом условий транспортировки смеси [41]. Используя зависимость (2.3), температуру смеси при доставке к месту производства работ можно определить по формуле

$$t_{\text{ук}} = t_{\text{вых}} - t_{\text{в}} / e^{m\tau} + t_{\text{в}}, \quad (4.9)$$

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

4.2. Допустимая продолжительность работ по строительству покрытий из горячих асфальтобетонных смесей в зависимости от температуры смеси при укладке, мин (температура воздуха 20 °С, скорость ветра 0 м/с)

Температура смеси при укладке, °С		160	140	120	100	80	60
Толщина слоя, м	0,03	31 –	21,5 32	16,5 24	11,5 19	7,0 8,5	– 5
	0,05	68 –	56 79	43 63	31 47	17 22	– 15
	0,08	150 –	130 175	100 142	72 109	42 52	– 31
	0,10	210 –	175 236	136 193	78 148	56 71	– 45

С целью выяснения влияния температуры горячей смеси при укладке на продолжительность работ по строительству покрытий проведены расчеты, результаты которых представлены в табл. 4.2 и на рис. 4.4. Для смесей с маркой битумов БН, БНД 40/60, 60/90, 90/130 принята температура укладки 160 °С и температура окончания уплотнения – 60 °С. Для смесей с битумом марок БН, БНД 130/200 и 200/300 соответственно 140 и 50 °С. Из представленных на рис. 4.4 данных видно, что характер зависимости не зависит от толщины укладываемого слоя. Допустимая продолжительность строительства покрытий, в зависимости от температуры укладываемой смеси, при разной толщине слоя может быть определена по формулам, представленным в табл. 4.2.

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

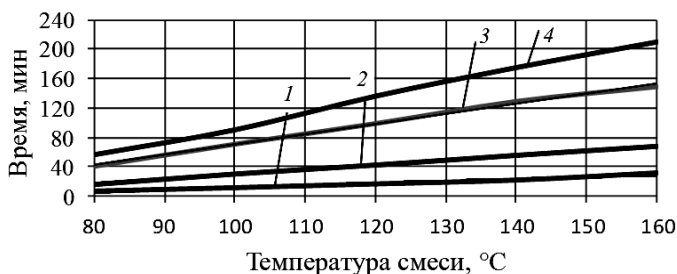


Рис. 4.4. Зависимость допустимого времени работ от температуры смеси при укладке при разной толщине слоя покрытия:

1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

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

Толщина слоя, м	Марка битума: БН, БНД 40/60, 60/90, 90/130	Марка битума: БН, БНД 130/200, 200/300
0,03	$\tau = 0,29 t_{\text{ук}} - 17,3$	$\tau = 0,35 t_{\text{ук}} - 17,05$
0,05	$\tau = 0,63 t_{\text{ук}} - 33,2$	$\tau = 0,80 t_{\text{ук}} - 33$
0,08	$\tau = 1,37 t_{\text{ук}} - 65,6$	$\tau = 1,89 t_{\text{ук}} - 87,2$
0,10	$\tau = 1,87 t_{\text{ук}} - 93,4$	$\tau = 2,52 t_{\text{ук}} - 113,4$

где $t_{\text{ук}}$ – температура смеси при укладке, °С. Коэффициент корреляции для данных уравнений составляет 0,98 – 0,99.

Для установления общей закономерности влияния температуры смеси при укладке на время нахождения горячей смеси в слое покрытия в заданном температурном интервале принимаем время охлаждения каждого слоя с момента укладки смеси и достижения им температуры, ниже которой уплотнение покрытия не дает эффекта, за единицу. Тогда в относительных величинах данные табл. 4.2 будут иметь значения, представленные в табл. 4.4. Обозначим температуру смеси при укладке, влияющей на продолжительность нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале, через коэффициент влияния температуры смеси ($K_{\text{тс}}$). Из представленных данных видно, что значение коэффициента $K_{\text{тс}}$ не зависит от толщины слоя покрытия, исключением является толщина слоя 0,03 м, что характеризуется незначительным количеством тепла в слое покрытия.

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

Температура смеси, °С		160	140	120	100	80	60
Толщина слоя, м	0,03	1,0 –	0,69 1,0	0,53 0,75	0,37 0,59	0,22 0,36	0,15
	0,05	1,0 –	0,82 1,0	0,63 0,82	0,45 0,61	0,25 0,40	0,18
	0,08	1,0 –	0,86 1,0	0,66 0,81	0,48 0,62	0,28 0,41	0,18
	0,10	1,0 –	0,85 1,0	0,66 0,82	0,48 0,62	0,27 0,41	0,18
	$\Sigma n/n$	1,0	0,84 1,0	0,65 0,82	0,47 0,62	0,27 0,41	0,18

4.5. Зависимость коэффициента влияния температуры смеси при укладке на продолжительность строительства

Толщина слоя, м	Марка битума: БН, БНД 40/60, 60/90, 90/130	Марка битума: БН, БНД 130/200, 200/300
0,03	$K_{TC} = 0,0094t_{CM} - 0,566$	$K_{TC} = 0,0105 t_{CM} - 0,475$
0,05 и более	$K_{TC} = 0,0092t_{CM} - 0,452$	$K_{TC} = 0,0103t_{CM} - 0,419$

где t_{CM} – температура смеси при укладке. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,98–0,99.

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

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

Численное значение коэффициента влияния температуры смеси при укладке на продолжительность строительства характеризуется линейной зависимостью, и с учетом марки битума определяется из выражений, представленных в табл. 4.5.

Установлено, что удельная теплоемкость смеси влияет на ее продолжительность охлаждения [5, 8, 22, 23]. В таблице 4.6 представлены результаты расчетов по определению продолжительности охлаждения асфальтобетонной смеси в зависимости от удельной теплоемкости при разных ее температурах при укладке в дорожное покрытие.

Из представленных данных видно, что с увеличением удельной теплоемкости продолжительность охлаждения слоя увеличивается независимо от температуры смеси при укладке. Для установления общей закономерности условно принимаем продолжительность охлаждения смеси при удельной теплоемкости, равной 1,65 кДж/(кг·°С) за единицу. Тогда в относительных величинах данные табл. 4.6 будут иметь значения (табл. 4.7).

Из данных таблицы видно, что величина удельной теплоемкости смеси влияет на продолжительность охлаждения смеси и не зависит

4.7. Влияние удельной теплоемкости смеси на относительную продолжительность охлаждения слоя при разных температурах укладки

Удельная теплоемкость, (кДж/кг·°С)		1,2	1,4	1,6	1,65	1,8	2,0	2,2	2,5
Температура смеси, °С	160	0,66	0,82	0,95	1,0	1,1	1,24	1,4	1,65
	140	0,68	0,82	0,96	1,0	1,1	1,25	1,41	1,64
	120	0,68	0,80	0,95	1,0	1,1	1,24	1,39	1,61
	100	0,70	0,80	0,93	1,0	1,08	1,23	1,40	1,60
	80	0,66	0,83	0,94	1,0	1,1	1,24	1,40	1,66
	Средняя величина	0,67	0,81	0,94	1,0	1,1	1,24	1,4	1,63

от температуры смеси при укладке. В интервале температур 160... 80 °С эта закономерность носит общий характер и может быть определена по формуле

$$K_{см} = 0,758 C_{см} - 0,263, \quad (4.10)$$

где $K_{см}$ – коэффициент, учитывающий влияние удельной теплоемкости смеси на продолжительность охлаждения, безразмерная величина; $C_{см}$ – удельная теплоемкость смеси, кДж/(кг·°С).

С целью установления влияния температуры воздуха на продолжительность охлаждения смеси при разной толщине слоя, были проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 4.5.

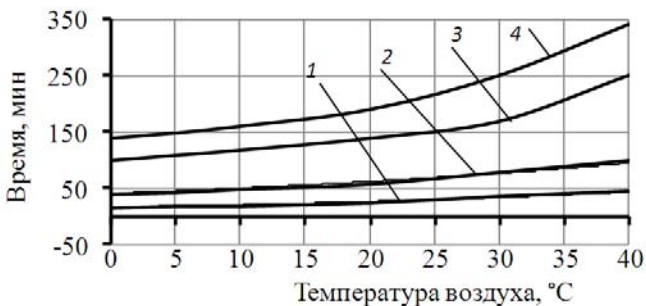


Рис. 4.5. Влияние температуры воздуха на охлаждение слоя покрытия (температура смеси при укладке – 160 °С, скорость ветра – 0 м/с):

1 – толщина слоя – 0,03 м; 2 – толщина слоя – 0,05 м;
3 – толщина слоя – 0,08 м; 4 – толщина – 0,1 м

4.8. Влияние температуры воздуха на допустимую продолжительность строительства

Толщина слоя, м	Битум марок БН, БНД 40/60, 60/90, 90/130	Битум марок БН, БНД 130/200, 200/300
0,03	$\tau = 15,5 e^{0,026t_B}$	$\tau = 15,87 e^{0,041t_B}$
0,05	$\tau = 40,1 e^{0,021t_B}$	$\tau = 42,585 e^{0,0333t_B}$
0,08	$\tau = 101 e^{0,199t_B}$	$\tau = 87,895 e^{0,0377t_B}$
0,10	$\tau = 138 e^{0,02t_B}$	$\tau = 121,48 e^{0,0369t_B}$

где τ – продолжительность процесса строительства покрытия в зависимости от температуры окружающего воздуха; t_B – температура воздуха, °С; e – основание натурального логарифма. Коэффициент корреляции данных уравнений составляет 0,95–0,98.

Из представленных данных видно, что с повышением температуры воздуха увеличивается время строительства покрытия. Допустимая продолжительность работ при укладке слоев разной толщины может быть определена по формулам, представленным в табл. 4.8.

Анализ результатов, представленных на рис. 4.5, показал, что с увеличением температуры воздуха выше 20 °С, продолжительность нахождения горячей смеси в заданном интервале температур резко возрастает. Это обстоятельство объясняется влиянием температуры основания, что отмечается в работах Б. И. Ладыгина и Н. Г. Горелышева [5, 24]. Экспериментальными исследованиями и результатами моделирования тепловых процессов при устройстве покрытий нежесткого типа установлено, что допустимая продолжительность устройства дорожного покрытия в заданном температурном интервале увеличивается пропорционально росту температуры окружающего воздуха до 15 – 20 °С, причем если при изменении температуры воздуха от –10 °С до 0 °С увеличение продолжительности работ составляет 0,5 мин на 1 °С, то с 0 °С до 15 °С эта величина составляет 1 мин на 1 °С. При дальнейшем увеличении температуры воздуха рост продолжительности работ происходит более интенсивно, что характерно для солнечных дней и температуры окружающей среды свыше 20 °С. Экспериментально установлено, что температура поверхности основания дорожного покрытия за счет солнечной радиации может превышать температуру окружающего воздуха на 10 – 30 °С, особенно при отсутствии ветра, что подтверждается работами других авторов [1, 24]. Увеличение температуры основания за счет этого фактора приводит к уменьшению темпа охлаждения смеси и, следовательно, способствует увеличению продолжительности работ по устройству покрытия.

**4.9. Влияние температуры основания
на допустимую продолжительность нахождения смеси
в заданном температурном интервале**

Температура окружающего воздуха, °С	20				30				40			
Температура основания, °С	20	25	30	35	30	35	40	45	40	45	50	60
Продолжительность работ, мин	51	53	56	79	64	70	74	79	89	96	107	136

Для учета этого фактора при расчете времени охлаждения смеси предложено учитывать влияние температуры основания путем введения коэффициента, зависящего от температуры основания. Численное значение коэффициента влияния температуры основания было рекомендовано принимать при температуре основания, равной температуре воздуха, равным единице, а при температуре основания 40...45 °С, равным 1,25. С целью уточнения влияния температуры основания на процесс охлаждения горячей смеси проведены расчеты, результаты которых представлены в табл. 4.9. и на рис. 4.6. (Толщина слоя 0,05 м, скорость ветра 0 м/с, температура смеси при укладке 140 °С).

Из данных таблицы видно, что повышение температуры основания дороги на 1 °С, при температуре воздуха от 20 °С до 30 °С, приводит к увеличению продолжительности работ на 0,6 мин, при температуре воздуха от +30 °С до 40 °С, это увеличение в среднем составляет 1,5 мин на 1 °С, а при дальнейшем увеличении температуры воздуха рост времени достигает 2,4 мин на 1 °С. На основании этого можно сделать вывод, что температура основания влияет на продолжительность работ по устройству покрытия. Принимая продолжительность процесса уплотнения покрытия при температуре основания, равной температуре воздуха, за единицу, получены численные значения коэффициентов влияния температуры основания ($K_{\text{осн}}$) на продолжительность уплотнения. При температуре воздуха 20 °С и повышения температуры основания от 20 до 40 °С, численное значение коэффициента определяется по формуле

$$K_{1\text{осн}} = 0,53e^{0,03t}. \quad (4.11)$$

При температурах воздуха 30 °С и 40 °С и, соответственно, температурах оснований 30...65 °С и 40...80 °С, коэффициенты будут определяться

$$K_{2\text{осн}} = 0,67e^{0,013t}, \quad (4.12)$$

$$K_{3\text{осн}} = 0,41e^{0,021t}, \quad (4.13)$$

где t – температура основания, °С. Коэффициент корреляции 0,98–0,99.

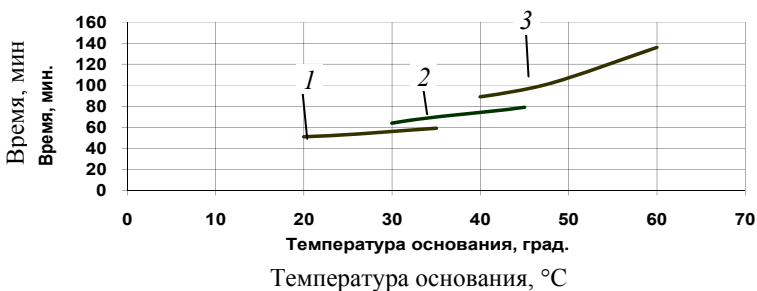


Рис. 4.6. Влияние температуры основания на время уплотнения:
 1 – температура основания 20 °С; 2 – 30 °С; 3 – 40°

Для получения общей закономерности влияния температуры основания на возможную продолжительность процесса уплотнения покрытий из горячих асфальтобетонных смесей представим данные табл. 4.9 в другом виде. Совместим полученные численные значения коэффициентов ($K_{осн}$) при различных температурах воздуха и основания, принимая за начало отсчета равенство температур основания и окружающего воздуха. По оси X отложим разницу температур основания и окружающего воздуха с интервалом 5 °С. По оси Y отложим относительное время уплотнения покрытий в связи с увеличением температуры основания. Полученные численные значения коэффициента влияния основания, в зависимости от разницы температур основания и окружающего воздуха, представлены в табл. 4.10 и на рис. 4.7.

Из представленных данных видно, что независимо от температуры окружающего воздуха, закономерность влияния температуры основания на продолжительность работ носит общий характер.

4.10. Численные значения коэффициентов влияния температуры основания на продолжительность процесса уплотнения при разных температурах воздуха

Разница температуры основания и воздуха	0	5	10	15	20
20	1,0	1,04	1,10	1,18	1,23
30	1,0	1,04	1,10	1,18	1,31
40	1,0	1,09	1,12	1,20	1,45
Среднее значение $K_{осн}$	1,0	1,06	1,11	1,19	1,33
Относительная погрешность, %	0	2,75	0,8	0,8	8,3



Рис. 4.7. Зависимость $K_{осн}$ от разницы температур основания и воздуха

Численное значение коэффициента влияния температуры основания на допустимую продолжительность работ по устройству покрытия может быть определено из выражения

$$K_{осн} = 0,987e^{0,013\Delta t}, \quad (4.14)$$

где Δt – разность температур основания и окружающего воздуха, °C; $K_{осн}$ – коэффициент влияния температуры основания. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,97.

Анализ влияния температуры воздуха на допустимую продолжительность работ при разной толщине укладываемого слоя покрытия показал, что они подчиняются общей закономерности. Для установления влияния толщины слоя покрытия на продолжительность охлаждения асфальтобетонной смеси в заданном температурном интервале, представим численные значения табл. 4.10 в относительных величинах, принимая толщину слоя покрытия 0,05 м за единицу. Обозначим данную величину через коэффициент влияния толщины слоя покрытия на продолжительность охлаждения слоя горячей смеси (K_h).

Анализ представленных данных в табл. 4.11 показал, что с увеличением толщины слоя продолжительность нахождения горячей смеси в заданном интервале температур возрастает. Закономерность подчиняется линейной зависимости (рис. 4.8).

4.11. Влияние температуры воздуха на продолжительность строительства при разной толщине укладываемого слоя покрытия (в относительных величинах)

Температура, °C		0	5	10	20	30	40	$\Sigma n/n$
Толщина слоя, м	0,03	0,38	0,38	0,38	0,43	0,42	0,46	0,35
	0,05	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,08	2,51	2,51	2,49	2,48	2,15	2,19	2,38
	0,10	3,45	3,46	3,43	3,38	3,16	3,0	3,31

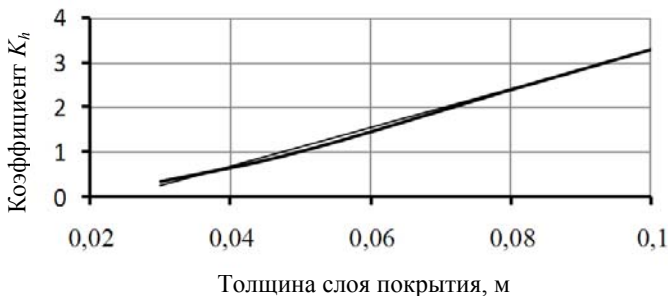


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента влияния толщины слоя покрытия на продолжительность охлаждения слоя горячей смеси

Численное значение коэффициента влияния толщины слоя горячей смеси на продолжительность охлаждения смеси определяется выражением

$$K_h = 42,86h - 1,03, \quad (4.15)$$

где K_h – безразмерная величина. Коэффициент корреляции равен 0,99.

С учетом полученных зависимостей время нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале имеет вид

$$\tau = 40,1K_{тс}K_h e^{0,021r_B}, \text{ мин.} \quad (4.16)$$

Из приведенных данных видно, что с повышением температуры воздуха увеличивается допустимое время строительства дорожного покрытия из горячих асфальтобетонных смесей. Интенсивный рост допустимого времени строительства покрытий наблюдается при достижении температуры воздуха свыше 20 °С, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

В значительной степени процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси зависит от скорости перемещения воздушных масс, поскольку от этого зависит конвективный теплообмен между средой и поверхностью уложенного слоя смеси. Увеличение скорости ветра приводит к более интенсивной отдаче тепла в окружающую среду за счет повышения коэффициента теплоотдачи, что способствует повышению темпа охлаждения слоя горячей смеси и уменьшению времени на выполнение работ по укладке и уплотнению покрытий. В таблице 4.12 представлены результаты расчетов продолжительности охлаждения смеси в зависимости от скорости ветра для слоев разной толщины покрытия (температура смеси при укладке 160 °С, температура воздуха 20 °С).

4.12. Влияние скорости ветра на продолжительность процесса охлаждения смесей при разной толщине слоя (мин)

Скорость ветра, м/с		0	3	5	7	10	15	Время, мин
Толщина слоя, м	0,03	31	27	24	22	20	16	$\tau = 30,51e^{-0,0435v}$
	0,05	68	58	53	50	45	36	$\tau = 66,56e^{-0,0409v}$
	0,08	150	129	121	114	101	86	$\tau = 146,57e^{0,0363v}$
	0,10	201	175	152	143	132	110	$\tau = 194,19e^{0,0394v}$

где v – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции уравнений 0,98–0,99.

Расчетами установлено, что характер охлаждения слоя смеси не зависит от толщины слоя и подчиняется экспоненциальной зависимости. Из представленных данных видно, что характер охлаждения слоя смеси при разной толщине покрытия не зависит от скорости ветра. В то же время скорость ветра влияет на темп охлаждения слоя, а следовательно, и на продолжительность строительства. За счет увеличения теплообмена поверхности слоя с окружающей средой происходит перераспределение теплового потока по толщине слоя покрытия. Экспериментально установлено, что перепад температуры по толщине слоя при отсутствии ветра или при незначительной его величине составляет 5...6 °С. С увеличением скорости ветра неравномерность распределения температуры по толщине слоя увеличивается, и перепад по толщине слоя достигает 18...20 °С. Такая неравномерность в распределении температуры по толщине слоя приводит к тому, что в процессе движения уплотняющих машин, за счет различия свойств смеси по толщине слоя, приводит к появлению пластических деформаций материала в средней части слоя материала и способствует процессу волнообразования, а также появлению микротрещин на поверхности слоя.

4.13. Влияние скорости ветра на продолжительность охлаждения горячей смеси

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

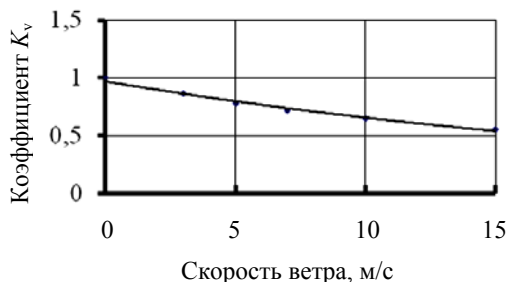


Рис. 4.9. Зависимость K_v от скорости ветра

С целью установления влияния скорости ветра на продолжительность охлаждения смеси принимаем продолжительность при отсутствии ветра за единицу, при температуре укладываемой смеси 160 °С. Тогда в относительных единицах данные табл. 4.12 будут иметь значения, представленные в табл. 4.13.

Из представленных данных видно, что характер влияния скорости ветра на продолжительность работ по строительству покрытий не зависит от толщины укладываемого слоя. Увеличение скорости ветра приводит к снижению продолжительности процесса строительства. Зависимость коэффициента влияния скорости ветра на продолжительность работ представлена на рис. 4.9.

Численное значение K_v может быть определено по формуле

$$K_v = 0,98e^{-0,039v}, \quad (4.17)$$

где v – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции 0,98.

Известно, что обеспечить качество работ по устройству дорожно-го покрытия нежесткого типа возможно при условии соблюдения технологических режимов. Нормативными документами при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей, в зависимости от дорожно-климатической зоны строительства автомобильной дороги допускается использовать разные марки битумов. Установлено, что в зависимости от применяемой марки битума, нижняя температурная граница эффективного уплотнения смесей меняется от 94 до 42 °С, что влияет на возможную продолжительность строительства [5]. В результате моделирования тепловых процессов при устройстве асфальтобетонных покрытий получены значения продолжительности охлаждения горячих смесей от момента укладки до нижней границы эффективного уплотнения смеси, зависящей от марки битума [10]. Результаты представлены в табл. 4.14.

4.14. Зависимость возможной продолжительности строительства от температуры окончания работы

Температура слоя, °С		150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40
Толщина	0,03	1,5	2,5	4,5	5,5	7,5	9,5	11,5	15	19,5	31	38	62
	0,05	3,5	7	10,5	15	19	24,5	31	39	51	68	94	144
	0,08	9,5	17,5	25	35	46	58	73	91	116	151	206	306
	0,10	10,5	21	33	46	61	78	99	125	158	205	277	380

Из представленных данных видно, что продолжительность охлаждения горячей смеси зависит от нижней граничной температуры применяемого вяжущего материала. Чем больше разница в температурах начала и окончания процесса устройства покрытия нежесткого типа, тем больше времени приходится на выполнение технологических процессов укладки и уплотнения слоя покрытия. Толщина слоя оказывает существенное влияние на время выполнения работы по устройству покрытия. Так, если при укладке слоя толщиной 0,03 м и температуре окончания работ 80 °С время составляет 15 мин, то при снижении температуры до 60 °С, это время будет равно 31 мин. Аналогичная закономерность наблюдается при укладке любых слоев, хотя с увеличением толщины слоя разрыв во времени уменьшается.

Для установления влияния этого фактора на возможную продолжительность строительства покрытий из горячих смесей представим данные табл. 4.14 в относительных величинах, принимая продолжительность строительства для каждого слоя при температуре окончания уплотнения смеси 60 °С за единицу. Обозначим влияние этого фактора через коэффициент $K_{н.г.}$, характеризующий нижнюю температурную границу уплотнения. Тогда данные табл. 4.15 будут иметь следующие значения:

4.15. Продолжительность строительства покрытия в зависимости от температуры окончания уплотнения асфальта

Температура, °С		150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40
Толщина слоя, м	0,03	0,05	0,08	0,15	0,18	0,24	0,31	0,37	0,48	0,63	1,0	1,23	2,0
	0,05	0,05	0,10	0,16	0,23	0,29	0,37	0,47	0,59	0,77	1,0	1,42	2,18
	0,08	0,06	0,08	0,17	0,23	0,3	0,38	0,48	0,60	0,77	1,0	1,36	2,03
	0,10	0,05	0,1	0,16	0,27	0,3	0,38	0,48	0,61	0,77	1,0	1,35	1,85
	$\Sigma n/n$	0,05	0,09	0,16	0,24	0,3	0,38	0,48	0,60	0,77	1,0	1,38	2,02

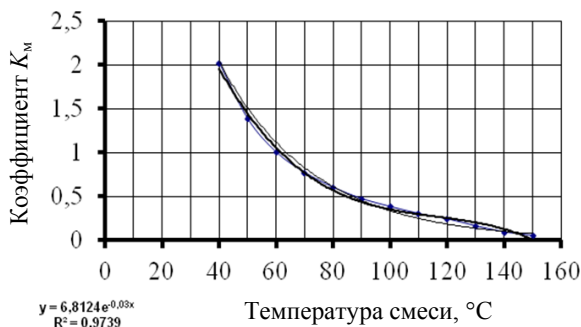


Рис. 4.10. Зависимость коэффициента $K_{н.г}$ от температуры окончания строительства

Из таблицы видно, что коэффициент влияния температуры окончания работы не зависит от толщины слоя и определяется типом смеси и маркой битума. Зависимость коэффициента $K_{н.г}$ от температуры окончания работ по строительству покрытий из горячих смесей представлена на рис. 4.10.

Численные значения коэффициента $K_{н.г}$, в зависимости от температуры окончания уплотнения для смесей с битумами марок БНД 40/60, 60/90 и 90/130, определяются по формуле

$$K_{н.г} = 6,81 e^{-0,03t_{н.г}}, \quad (4.18)$$

где $t_{н.г}$ – температура окончания работ по строительству покрытий, зависящая от марки битума, град; e – основание натурального логарифма. Коэффициент корреляции для данных уравнений составляет 0,97.

Таким образом, продолжительность строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей при укладке асфальтобетонной смеси одной полосой на всю ширину покрытия определяется выражением

$$\tau_{стр} = K_{см} K_{тс} K_h K_v K_{н.г} K_{осн} e^{\alpha t_{в}}, \text{ мин.} \quad (4.19)$$

Предлагаемая зависимость позволяет определить допустимую продолжительности строительства покрытия, состоящую из процессов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей с учетом теплофизических характеристик и условий производства работ.

4.3. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕГРУЗЧИКОВ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ «ШАТТЛ-БАГГИ»

При определении температурных режимов асфальтобетонной смеси принимают, что температура горячей смеси распределяется равномерно по всему объему материала при его доставке к месту произ-

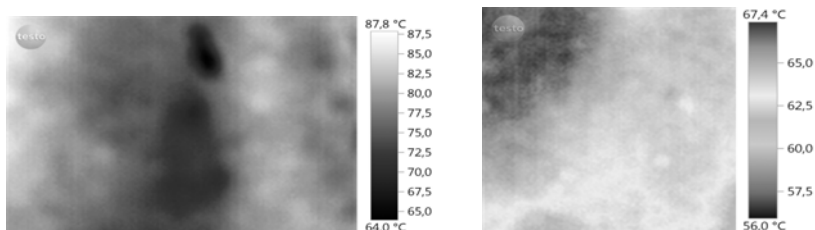


Рис. 4.11. Распределение температуры смеси при укладке слоя дорожного покрытия

водства работ. Однако на практике, при распределении горячей асфальтобетонной смеси по полосе покрытия имеет место неравномерность ее распределения (рис. 4.11).

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

Помимо этого, при загрузке транспортного средства горячей смесью, при расстоянии от заслонки горячего бункера и днища кузова автосамосвала свыше 2,0 м, наблюдается гранулометрическая неоднородность асфальтобетонной смеси. Аналогичное явление наблюдается при загрузке транспорта с одной стоянки и при транспортировке на значительные расстояния. Это способствует образованию участков с разными физико-механическими свойствами покрытия. При разгрузке горячей смеси транспортным средством в бункер асфальтоукладчика, материал с более низкой температурой захватывается шнеком и распределяется в слой покрытия за счет отдачи тепла стенкам кузова транспортных машин и в окружающую среду. Разница в температурах смеси на таких участках может достигать до 25...35 °С, что снижает качество укладки и последующего уплотнения смеси. Помимо этого, при транспортировке на значительные расстояния наблюдается гранулометрическая неоднородность асфальтобетонной смеси, способствующая образованию участков с разными физико-механическими свойствами покрытия. Наличие таких участков способствует неравномерности достигаемой плотности, прочности и низкой деформативной способности готового покрытия, что при эксплуатации дороги приводит к снижению его работоспособности (рис. 4.12 и 4.13) [18, 60].

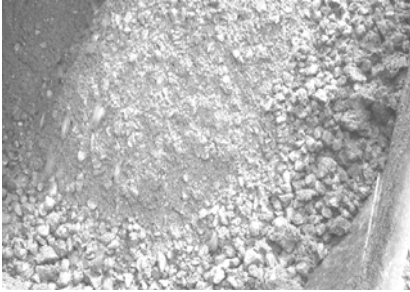


Рис. 4.12. Гранулометрическая сегрегация смеси при выгрузке из самосвала



Рис. 4.13. Температурная сегрегация смеси при укладке



Рис. 4.14. Применение перегрузчика горячей асфальтобетонной смеси «Шаттл-Багги» для устройства дорожного покрытия

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

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

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УКЛАДКИ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ОДНОЙ ПОЛОСОЙ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Устройство дорожных покрытий нежесткого типа начинается с момента укладки горячей смеси на подготовленное основание дороги и ведется непрерывно потоком комплекта машин на заданном участке дороги, обеспечивающих распределение и уплотнение горячей асфальтобетонной смеси. Эффективность работы механизированного звена машин определяется производительностью ведущей машины, в качестве которой принимается асфальтоукладчик. Выбор параметров асфальтоукладчика определяется темпом строительства покрытия. В процессе работы асфальтоукладчик обеспечивает не только заданный темп строительства с заданными параметрами укладываемого слоя, но и осуществляет предварительное уплотнение уложенной горячей смеси, а также обеспечивает фронт работы звену уплотняющих машин в заданном температурном интервале. Согласно рекомендациям, для обеспечения требуемого качества устройства покрытия длина укладываемой полосы должна быть более 10...15 м, т.е. должно соблюдаться условие [3, 45]

$$S_y \Rightarrow [S], \text{ м}, \quad (5.1)$$

где $[S]$ – рекомендуемая предельно минимальная длина участка уплотнения, м; S – длина полосы, укладываемая асфальтоукладчиком с учетом температурного интервала горячей смеси, м.

Длина укладываемой полосы смеси для работы первого и последующих катков, с учетом температурных режимов, устанавливается исходя из рабочей скорости укладчика и времени охлаждения смеси в заданных температурных границах. Можно записать

$$S_y = v_{a/y} \cdot \tau_{ук}, \text{ м}, \quad (5.2)$$

где $v_{a/y}$ – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; $\tau_{ук}$ – время укладки, зависящее от разницы температур смеси при укладке и началом уплотнения катками, мин.

Скорость укладки горячей смеси асфальтоукладчиком определяется условиями производства работ и у современных машин находится в пределах от 0,8 до 21,64 м/мин [3]. С учетом непрерывности строительства, для обеспечения требуемых качеств покрытия, необходимо, чтобы длина укладываемого слоя была равна длине захватки для всех уплотняющих машин в заданном температурном интервале асфальтобетонного слоя покрытия. Установление закономерности влияния производственных факторов на продолжительность укладки горячих ас-

фальтобетонных смесей позволяет обосновать технологические режимы работы асфальтоукладчиков в зависимости от условий производства работ. Зависимость времени укладки горячей смеси позволяет определять длину полосы укладки с учетом рекомендуемых температурных интервалов смеси при заданной скорости асфальтоукладчика, или при установленной длине захватки определять скорость укладки смеси в покрытие. В соответствии с рекомендациями для обеспечения сопряжения смежных полос длина захватки зависит от температуры воздуха (табл. 5.1) [3].

Температура укладки смесей с применением вязких битумов зависит от марки. Укладку горячих плотных, пористых и высокопористых смесей на вязких битумах марок 40/60, 60/90, 90/130 необходимо осуществлять при температуре смесей не ниже 120 °С; при использовании ПАВ – не ниже 100 °С; горячих смесей на битумах марок 130/200 и 200/300 и жидких битумов марки 130/200 – не ниже 90 °С; высокоплотных смесей и смесей на полимерно-битумных вяжущих – на 20 °С выше [41, 43, 47]. Минимально допустимая температура смеси при укладке, в зависимости от температуры воздуха, вязкости битума и толщины слоя, должна соответствовать данным, приведенным в табл. 5.2 [38, 47].

Из данных таблицы 5.2 видно, что между температурой воздуха и минимальной допускаемой температурой смеси при укладке существует прямая зависимость. Анализ рекомендуемых температур смесей при укладке показывает, что температура смеси при укладке зависит от свойств смеси, температуры воздуха, типа смеси и марки битума. Влияние температуры укладываемой смеси на качество предварительно уплотнения асфальтоукладчиками исследовалось А. Г. Масловым [26].

5.1. Влияние температуры воздуха на длину укладываемой полосы покрытия

Температура воздуха, °С	Длина укладываемой полосы, м, при количестве асфальтоукладчиков		
	одного		двух
	на защищенных от ветра участках	на открытых участках	
5 ...10	30...40	25...30	60...70
10...15	40...60	30...50	70...80
15...20	60...80	50...70	80...100
20...25	80...100	70...80	100...150
Свыше 25	100...150	80...100	150...200

5.2. Минимально допустимая температура смеси при укладке

Толщина слоя, м	Марка битума	Температура воздуха, °С							
		-10	-5	0	5	10	15	20	30
До 0,05	БНД 40/60, 60/90, 90/130	–	–	145	140	135	130	125	115
				155	150	145	140	135	120
0,05...0,10	БНД 40/60, 60/90, 90/130	–	–	135	130	125	120	115	105
				140	135	130	125	120	110
До 0,05	БНД 130/200, 200/300	125	120	115	110	105	100	95	90
		135	130	125	120	115	110	105	100
	БНД 130/200, 200/300	120	115	110	100	95	90	90	
		130	125	115	110	105	100	95	

Верхнее значение при скорости ветра 6 м/с, нижнее 6...13 м/с.

На основании проведенных исследований сделан вывод, что увеличение температуры смеси при укладке до 150 °С способствует повышению K_y и уменьшению водонасыщения. Дальнейшее повышение температуры смеси при укладке не оказывает существенного влияния на качество предварительного уплотнения.

Для определения длины полосы укладки асфальтоукладчиком, в зависимости от температурных условий, предложена зависимость [5]

$$L = K_1 K_2 h (c\gamma - 2t)v_1 v_2 / (a_1 - a_2)(v_1 - v_2), \quad (5.3)$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от температурных условий, численное значение которого определяется по формуле

$$K_1 = 7,5(t_{уп} - t_B) / (t_K - t_B), \quad (5.4)$$

где $t_{уп}$ – температура смеси в начале уплотнения, °С; t_B – температура воздуха, °С; t_K – допускаемая температура при сопряжении полос, принимается равной 60...70 °С; K_2 – коэффициент, учитывающий температуру основания. Рекомендуется принимать равным единице при условии равенства температур основания и окружающего воздуха и температуре воздуха 25 °С; при температуре воздуха свыше 25 °С, численное значение принимается равным 1,2; h – толщина слоя, м; c – удельная теплоемкость смеси, равная 0,3...0,4 ккал/(кг·°С); γ – требуемая плотность асфальтобетона, кг/м³; t – продолжительность первой хода асфальтоукладчика на смежную полосу, ч (принимается равной 0,064 ч); v_1 – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; v_2 – транспортная скорость асфальтоукладчика (м/мин), принимается равной 10...12 м/мин; a_1 – коэффициент теплоотдачи асфальтобетонной смеси

за счет излучения (принимается равной 6 ккал/кг·°C); a_2 – коэффициент теплоотдачи смеси за счет конвекции (при скорости ветра 1 м/мин принимается равным 5, если 10 м/мин – то 12, при большей скорости принимается равным 16).

Анализ предложенной зависимости показывает, что теплофизические свойства асфальтобетонной смеси принимаются постоянными и тип смеси не учитывается, что влияет на темп охлаждения слоя. Продолжительность укладки определяется температурой смеси слоя от момента его укладки до начала процесса уплотнения, что также не учитывается предложенной зависимостью.

Установлено, что режимы работы асфальтоукладчика (скорость движения, параметры работы вибрационной плиты и трамбуемого бруса) влияют на степень предварительного уплотнения слоя асфальтобетонной смеси, а, следовательно, на назначение машин в механизированное звено. Влияние режимов работы уплотняющих органов асфальтоукладчика на коэффициент предварительного уплотнения горячей смеси представлено на рис. 5.1 [16].

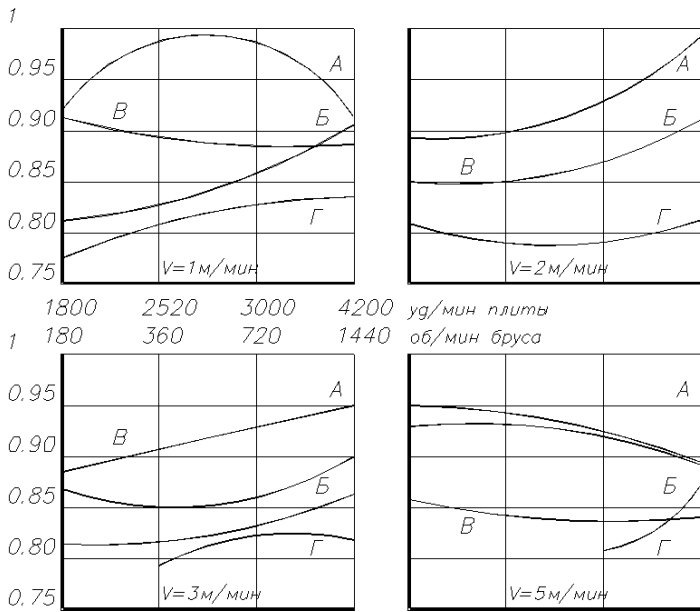


Рис. 5.1. Зависимость степени уплотнения асфальтобетонных смесей от режима работы уплотняющих органов при совместной работе трамбуемого бруса и вибрационной плиты асфальтоукладчика

Из представленных зависимостей видно, что режимы работы асфальтоукладчика (скорость движения, параметры работы вибрационной плиты и трамбуемого бруса) влияют на степень предварительного уплотнения слоя асфальтобетонной смеси, а, следовательно, на выбор параметров уплотняющих машин. Для смесей типа А рабочая скорость перемещения асфальтоукладчика оказывает существенное влияние на качество укладываемого слоя. При скорости укладки 1 м/мин и оптимальных параметрах вибрационной плиты коэффициент уплотнения слоя покрытия (K_y) равен единице, что соответствует нормативной плотности слоя после окончания работы уплотняющих машин. Для смеси типа Б коэффициент уплотнения имеет меньшее значение и соответствует 0,92. С увеличением скорости укладки, K_y снижается независимо от типа смеси. Для смесей типов В и Г скорость укладки смеси на качество предварительного уплотнения существенного влияния не оказывает и K_y имеет значения 0,9 и меньше. На основании этого можно сделать вывод, что при укладке смесей типа А, с целью уменьшения количества уплотняющих машин, скорость движения асфальтоукладчика должна быть в пределах 1–2 м/мин. При повышении скорости укладки, как и при укладке остальных типов смесей, скорость асфальтоукладчика не влияет на выбор звена катков, поскольку коэффициент предварительного уплотнения достигает незначительной величины (0,9...0,91) и для достижения требуемого уплотнения необходимо звено катков всех типов (легкий, средний, тяжелый).

Температура горячей асфальтобетонной смеси, отгружаемой потребителю, зависит от применяемого вяжущего и находится в пределах 160...70 °С. С учетом потерь тепла в окружающую среду в процессе транспортировки смеси к месту укладки температура снижается на определенную величину в зависимости от дальности и способа транспортировки. Существующими нормативными документами дальность транспортировки горячих асфальтобетонных смесей не регламентирована, и пригодность смеси к укладке осуществляется в виде контроля за температурой при доставке к месту производства работ. Температура смеси в начале уплотнения рекомендована СНиПом, что дает возможность определить температурные интервалы укладки горячей асфальтобетонной смеси в дорожное покрытие. В зависимости от типа смеси и марки битума температурные границы укладки горячих асфальтобетонных смесей представлены в табл. 5.3 [41].

Длина захватки при распределении асфальтобетонной смеси зависит от температуры смеси при укладке и климатических условий производства работ. Длительность процесса охлаждения горячей асфальтобетонной смеси, влияющего на работу механизированного звена машин, зависит также от толщины слоя. Толщина слоя покрытия должна быть не менее 0,03 м из песчаного асфальтобетона и 0,07 м для крупнозернистого [40].

5.3. Температурные границы укладки горячих асфальтобетонных смесей

Марка битума	Температура отгрузки потребителю	Температура начала уплотнения	
		Тип смеси	
		А и Б	В, Г, Д
БНД 40/60, 60/90, 90/130	160	120 – 160	100 – 130
БНД 130/200, 200/300	140	100 – 140	80 – 110

Установлено, что длительность охлаждения слоя горячей смеси в интервале температур 160...70 °С прямо пропорциональна температуре смеси при укладке покрытий различной толщины. Результаты расчетов представлены в табл. 5.4 и на рис. 5.2.

Полученные зависимости могут быть аппроксимированы следующими уравнениями в зависимости от толщины слоя:

$$\begin{aligned}
 0,03 \text{ м } \tau_{\text{ук}} &= 19,25 \ln t_{\text{ук}} - 88,34, \text{ мин;} \\
 0,05 \text{ м } \tau_{\text{ук}} &= 52,675 \ln t_{\text{ук}} - 242,5 \text{ мин;} \\
 0,08 \text{ м } \tau_{\text{ук}} &= 120,9 \ln t_{\text{ук}} - 555,3, \text{ мин;} \\
 0,10 \text{ м } \tau_{\text{ук}} &= 167,99 \ln t_{\text{ук}} - 773,65,77, \text{ мин,}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

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

5.4. Продолжительность охлаждения слоя горячей смеси в зависимости от марки битума (БНД 40/60, 60/90, 90/130; температура воздуха 20 °С; скорость ветра 0 м/с)

Толщина слоя, м		0,03	0,05	0,08	0,10
Температура смеси, °С	160	9,5	24,5	58,0	78,5
	150	8,0	21,0	50,0	68,0
	140	6,5	18,0	42,0	56,5
	130	5,5	14,0	34,0	44,0
	120	4,0	10,0	24,5	30,5
	110	2,5	5,0	14,0	16,0
	100	0	0	0	0

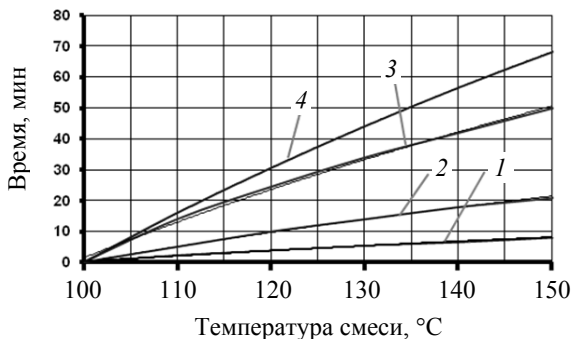


Рис. 5.2. Влияние температуры смеси на продолжительность охлаждения слоя покрытия в интервале температур 160...100 °С (для смесей типа А и Б на битумах марок БНД 40/60, 60/90, 90/130):
 1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – толщина слоя 0,05 м;
 3 – толщина слоя 0,08 м; 4 – толщина слоя 0,1 м

Аналогичные закономерности имеют место при укладке смесей на битумах марок БНД 130/200, 200/300. Следовательно, чем выше температура смеси при начале укладки слоя, тем больше времени приходится на обеспечение фронта работы для уплотняющих машин. Этот фактор является важным моментом при строительстве покрытий при пониженных температурах воздуха. Для уточнения влияния температуры смеси на процесс охлаждения слоя из горячих асфальтобетонных смесей представим данные табл. 5.4 в относительных величинах. Принимаем время охлаждения разных по толщине слоев при максимально допустимой температуре укладки за единицу (табл. 5.5). Обозначим влияние температуры смеси при укладке на время охлаждения слоя через коэффициент $K_{Тс}$ в относительных величинах, представляющий собой отношение времени охлаждения слоя при укладке с различной температурой смеси ко времени охлаждения слоя, уложенного при максимально допустимой температуре. Численные значения коэффициента влияния температуры смеси на продолжительность охлаждения, с учетом толщины слоя и марки битума, представлены в табл. 5.6.

Из данных таблицы видно, что коэффициент $K_{Тс}$ зависит от температуры смеси при укладке и не зависит от толщины слоя.. Численное значение $K_{Тс}$ определяется формулой

$$K_{Тс} = 0,015t_{см} - 1,45, \quad (5.6)$$

где $t_{см}$ – температура горячей смеси при укладке, °С. Коэффициент корреляции равен 0,99.

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

Толщина слоя, м	0,03	0,05	0,08	0,10	$\sum n/n$	Погрешность, %
Температура смеси, °С	160	1,0	1,0	1,0	1,0	–
	150	0,84	0,85	0,86	0,86	1,1
	140	0,7	0,73	0,72	0,72	2,7
	130	0,58	0,57	0,58	0,56	1,7
	120	0,40	0,41	0,42	0,39	4,7
	110	0,24	0,2	0,24	0,2	9,1
	100	0	0	0	0	–

С увеличением толщины укладываемого слоя время охлаждения возрастает более интенсивно, и зависимость носит нелинейный характер. На рисунке 5.3 представлены зависимости влияния толщины слоя смеси на время охлаждения при разных температурах смеси при укладке.

Анализ представленных зависимостей показал, что они характеризуются степенными зависимостями и могут быть рассчитаны по следующим уравнениям:

$$\begin{aligned}
 \text{при температуре смеси } 160 \text{ }^\circ\text{C } \tau &= 4486,8 h_{\text{сл}}^{1,75}, \text{ мин;} \\
 140 \text{ }^\circ\text{C } \tau &= 3914,7 h_{\text{сл}}^{1,81}, \text{ мин;} \\
 160 \text{ }^\circ\text{C } \tau &= 2717,6 h_{\text{сл}}^{1,76}, \text{ мин;} \\
 130 \text{ }^\circ\text{C } \tau &= 1168,9 h_{\text{сл}}^{1,77}, \text{ мин;}
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

где τ – время, мин; $h_{\text{сл}}$ – толщина слоя, м.

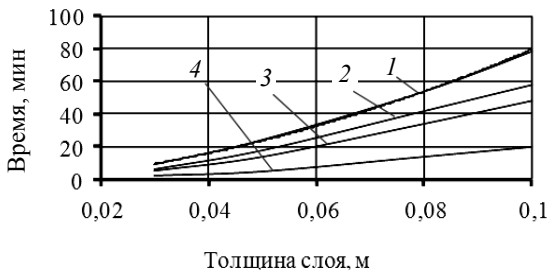


Рис. 5.3. Влияние толщины слоя на время охлаждения при разных температурах смеси при укладке, скорость ветра – 0 м/с:

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

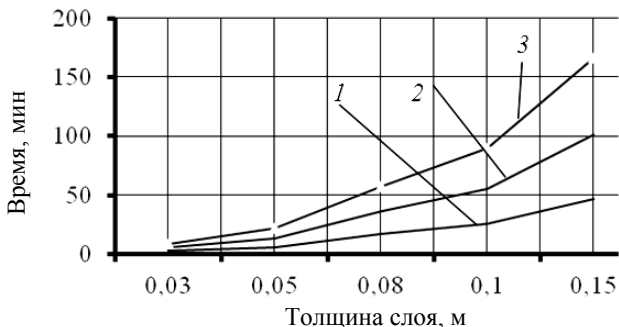


Рис. 5.4. Влияние толщины слоя на продолжительность охлаждения слоя смеси при различных температурах окружающего воздуха.

1 – при температуре воздуха – 10 °С; 2 – +5 °С; 3 – +30 °С

Из рисунка 5.3 видно, что с увеличением толщины укладываемого слоя время охлаждения слоя смеси в температурном интервале с момента укладки смеси и до начала процесса уплотнения, независимо от температуры смесей при укладке и температуры окружающего воздуха, увеличивается по степенной зависимости. На рисунке 5.5 представлены зависимости влияния толщины слоя на время охлаждения, полученные при разных температурах окружающего воздуха (от +5 до +40 °С).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при строительстве дорожных покрытий нежесткого типа при пониженных температурах воздуха, для увеличения продолжительности работ, эффективнее увеличивать толщину слоя покрытия по отношению повышения нагрева асфальтобетонной смеси.



Рис. 5.5. Зависимость времени охлаждения слоя от температуры воздуха для смесей типа А и Б на битумах марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 при разной толщине слоя покрытия

(температура смеси при укладке 160 °С, скорость ветра – 0 м/с):

1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Производство работ по устройству покрытий нежесткого типа допускается при минимальной температуре окружающего воздуха в летний период +5 °С [41, 42]. С целью уточнения влияния температуры окружающего воздуха на процесс охлаждения слоя смеси смоделированы тепловые процессы в слое покрытия при температуре смеси укладки 160 °С и скорости ветра 0 м/с. Результаты расчетов представлены на рис. 5.4.

Из представленных данных видно, что с повышением температуры окружающего воздуха время на укладку горячих асфальтобетонных смесей возрастает. Зависимость носит нелинейный характер, и с учетом толщины укладываемого слоя время укладки может быть определено по следующим формулам:

при толщине слоя

$$\begin{aligned} 0,03 \text{ м } \tau_y &= 4,82 e^{0,0071t}, \\ 0,05 \text{ м } \tau_y &= 12,46 e^{0,0086t}, \\ 0,08 \text{ м } \tau_y &= 29,77 e^{0,0089t}, \\ 0,10 \text{ м } \tau_y &= 47,12 e^{0,0071t}, \end{aligned} \quad (5.8)$$

где t – температура воздуха, °С; коэффициент корреляции данных уравнений равен 0,99.

Из представленных уравнений видно, что независимо от толщины слоя, зависимости характеризуются общей закономерностью, которую с учетом толщины слоя покрытия можно представить уравнением

$$\tau_y = K_h e^{\alpha t_b}, \text{ мин}, \quad (5.9)$$

где K_h и α – коэффициенты, зависящие от толщины слоя, численное значение которых можно определить по табл. 5.6.

В общем виде значение коэффициентов K_h можно определить по формуле

$$K_h = 4294 h_{\text{сл}}^{1,8}. \quad (5.10)$$

Продолжительность процесса укладки асфальтобетонной смеси зависит от скорости ветра, поскольку перемещение воздушных масс способствует отводу тепла в окружающую среду. На рисунке 5.6 и в табл. 5.7 представлены данные по продолжительности процесса охлаждения горячей смеси от скорости ветра (температура смеси при укладке 160 °С, температура воздуха 20 °С).

5.6. Зависимость коэффициентов K_h и α от толщины слоя покрытия

Толщина слоя, м	0,03	0,05	0,08	0,10
Значение K_h	7,56	19,73	47,60	64,32
Значение α	0,01	0,01	0,01	0,01



Рис. 5.6. Влияние скорости ветра на продолжительность охлаждения горячей смеси в заданном температурном интервале:
1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

5.7. Продолжительность процесса укладки асфальтобетонной смеси от скорости ветра

Толщина слоя, м	Скорость ветра, м/с					
	0	3	5	7	10	15
0,03	6,0	5,1	4,8	4,0	3,6	3,0
0,05	15	12,8	11,3	10,0	9,0	8,0
0,08	35	30,5	28,0	24,0	22,0	18,0
0,10	54	47,5	42,0	37,0	35,0	28,0

Продолжительность процесса укладки смеси в зависимости от толщины укладываемого слоя с учетом скорости ветра можно определить по следующим формулам:

при толщине слое

$$\begin{aligned}
 0,03 \text{ м } \tau_y &= 5,88 e^{-0,0147v}; \\
 0,05 \text{ м } \tau_y &= 14,31 e^{-0,0426v}; \\
 0,08 \text{ м } \tau_y &= 34,57 e^{-0,0448v}; \\
 0,10 \text{ м } \tau_y &= 52,86 e^{-0,0433v},
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

где v – скорость ветра, м/с; τ_y – продолжительность укладки смеси, мин.

Коэффициент корреляции находится в пределах 0,95...0,98.

Из представленных данных видно, что с увеличением скорости ветра время укладки уменьшается, и зависимость носит экспоненциальный характер. Следует отметить, что при укладке покрытия толщиной 0,03 м время охлаждения находится в пределах от 2 до 3 мин, что недостаточно для обеспечения фронта работы для уплотняющих машин. При укладке таких покрытий процесс уплотнения необходимо вести вслед за асфальтоукладчиком.

5.8. Влияние скорости ветра на продолжительность укладки (в относительных единицах)

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

Для установления влияния скорости ветра на время укладки слоя смеси представим данные табл. 5.7 в относительных величинах. Принимаем время укладки каждого слоя при нулевой скорости ветра за единицу (табл. 5.8).

Из представленных данных видно, что с возрастанием скорости ветра время на укладку горячей смеси уменьшается независимо от толщины слоя. В относительных величинах зависимость влияния коэффициента скорости ветра (K_v) представлена на рис. 5.7. Численное значение определяется по формуле

$$K_v = 0,98e^{-0,0466v}, \quad (5.12)$$

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



Рис. 5.7. Влияние скорости ветра на коэффициент K_v

В зависимости от места расположения объекта строительства и завода по приготовлению асфальтобетонных смесей температура отгрузки смеси потребителю и температура смеси в начале укладки могут значительно отличаться между собой, что влияет на процесс уплотнения и качество работ по устройству покрытия. В таблице 5.6 представлены данные по продолжительности охлаждения в зависимости от температуры смеси при укладке.

Представим данные таблицы в относительных величинах, принимая условно за единицу время окончания процесса укладки для данных смесей 100 °С. Принимая полученную относительную величину за коэффициент, учитывая нижнюю температурную границу укладки смеси, обозначим его K_{oy} . Тогда данные табл. 5.10 будут иметь вид (табл. 5.9).

Из данных таблицы видно, что численное значение K_{oy} не зависит от толщины слоя для данных марок битума и определяется по формуле

$$K_{oy} = -3,52 \ln(t_{oy}) + 17,86, \quad (5.13)$$

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

**5.9. Продолжительность процесса охлаждения смесей типа А, Б, В, Г, Д на битумах марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости от температуры начала уплотнения слоя покрытия после укладки при разной толщине слоя (мин).
Температура смеси начала укладки 160 °С**

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

5.10. Продолжительность процесса охлаждения смесей типа А, Б, В, Г, Д на битумах марок БН и БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости от окончания укладки при разной толщине слоя (мин) в относительных значениях

Температура смеси, °С		150	140	130	120	110	100
Толщина слоя, м	0,03	0,27	0,47	0,81	1	1,36	1,72
	0,05	0,23	0,46	0,7	1	1,26	1,63
	0,08	0,27	0,5	0,71	1	1,31	1,65
	0,10	0,22	0,45	0,71	1	1,32	1,69
$\Sigma n/n$		0,24	0,47	0,71	1	1,31	1,67

Ранее установлено, что независимо от температуры окружающего воздуха, закономерность влияния температуры основания на продолжительность работ носит общий характер и имеет вид

$$K_{\text{осн}} = 0,987e^{0,013\Delta t}, \quad (5.14)$$

где Δt – разница температур основания и окружающего воздуха, град; $K_{\text{осн}}$ – коэффициент влияния температуры основания. Коэффициент корреляции равен 0,97.

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

$$\tau_{\text{ук}} = K_h K_{\text{т.с}} K_v K_{\text{см}} K_{\text{ос}} e^{\alpha t_{\text{в}}} K_{\text{оу}}, \text{ мин.} \quad (5.15)$$

где K_h – коэффициент, зависящий от толщины укладываемого слоя покрытия; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; $K_{\text{т.с}}$ – коэффициент, зависящий от температуры смеси при укладке; K_v – коэффициент, зависящий от скорости ветра, м/с; $K_{\text{см}}$ – коэффициент, зависящий от типа смеси и марки битума; $K_{\text{ос}}$ – коэффициент, учитывающий температуру основания; $K_{\text{оу}}$ – коэффициент, учитывающий температуру при окончании укладки.

Сравнение экспериментальных данных продолжительности укладки горячих асфальтобетонных смесей типа А, для слоя толщиной 0,05 м с применением битума марки БНД 90/130, с расчетными данными представлено в табл. 5.11.

Зная продолжительность распределения горячей смеси асфальтоукладчиком и его рабочую скорость, с учетом уравнения (5.15), можно определить длину полосы укладки асфальтобетонной смеси. В таблице 5.12 приведены сравнительные данные по длине укладки асфальтобетонной смеси при устройстве покрытия с учетом существующих рекомендаций и результатов исследования, учитывающих конкретные условия производства работ по укладке горячей смеси (при рабочей скорости асфальтоукладчика 3 м/мин).

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

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

5.12. Сравнение длины полосы укладки асфальтобетонной смеси при устройстве дорожного покрытия при работе одного асфальтоукладчика

Температура воздуха, °С	Длина полосы по рекомендации, м	По результатам исследования			
		Температура смеси при укладки, °С	Температура основания, °С	Скорость ветра, м/с	Длина полосы укладки, м
16	47,9	160	16	3–4	42,9
18	53,7	140	18	3,0	21,0
29	101,7	130	40	–	19,5
30	107,8	150	42	–	45,6
42	216,2	160	45	–	58,5

Из представленных данных видно, что условия производства работ в значительной степени влияют на длину укладки полосы покрытия, а следовательно, на температурные режимы горячей смеси и процесс уплотнения асфальтобетонной смеси.

5.1. ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ОТДЕЛЬНЫМИ ПОЛОСАМИ

При производстве ремонтных работ и реконструкции дорожных одежд, при небольших объемах работ по устройству полос покрытия нежесткого типа, а также при недостаточной мощности асфальтобетонного завода укладку горячей смеси в пределах захватки выполняют одним асфальтоукладчиком (рис. 5.8). В этом случае за захватку принимают длину укладываемой полосы, равной сменной производительности асфальтоукладчика. Сопряженная полоса устраивается через сравнительно продолжительное время, в пределах которого температура уложенной смеси первой полосы снижается, и к моменту укладки сопряженной полосы равняется температуре воздуха или несколько

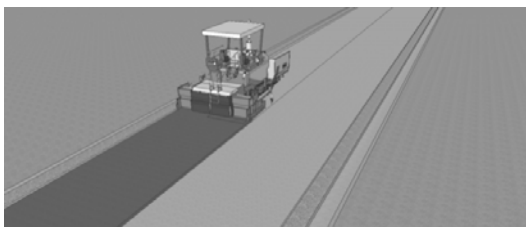


Рис. 5.8. Укладка асфальтобетонной смеси отдельными полосами покрытия одним асфальтоукладчиком

выше. Ширина укладываемой полосы асфальтобетонной смеси принимается равной ширине полосы движения транспортных средств. При такой технологии устройства покрытия обеспечивается движение транспортного потока при производстве работ и не требуются временные дороги. К недостаткам следует отнести образование при устройстве покрытия продольного шва на стыке сопряженных полос. Устранить отмеченный недостаток можно за счет обеспечения, в процессе уплотнения стыка сопряженных полос, температурных режимов применяемых горячих смесей. Инструкциями и нормативными документами предусматривается, перед укладкой второй полосы покрытия, производить прогрев края ранее уложенной полосы, но не уплотненной, на ширину 0,1...0,15 м до температуры 70...80 °С [45]. Современные конструкции разогревателей позволяют разогревать асфальтобетон слоем 30...40 мм за 2–3 мин до температуры 80...100 °С. До начала укладки новой полосы вертикальный край ранее уложенного асфальтобетона смазывается битумной эмульсией. При сопряжении смежных полос, перед укладкой второго слоя, разогреватель перемещают со скоростью, обеспечивающей нагрев асфальтобетона до температуры 70...80 °С по краю ранее уложенной полосы асфальтобетона на ширину 100...150 мм, который не подвергается уплотнению. Вновь устраиваемая полоса соприкасается в этом случае с разогретым краем ранее устроенной полосы, который уплотняется одновременно с новой полосой. В некоторых случаях, при небольших объемах работ, для нагрева края ранее уложенной полосы применяют способ нагрева за счет температуры сопряженного слоя. В этом случае при укладке параллельной полосы накладывают слой горячей смеси на край первой полосы. За счет передачи теплового потока от сопряженного слоя край полосы нагревается до определенной температуры, величина которой зависит от условий производства работ и применяемых смесей.

Качество строительства дорожных покрытий нежесткого типа в значительной степени зависит от обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении горячих асфальтобетонных смесей. Для обеспечения требуемых характеристик асфальтобетона по ширине покрытия необходимо обеспечить температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси в зоне сопряжения полос. Нарушение этого условия не позволяет достичь требуемых параметров уплотнения (коэффициент уплотнения, водонепроницаемость, плотность), что в процессе эксплуатации дороги способствует образованию дефектов в виде трещин, выкрашивания, образования выбоин. Установлено, что распределение температуры по ширине полосы покрытия неравномерно. В крайних точках полосы покрытия охлаждение горячей смеси происходит более интенсивно, чем в центре (рис. 5.9).

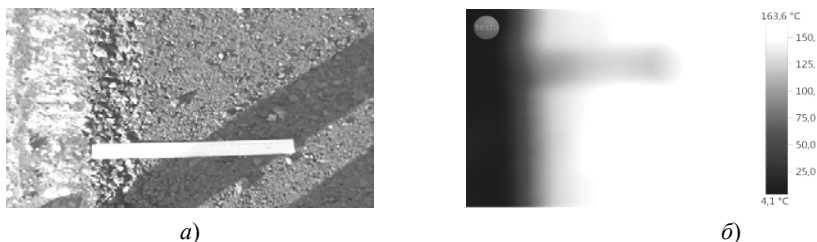


Рис. 5.9. Внешний вид стыка полос дорожного покрытия (а) и тепловизионная съемка распределения температуры горячей смеси по ширине на стыке полос покрытия (б)

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

При устройстве многополосного дорожного покрытия одним укладчиком температура смеси на стыке полос зависит от конкретных условий производства работ (погодные условия, конструкции дорожной одежды, условия работы и т.д.). Поэтому для обеспечения температурных режимов горячей смеси предусматривается осуществлять дополнительный нагрев края уложенной ранее полосы разогревателями асфальтобетона (типа КР-53А или КР-10), а также допускается осуществлять нагрев за счет температуры слоя горячей смеси смежной полосы покрытия [3 – 9]. С этой целью при укладке сопряженной полосы покрытия горячую смесь новой полосы накладывают на уложенный ранее слой первой полосы. За счет теплопередачи от верхнего слоя горячей смеси происходит нагрев ранее уложенного слоя смеси. Согласно существующим рекомендациям, при такой технологии, остывшую кромку ранее уложенной полосы обрубают в вертикальной плоскости по высоте слоя, обмазывают жидким битумом и сверху укладывают горячую смесь шириной 10...20 см. После разогрева кромки полосы смесь сдвигают на укладываемую полосу [1, 45]. Следует заметить, что применение такой технологии научно не обосновано, так как отсутствуют рекомендации по ее применению и не выяснено влияние различных факторов на процесс нагрева ранее уложенного слоя покрытия. Процесс нагрева края ранее уложенной полосы за счет температуры асфальтобетонной смеси сопряженного слоя можно представить моделью, изображенной на рис. 5.10.

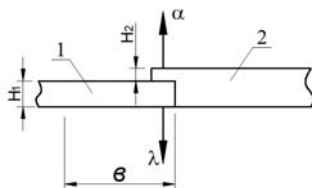


Рис. 5.10. Модель передачи тепла от слоя горячей смеси ранее уложенной асфальтобетонной смеси в полосу покрытия:

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

2 – асфальтобетонная смесь сопряженной полосы дорожного покрытия;

h_i – толщина слоя асфальтобетонной смеси, м; λ_i – коэффициент теплопередачи асфальтобетонной смеси; α – коэффициент теплоотдачи, численное значение которого зависит от скорости перемещения воздушных масс

Значение коэффициентов теплоотдачи (α) и теплопередачи определяется выражением 2.2.

Коэффициент теплопередачи асфальтобетонной смеси (λ) зависит от температуры горячей смеси и объемной массы. При расчете температурных режимов использовалась зависимость, полученные на основании экспериментальных данных, представленных в главе 2 (выражения 2.2, 2.14).

При разработке математической модели приняты следующие допущения:

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

- ширина перекрываемого слоя сопряженных полос зависит от толщины слоя покрытия и находится в пределах 0,3...05 м;

- в начальный момент времени температура горячей смеси по толщине слоя имеет одинаковую величину;

- укладываемый материал в выбоину однородный;

- потери тепла происходят через верхнюю поверхность слоя за счет теплового излучения и конвективного обмена в атмосферу, а также через боковую поверхность полосы за счет теплопроводности материала;

- направление тепловых потоков принимается перпендикулярно к поверхности выбоины;

- потери тепла в основание выбоины происходят через нижнюю поверхность слоя за счет теплопроводности материала;

- сцепление слоев обеспечивает достаточный термоконттакт;

- температура окружающей среды и скорости воздушных масс с момента укладки слоя смеси и до окончания процесса уплотнения остаются постоянными.

– ширина перекрытия сопряженных полос значительно больше толщины слоя, и тепловой поток передается за счет контактной поверхности слоев.

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

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

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{h=0} = \alpha [t(0; \tau) - t_{\text{в}}]; \quad (5.16)$$

– условие равенства тепловых потоков на границах контакта сопряженных полос покрытия имеет вид

$$\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial y_i} \Big|_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial t_{i+1}}{\partial y_{i+1}} \Big|_{y_i=y_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad (5.17)$$

$$\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial y_i} \Big|_{x_i=b_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial t_{i+1}}{\partial x_{i+1}} \Big|_{x_i=x_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (5.18)$$

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

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

$$t_{\text{нагр}} = f(t_{\text{смеси}}; t_{\text{возд}}; h_{\text{слоя}}; h_{\text{од}}; t_{\text{осн}}; v_{\text{в}}; \tau_{\text{нагр}}), \quad (5.19)$$

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

Моделирование тепловых процессов осуществлялось с помощью программ для расчета температурных режимов асфальтобетонных покрытий [10, 14]. Температура нагрева края полосы покрытия при распределении горячей смеси по верху слоя зависит от количества тепла,

передаваемого от температуры массы распределенной горячей смеси. В таблицах 5.13 и 5.14 представлены результаты моделирования тепловых процессов при разной относительной толщине слоев покрытия и температуры смеси.

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

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

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

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

5.15. Влияние температуры горячей смеси на значение коэффициента, зависящего от относительной толщины слоя нагрева

Температура укладываемой смеси, °С	180	160	150	140	120	100
Температура смеси по оси сопряженной полосы, °С	85	83	75	71	60	56
Температура нагрева поверхности первой полосы, °С	58	53	51	48	44	39
Время достижения максимальной температуры слоя, мин	6...7	5...8	6...7	5...8	5...7	6...7
Температура нагрева нижней части полосы, °С	16	16	16	16	16	16

По результатам моделирования получены также значения температуры при относительной толщине слоев 1,5 и 2,0. Для установления общей закономерности влияния относительной толщины слоев на нагрев нижнего слоя покрытия, результаты нагрева первого слоя покрытия представлены в относительных величинах. За единицу принята температура нагрева при относительной толщине слоев, равной единице (см. табл. 5.15 и рис. 5.11).

Обозначим полученную величину через коэффициент влияния относительной толщины слоя на нагрев нижнего слоя полосы покрытия. Численное значение коэффициента можно определить из выражения

$$K_h = 1,049(h_2 / h_1)^{0,22} . \quad (5.20)$$

Коэффициент корреляции равен 0,95.

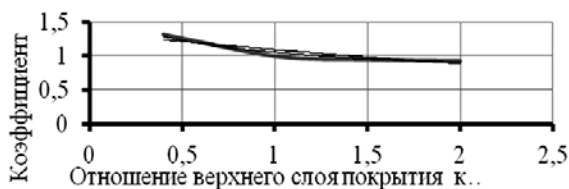


Рис. 5.11. Значение коэффициента влияния толщины слоя горячей смеси от толщины слоя полосы покрытия

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

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

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

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

Известно, что темп охлаждения горячей асфальтобетонной смеси зависит от температуры окружающего воздуха. В таблицах 5.16 и 5.17 представлены значения температуры нагрева нижнего слоя дорожного покрытия при постоянной относительной толщине слоя и температуре воздуха 5 и 30 °С.

Из представленных данных видно, что температура воздуха влияет на температурные режимы горячей смеси, следовательно, на нагрев нижнего слоя покрытия. Исследуя влияние температуры воздуха на температурные режимы в диапазоне 5...40 °С, получены значения температуры нагрева края полосы покрытия под слоем горячей смеси при относительной толщине слоев, равной единице. Принимая значения температуры нагрева нижнего слоя покрытия при температуре воздуха 20 °С за единицу, установлено значение коэффициента влияния температуры воздуха на процесс нагрева ранее уложенной полосы

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

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

асфальтобетонной смеси при укладке на нее горячей смеси, которая имеет вид

$$K_t = 0,862e^{0,007t_b}, \quad (5.21)$$

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

Известно, что в зависимости от времени укладки сопряженной полосы покрытия, температура смеси ранее уложенной полосы будет иметь разное значение. С целью выявления закономерности влияния температуры края ранее уложенной полосы на ее нагрев за счет температуры смеси при распределении второй полосы, произведено моделирование тепловых процессов, результаты которых представлены в табл. 5.18.

Из данных табл. 5.18 видно, что с повышением температуры смеси края полосы, нагрев за счет горячей смеси достигает более высокой температуры. Для уточнения влияния на нагрев ранее уложенной полосы покрытия за счет температуры горячей смеси при распределении по краю полосы покрытия горячей смеси сопряженного слоя, представим данные таблицы в относительных величинах, приняв величину нагрева смеси при температуре воздуха за единицу (табл. 5.18). Обозначим величину, характеризующую влияние температуры края полосы на нагрев смеси через коэффициент влияния температуры асфальтобетона на краю полосы (k_t).

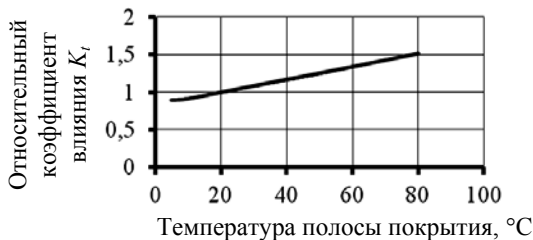


Рис. 5.12. Зависимость коэффициента K_t от температуры края полосы на нагрев от слоя горячей смеси

Численное значение коэффициента K_t определяется зависимостью

$$K_t = 0,864e^{0,007t_{\text{пок}}}, \quad (5.22)$$

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

Нагрев ранее уложенной полосы покрытия в значительной степени зависит от температуры распределяемой горячей смеси сопряженной полосы. Результаты моделирования влияния температуры горячей смеси при ее распределении по поверхности ранее уложенной полосы покрытия представлены на рис. 5.12. Из представленных результатов видно, что с повышением температуры смеси при распределении по верх слоя покрытия, нагрев осуществляется более интенсивно.

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

$$t_{\text{нагр}} = 27,73e^{0,005t_{\text{см}}} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5.23)$$

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

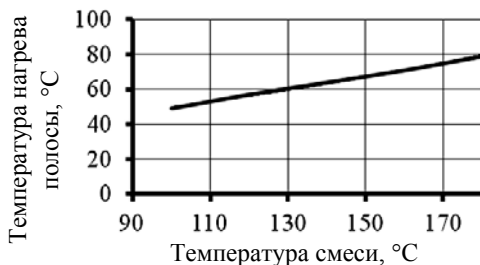


Рис. 5.13. Влияние температуры горячей смеси на нагрев ранее уложенной смеси покрытия

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

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

$$t_{\text{нагр}} = 20,63K_{\text{н}} e^{0,005t_{\text{см}} + 0,007t_{\text{в}} + 0,007t_{\text{осн}}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5.24)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5.1.1. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОНА В ЗОНЕ СТЫКА СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛОС ПОКРЫТИЯ

При разработке математической модели распределения температуры горячего материала приняты следующие допущения:

- температурные режимы укладки и уплотнения горячей смеси при производстве работ покрытия нежесткого типа зависят от типа смеси, марки битума и ограничены во времени температурным интервалом 160...50 °С;
- толщина укладываемого слоя горячей смеси находится в пределах от 0,03 до 0,3 м;
- в начальный момент времени распределения смеси температура по толщине слоя имеет одинаковую величину;
- укладываемый материал однородный;
- потери тепла происходят через верхнюю поверхность слоя за счет теплового излучения и конвективного обмена в атмосферу и через боковые поверхности полосы за счет теплопроводности материала;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярно к поверхности слоя;
- потери тепла в основание происходят через нижнюю поверхность слоя за счет теплопроводности материала;
- сцепление слоев обеспечивает достаточный термоконттакт;
- температура окружающей среды и скорости воздушных масс с момента укладки слоя смеси и до окончания процесса уплотнения остаются постоянными.

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

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

$$\lambda_1 \partial t / \partial y |_{h=0} = \alpha [t(0; \tau) - t_B]; \quad (5.25)$$

- условие равенства тепловых потоков на границе контакта горячей смеси и ранее уложенного слоя полосы покрытия имеет вид

$$\lambda_i \partial t_i / \partial y_i |_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \partial t_{i+1} / \partial y_{i+1} |_{y_i=y_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (5.26)$$

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

При разработке аналитической модели использовано уравнение теплопроводности для изотропной неоднородной среды, которая имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_v T) \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{dT}{dx} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{dT}{dy} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_3 \frac{dT}{dz} \right), \quad (5.27)$$

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

В основе аналитической модели теплопроводности используется модель теплового потока, определяемая уравнением Био–Фурье [41]:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (5.28)$$

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

Производство работ с применением горячих асфальтобетонных смесей выполняется при разных температурах поставляемой смеси, что влияет на величину коэффициента теплопроводности. Численное значение коэффициента теплопроводности, в зависимости от плотности и температуры, определялось из выражения (2.11).

Передача теплоты конвекцией основана на законе Ньютона–Рихмана при условии, что тепловой поток Q от стенки к воздуху пропорционален поверхности теплообмена и разности температур между температурой твердой стенки T_c и температурой воздуха T_b . В модели использовалась зависимость, основанная на экспериментальных данных, согласно которым охлаждение горячей асфальтобетонной смеси в тонком слое, независимо от ее состава, температуры воздуха и скорости ветра подчиняется экспоненциальному закону [17]:

$$\text{Ln} \left(\frac{T_0 - T_b}{T_p - T_b} \right) = m\tau = \frac{2\lambda}{\gamma h} t, \quad (5.29)$$

где T_p – температура смеси в расчетный момент времени, °C; m – скорость охлаждения, °C⁻¹; λ – коэффициент теплоотдачи смеси, Вт/(м·°C); c – теплоемкость смеси, Дж/(кг·°C); γ – объемная масса смеси, кг/м³; h – толщина слоя смеси, м.

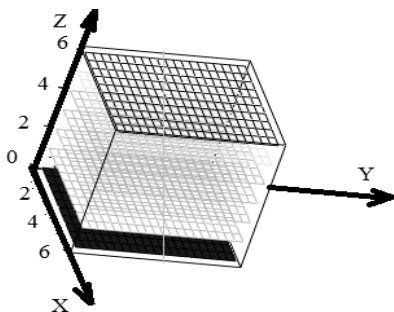


Рис. 5.14. Топология сеточной модели

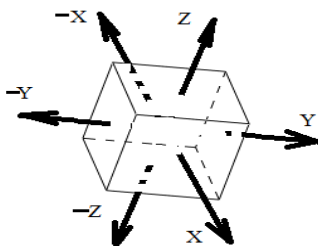


Рис. 5.15. Элемент модели

Построение имитационной модели производилось на основе сеточной модели, включающей в себя 7 горизонтальных слоев (рис. 5.14) с разбивкой каждого слоя на однородные прямоугольные параллелепипеды (рис. 5.15), между которыми осуществлялся теплообмен через боковые грани в вертикальной \overline{OZ} и горизонтальной \overline{OXY} плоскостях в соответствии с формулами (5.23 – 5.24) с использованием метода Монте-Карло.

Верхний слой ($Z=6$) является воздушным слоем, расположенным непосредственно над дорожной одеждой, где производятся работы. Нижний слой ($Z=0$) – основание выбоины. Остальные слои – укладываемая асфальтобетонная смесь. Однородность параллелепипедов подразумевает их одинаковые массовые и, следовательно, теплоэнергетические характеристики при незначительных изменениях (до 25 %) по высоте.

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

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

Стохастическое моделирование коэффициентов теплопроводности λ состояло в имитации на каждом шаге моделирования коэффи-

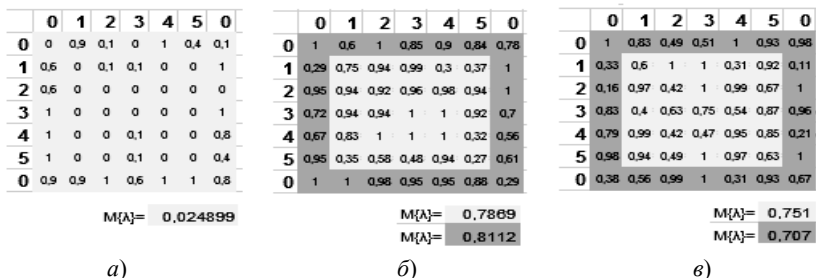


Рис. 5.16. Моделирование коэффициентов теплопроводности:

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

циентов теплопроводности для каждой из 6 граней прямоугольного параллелепипеда (рис. 5.16) сеточной модели, сгруппированных в виде трех матриц:

– матрица коэффициентов конвекционного теплообмена воздушных масс (рис. 5.16, а) в верхнем слое сеточной модели (3), где $\lambda_0 = 0,022...0,026$ Вт/(м·°С);

– матрица коэффициентов диффузионного теплообмена (рис. 5.16, б) для всех средних слоев сеточной модели (3), где $\lambda_0 = 0,70...0,75$ Вт/(м·°С);

– матрица коэффициентов диффузионного теплообмена (рис. 5.21, в) для нижнего слоя сеточной модели (3), где $\lambda_0 = 0,70...0,8$ Вт/(м·°С).

Следует заметить, что элемент модели для каждого слоя укладываемой смеси (рис. 5.16, 5.17, 5.20, 5.21) имеет координаты: $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 0\} \times \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 0\}$, а если одна из координат – нулевая, то это пограничный слой старого покрытия по отношению к укладываемому.

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

Начальное задание распределения температуры основания выбоины и поверхности уложенной смеси получено за счет оцифровки изображения тепловизора (рис. 5.17).

На рисунках 5.16, 5.17, 5.18, 5.20 поле температур привязано к единой шкале градаций температур, приведенной на рис. 5.18.

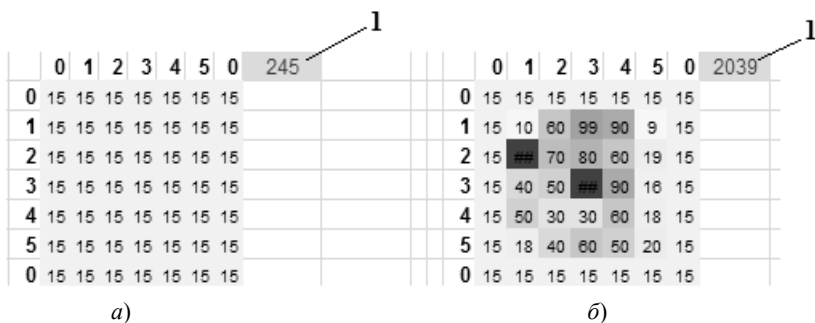


Рис. 5.17. Граничные условия модели:

I – суммарная теплота слоя;

a – температура основания выбоины b – температура верхнего слоя смеси

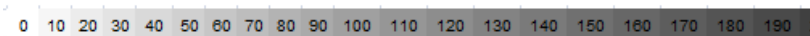


Рис. 5.18. Шкала градиций температур

Стохастическая модель теплообмена основана на том, что каждый конечный элемент модели в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 5.20) разбивается на шесть подэлементов в виде пирамид, каждая из которых имеет в качестве основания соответствующую грань прямоугольного параллелепипеда и общую для всех вершину – центр данного параллелепипеда (рис. 5.18). Модель теплообмена основывается на формуле (5.19). При этом, для каждого слоя i асфальтобетонной смеси рассчитываются две матрицы: матрица T_{ij} – распределение температуры слоя i на шаге итерации j и матрица $T_{i, j+1}$ – распределение температуры слоя i на шаге итерации $j+1$. При этом задействуются однородные по принципу вычисления процедуры, включающие шесть операций суммирования, обеспечивающие определение температуры каждого сеточного элемента модели (рис. 5.26) на основе сопоставления температур его шести подэлементов с их соответствующими подэлементами-соседями.

Используя формулу (5.26) и данные, приведенные на рис. 5.17, несложно получить матрицу $T_{i, j+1}$, исходя из матрицы T_{ij} .

На рисунках 5.20 и 5.21 приведены результаты распределения температур для первого и $j=10$ шагов моделирования соответственно для первого, третьего и последнего слоя асфальтобетонной смеси.

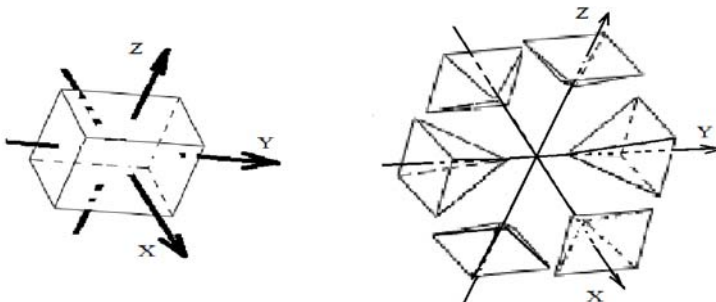


Рис. 5.19. Структура модели теплообмена

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

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

	0	1	2	3	4	5	0
0	15	15	15	15	15	15	15
1	15	15	15	15	15	15	15
2	15	15	15	15	15	15	15
3	15	15	15	15	15	15	15
4	15	15	15	15	15	15	15
5	15	15	15	15	15	15	15
0	15	15	15	15	15	15	15

Рис. 5.20. Начальное межслоевое распределение температуры

	0	1	2	3	4	5	0
0	13	22	17	15	18	20	19
1	18	20	15	30	45	20	16
2	22	30	60	90	70	25	22
3	19	22	40	70	80	50	29
4	18	33	40	29	20	35	17
5	22	29	32	17	21	20	14
0	19	23	17	25	26	17	21

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

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

Рис. 5.21. Распределение температуры после 10 шагов моделирования

В модели натурального эксперимента предлагается оценить адекватность построенной модели и данных, полученных с помощью тепловизора.

Известно, что численное значение суммарного коэффициента теплоотдачи асфальтобетонной смеси находится в пределах от 15,6 до 20,4 Вт/м²·°С, и повышение скорости ветра на 1 м/с увеличивает значение коэффициента на 2,236 Вт/м²·°С [17]. С целью уточнения теплофизических характеристик горячих асфальтобетонных смесей были использованы экспериментальные данные, полученные в процессе производства работ при ремонтных работах на дорожных покрытиях в г. Тамбове при разных температурах окружающего воздуха. Данная программа позво-

ляет с использованием экспериментальных данных моделировать тепловые процессы с применением горячих смесей и определять температуру горячей смеси в любой точке уложенного объема материала.

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

При строительстве многополосных покрытий нежесткого типа технологией работ предусматривается осуществлять нагрев стыка ранее уложенной полосы асфальтобетонной смеси за счет температуры укладываемой горячей смеси сопряженной полосы. С целью выяснения возможности нагрева края уложенной ранее полосы за счет температуры горячей асфальтобетонной смеси сопряженной полосы проведены экспериментальные исследования, в процессе которых контролировался процесс передачи тепла от одной вырубке асфальтобетона с размерами 100×100 мм к другому. Нагрев асфальтобетонного образца осуществлялся в сушильном шкафу до температуры 120° в течение 4 часов, температура холодного образца и воздуха составляла 13°C . Измерение температуры и динамика процесса нагрева и охлаждения образцов производилась термометрами и тепловизионной камерой (testo 880). Результаты измерения температуры на стыке полос в виде теплового изображения и динамика нагрева–охлаждения стыка краев сопрягаемых полос асфальтобетонного покрытия во времени представлены на рис. 22 – 24. Из представленных данных видно, что для нагрева холодного стыка полосы требуется определенное время, зависящее от величины теплового потока и теплофизических характеристик материала. Результаты измерения температуры в зоне стыка полос представлены в табл. 5.19.

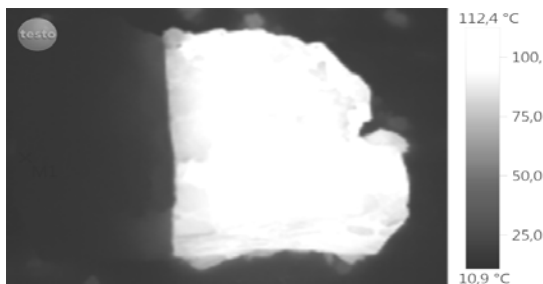


Рис. 5.22. Тепловое изображение стыка, 5 мин после стыка образцов асфальтобетона (температура воздуха 13°C , температура основания 13°C , начальная температура смеси 120°C , начальная температура холодной смеси 12°C , скорость ветра от 0 м/с)

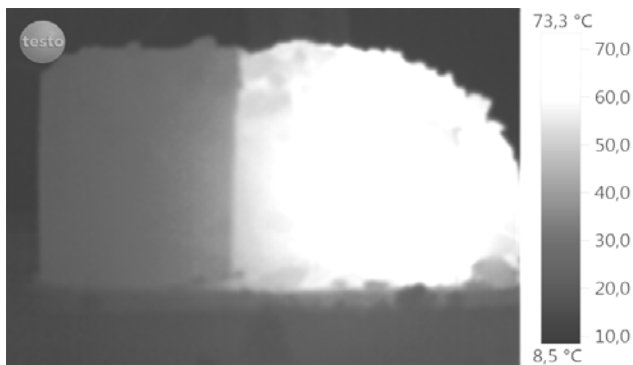


Рис. 5.23. Тепловое изображение стыка через 20 мин после совмещения образцов

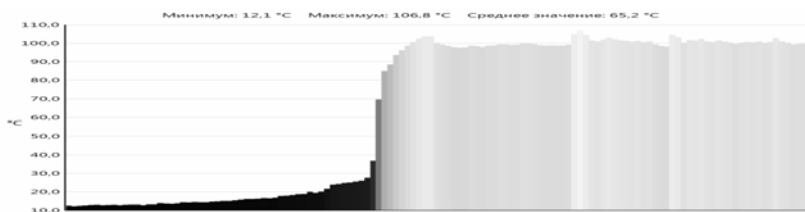
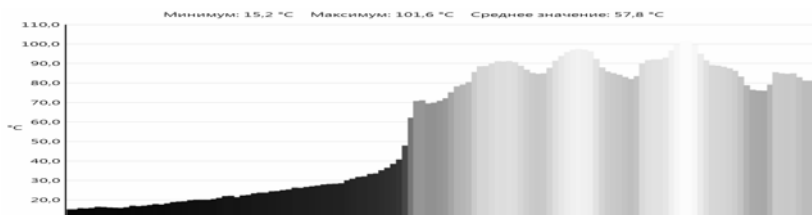
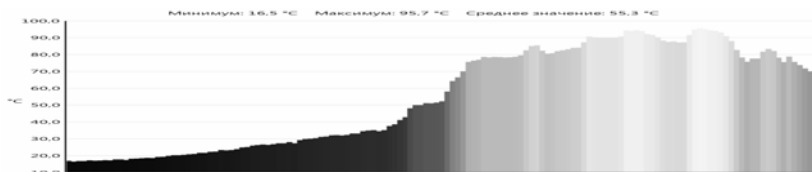


Диаграмма распределения температуры в зоне стыка, 5 мин после совмещения образцов

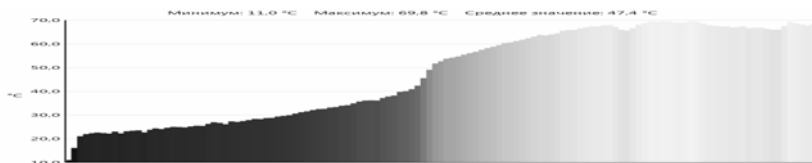


10 мин после совмещения образцов

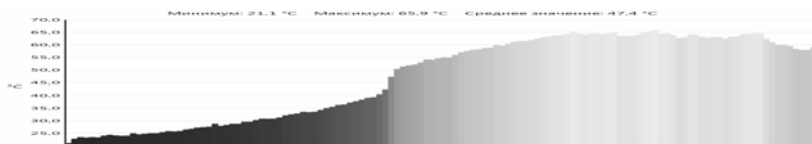


15 мин после совмещения образцов

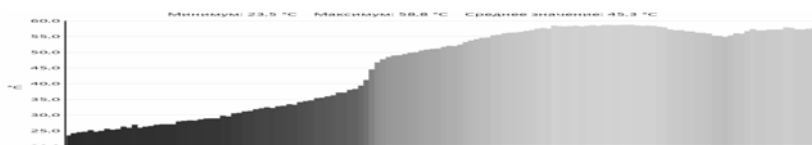
Рис. 5.24. Динамика нагрева охлаждения во времени стыка края сопрягаемых полос асфальтобетонного покрытия



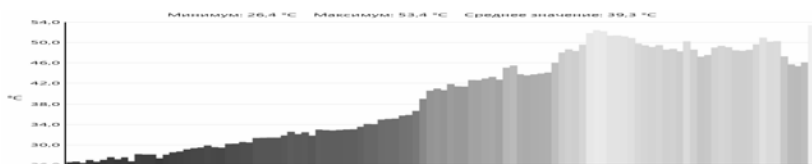
20 мин после совмещения образцов



25 мин после совмещения образцов



30 мин после совмещения образцов



35 мин после совмещения образцов

Рис. 5.24. Продолжение

5.19. Результаты измерения температуры в зоне стыка полос

Время, мин	Температура на крае уложенной полосы, °C	Температура в центре	Температура на стыке холодной полосы	Температура на стыке горячей полосы	Температура в центре горячей полосы	Температура на крае горячей полосы
13,11	12	12,3	33	80	105	97
13,12	12,6	14,7	46	77	102	85
13,16	14,5	18	45	64	92	70
13,18	16	23,5	56	58	85	63
13,22	18	25	45	52	71	55
13,26	20	28	42	45	67	49
13,33	23	29	40	49	61	45
13,38	25	30	36	40	55	41
13,44	25	31	35	36	50	35

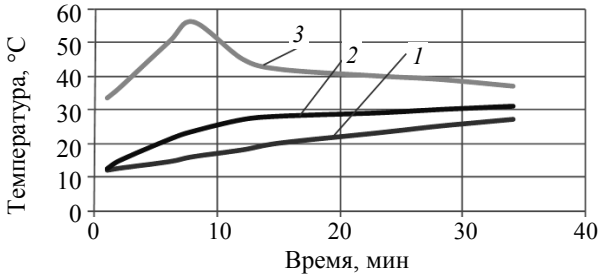


Рис. 5.25. Изменение температуры асфальтобетона в слое холодной вырубki покрытия при нагреве за счет передачи тепла от сопряженного слоя покрытия:

1 — край полосы контакта с воздухом; 2 — по оси вырубki;
3 — в зоне контакта с горячим слоем вырубki

Установлено, что имеется различие в характере изменения температуры в зоне стыка холодного и горячего асфальтобетона. На рисунке 5.25 представлены результаты измерения температуры в зоне стыка асфальтобетона с пониженной температурой.

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

В зоне стыка горячего асфальтобетона процесс охлаждения подчиняется общим законам теплопередачи тепла и характеризуется экспоненциальной зависимостью (рис. 5.26).

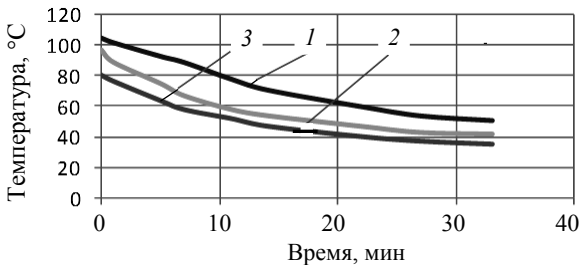


Рис. 5.26. Изменение температуры асфальтобетона в слое горячей вырубki:

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

Из представленных данных видно, что температура асфальтобетона по ширине полосы распределяется неравномерно. Наиболее низкая температура после укладки соответствует зоне стыка полос за счет коэффициента теплопередачи (λ) от одной полосы покрытия другой.

5.2. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОВ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЧ К УСТРОЙСТВУ МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Экспериментальными исследованиями доказано, что под действием солнечной радиации температура покрытия, а, следовательно, и нижележащий слой дорожной одежды может прогреваться до температуры 30...60 °С в зависимости от климатических условий. Это способствует увеличению времени на строительство покрытий. При строительстве многополосных покрытий автомобильных дорог, когда сопрягаемые полосы покрытия укладываются в разное время, в зоне стыка полос происходит передача тепла от одной полосы к другой за счет теплопередачи горячей смеси. Моделирование процесса нагрева – охлаждения смеси полосы с низкой температурой и смеси полосы с более высокой температурой, происходит по одинаковому закону, хотя между ними существуют определенные различия. В зоне стыка сопрягаемых полос покрытия асфальтобетон с пониженной температурой за счет теплопередачи от полосы с более высокой температурой нагревается до определенной температуры и затем происходит охлаждение обеих полос покрытия. В этот промежуток времени в асфальтобетоне происходят сложные тепловые процессы, характерные для нестационарных тепловых процессов. Характер процесса нагрева – охлаждения асфальтобетона в зоне стыка – представлен на рис. 5.25 и 5.26.

Анализ распределения температуры на стыке сопрягаемых полос показал, что распределение температуры по толщине слоя происходит неравномерно за счет отдачи тепла в окружающую среду и нижележащий слой основания. Передача тепла в зоне стыка по поверхности соприкосновения слоев способствует повышению отдачи тепла от горячего слоя покрытия за счет коэффициента теплопередачи к слою с низкой температурой, что приводит к повышению интенсивности охлаждения горячей смеси по отношению к оси полосы. Экспериментально установлено, что ширина зоны полосы снижения температуры в слое горячей смеси находится в пределах 0,1...0,2 м. Установлено, что продолжительность периода нагрева асфальтобетона в зоне стыка зависит от разницы температуры полос покрытия и толщины укладываемого слоя. На рисунке 5.32 представлено распределение температур

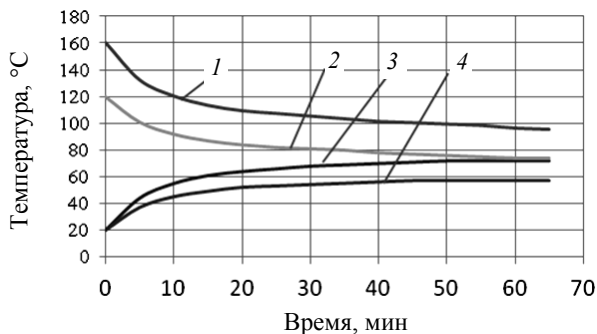


Рис. 5.27. Распределение температуры горячей смеси на стыке сопрягаемых полос покрытия при температуре воздуха 20 °С:

1, 2 – температура нового слоя;
3, 4 – температура края ранее уложенного слоя покрытия

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

Установлено, что продолжительность интенсивного нагрева края полосы с пониженной температурой не зависит от температуры горячей смеси сопряженной полосы, и при равной толщине укладываемого слоя находится в пределах 15 – 20 мин (рис. 5.28).

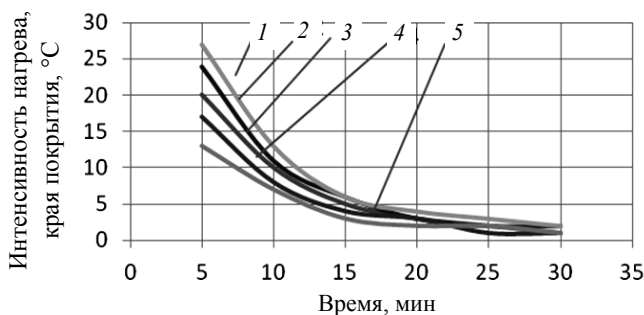


Рис. 5.28. Характер изменения интенсивности нагрева края ранее уложенной полосы от температуры смеси сопрягаемой полосы при температуре воздуха 20 °С:

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

5.20. Продолжительность этапа интенсивного прогрева асфальтобетона

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

Распределение температуры на стыке полос покрытия при процессе «нагрев–охлаждение» позволяет сделать вывод, что на стыке полос покрытия происходит нестационарный тепловой процесс. При погрешности расчетов в 5 % продолжительность нагрева принимается в пределах $Fo = 0,12$, где Fo – критерий Фурье [27]. При принятых толщинах укладываемых слоев продолжительность этапа интенсивного прогрева асфальтобетона в стыке сопрягаемых полос составляет (табл. 5.20).

На втором этапе тепловой процесс протекает по законам регулярного режима, при котором слой смеси равномерно охлаждается вместе с подогретым основанием. Темп охлаждения смеси, достаточной для практических целей, определяется по зависимости (2.3). Такую закономерность принято считать действительной при соблюдении условия [27]

$$H/2(a\tau)^{1/2} > 0,6, \quad (5.30)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, определяемый выражением

$$a = \lambda/c\gamma, \text{ м}^2/\text{ч}. \quad (5.31)$$

Результаты расчетов по соблюдению данного условия представлены в табл. 5.21.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что процесс укладки и уплотнения горячих смесей в дорожное покрытие меньше, чем рассчитанные критические значения. Следовательно, процесс охлаждения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей соответствует общим законам нестационарных теплопередач. Поэтому можно принять, что изменение температуры на стыке сопрягаемых полос покрытия подчиняется законам нестационарных теплопередач, что необходимо учитывать при расчете температурных режимов горячих асфальтобетонных смесей при устройстве многополосных дорожных покрытий.

5.21. Влияние толщины слоя покрытия на критическое время

Толщина слоя, м	0,03	0,05	0,10
Время, ч	1,45	2,41	4,83

5.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ ПРИ КЛАДКЕ ГОРЯЧЕЙ СМЕСИ С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Экспериментальными исследованиями установлено, что при распределении и предварительном уплотнении горячей асфальтобетонной смеси, независимо от ширины полосы покрытия, в поперечном профиле покрытия имеются участки, на которых коэффициент предварительного уплотнения горячей смеси ниже, чем в средней части покрытия [7]. Причем установленная неравномерность в распределении коэффициента предварительного уплотнения отмечена при работе асфальтоукладчиков как иностранного производства, так и отечественного, при устройстве полос покрытия шириной 3,5 и 7,5 м. В обоих случаях понижение коэффициента наблюдается на крае укладываемой полосы. Такое распределение предварительной плотности горячей смеси при укладке можно объяснить неравномерностью распределения параметров вибрации по длине вибрационного бруса или нарушением температурных режимов горячей смеси по ширине покрытия полосы. С целью уточнения распределения температуры по ширине полосы покрытия проведены исследования в производственных условиях (рис. 5.29).

Измерение температуры в разных точках по ширине полосы покрытия осуществлялось термометрами и тепловизором Testo 880. Съёмка производилась при разных температурах воздуха (рис. 5.30).



Рис. 5.29. Строительство дорожного покрытия автомобильной дороги
«Тамбов–Воронеж»

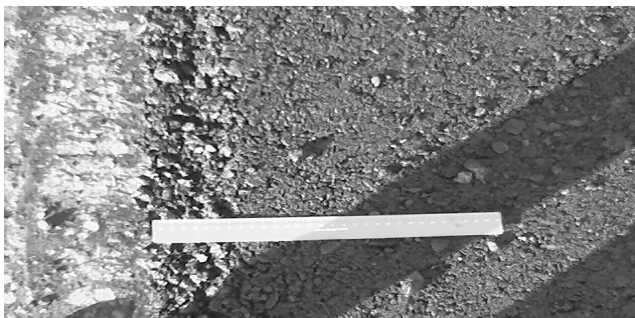


Рис. 5.30. Укладка новой полосы покрытия с ранее уложенной полосой

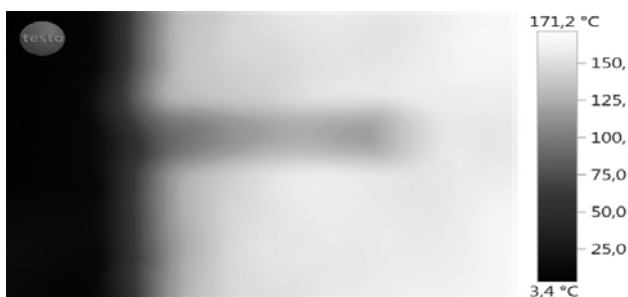


Рис. 5.31. Тепловое изображение участка покрытия, после распределения смеси (температура воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура основания $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура смеси $165\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость ветра от 0 до 3 м/с)

Измерения температуры производились непосредственно по окончании распределения смеси и продолжались в процессе охлаждения полосы покрытия до момента окончания работы катков. На рисунке 5.31 представлен снимок теплового изображения места стыка полос покрытия.

Из представленного рисунка видно, что температура горячей асфальтобетонной смеси меняет свою величину по мере приближения к остывшему асфальтобетону, что характерно для устройства многополосных дорожных покрытий нежесткого типа. Наиболее резкое понижение температуры наблюдается в зоне стыка полос покрытия, причем непосредственно сразу после укладки горячей смеси. Изменение температуры смеси в зоне контакта будет зависеть от теплофизических характеристик асфальтобетонной смеси. Характер изменения теплового изображения при разных температурах горячей смеси представлен на рис. 5.32 – 5.33.



Рис. 5.32. Тепловое изображение участка покрытия через 5 минут после распределения смеси (температура воздуха 5 °С, температура основания 2...3 °С, начальная температура смеси 165 °С, скорость ветра от 0 до 3 м/с)

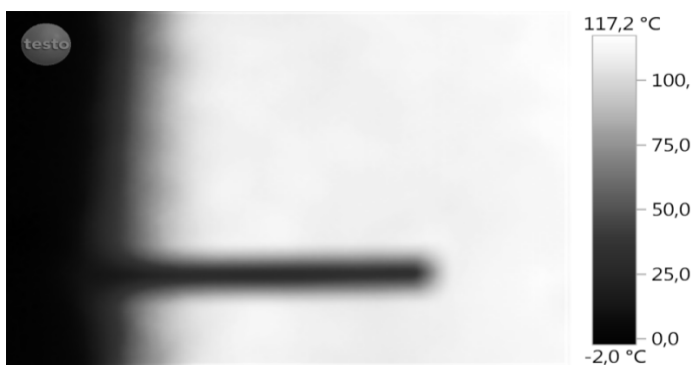
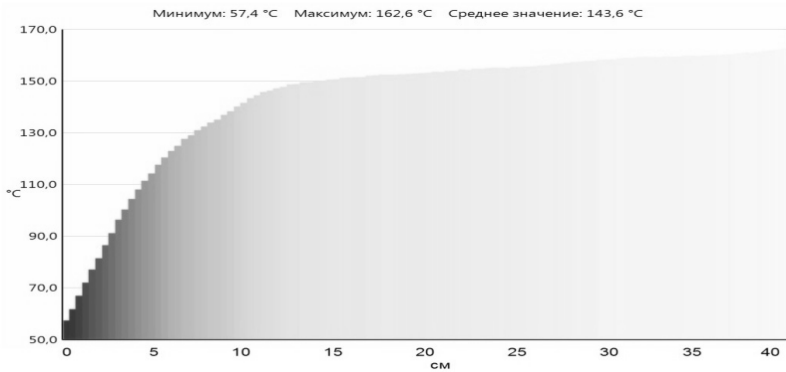
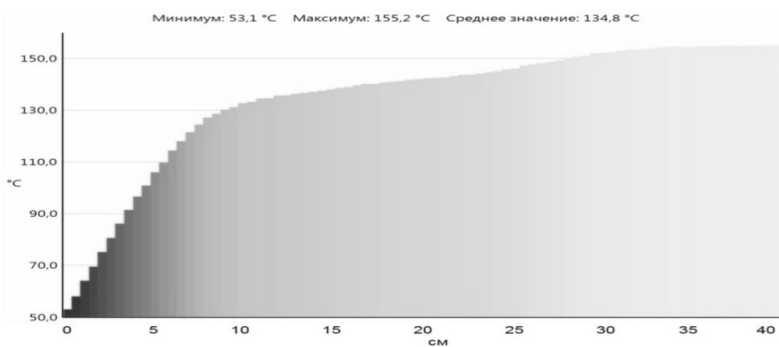


Рис. 5.33. Тепловое изображение участка покрытия через 15 мин после распределения смеси

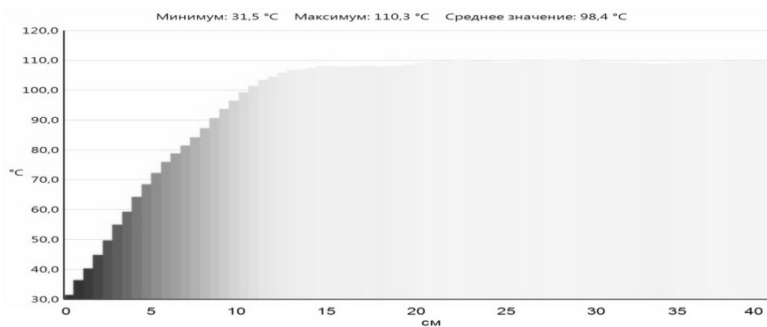
На рисунке 5.34 представлено распределение температуры горячей смеси полосы покрытия на разном расстоянии (до 0,4 м) от места стыка полос покрытия при разной продолжительности охлаждения горячей смеси (температура воздуха 5 °С, температура основания 2...3 °С, начальная температура смеси 165 °С, скорость ветра от 0 до 3 м/с).



Распределение температуры горячей смеси по основанию дороги

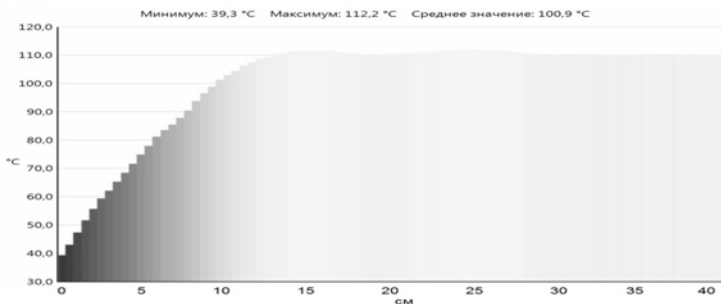


Через 5 минут после распределения смеси

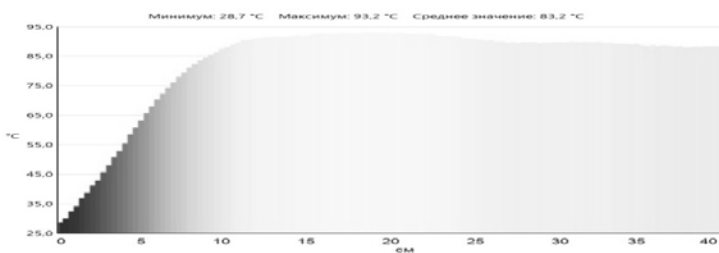


Через 10 минут после распределения смеси

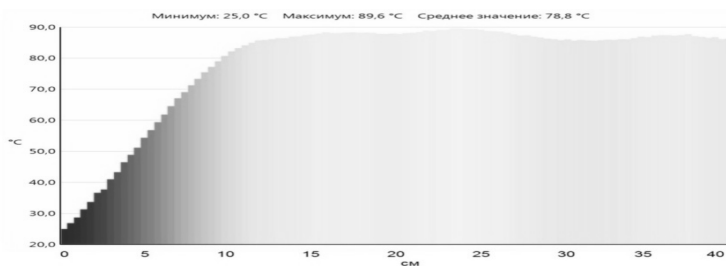
Рис. 5.34. Тепловое изображение участка покрытия через 30 мин после распределения смеси



Через 15 минут после распределения смеси



Через 20 минут после распределения смеси



Через 25 минут после распределения смеси

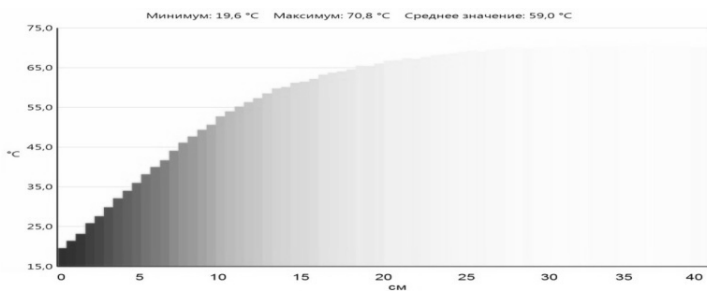


Рис. 5.34. Продолжение

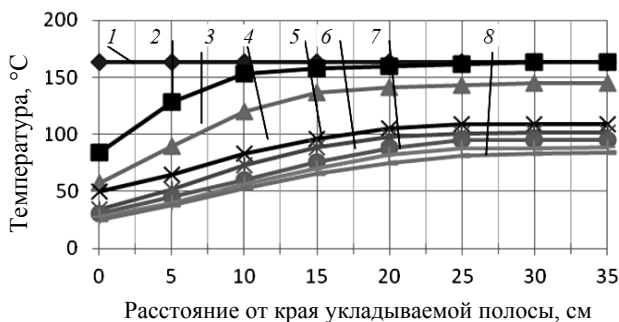


Рис. 5.35. Изменение температуры горячей смеси по ширине полосы:
 1 – после укладки; 2 – через 5 мин; 3 – 10 мин; 4 – 15 мин; 5 – 20 мин;
 6 – 25 мин; 7 – 30 мин; 8 – 35 мин

Анализ представленных результатов доказывает, что край укладываемой полосы более интенсивно охлаждается в зоне стыка сопряженных полос. Ширина полосы охлаждения достигает 10...12 см (рис. 5.35). Зона с температурой смеси, при которой процесс уплотнения не соответствует температурным режимам горячей смеси, достигает от 0,03 до 0,1 м в зависимости от температуры смеси при укладке сопряженного слоя. В ходе эксплуатации данный участок в большинстве случаев разрушается, а если стык подвержен большому количеству нагрузок, то ремонт данного участка необходимо производить после нескольких лет эксплуатации.

На рисунке 5.36 представлено распределение температуры асфальтобетона по ширине полосы покрытия во времени, полученное в производственных условиях устройства покрытия.

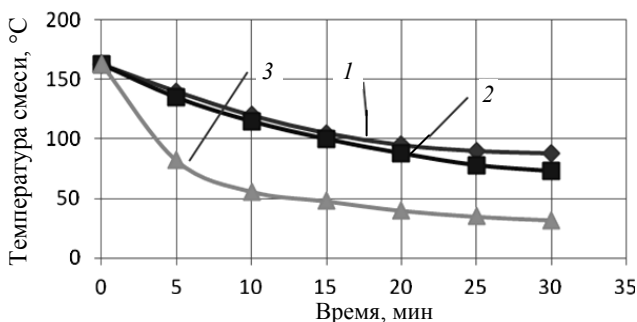


Рис. 5.36. Изменение температуры горячей смеси по ширине полосы покрытия:

1 – по оси полосы; 2 – на расстоянии 0,2 м от края полосы;
 3 – на стыке сопряженных полос

Из представленных на рис. 5.41 данных видно, что в зоне контакта сопряженных полос покрытия при раздельном способе укладки полос происходит резкое понижение температуры асфальтобетонной смеси в зоне стыка полос. Нагрев смеси в зоне стыка сопряженных полос за счет передачи тепла от сопряженного слоя полосы не обеспечивает достижения требуемой температуры в соответствии с температурными режимами уплотнения.

Существующими инструкциями по строительству дорожных асфальтобетонных покрытий предусматривается при укладке отдельных полос дорожного покрытия, перед укладкой второй полосы покрытия, производить прогрев края ранее уложенной полосы на ширину 0,1...0,15 м до температуры 70...80 °С [3, 45, 47, 48]. Для этой цели применяют линейку-разогреватель, которая позволяет разогревать асфальтобетон слоем 30...40 мм на ширину 0,1...0,15 м за 2–3 мин до температуры 80...100 °С [3, 45]. До начала укладки новой полосы вертикальный край ранее уложенного асфальтобетона смазывают битумной эмульсией. При устройстве новой полосы смесь распределяется толщиной слоя, с учетом его уменьшения при уплотнении до толщины ранее устроенной полосы. Вновь устраиваемая полоса соприкасается в этом случае с разогретым краем ранее устроенной полосы, который уплотняется одновременно с новой полосой, что позволяет обеспечить температурные режимы горячей смеси в зоне стыка полос.

Для уточнения влияния температуры асфальтобетона ранее уложенной полосы на изменение температуры асфальтобетона в зоне стыка полос разработана программа, позволяющая определять распределение температуры в зоне стыка сопряженных полос при разной температуре асфальтобетона края первой полосы. На рисунке 5.37 представлены результаты моделирования распределения температуры в зоне стыка сопряженных полос при разных значениях температуры края ранее уложенной полосы покрытия при температуре воздуха 20 °С и толщине слоя при укладке 0,05 м (тип смеси Б, битум марки 90/130). Из представленных результатов видно, что температура асфальтобетона на крае ранее уложенной полосы покрытия существенно влияет на распределение температуры горячей смеси в зоне стыка сопряженных полос. При укладке сопряженного слоя покрытия с более высокой температурой смеси, за счет передачи тепла происходит дополнительный нагрев ранее уложенного слоя. Повышение температуры края ранее уложенной полосы составляет, в зависимости от разницы температуры слоев, от 15 до 20 °С. Анализ результатов показал, что после укладки сопряженного слоя максимальная температура края полосы, за счет нагрева от сопряженного слоя достигается через 10 – 20 мин. Следовательно, процесс уплотнения асфальтобетона на стыке полос необходимо осуществлять после нагрева через некоторый промежуток времени после укладки сопряженного слоя покрытия.

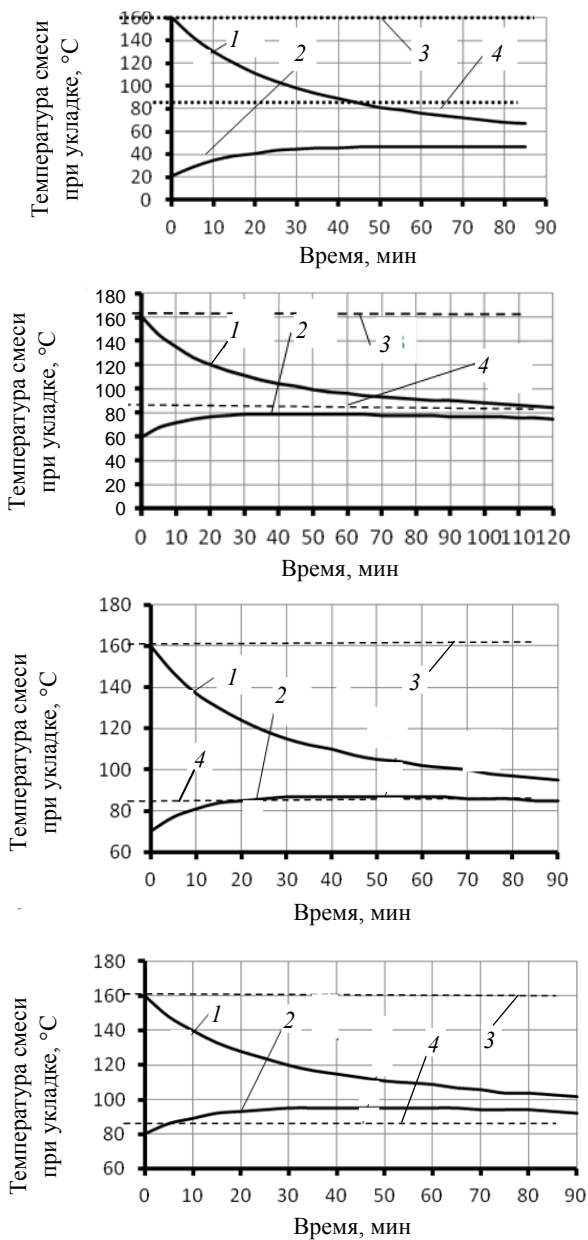


Рис. 5.37. Распределение температуры смеси в зоне стыка полос покрытия

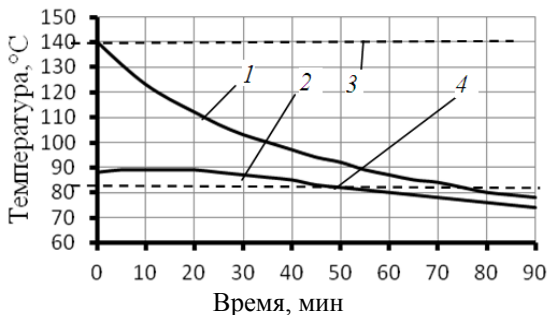


Рис. 5.38. Распределение температуры асфальтобетона в зоне стыка полос (температура смеси при укладке 140 °С, толщина слоя укладки 0,05 м, температура воздуха 20 °С)

Рекомендуемые температуры нагрева асфальтобетона на крае первой полосы не соответствуют температурным режимам горячей смеси при уплотнении [45]. При нагреве асфальтобетона в зоне стыка до 80 °С и дополнительного повышения температуры смеси на 15... 20 °С, температура смеси достигнет величины 95...100 °С, что не соответствует температуре смеси в начале процесса уплотнения [3; 40]. При укладке асфальтобетонной смеси с более низкими температурами эффект дополнительного нагрева асфальтобетона в зоне стыка полос понижается (рис. 5.38).

Установлено, что темп охлаждения горячей смеси в зоне стыка полос, при укладке сопряженного слоя покрытия, понижается, что позволяет увеличить время на уплотнение асфальтобетона в зоне стыка (рис. 5.39).

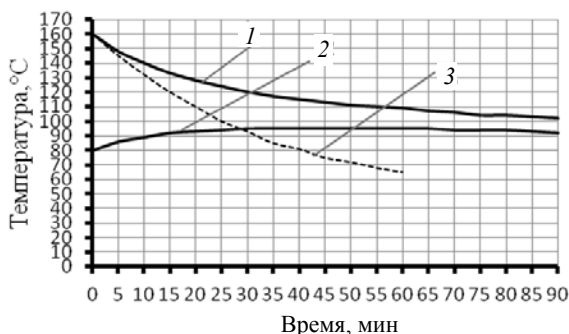


Рис. 5.39. Изменение температуры асфальтобетона в зоне стыка полос покрытия:

- 1 — первая полоса; 2 — сопряженная полоса;
- 3 — при укладке одной полосы покрытия

5.4. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИНФРАКРАСНОГО РАЗОГРЕВАТЕЛЯ ПРИ НАГРЕВЕ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

В предыдущем разделе доказано, что для обеспечения температурных режимов при применении технологии укладки отдельными полосами необходимо осуществлять нагрев края асфальтобетона в зоне стыка полос перед укладкой горячей асфальтобетонной смеси сопряженной полосы до температуры 100...110 °С. Широкое применение для этих целей получили инфракрасные разогреватели, обеспечивающие заданную температуру нагрева края полосы покрытия за сравнительно малое время нагрева. Эффективность работы разогревателя определяется выбором его параметров, соответствующих технологии укладки горячей асфальтобетонной смеси. В зависимости от конструктивных особенностей, разогреватели могут применяться как самостоятельное дополнительное оборудование, перемещаемое перед асфальтоукладчиком, или в виде навесного оборудования к асфальтоукладчику. Высота расположения разогревателя над поверхностью слоя покрытия должна быть не менее 0,05 м. Рабочая скорость асфальтоукладчика зависит от скорости перемещения асфальторазогревателя, обеспечивающего нагрев края полосы покрытия до требуемой температуры. Продолжительность нагрева определяется мощностью теплового потока и допустимым градиентом температур по толщине слоя покрытия.

Анализ конструкций асфальторазогревателей показал, что в настоящий момент имеется значительное количество моделей с разными техническими характеристиками, в зависимости от области применения. Если при производстве ремонтных работ дорожных покрытий нежесткого типа (ямочный ремонт) одним из основных параметров разогревателя является площадь разогрева покрытия, то при строительстве, ремонте или реконструкции полос дорожных покрытий, ввиду незначительной полосы прогрева, является длина разогревателя, влияющая на скорость его перемещения. Поэтому максимальная длина асфальторазогревателя принимается до 5,5 м при ширине от 0,45 до 0,9 м. Для обеспечения нагрева полосы до заданной температуры, без перегрева верхнего слоя покрытия, общая длина разогревателя зависит от количества отдельных блоков (от одного до трех). Продолжительность нагрева асфальтобетона зависит от мощности теплового потока и принятых технологических режимов работы разогревателя. У современных асфальторазогревателей мощность находится в широких пределах, от нескольких до 200 кВт.

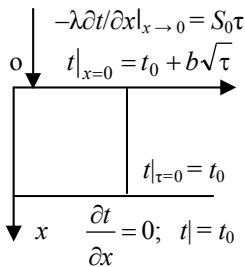


Рис. 5.40. Расчетная тепловая модель для определения параметров разогревателя

Для расчета технологических режимов асфальторазогревателя рассмотрим тепловую модель, представленную на рис. 5.40.

Учитывая, что при применении технологии строительства многополосных дорожных покрытий раздельными полосами, а также при ремонте и реконструкции покрытия, укладка сопряженной полосы производится через значительный промежуток времени, то можно считать, что температура асфальтобетона по толщине слоя покрытия до нагрева

равномерно распределяется по толщине слоя покрытия и равна температуре окружающего воздуха. При работе асфальторазогревателя, за счет сжигания топлива и нагрева керамических насадок, на поверхность покрытия воздействует тепловой поток в виде инфракрасных лучей. Интенсивность воздействия теплового потока на поверхность асфальтобетона может регулироваться в широких пределах. Принимаем, что тепловой поток в течение времени имеет постоянное значение. На основе экспериментальных данных по нагреву слоя покрытия принимаем, что температура изменяется по закону (граничное условие первого рода) [34]

$$t_{\pi} = t_0 + b\sqrt{\tau}, \quad (5.32)$$

где t_{π} – температура поверхности слоя покрытия, °С; τ – время нагрева, ч; b – параметр; t_0 – начальная температура асфальтобетона на крае полосы покрытия, °С.

Начальное условие имеет вид

$$t|_{\tau=0} = t_0.$$

Граничные условия

$$-\lambda\partial t/\partial x|_{x\rightarrow 0} = S_0\tau; \quad t|_{x\rightarrow 0} = t_0 + b\sqrt{\tau}; \quad \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x\rightarrow\infty} = 0; \quad t|_{x\rightarrow\infty} = t_0.$$

Время нагрева асфальтобетона на глубине h до температуры t определяется из формулы [34]

$$\Theta = \frac{t - t_0}{t_{\pi} - t_0} = \exp\left(-\frac{1}{4Fo_h}\right) - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{Fo_h}} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\pi}{2Fo_h}}, \quad (5.33)$$

Θ – безразмерная температура асфальтобетона на глубине h при постоянном тепловом потоке от числа критерия Фурье, где Fo_h – критерий гомохронности Фурье, который определяется зависимостью

$$Fo_h = \frac{a\tau}{h^2}, \quad (5.34)$$

где a – коэффициент температуропроводности, определяемый по формуле

$$a = \lambda/c\gamma, \text{ м}^2/\text{ч}, \quad (5.35)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°С); γ – удельный вес, кг/м³.

Численное значение коэффициента теплопроводности определяется зависимостью

$$\lambda = 0,298e^{0,578\gamma + 0,0898(t/100)}, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С}), \quad (5.36)$$

где c – удельная теплоемкость в ккал/(кг·°С); t – температура асфальтобетона, °С.

Удельную теплоемкость асфальтобетонной смеси, в зависимости от типа смеси, можно определить из выражения

$$C_{\text{уд}} = 1,371e^{0,0023t - 0,007\psi}, \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{С}), \quad (5.37)$$

где ψ – процентное содержание щебня в смеси, %.

Продолжительность нагрева слоя асфальтобетона определяется из выражения (3)

$$\tau = \frac{Fo_h^2}{a}, \text{ ч}. \quad (5.38)$$

Из данной формулы видно, что время нагрева слоя асфальтобетона зависит от толщины нагреваемого слоя, и продолжительность процесса нагрева пропорциональна квадрату толщины слоя. На рисунке 5.41

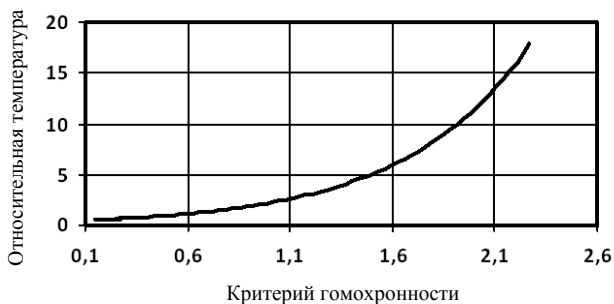


Рис. 5.41. Зависимость безразмерной температуры асфальтобетона на глубине h от критерия гомохронности Фурье

5.22. Продолжительность нагрева при разных температурах слоя асфальтобетона

Толщина слоя, см	Продолжительность разогрева при начальной температуре, мин				
	10	20	30	40	50
1	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3
2	2,2	2,0	1,7	1,5	1,3
3	5	4,5	3,9	3,3	2,8
4	8,8	8,0	6,9	5,9	5,0

представлена зависимость безразмерной температуры асфальтобетона на глубине h слоя покрытия от критерия гомохронности Фурье, рассчитанная по формуле (5.31) с учетом экспериментальных данных.

Численное значение безразмерной температуры асфальтобетона на глубине h слоя асфальтобетона определяется из формулы

$$\Theta = 0,43e^{1,64Fo_h}, \quad (5.39)$$

где Fo_h – критерий гомохронности Фурье. Коэффициент корреляции равен 0,96.

Продолжительность разогрева слоя асфальтобетона до температуры нагрева 110 °С можно определить на основе данных, представленных в работе [38], табл. 5.22.

Результаты обработки данных табл. 5.22, при начальной температуре нагрева асфальтобетона 10 °С, в зависимости от толщины нагреваемого слоя, представлены в виде зависимости на рис. 5.42.

Численное значение продолжительности нагрева определяется из уравнения

$$\tau = 0,5h^2, \quad (5.40)$$

где h – толщина слоя асфальтобетона, см. Коэффициент корреляции равен 1,0.

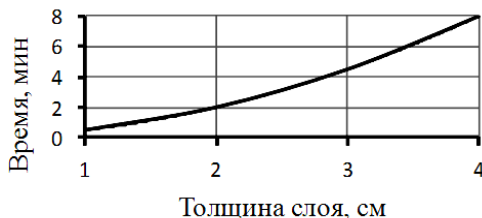


Рис. 5.42. Зависимость времени нагрева при разных температурах слоя асфальтобетона

5.23. Время нагрева асфальтобетона при разной толщине слоя в зависимости от начальной температуры (в относительных величинах)

Толщина слоя, см	Продолжительность разогрева при начальной температуре, мин				
	10	20	30	40	50
1	1,2	1,0	0,8	0,8	0,6
2	1,1	1,0	0,85	0,75	0,65
3	1,1	1,0	0,86	0,73	0,62
4	1,1	1,0	0,86	0,73	0,62
$\Sigma n/n$	1,12	1,0	0,84	0,75	0,62

Продолжительность нагрева пропорциональна квадрату толщины слоя асфальтобетона, что подтверждается формулой (5.38). Из данных табл. 5.23 видно, что время нагрева зависит от начальной температуры асфальтобетона. С целью уточнения влияния начальной температуры асфальтобетона на время нагрева, представим данные табл. 5.22 в относительных величинах, принимая за эталон время нагрева при температуре воздуха 20 °С за единицу, и обозначим его через коэффициент влияния начальной температуры покрытия до нагрева (табл. 5.23).

Анализ данных в относительных величинах времени нагрева асфальтобетона, при разной толщине слоя, в зависимости от начальной температуры слоя покрытия, показал, что имеется общая закономерность продолжительности нагрева асфальтобетона независимо от толщины слоя полосы, которая представлена на рис. 5.43.

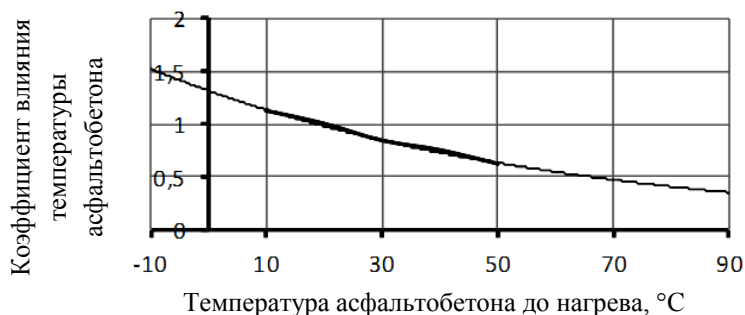


Рис. 5.43. Влияние температуры асфальтобетона на крае полосы на коэффициент

Время нагрева края полосы асфальтобетона при начальных значениях температуры поверхности от 10 до 50 °С, в соответствии с методикой рационального планирования экспериментальных данных, можно определить по формуле [32]

$$\tau_{\text{наг}} = 0,66h^2 e^{-0,015t_{\text{см}}}, \text{ мин}, \quad (5.41)$$

где h – толщина нагреваемого слоя асфальтобетона, см; $t_{\text{см}}$ – температура асфальтобетона до нагрева, °С. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Нагрев асфальтобетонного покрытия происходит при перемещении разогревателя с заданной скоростью в зависимости от температуры асфальтобетона края полосы и толщины слоя полосы, которая определяется по формуле

$$v = \frac{l}{\tau} = \frac{l\alpha}{Fo_h h^3}, \quad (5.42)$$

или
$$v = l/0,66h^2 e^{-0,015t_{\text{см}}}, \text{ м/мин},$$

где l – длина блока разогревателя.

С учетом теплофизических свойств асфальтобетонной смеси скорость перемещения разогревателя определяется по формуле

$$v = 0,298/e^{0,578\gamma+0,0898(t/100)} / 0,19e^{0,023t_{\text{см}}-0,007\psi+5,67660}. \quad (5.43)$$

Мощность излучения на поверхности покрытия, определяемая из условия постоянного теплового потока, определяется выражением [25]

$$S = \frac{(t_n - t_0)\sqrt{\pi\gamma\lambda c}}{2\sqrt{\tau}}. \quad (5.44)$$

Эффективность работы разогревателя зависит от интенсивности нагрева слоя края полосы асфальтобетона, которая определяется высотой расположения разогревателя над поверхностью полосы покрытия. При постоянном тепловом потоке, в соответствии с экспериментальными данными для горелок с керамическими насадками, высота R установки горелок над покрытием определяется по формуле [60]

$$R = \sqrt{\frac{320}{S}}. \quad (5.45)$$

На основании уточненной методики по расчету параметров инфракрасного разогревателя в табл. 5.24 и табл. 5.25 представлены результаты расчета технологических режимов при разогреве слоя асфальтобетона толщиной 0,02 и 0,03 м от 10 °С до 110 °С при разной температуре асфальтобетона, равной температуре окружающего воздуха.

5.24. Технологические режимы разогревателя при нагреве слоя асфальтобетона толщиной 0,02 м и длине блока разогревателя 2,0 м

Температура воздуха, °С	Время нагрева, мин	Высота расположения горелки относительно поверхности	Мощность излучения, кВт/м ²	Скорость перемещения разогревателя, м/мин
-10	3,1	0,14	11,0	0,65
0	2,6	0,14	11,2	0,75
10	2,3	0,14	10,9	0,88
20	2,0	0,17	10,1	1,02
30	1,7	0,17	10,2	1,20

5.25. Технологические режимы разогревателя при нагреве слоя асфальтобетона толщиной 0,03 м и длине блока разогревателя 2,0 м

Температура воздуха, °С	Время нагрева, мин	Высота расположения горелки относительно поверхности, м	Мощность излучения, кВт/м ²	Скорость перемещения разогревателя, м/мин
-10	6,9	0,17	8,1	0,29
0	5,9	0,20	7,4	0,34
10	5,1	0,20	7,1	0,39
20	4,4	0,20	6,9	0,45
30	3,8	0,20	6,5	0,53

Время разогрева при толщине слоя 0,02 и 0,03 м, при разных температурах воздуха, представлено на рис. 5.44.

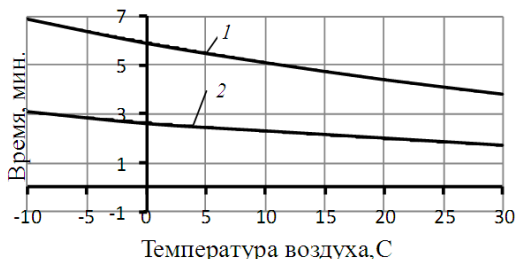


Рис. 5.44. Зависимость времени нагрева асфальтобетона от температуры воздуха:

1 – толщина слоя нагрева 0,02 м; 2 – толщина слоя нагрева 0,03 м

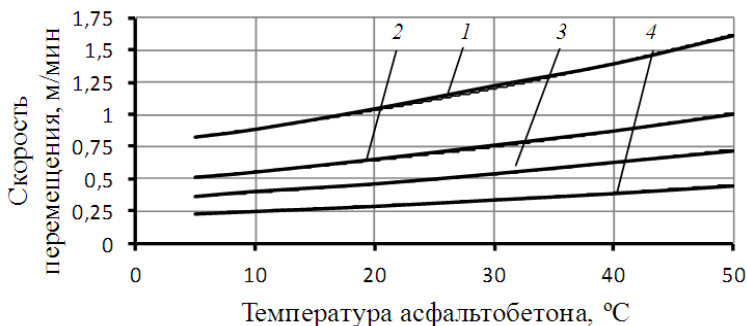


Рис. 5.45. Зависимость скорости перемещения разогревателя от температуры воздуха и толщины слоя прогрева:

- 1 – глубина прогрева 2 см при длине разогревателя 1,25 м;
- 2 – глубина прогрева 2 см при длине разогревателя 2,0 м;
- 3 – глубина прогрева 3 см при длине разогревателя 1,25 м;
- 4 – глубина прогрева 3 см при длине разогревателя 2,0 м

Численное значение времени нагрева при разной температуре воздуха и толщине слоя асфальтобетона определяется зависимостями:

$$\tau = 5,92 e^{-0,015t_v} \quad \text{при толщине слоя } 0,02 \text{ м}; \quad (5.46)$$

$$\tau = 2,65 e^{-0,015t_v} \quad \text{при толщине слоя } 0,03 \text{ м},$$

где t_v – температура воздуха, °C. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Результаты расчетов скорости перемещения разогревателя при разных температурах воздуха и толщине слоя покрытия представлены на рис. 5.45.

Численное значение скорости перемещения разогревателя от температуры воздуха могут быть рассчитаны по уравнениям, представленные в табл. 5.26.

5.26. Зависимость скорости перемещения разогревателя от температуры асфальтобетона

Длина блока разогревателя, м	Глубина нагрева, м	Скорость перемещения разогревателя, м/мин	Коэффициент корреляции
1,25	0,02	$v = 0,76e^{0,0151ra}$	0,99
2,0	0,02	$v = 0,46e^{0,0151ra}$	0,99
1,25	0,03	$v = 0,39e^{0,0153ra}$	0,99
2,0	0,03	$v = 0,25e^{0,0149ra}$	0,99

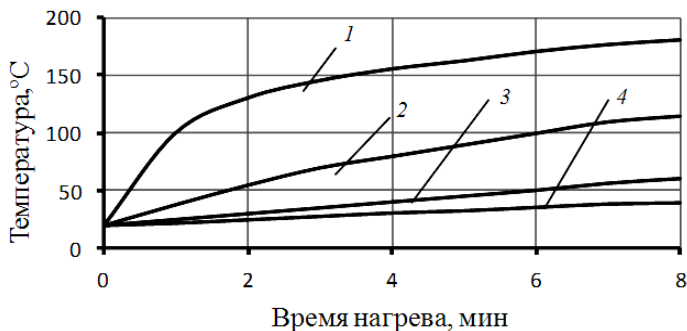


Рис. 5.46. Распределение температуры в слое асфальтобетона при нагреве: 1 – на поверхности; 2 – на глубине 0,01 м; 3 – 0,02 м; 4 – 0,03 м

На основании представленных результатов можно сделать вывод, что при устройстве полос покрытия с отдельными полосами и необходимостью осуществлять разогрев края полосы покрытия при укладке смежной полосы, применение разогревателя будет снижать производительность механизированного звена машин, поскольку скорость нагрева края полосы покрытия незначительна. С целью обеспечения заданного темпа устройства покрытия необходимо увеличивать длину блока или количества блоков разогревателей.

Увеличение длины блока разогревателя при постоянной мощности излучателя теплового потока приводит к повышению температуры на поверхности асфальтобетона. На рисунке 5.46 представлена динамика распределения температуры на глубине до 0,03 м в слое покрытия при нагреве инфракрасным асфальтозагретелем РА-20.

Из представленных на рис. 5.46 данных видно, что распределение температуры по толщине слоя асфальтобетона неравномерно, и на поверхности слоя наблюдается пережог смеси. Для обеспечения равномерности распределения температуры смеси по толщине слоя используют несколько блоков разогревателей, отличающихся между собой разными режимами нагрева асфальтобетона. Произведя замену значения температуропроводности, зависящей от теплофизических характеристик смеси, а также время нагрева, мощность излучения на заданной глубине слоя будет определяться

$$S = \lambda(t_{\text{н}} - t_{\text{с}}) \sqrt{\pi/2h} \sqrt{F_h}, \text{ Вт/м}^2. \quad (5.47)$$

5.27. Технологические параметры разогревателя, состоящего из трех блоков

№ блока	Интервал температур нагрева, °С	Время нагрева, мин	Мощность излучения, кВт/м ²	Высота расположения горелки, м	Скорость перемещения, м/мин
1	10...40	1,8	2,4	0,36	1,1
2	40...80	1,8	2,4	0,36	1,1
3	80...110	1,5	2,8	0,42	1,3

Для обеспечения непрерывности технологии укладки горячей асфальтобетонной смеси сопряженной полосы необходимо обеспечить равенство скорости перемещения разогревателя и скорости асфальтоукладчика.

В этом случае рабочая скорость асфальтоукладчика зависит от скорости перемещения блока разогревателя. При креплении блоков разогревателей к конструкции асфальтоукладчика их технологические режимы должны соответствовать заданному темпу устройства полосы покрытия.

В таблице 5.27 представлены результаты расчета технологических режимов разогревателя, состоящего из трех блоков, при нагреве края полосы асфальтобетона от 10 °С до 110 °С при толщине слоя 0,03 м.

С учетом полученных результатов разработано программное обеспечение с использованием программы Labview, позволяющее определять технологические параметры разогревателя с учетом конструктивных и погодных условий производства работ. На рисунке 5.47 представлена блок-схема программы.

Панель управления данной программы представлена на рис. 5.48.

Использование программы Labview позволяет определять технологические параметры разогревателя с учетом нескольких блоков разогревателей. В качестве примера на рис. 5.49 представлена панель управления асфальторазогревателя с использованием двух блоков разогревателей.

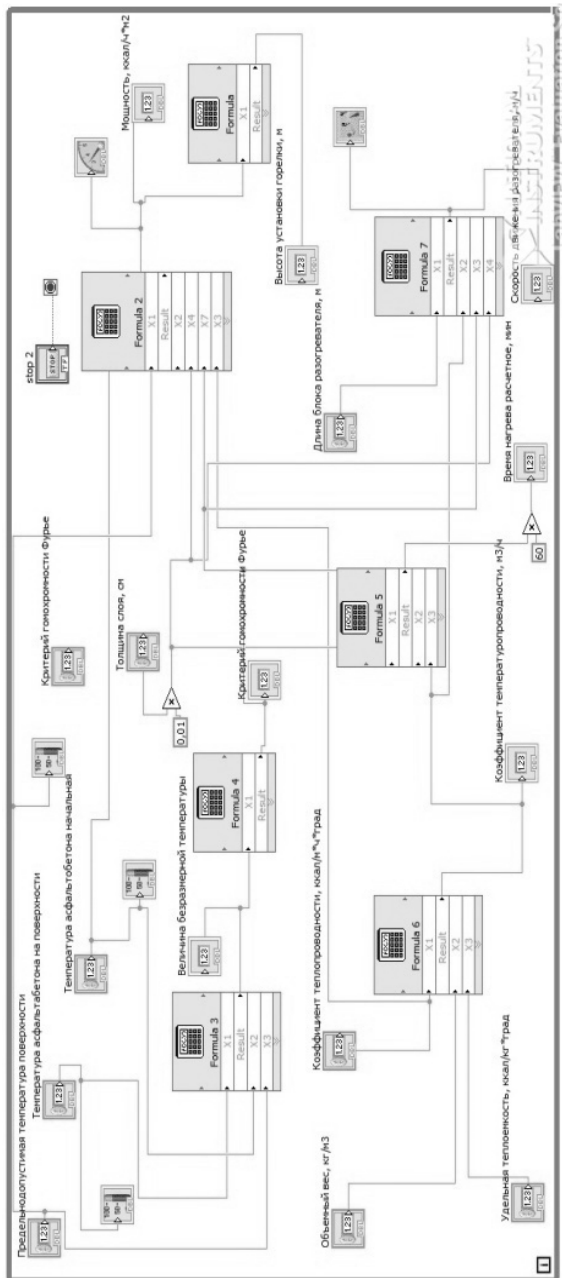


Рис. 5.47. Блок-схема программы по расчету технологических параметров асфальтогазового нагревателя.

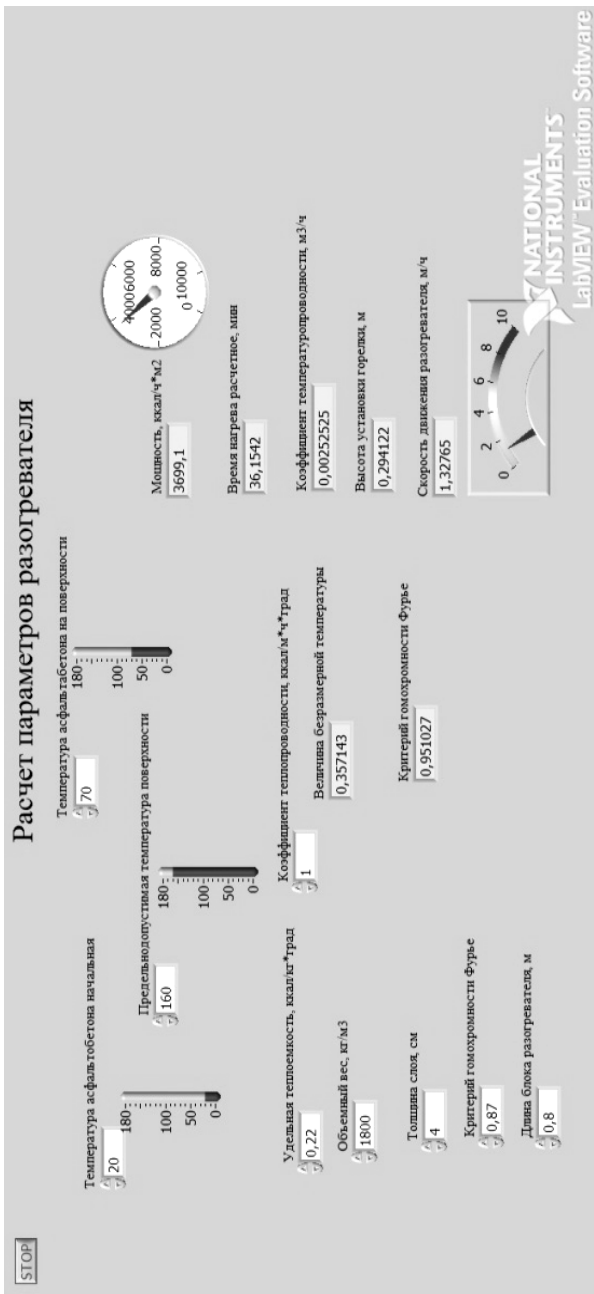




Рис. 5.48. Панель управления программы по расчету параметров разогревателя в среде Labview

Расчет параметров разогревателей


Температура асфальтобетона начальная 0 20 100 180	Мощность первого разогревателя, ккал/ч*м.2 5841,77	Мощность второго разогревателя, ккал/ч*м.2 2281,51
Температура асфальтобетона конечная 0 80 100 180	Интервал между прогревом, мин 26,6032	
Предельнодопустимая температура поверхности 0 180 100 0	Время нагрева первого разогревателя расчетное, мин 13,1489	Время нагрева второго разогревателя расчетное, мин 1,09882
Объемный вес, кг/м3 1800	Высота установки горелки первого разогревателя, м 0,234047	Высота установки горелки второго разогревателя, м 0,37451
Удельная теплоемкость, ккал/кг*град 0,22	Коэффициент теплопроводности при начальной температуре, ккал/м*ч*град 0,790133	Скорость движения первого разогревателя, м/ч 4,56312
Толщина слоя, см 5	Коэффициент теплопроводности после прогрева первого разогревателя, ккал/м*ч*град 0,804524	Скорость движения второго разогревателя, м/ч 0,910068
Длина блока разогревателя, м 1	Высота вертикальной температуры 0,133333	
Длина блока второго разогревателя, м 1	Критерий сообразности Фурье 0,174905	
	Критерий сообразности Фурье второго разогревателя 0,892996	
	Коэффициент температуропроводности, м2/ч 0,20198529	




Мощность первого разогревателя, ккал/ч*м.2
5841,77




Мощность второго разогревателя, ккал/ч*м.2
2281,51



Интервал между прогревом, мин
26,6032



Время нагрева первого разогревателя расчетное, мин
13,1489



Время нагрева второго разогревателя расчетное, мин
1,09882

Расчетные величины

Коэффициент теплопроводности при начальной температуре, ккал/м*ч*град
0,790133

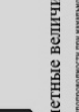
Коэффициент теплопроводности после прогрева первого разогревателя, ккал/м*ч*град
0,804524

Высота вертикальной температуры
0,133333


Критерий сообразности Фурье
0,174905

Критерий сообразности Фурье второго разогревателя
0,892996


Коэффициент температуропроводности, м2/ч
0,20198529




Высота установки горелки первого разогревателя, м
0,234047



Высота установки горелки второго разогревателя, м
0,37451



Скорость движения первого разогревателя, м/ч
4,56312



Скорость движения второго разогревателя, м/ч
0,910068



Рис. 5.49. Панель управления программы по расчету параметров разогревателя, состоящего из двух блоков

5.5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УКЛАДКИ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ОДНИМ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОМ СО СМЕЩЕНИЕМ ПОЛОС ПОКРЫТИЯ ПРИ УКЛАДКЕ

В зависимости от условий производства работ, применяется технология устройства многополосных покрытий нежесткого типа одним асфальтоукладчиком, при которой асфальтоукладчик смещается с полосы на полосу при устройстве покрытия (рис. 5.50).

Схема укладки асфальтобетонной смеси представлена на рис. 5.51.

Длина захватки по укладке асфальтобетонной смеси при такой технологии, с условием обеспечения температурных режимов в зоне стыка сопрягаемых полос покрытия, зависит от темпа охлаждения горячей смеси. Известно, что на темп охлаждения горячей смеси влияют



Рис. 5.50. Укладка асфальтобетонной смеси одним асфальтоукладчиком со смещением полос дорожного покрытия

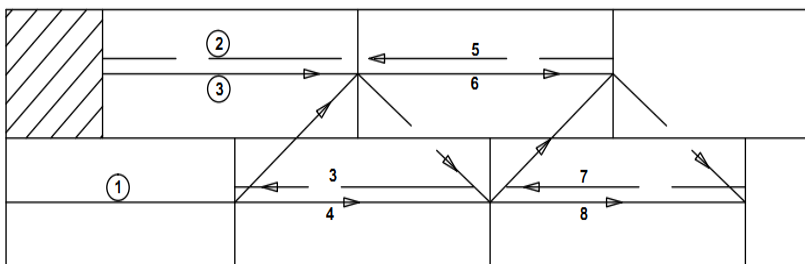


Рис. 5.51. Схема укладки полос покрытия дорожного покрытия нежесткого типа одним асфальтоукладчиком со смещением полос

5.28. Влияние температуры воздуха на длину полосы укладки

Температура воздуха при отсутствии ветра, °С	Длина укладываемой полосы, м	
	участки, защищенные от ветра	открытые участки
5...10	30...40	25...30
10...15	40...60	30...50
15...20	60...80	50...70
20...25	80...100	70...80
≥ 25	100...150	80...100

теплофизические свойства, конструктивные параметры покрытия, скорость ветра. В то же время существующими рекомендациями при определении длины укладываемой полосы, с учетом обеспечения температурных режимов горячей смеси в зоне стыка сопряженных полос, учитывается только температура окружающего воздуха (табл. 5.28) [3, 16, 45].

В зависимости от свойств асфальтобетонной смеси, температурных условий производства работ и конструктивных параметров покрытия длину захватки при укладке горячей смеси, с учетом обеспечения температурных режимов смеси на стыке полос, предложено определять выражением [6]

$$l_{\text{дл}} = K_1 K_2 h(C\gamma - 2t)v_1 v_2 / (a_1 + a_2)(v_1 + v_2), \text{ м}, \quad (5.48)$$

где K_1 – коэффициент, зависящий от температурных условий производства работ, определяемый из выражения

$$K_1 = 7,5(t_v - t_b / t_k - t_b), \quad (5.49)$$

где t_v – температура горячей смеси в начале уплотнения, °С; t_k – допускаемая температура смеси в зоне стыка сопрягаемых полос покрытия (60...70 °С), °С; t_b – температура воздуха, °С; K_2 – коэффициент, учитывающий температуру основания. При температуре основания, равной температуре воздуха, коэффициент принимается равным 1 и соответствует температуре воздуха до 25 °С. При температуре воздуха свыше 25 °С, численное значение K_2 принимается равным 1,2; h – толщина укладываемого слоя покрытия, м; C – теплоемкость асфальтобетонной смеси, ккал/(кг·°С), принимается (0,3...0,4); γ – требуемая плотность асфальтобетона, кг/м³; t – продолжительность перехода на смежную полосу, ч (примерно 0,06 ч); v_1 – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; v_2 – транспортная скорость асфальтоукладчика, м/мин (примерно 10 – 12); a_1 – коэффициент теплоотдачи от горячей смеси за счет излучения, ккал/(м²·ч·°С, примерно равен 6); a_2 – коэффи-

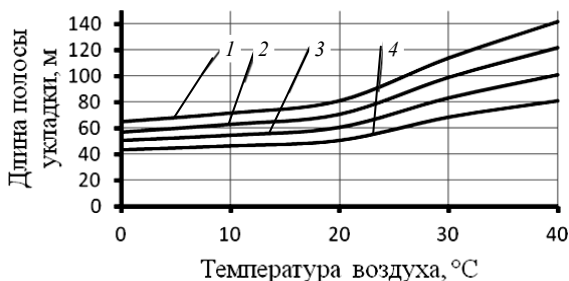


Рис. 5.52. Влияние температуры воздуха на длину полосы укладки горячей смеси одним асфальтоукладчиком:

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

коэффициент теплоотдачи от горячей смеси за счет конвекции (при скорости ветра до 1 м/с принимается равным 5, при скорости ветра 10 м/с принимается равным 12, при большем значении скорости принимается 16).

Используя предложенную зависимость, на рис. 5.52 представлены результаты расчетов по определению длины полосы укладки с учетом температурных режимов горячей смеси в зоне стыка полос покрытия, в зависимости от температуры воздуха при разных значениях температуры горячей асфальтобетонной смеси при укладке.

Анализ предложенной зависимости и представленных на рис. 5.52 данных показали, что при повышении температуры воздуха свыше 20 °C, наблюдается резкое увеличение длины укладываемой полосы покрытия, что можно объяснить введением в предложенную зависимость коэффициента влияния температуры основания K_2 [5, 24]. Действительно, температура основания влияет на температурные режимы горячей смеси, но не скачкообразно, а с учетом разницы температуры основания и окружающего воздуха [8]. Установлено, что теплоемкость асфальтобетонной смеси, влияющая на температурные режимы горячей смеси, зависит от температуры битума и процентного содержания минерального материала [8, 23]. Поэтому принятая допускаемая температура асфальтобетона в зоне стыка полос не учитывает свойств применяемого асфальтобетона, которые зависят от типа смеси и марки битума и имеют разные температурные режимы как при укладке, так и уплотнении.

В результате проведенного анализа данной зависимости установлено, что между температурой смеси при укладке и длиной полосы покрытия существует прямо пропорциональная зависимость, которая получена по результатам расчета предложенной зависимости и представлена в виде коэффициента влияния температуры смеси при укладке на длину укладываемой полосы покрытия (рис. 5.53).

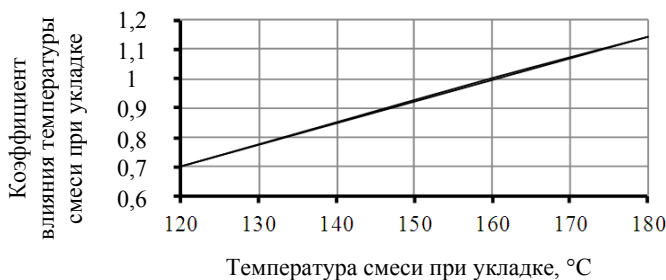


Рис. 5.53. Влияние температуры смеси при укладке горячей смеси в дорожное покрытие

Известно, что обеспечение температурных режимов асфальтобетонной смеси в зоне стыка сопрягаемых полос покрытия зависит от свойств смеси, темпа охлаждения и промежутка времени между укладками смежных полос. С учетом этих факторов длина полосы укладки будет зависеть также от рабочей скорости асфальтоукладчика, которая зависит от принятого темпа строительства покрытия и производственных возможностей обеспечения горячей смесью объекта работ. При раздельной укладке полос покрытия между длиной укладываемой полосы и скоростью асфальтоукладчика существует линейная зависимость. При укладке смеси со смещением асфальтоукладчика его производительность снижается за счет его перемещения с одной захватки на другую, что влияет на среднюю скорость укладки смеси. Зависимость длины полосы укладки от рабочей скорости асфальтоукладчика, рассчитанная по зависимости (5.52), представлена на рис. 5.54.



Рис. 5.54. Зависимость длины захватки при укладке от рабочей скорости асфальтоукладчика

Из представленных данных видно, что в отличие от технологии укладки горячей смеси при устройстве покрытия отдельными полосами, а также с увеличенной шириной полосы укладки, длина полосы укладки со смещением асфальтоукладчика с одной полосы на другую уменьшается, что свидетельствует о снижении эффективности работы механизированного звена машин по устройству дорожного покрытия нежесткого типа. Зависимость длины захватки при такой технологии, в зависимости от рабочей скорости, имеет вид

$$L = 74v^{0,778} \text{ м}, \quad (5.50)$$

где L – длина захватки при укладке горячей смеси; v – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Доказано, что при укладке горячей асфальтобетонной смеси в дорожную полосу покрытия охлаждение происходит не только на поверхности слоя, но и на боковой поверхности, что способствует повышению интенсивности охлаждения смеси в зоне стыка сопряженных полос. Охлаждение смеси в зоне стыка зависит не только от температуры поставляемой смеси и температуры воздуха, но и продолжительности между укладками горячей смеси в смежные полосы покрытия. Увеличение длины укладки асфальтобетонной смеси при незначительной рабочей скорости асфальтоукладчика приводит к повышению времени укладки смеси сопряженной полосы, что приводит к понижению температуры смеси в зоне стыка полос. Понижение температуры горячей смеси в зоне сопряжения полос ниже предельной приводит к снижению физико-механических характеристик асфальтобетона при уплотнении (прочности, водонепроницаемости, плотности), что способствует разрушению дорожного покрытия в зоне стыка полос в процессе эксплуатации (рис. 5.55).



Рис. 5.55. Дефект дорожного покрытия на стыке двух полос

Условие обеспечения температурного режима в зоне стыка сопряженных полос покрытия при укладке асфальтобетонной смеси можно представить в виде

$$t_{\text{см}} \geq [t_{\text{см}}], \quad (5.51)$$

где $t_{\text{см}}$ – температура смеси при укладке сопряженной полосы, °С; $[t_{\text{см}}]$ – допускаемая нижняя граница температурного интервала горячей смеси при укладке асфальтобетонной смеси, зависящая от типа смеси и марки битума, °С.

Нормативными документами и рекомендациями определена температура начала и окончания укладки асфальтобетонной смеси [38, 41, 42, 47]. Следовательно, условие (5.54) можно представить в виде

$$t_{\text{ны}} - t_{\text{оу}} = \Delta t \geq [t_{\text{см}}], \quad (5.52)$$

где Δt – температурный интервал между началом ($t_{\text{ны}}$) и $t_{\text{оу}}$ окончанием укладки горячей асфальтобетонной смеси, определяющий продолжительность укладки смеси, мин.

Установленный температурный интервал при укладке горячей асфальтобетонной смеси зависит от свойств смеси, характеризуемых вяжущим материалом. Изменение температуры в заданном интервале зависит от темпа охлаждения слоя покрытия, который определяет время нахождения горячей смеси в установленном интервале температур, а, следовательно, и время укладки асфальтобетонной смеси. В зависимости от принятой скорости асфальтоукладчика и времени укладки смеси, определяется длина полосы укладки. Ранее отмечалось, что рабочая скорость асфальтоукладчика зависит от конкретной организации производства работ. Поэтому для обеспечения качества работ при строительстве многополосных покрытий и обеспечения качества уплотнения асфальтобетонной смеси в зоне стыка сопряженных полос необходимо знать время нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале с учетом разных факторов, влияющих на процесс охлаждения горячей смеси.

Известно, что температура горячей смеси после распределения по основанию дороги зависит от разных факторов и в общем виде, на стыке смежных полос, ее можно представить в виде функции

$$t_{\text{ст}} = f(t_{\text{в}}; t_{\text{см}}; h; v_{\text{в}}; K_{\text{ш}}; K_{\text{ос}}; K_{\text{см}}; \tau), \quad (5.53)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; $t_{\text{см}}$ – температура смеси при укладке, °С; h – толщина слоя смеси; $v_{\text{в}}$ – скорость ветра, м/с; $K_{\text{ш}}$ – коэффициент, учитывающий снижение температуры смеси на стыке смежных полос, $K_{\text{ос}}$ – коэффициент влияния температуры основания; τ – промежуток времени между температурой смеси при укладке и ее измерением, мин.

Доказано, что процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси происходит во времени, и между ними существует зависимость. Тогда уравнение (5.56) можно представить в виде

$$\tau = f(t_{\text{в}}; t_{\text{см}}; t_{\text{оу}}; h; v_{\text{в}}; K_{\text{ш}}; K_{\text{ос}}; K_{\text{см}}), \text{ } ^\circ\text{C, мин,} \quad (5.54)$$

где $t_{\text{оу}}$ – температура смеси при окончании процесса укладки смеси в полосу покрытия, $^\circ\text{C}$.

При назначении длины захватки необходимо обеспечить монолитность продольного шва в зоне стыка сопряженных полос, которая возможна при условии обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей. Температурные режимы асфальтобетонных смесей зависят от типа смеси и марки битума, конструктивных параметров слоя, погодных условий и регламентированы нормативными документами [38, 41, 42, 47].

В таблице 5.29 представлены температурные режимы горячих асфальтобетонных смесей в зависимости от типа смеси и марки битума [8].

Анализ значений температуры, представленных в табл. 5.29 показал, что температурные границы укладки смеси и окончания уплотнения покрытия находятся в широком интервале значений и зависят от состава смеси. Для установления общей закономерности влияния условий производства работ, свойств применяемых смесей и конструктивных параметров покрытия разработана математическая модель, которая представлена на рис. 5.26.

Расчетная модель принята с учетом следующих предпосылок:

- процесс устройства многополосного покрытия нежесткого типа ограничен во времени температурным интервалом 180...60 $^\circ\text{C}$;
- в начальный момент времени укладки температура смеси по толщине слоя имеет одинаковую величину;

5.29 . Температурные режимы горячей асфальтобетонной смеси

Марка битума	Температура укладки, $^\circ\text{C}$	Температура окончания уплотнения горячих смесей				
		А	Б	В	Г	Д
БНД 40/60	150...160	105...100	100...95	95...90	100...95	95...90
БНД 60/90	145...155	100...95	95...90	90...85	95...90	90...85
БНД 90/130	140...150	95...90	90...85	85...80	90...85	85...80
БНД 130/200	130...140	85...80	80...75	75...70	80...75	75...70
БНД 200/300	120...130	75...70	70...65	65...60	70...65	65...60

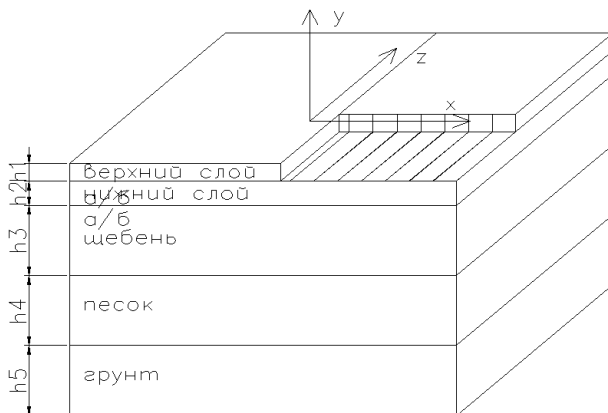


Рис. 5.56. Расчетная схема укладки дорожного покрытия несколькими асфальтоукладчиками

- материал слоя покрытия однородный;
- потери тепла через боковые грани слоев незначительны и ими можно пренебречь;
- направление тепловых потоков принимается перпендикулярным к поверхности слоя;
- потери тепла через верхнюю поверхность слоя укладываемых полос покрытия одинаковы;
- потери тепла в нижележащие слои происходят через нижнюю поверхность слоя за счет теплопроводности материала;
- сцепление слоев покрытия обеспечивает достаточный термический контакт;
- температура окружающей среды и скорости воздушных масс с момента укладки слоя смеси и до окончания процесса уплотнения остаются постоянными;
- физико-механические и теплофизические свойства материала при укладке полос одинаковы по всей ширине покрытия;
- внешние источники тепла в слое асфальтобетона отсутствуют.

Принятая расчетная модель описывается системой дифференциальных уравнений, отражающих процесс нестационарной теплопроводности в слоях с различными физико-механическими и теплотехническими свойствами, лежащими на бесконечной полуограниченной стенке из однородного материала.

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

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

$$\lambda_i \partial t / \partial y \Big|_{h=0} = \alpha [t(0; \tau) - t_B]; \quad (5.55)$$

– условие равенства тепловых потоков на границах контакта горячей смеси и полосы покрытия имеет вид

$$\lambda_i \partial t_i / \partial y_i \Big|_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \partial t_{i+1} / \partial y_{i+1} \Big|_{y_i=y_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (5.56)$$

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

В общем виде системы дифференциальных уравнений в частных производных имеют вид:

$$\begin{aligned} \partial t_1 / \partial \tau &= (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2) - \text{для верхнего слоя;} \\ \partial t_2 / \partial \tau &= (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2) - \text{для основания;} \\ \partial t_3 / \partial \tau &= (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2) - \text{для дополнительного} \\ &\quad \text{слоя основания;} \\ \partial t_4 / \partial \tau &= (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2) - \text{для грунта,} \end{aligned} \quad (5.56)$$

где x, y, z – координатные оси; λ_{1-5} – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(кг·°С); c_{1-5} – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С); γ_{1-5} – объемная плотность, кг/м³; τ – время, с.

С учетом допущений и данных экспериментальных исследований принимаем, что температура укладываемого слоя смеси и ее распределение в нижерасположенных слоях имеет одинаковое значение в двух плоскостях (x, z) и меняется во времени, в зависимости от различных факторов, практически в одной плоскости (y). Поэтому решение данной задачи сводится к определению распределения температуры в одной плоскости, т.е. к решению плоской задачи. С учетом этого выражения (5.61) можно представить

$$\partial t_i / \partial \tau = (\lambda_i / c_i \gamma_i) (\partial^2 t_i / \partial y_i^2), \quad \tau > 0, \quad 0 < y_i < h_i, \quad i = 1 - 5. \quad (5.57)$$

Начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} t_1 \Big|_{\tau=0}^{y=h_1=0} &= t_1; \quad t_1 \Big|_{\tau=0}^{y=h_1} = t'_1; \\ t'_1 \Big|_{\tau=0}^{y=h_1} &= t_2 \Big|_{\tau=0}^{y=h_2=0}; \quad t'_2 \Big|_{\tau=0}^{y=h_2} = t_2 + \Delta t_2 e^{-\mu_2 y}; \end{aligned}$$

$$t_2' \Big|_{\tau=0}^{y=h_2} = t_3 \Big|_{\tau=0}^{y=h_3=0}; \quad t_3' \Big|_{\tau=0}^{y=h_3} = t_3 + \Delta t_3 e^{-\mu_3 y};$$

$$t_3' \Big|_{\tau=0}^{y=h_3} = t_4 \Big|_{\tau=0}^{y=h_4=0}; \quad t_4' \Big|_{\tau=0}^{y=h_4} = t_4 + \Delta t_4 e^{-\mu_4 y},$$

где $t_1, t_1', t_2, t_2', t_3, t_3', t_4, t_4', t_5, t_5'$ – температура в начале и на глубине слоя дорожной конструкции, °С; e – основание натурального логарифма; μ_i – коэффициент, характеризующий свойства материала; $\Delta t_i e^{-\mu_i y}$ – перепад температуры между поверхностью слоя и рассматриваемой точкой на глубине y .

Граничные условия приняты на основе следующих допущений:

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

$$\lambda_1 \partial t / \partial y \Big|_{h=0} = \alpha [t(0; \tau) - t_b] - \quad (5.58)$$

условие равенства тепловых потоков на границах слоев имеет вид:

$$\lambda_i \partial t_i / \partial y_i \Big|_{y_i=h_i} = \lambda_{i+1} \partial t_{i+1} / \partial y_{i+1} \Big|_{y_{i+1}=0}; \quad \tau > 0; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad (5.59)$$

$$\lambda_i \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x_i=b_i} = \lambda_i \frac{\partial t_{i+1}}{\partial x_{i+1}} \Big|_{x_i=x_{i+1}} - \text{условие равенства тепловых потоков на границе полос покрытия}; \quad (5.60)$$

$$t_4' \Big|_{\tau=0}^{y=h_4=\infty} < \infty (t_{\text{осн}}) - \text{условие на бесконечность, ограничивающее температуру в полупространстве,}$$

здесь h_i – толщины слоев дорожной конструкции, м; τ – время, с; t_b – температура воздуха, °С; $t_{\text{осн}}$ – температура грунта на заданной глубине, °С; $t(0; \tau)$ – температура смеси в момент укладки, °С; α – коэффициент теплоотдачи горячей смеси.

Для выявления общей закономерности влияния разных факторов на время охлаждения асфальтобетонной смеси при устройстве многополосных покрытий при смещении асфальтоукладчика с одной полосы на другую рассмотрим температурный интервал укладки и уплотнения горячей смеси в пределах 160...60 °С. В таблице 5.30 представлены численные значения времени в зависимости от температуры воздуха при разных температурах горячей смеси при укладке с учетом обеспечения температурных режимов смеси в стыке сопряженных полос покрытия (толщина слоя 0,05 м, скорость укладки смеси 1 м/мин, скорость ветра 0 м/с).

5.30. Влияние температуры воздуха и горячей смеси при укладке на время охлаждения при устройстве многополосных дорожных покрытий

Температура воздуха, °С		-10	0	5	10	20	30	40	50	Зависимость
Температура смеси, °С	160	36,6	40,5	42,8	45,4	51,7	60,5	74,0	99,0	$\tau = 40,5e^{0,0143t_B}$
	140	30,2	33,6	35,6	37,9	43,6	51,5	63,8	83,7	$\tau = 33,4e^{0,0153t_B}$
	120	23,6	26,4	28,1	30,1	34,9	41,9	52,8	74,1	$\tau = 26,5e^{0,0161t_B}$
	100	16,5	18,7	20,0	21,5	25,4	31,0	40,2	58,9	$\tau = 18,6e^{0,0191t_B}$

Для наглядности продолжительность охлаждения горячей смеси в заданном температурном интервале с учетом температуры при укладке и температуры воздуха представлены на рис. 5.57.

Из представленных данных видно, что температура смеси при укладке в дорожное покрытие и температура окружающего воздуха влияют на продолжительность работ при условии обеспечения температурных режимов горячей смеси в зоне стыка сопрягаемых полос покрытия.

Для установления общей закономерности влияния указанных факторов на продолжительность работ представим данные табл. 5.30 в относительных значениях, принимая за единицу температуру смеси 160 °С (табл. 5.31).

Из представленных в табл. 5.31 данных видно, что в отличие от температуры воздуха, температура смеси при укладке в большей степени влияет на время устройства полос покрытия, чем температура воздуха. Анализ данных таблицы в относительных значениях показал,

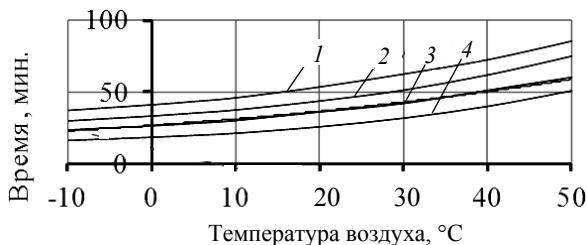


Рис. 5.57. Зависимость времени смешения асфальтоукладчиков между собой от температуры воздуха и горячей смеси при укладке:
1 – температура смеси 160 °С; 2 – 140 °С; 3 – 120 °С; 4 – 100 °С

5.31. Влияние температуры воздуха и горячей смеси на процесс охлаждения асфальтобетонной смеси (в относительных значениях)

Температура воздуха, °С		-10	0	5	10	20	30	40	50	$\Sigma n/n$
Температура смеси при укладке, °С.	160	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	140	0,83	0,83	0,83	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88	0,84
	120	0,64	0,65	0,65	0,66	0,67	0,69	0,71	0,74	0,67
	100	0,45	0,46	0,47	0,47	0,49	0,51	0,54	0,59	0,49
	80	0,24	0,25	0,25	0,25	0,27	0,29	0,32	0,38	0,28

что при температуре воздуха до 20 °С, влияние температуры укладываемой горячей смеси проявляется значительно, чем при более высоких температурах воздуха. Однако независимо от температуры воздуха, влияние температуры смеси на время работы носит общий характер. Данная закономерность подтверждается результатами других исследователей [9, 23].

Для установления общей закономерности влияния температуры горячей смеси на продолжительность охлаждения смеси принимаем среднее значение относительной величины температуры смеси (табл. 5.32). Обозначим влияние температуры горячей смеси на продолжительность устройства смежных полос покрытия через коэффициент $K_{см}$. Зависимость коэффициента $K_{см}$ от температуры смеси при укладке на время работы звена машин при устройстве смежных полос покрытия представлена на рис. 5.58.

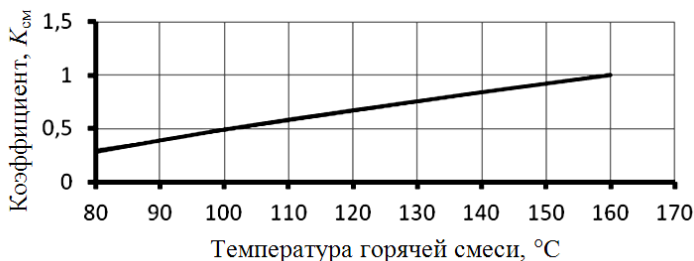


Рис. 5.58. Зависимость коэффициента влияния температуры смеси при укладке на время работы механизированного звена машин при устройстве многополосного покрытия

Численное значение коэффициента $K_{см}$ определяется из выражения

$$K_{см} = 0,0089t_{см} - 0,418, \quad (5.61)$$

где $t_{см}$ – температура горячей смеси при укладке, °С. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Темп охлаждения горячей смеси при устройстве дорожных покрытий, в том числе и зоне стыка сопряженных полос покрытия, зависит от толщины укладываемых слоев полос покрытия. Толщина слоя покрытия регламентирована и находится в интервале от 0,03 до 0,08 м [40]. Влияние толщины слоя полосы покрытия на продолжительность охлаждения горячей смеси в зоне стыка полос покрытия представлено в табл. 5.32 и на рис. 5.59.

Коэффициент корреляции представленных в табл. 5.32 уравнений равен 0,98...0,99.

5.32. Влияние толщины слоя на продолжительность охлаждения смеси при совместной работе асфальтоукладчиков

Температура воздуха, °С		-10	0	5	10	20	30	40	50	Зависимость
Толщина слоя, см	3	22,0	24,3	25,7	27,2	31,0	36,3	44,4	50,4	$\tau = 24,2e^{0,0142t_B}$
	5	36,6	40,5	42,8	45,3	51,7	60,5	74,0	99,0	$\tau = 40,5e^{0,0143t_B}$
	7	51,3	56,7	59,9	63,5	72,4	84,8	103	138	$\tau = 56,7e^{0,0146t_B}$
	10	73,3	81,0	85,6	90,7	103	121	147	170	$\tau = 81e^{0,0143t_B}$

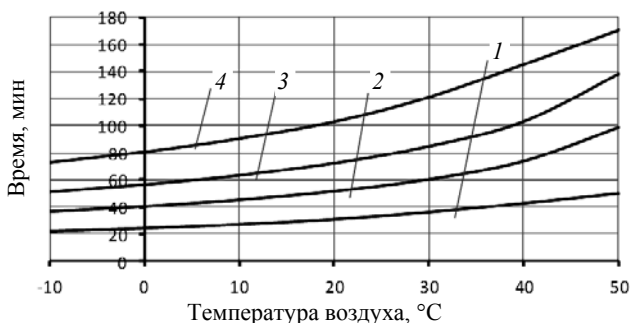


Рис. 5.59. Зависимость времени охлаждения горячей смеси в зоне стыка полос от температуры воздуха при разной толщине укладываемого слоя полосы покрытия:

1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,07 м; 4 – 0,1 м

5.33. Влияние толщины слоя полосы покрытия на продолжительность соответствия температуры смеси в стыке полос покрытия заданным температурным интервалам смеси

Температура воздуха, °С		-10	0	5	10	20	30	40	50	$\Sigma n/n$
Толщина слоя, см	3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	7	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	10	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Из представленных данных видно, что температура воздуха существенно влияет на темп охлаждения горячей асфальтобетонной смеси в зоне сопряженных полос покрытия в зависимости от толщины укладываемого слоя. Распределение горячей смеси производится слоями на большую поверхность покрытия при сравнительно небольшой толщине слоя. При одинаковых теплофизических характеристиках горячей смеси и равной поверхности покрытия количество тепла в слое зависит от толщины укладываемого слоя. Поэтому температура асфальтобетонной смеси в зоне стыка полос зависит от толщины слоя полосы покрытия. Для установления влияния толщины слоя покрытия на время соответствия асфальтобетонной смеси температурным режимам при устройстве покрытия представим данные табл. 5.32 в относительных величинах (табл. 5.33).

Из данных, представленных в табл. 5.33, видно, что между толщиной слоя покрытия и временем нахождения горячей смеси в требуемом интервале температур существует зависимость, которая представлена на рис. 5.59.



Рис. 5.60. Зависимость коэффициента влияния толщины слоя полосы покрытия на время соответствия температуры смеси в зоне стыка температурных интервалов смеси

Численное значение коэффициента определяется из выражения

$$K_h = 0,2h. \quad (5.68)$$

Установлено, что время нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале зависит от температуры смеси при укладке. При понижении температуры смеси при укладке от 160 до 120 °С численное значение коэффициента K_h уменьшается на треть (рис. 5.60).

Время охлаждения горячей смеси в значительной степени зависит от скорости ветра. Влияние скорости ветра на время соответствия температуры смеси заданным температурным интервалам при устройстве покрытия при разных значениях температуры воздуха представлено в табл. 5.34 и на рис. 5.61.

5.34. Влияние скорости ветра на время соответствия температуры смеси заданным температурным интервалам при разных значениях температуры воздуха

Температура воздуха, °С		-10	0	5	10	20	30	40	50	Зависимость
Скорость ветра, м/с	0	36,6	40,5	42,8	45,4	51,7	60,5	74,0	99	$\tau = 39,9e^{0,0161t_B}$
	3	27,1	30,0	31,7	33,6	38,3	44,9	54,9	73,4	$\tau = 29,6e^{0,0161t_B}$
	5	23,1	25,6	27,1	28,7	32,7	38,9	46,8	62,6	$\tau = 25,3e^{0,0161t_B}$
	7	20,2	22,3	23,6	25,0	28,5	33,4	40,8	54,6	$\tau = 22e^{0,0161t_B}$
	10	16,9	18,7	19,8	21,0	23,9	28,0	34,2	45,8	$\tau = 18,4e^{0,0161t_B}$
	15	13,5	14,7	15,6	16,5	18,8	22,1	27,0	36,1	$\tau = 14,6e^{0,0161t_B}$

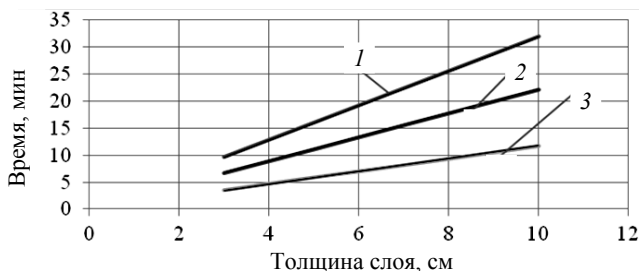


Рис. 5.61. Влияние температуры смеси при укладке на время охлаждения горячей смеси в интервале температур 160...60 °С при разной толщине укладываемого слоя (смесь типа А на битуме марки 40/60):

1 – температура смеси 160 °С; 2 – 140 °С; 3 – 120 °С

5.35. Влияние скорости ветра на время соответствия температуры смеси заданным температурным интервалам при разных значениях температуры воздуха (в относительных величинах)

Температура воздуха, °С	-10	0	5	10	20	30	40	50	$\Sigma n/n$
Скорость ветра, м/с	0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	3	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
	5	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
	7	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	10	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
	15	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

Представим данные таблицы в относительных величинах, принимая значения времени при скорости ветра, равной нулю, за единицу. Тогда в относительных значениях данные табл. 5.34 будут иметь значения (табл. 5.35).

Из данных таблицы видно, что скорость ветра влияет на темп охлаждения горячей смеси и не зависит от температуры воздуха. Обозначим влияние скорости ветра на время нахождения горячей смеси на стыке сопрягаемых полос покрытия в заданном температурном интервале через коэффициент влияния скорости ветра и обозначим его K_v . Зависимость коэффициента K_v от скорости ветра представлена на рис. 6.62.

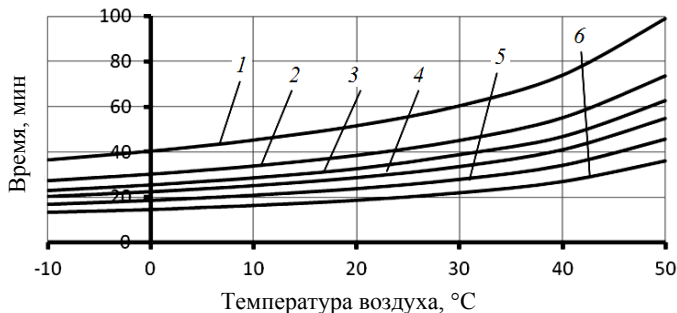


Рис. 5.62. Зависимость времени соответствия температуры смеси на стыке сопрягаемых полос от температуры воздуха при разных значениях скорости ветра

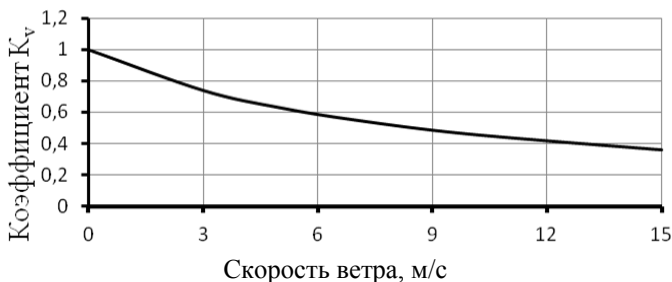


Рис. 5.63. Зависимость коэффициента K_v от скорости ветра

Численное значение коэффициента K_v определяется из зависимости

$$K_v = e^{-0,075v}, \quad (5.62)$$

где v – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции 0,95.

В соответствии с нормативными документами, рекомендуемые области применения асфальтобетонов при устройстве дорожных покрытий зависят от дорожно-климатической зоны строительства автомобильной дороги [41, 43]. Для приготовления горячих асфальтобетонных смесей, для одного и того же типа смеси, могут применяться разные марки битума, которые рекомендованы в зависимости от дорожно-климатической зоны строительства автомобильной дороги. С учетом этого эффективные температурные режимы асфальтобетонных смесей при устройстве дорожных покрытий нежесткого типа различаются между собой. В таблице 5.36 представлены значения времени соответствия температурных режимов горячих смесей в зависимости от температуры воздуха для разных типов смеси и марок битума.

Нормативными документами рекомендуется для I, II, III климатических зон для приготовления горячих асфальтобетонных смесей применять битумы марок 60/90, 90/130, 130/200, для 1–2 климатических зон рекомендуются марки битумов 40/60, 60/90 и 90/130. В таблице 5.37 представлены данные по продолжительности охлаждения горячих асфальтобетонных смесей, при условии обеспечения температурных режимов при разной толщине укладываемого слоя полосы.

Для установления общей закономерности влияния нижней температурной границы уплотнения горячей асфальтобетонной смеси представим данные табл. 5.37 в относительных величинах, условно принимая продолжительность охлаждения горячей смеси при ее температуре 60 °С за единицу (табл. 5.38). Обозначим данную величину через коэффициент влияния окончания уплотнения покрытия ($K_{п.г}$).

**5.36. Влияние типа асфальтобетона и марки битума
на продолжительность охлаждения горячей смеси
на стыке сопряженных полос покрытия**

Температура воздуха, °С	-10	0	10	20	40	
<i>Асфальтобетон типа А. Битум 40/60.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –100 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	160	19,5	21	22,8	25	31
	140	13,3	14,5	15,8	17,4	22
	120	6,9	7,5	8,3	9,2	11,9
<i>Асфальтобетон типа А. Битум 60/90.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –95 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	155	19,8	21,5	23,4	25,8	32,3
	140	15,2	16,5	18,1	20,0	25,4
	120	8,7	9,5	10,5	11,8	15,3
	100	1,8	2,0	2,2	2,5	3,4
<i>Асфальтобетон типа А. Битум 90/130.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –90 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	150	22,4	24,2	26,7	29,6	37,6
	140	19	20,7	22,7	25,2	32,6
	120	11,8	12,9	14,3	16,0	21,1
	100	4,1	4,5	5,1	5,8	7,9
<i>Асфальтобетон типа Б. Битум 40/60.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –95 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	160	21,3	23,1	25,2	27,6	34,5
	140	15,2	16,5	18,1	20,0	25,4
	120	8,7	9,5	10,5	11,8	15,3
	100	1,8	2,0	2,2	2,5	3,0
<i>Асфальтобетон типа Б. Битум 60/90.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –90 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	155	22,3	24,3	26,5	29,3	37,2
	140	17,6	19,1	21,0	23,3	30,0
	120	10,9	12,0	13,2	14,8	19,6
	100	3,8	4,2	4,7	5,3	7,3
<i>Асфальтобетон типа Б. Битум 90/130.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –85 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	150	24,6	20,8	29,5	32,8	42,3
	140	21,3	23,1	25,5	28,4	37,0
	120	14,0	15,4	17,1	19,2	25,6
	100	6,3	6,95	7,8	8,9	12,3

Продолжение табл. 5.36

Температура воздуха, °С	-10	0	10	20	40	
<i>Асфальтобетон типа В. Битум 40/60.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –90 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	160	23,3	25,2	27,6	30,4	38,4
	140	17,1	18,6	20,5	22,7	29,2
	120	10,6	11,6	12,9	14,4	19,0
	100	3,7	4,1	4,6	5,2	7,1
<i>Асфальтобетон типа В. Битум 60/90.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –85 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	155	20,0	27,2	29,9	33,1	42,6
	140	20,1	22,0	24,2	27,0	35,1
	120	13,3	14,6	16,2	16,2	24,3
	100	6,0	6,6	7,4	8,4	11,7
<i>Асфальтобетон типа В. Битум 90/130.</i>						
<i>Температура окончания уплотнения –80 °С</i>						
Температура смеси при укладке, °С	150	26,9	29,4	32,4	36,2	47,3
	140	23,4	25,7	28,4	31,8	42,0
	120	16,2	17,9	19,9	22,5	30,6
	100	8,5	9,5	10,6	12,18	17,2

5.37. Продолжительность охлаждения горячих смесей типа А, Б, В, Г, Д на битумах марок 40/60, 60/90, 90/130, 130/200

Толщина слоя покрытия, м	Нижняя граница температурного интервала уплотнения горячей смеси с учетом типа смеси и марки битума							
	100	95	90	85	80	70	60	Зависимость
0,03	15,0	16,6	18,2	20,0	21,8	26	31,0	$\tau = 304,2e^{-0,018t_{н.г}}$
0,05	25,0	27,6	30,4	33,3	36,4	43,4	51,7	$\tau = 215,2e^{-0,018t_{н.г}}$
0,07	35,0	38,7	42,5	46,6	51,0	60,7	72,4	$\tau = 153,8e^{-0,018t_{н.г}}$
0,10	50,1	55,3	60,8	66,6	72,8	86,7	103,0	$\tau = 91,9e^{-0,018t_{н.г}}$

5.38. Продолжительность охлаждения горячих смесей типа А, Б, В, Г, Д на битумах марок 40/60, 60/90, 90/130, 130/200 (в относительных значениях)

Толщина слоя покрытия, м	Нижняя граница температурного интервала уплотнения горячей смеси с учетом типа смеси и марки битума									
	160	140	120	100	95	90	85	80	70	60
0,03	0,0	0,237	0,335	0,483	0,535	0,587	0,645	0,703	0,838	1,0
0,05	0,0	0,239	0,340	0,483	0,533	0,588	0,644	0,704	0,839	1,0
0,07	0,0	0,238	0,342	0,483	0,534	0,587	0,643	0,704	0,838	1,0
0,10	0,0	0,240	0,343	0,484	0,534	0,587	0,643	0,704	0,837	1,0
$\Sigma n/n$	0,0	0,239	0,34	0,483	0,534	0,587	0,644	0,704	0,838	1,0

Из данных табл. 5.38 видно, что продолжительность нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале зависит от температуры окончания эффективного уплотнения горячей смеси, с учетом типа смеси и марки битума, и не зависит от толщины слоя покрытия. На рисунке 5.64 представлена зависимость $K_{н.г}$ от численного значения нижнего температурного интервала горячей смеси в зависимости от типа смеси и марки битума.

Численное значение коэффициента влияния нижней температурной границы окончания работ на продолжительность нахождения горячей смеси в зоне стыка полос определяется из зависимости

$$K_{н.г} = -0,985 \ln(t_{ог}) + 5,0, \quad (5.63)$$



Рис. 5.64. Влияние нижней температурной границы производства работ на продолжительность нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале

где $t_{0,y}$ – температура горячей смеси при окончании укладки горячей смеси с учетом типа смеси и марки битума. Коэффициент корреляции равен 0,99.

В общем виде время охлаждения асфальтобетонной смеси, при условии обеспечения температурных режимов горячей смеси в зоне сопряжения полос, имеет вид

$$\tau = 40,5K_{cm}K_hK_vK_{ш}K_{oy}K_{тс}K_{ос}e^{-0,0143t_b}, \text{ мин.} \quad (5.64)$$

Подставляя численные значения коэффициентов в зависимость (5.64), продолжительность охлаждения смеси в заданном температурном интервале определяется выражением

$$\tau = 24,5hK_{cm}K_{oy}K_{ш}e^{-0,0143t_b - 0,075v}, \text{ мин.} \quad (5.65)$$

При устройстве дорожного покрытия нежесткого типа соблюдается принцип непрерывности технологических процессов укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей при работе механизированного звена машин. Скорость движения звена машин определяется рабочей скоростью асфальтоукладчика, при этом звено уплотняющих машин выбирается из условия обеспечения требуемого качества уплотнения смеси с учетом их температурных режимов. Общая длина захватки звена машин определяется зависимостью

$$L_{\text{общ}} = v_{\text{ук}}\tau_{\text{стр}}, \quad (5.66)$$

где $v_{\text{ук}}$ – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; $\tau_{\text{стр}}$ – время охлаждения горячей смеси в заданном температурном интервале, зависящем от типа смеси и марки битума, мин.

Согласно представленной на рис. 5.51 технологической схеме производства работ по устройству многополосного покрытия одним асфальтоукладчиком, время охлаждения горячей смеси крайней точки полосы зависит от длины захватки, определяемой температурой воздуха, а также скоростными режимами укладки и временем перемещения асфальтоукладчика с одной полосы на другую. В этом случае продолжительность охлаждения асфальтобетонной смеси на крае полосы покрытия, с учетом температурных режимов горячей смеси, определяется

$$\tau = L/2v_{\text{ук}} + \tau_{\text{пов}} + (L/2)/v_{\text{тр}}, \text{ мин,} \quad (5.67)$$

где L – длина захватки, м; $v_{\text{ук}}$ – скорость укладки горячей смеси, м/мин; $v_{\text{тр}}$ – транспортная скорость асфальтоукладчика, м/мин; $\tau_{\text{пов}}$ – время на перемещение асфальтоукладчика с одной полосы на другую, мин.

Следует заметить, что при такой технологии, помимо охлаждения края сопрягаемых полос покрытия, возникает вопрос определения температуры (охлаждения) горячей смеси в поперечном стыке полосы покрытия, зависящего от продолжительности между укладкой смеси

на захватке. Продолжительность охлаждения горячей смеси в поперечном стыке полосы будет определяться

$$\tau = L / v_{\text{ук}} + 2\tau_{\text{пов}} + L / v_{\text{тр}}. \quad (5.68)$$

Тогда длина полосы укладки, в зависимости от температуры смеси при доставке к месту производства работы и температуры окончания укладки, будет определяться:

для поперечного стыка

$$L = 2(\tau - \tau_{\text{п}})v_{\text{ук}}v_{\text{тр}} / v_{\text{ук}} + v_{\text{тр}}, \text{ м}, \quad (5.69)$$

для продольного стыка

$$L = (\tau - 2\tau_{\text{п}})v_{\text{ук}}v_{\text{тр}} / v_{\text{ук}} + v_{\text{тр}}, \text{ м}, \quad (5.70)$$

где L – длина полосы укладки горячей смеси, м; τ – продолжительность укладки горячей смеси с учетом температурных режимов горячей смеси, мин; $\tau_{\text{п}}$ – время на перемещение асфальтоукладчика с одной полосы на другую, мин; $v_{\text{ук}}$ – скорость укладки горячей смеси, м/мин; $v_{\text{тр}}$ – транспортная скорость асфальтоукладчика, м/мин.

Из зависимостей (5.74) и (5.75) видно, что продолжительность охлаждения горячей смеси на поперечном стыке полосы меньше, чем в зоне продольного стыка.

Максимальная скорость укладки горячей асфальтобетонной смеси зависит от заданного темпа строительства дорожного покрытия. Минимальная рабочая скорость асфальтоукладчика определяется из условия обеспечения работы уплотняющих машин с учетом температурных режимов применяемой смеси, при этом длина захватки должна быть равна не менее 3 – 5 длин применяемых катков (по условию разгона и торможения). Принимаем время перехода асфальтоукладчика с одной полосы на другую – 0,06 ч, а транспортную скорость 10 – 12 м/мин, с учетом данных, представленных в работе [6]. На рисунке 5.65 представлены зависимости длины захватки при разной температуре воздуха.

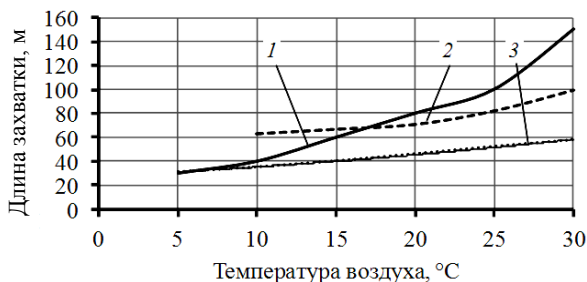
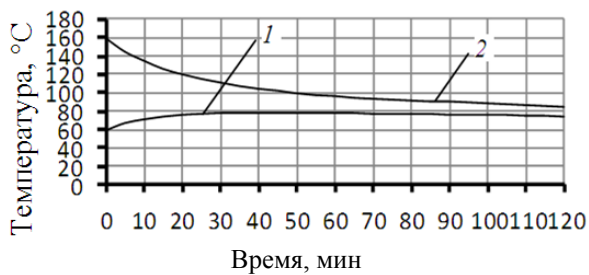


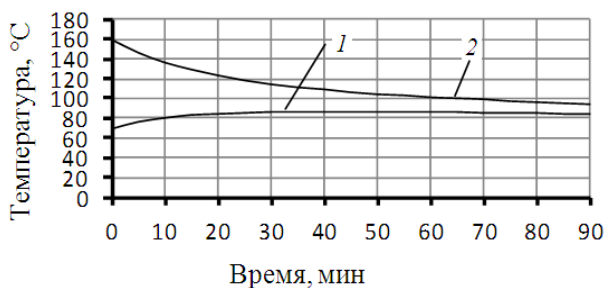
Рис. 5.65. Зависимость длины захватки от температуры воздуха:

1 – согласно рекомендациям; 2 – по данным Н. В. Горельшова;

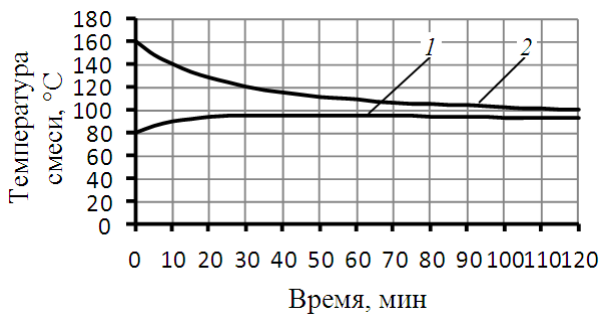
3 – по предложенной зависимости (при скорости укладки смеси 5 м/мин)



а)



б)



в)

Рис. 5.66. Распределение температуры в зоне стыка полос при разных температурах смеси в зоне стыка ранее уложенной полосы:

а – при 60 °С; б – при 70 °С; в – при 80 °С;

1 – температура асфальтобетона края первой полосы;

2 – температура смеси при укладке слоя сопряженной полосы

Используя представленные зависимости, при температуре воздуха 10 °С и заданных скоростях укладки асфальтобетонной смеси (3 и 5 м/мин), определено время укладки сопряженного слоя горячей смеси, которое будет равно, соответственно, 8,3; 12,2 и 7 мин. Используя программу для определения температуры смеси в зоне стыка сопряженных полос, получены данные по распределению температуры в зоне стыка полос при разных температурах смеси в зоне стыка ранее уложенной полосы. Результаты расчетов представлены на рис. 5.66. Из представленных данных видно, что укладка сопрягаемого слоя покрытия с более высокой температурой смеси способствует повышению температуры смеси в зоне стыка полос. В то же время несоблюдение температурных режимов в стыке сопрягаемых полос способствует недоуплотнению смеси и характеризуется низким качеством работ.

Анализ представленных данных на рис. 5.66 позволяет сделать вывод, что уплотнение стыка полос покрытия необходимо выполнять после достижения температуры смеси в стыке полос максимального значения, в отличие от существующих рекомендаций уплотнять горячую смесь на стыке полос сразу после укладки второго сопряженного слоя покрытия [42].

5.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ ДВУХ И БОЛЕЕ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОВ ПО УСТРОЙСТВУ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

При устройстве многополосных покрытий нежесткого типа широкое применение получила технология укладки горячей смеси несколькими асфальтоукладчиками, смещенными относительно друг друга в плане на некоторое расстояние (рис. 5.67).

Согласно рекомендациям, смещение укладчиков относительно друг друга в плане принимается в пределах 10...15 м, но не более 30 м.

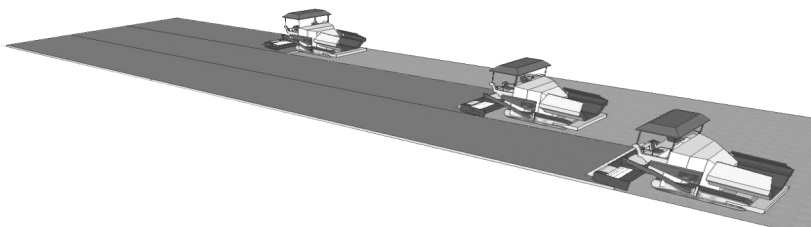


Рис. 5.67. Технология укладки смеси несколькими асфальтоукладчиками

В зависимости от темпа строительства дорожного покрытия и условий производства работ (температуры воздуха, дальности транспортирования горячей смеси, теплофизических свойств применяемой смеси, скорости ветра), длина полосы укладки может находиться в пределах от 60 до 200 м. Длина полосы укладки принимается из условия обеспечения хорошего сопряжения смежных полос [16]. Возможную длину полосы укладки принимают по табл. 5.39 [3, 8, 38].

При назначении длины захватки необходимо обеспечить монолитность продольного шва в зоне стыка сопряженных полос, которая возможна при условии обеспечения температурных режимов при укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей. Температурные режимы асфальтобетонных смесей зависят от типа смеси и марки битума, конструктивных параметров слоя, погодных условий и регламентированы нормативными документами [3, 5, 40].

Общая длина захватки при устройстве покрытия нежесткого типа зависит от скорости асфальтоукладчика и времени нахождения горячей смеси в заданном интервале температур, зависящем от свойств применяемой асфальтобетонной смеси. Установлено, что плотность асфальтобетонной смеси при укладке асфальтоукладчиком влияет на состав механизированного звена машин при устройстве покрытия. При укладке горячей смеси асфальтоукладчик не только распределяет смесь по ширине полосы покрытия, но и выполняет процесс предварительного уплотнения уложенного слоя асфальтобетонной смеси. Установлено, что в зависимости от конструктивных параметров асфальтоукладчика, величина предварительного уплотнения смеси, которая характеризуется коэффициентом предварительного уплотнения смеси, находится в пределах от 0,9 до 0,96. Следовательно, в зависимости от достижения величины предварительного уплотнения смеси, состав звена катков будет разным, поскольку каждый тип катка обеспечивает достижение коэффициента уплотнения асфальтобетона до определенного значения [22, 31, 37].

5.39. Зависимость длины полосы укладки горячей смеси от температуры воздуха

Температура воздуха, °С	Длина укладываемой полосы при работе двумя асфальтоукладчиками
5...10	60...70
10...15	70...80
15...20	80...100
20...25	100...150
Более 25	150...200

В общем виде длина захватки при работе механизированного звена машин при устройстве покрытия нежесткого типа определяется зависимостью

$$L = v_y \tau_{стр}, \text{ м}, \quad (5.71)$$

где v_y – скорость асфальтоукладчика при укладке горячей смеси, м/мин; $\tau_{стр}$ – время, определяемое температурой смеси от момента укладки до нижней температурной границы допустимого уплотнения с учетом типа смеси и марки битума, мин.

При определении длины захватки при назначении звена машин, необходимо учитывать, что для обеспечения безопасных условий работы катков минимальная длина участка укладки должна составлять от 3 до 5 длины каждого типа катка. Статистический анализ параметров дорожных катков показал, что длина катков составляет 5...6 м. Следовательно, минимальная длина участка укладки асфальтоукладчиком должна соответствовать 15...30 м (с учетом разгона и торможения).

Длина укладываемой полосы асфальтоукладчиком определяется зависимостью

$$L_y = v_y \tau_{ук}, \text{ м}, \quad (5.72)$$

где $\tau_{ук}$ – время, определяемое температурой смеси от момента укладки до нижней температурной границы укладки асфальтобетонной смеси.

Температура асфальтобетонной смеси начала и окончания укладки определена нормативными документами [3, 41, 42, 45, 47]. Время укладки асфальтобетонной смеси зависит как от свойств смеси, толщины слоя покрытия, так и условий производства и организации работ по устройству покрытия. С учетом отмеченных факторов время укладки асфальтобетонной смеси, с учетом ее температуры в зоне стыка сопряженных полос, определяется зависимостью (5.64) и имеет вид

$$\tau_{ук} = 40,5 K_{см} K_{тс} K_h K_{см} K_v K_{ш} K_{оу} e^{-0,0143t_b}, \text{ мин}. \quad (5.73)$$

Следовательно, задаваясь типом смеси и маркой битума, с учетом толщины укладываемого слоя полосы покрытия и конкретных условий производства работ, можно определить время укладки асфальтобетонной смеси и при заданной скорости асфальтоукладчика определить длину полосы укладки с учетом обеспечения температурных режимов смеси в зоне стыка сопряженных полос покрытия. На рисунках 5.68 и 5.75 представлены результаты расчетов по определению длины полосы укладки асфальтобетонной смеси при совместной работе двух асфальтоукладчиков при условии обеспечения температурных режимов смеси в зоне стыка сопряженных полос.

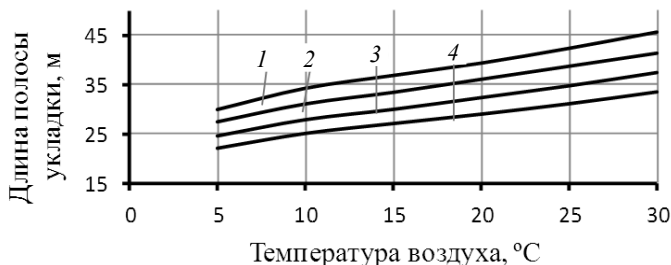


Рис. 5.68. Зависимость длины полосы укладки горячей смеси от температуры воздуха при разных температурах смеси при укладке:
 1 – температура при укладке 160 °C; 2 – 150 °C; 3 – 140 °C; 4 – 130 °C

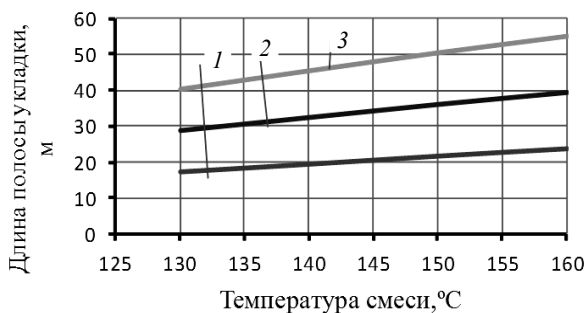


Рис. 5.69. Зависимость длины полосы укладки горячей смеси от температуры горячей смеси при разной толщине слоя покрытия. Температура воздуха 20 °C:
 1 – при толщине слоя покрытия 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,07 м

Из представленных на рис. 5.74 и 5.75 данных видно, что длина полосы укладки горячей асфальтобетонной смеси, с учетом ее температурных режимов в зоне стыка сопряженных полос, зависит не только от температуры воздуха, что учитывается рекомендациями, но и от темпа охлаждения горячей смеси. Укладка горячей смеси в смежные полосы покрытия при совместной работе двух асфальтоукладчиков, без учета температурных режимов смеси в зоне стыка полос, способствует образованию дефектов покрытия в процессе эксплуатации дороги. В качестве примера на рис. 5.70 представлены результаты моделирования температурных режимов горячей смеси, распределения температуры смеси в зоне сопряжения полос при разных значениях температуры воздуха (скорость асфальтоукладчика 2 м/мин, толщина слоя 0,05 м, скорость ветра 0 м/с, смесь типа А, битум марки 40/60 и 60/90).

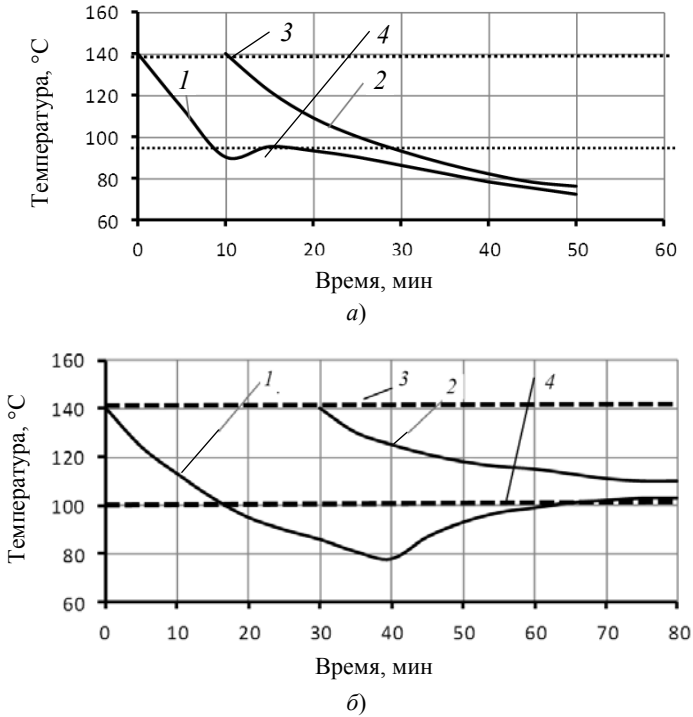


Рис. 5.70. Распределение температуры асфальтобетонной смеси в зоне стыка полос:

а – температура воздуха 5 °С; *б* – температура воздуха 20 °С;
1 – температура в зоне стыка первой полосы; *2* – в зоне второй полосы;
3 – температура начала укладки; *4* – температура окончания уплотнения

Из данных, представленных на рис. 6, *а*, видно, что при рабочей скорости асфальтоукладчика 2 м/мин и времени распределения смеси 10 мин, смещение в плане асфальтоукладчиков между собой составляет 20 м, что соответствует рекомендациям [3, 45]. В то же время в зоне стыка полос возникает незначительный участок стыка полосы, где нарушаются температурные режимы смеси при уплотнении, что и является причиной образования дефектов в зоне стыка сопряженных полос. При значительном смещении асфальтоукладчиков между собой (рис. 70, *б*), в процессе эксплуатации покрытия возникают участки со значительной протяженностью. Практика показывает, что такие участки покрытия требуют ремонтных работ уже через год эксплуатации дороги.

6. ТЕХНОЛОГИЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Заключительной стадией строительства автомобильных дорог является уплотнение дорожных покрытий, от качества выполнения которого зависит прочность, надежность и долговечность дорожного покрытия. Обеспечить требуемые характеристики покрытия можно только в определенном температурном интервале укладываемой смеси с учетом ее свойств, параметров уплотняющих машин и времени выполнения процесса укатки. Процесс уплотнения покрытия осуществляется во времени, при котором температура горячей асфальтобетонной смеси, в зависимости от свойств материала, конструктивных параметров дороги и погодных условий устройства покрытия соответствует температурным режимам применяемой смеси. Вопрос определения рациональных областей применения разных типов катков при строительстве асфальтобетонных покрытий рассмотрен в работе [23]. На основании проведенных исследований установлены зависимости между переменными параметрами, влияющие на процесс охлаждения горячей смеси, что позволило получить аналитическую зависимость для расчета продолжительности процесса уплотнения при устройстве асфальтобетонного покрытия. Предложенная зависимость имеет вид

$$\tau_{уп} = \exp(1,1938 + 0,0325T_n + 0,6202\gamma - 0,1777K_2 - 0,0265v_v + 0,0212T_v + 0,7532\ln H_{сл} + 0,0044T_n \ln H_{сл}), \quad (6.1)$$

где $\tau_{уп}$ – допустимое время уплотнения горячих асфальтобетонных смесей; T_n – начальная температура смеси, град; γ – плотность смеси, т/м³; K_2 – теплопроводность материала подстилающего слоя, Дж/(м·с·°С); v_v – скорость ветра, км/ч; T_v – температура окружающего воздуха, °С; $H_{сл}$ – толщина слоя.

Анализ предложенной зависимости показал, что она позволяет рассчитать допустимое время уплотнения при температуре смеси в момент окончания процесса уплотнения 80 °С, что применимо для горячих асфальтобетонных смесей определенного типа смеси и марки битума. В то же время нижняя температурная граница окончания уплотнения с учетом типа смеси находится в пределах 100...60 °С. Поэтому предложенная зависимость для определения допустимого времени уплотнения горячих асфальтобетонных покрытий требует уточнения.

Достичь требуемое качество уплотнения можно при определенной температуре смеси покрытия и соответствующих параметрах уплотняющих машин. Температура начала уплотнения регламентирована. Температура окончания укатки не регламентируется существующими рекомендациями, в зависимости от типа смеси, принимается в интервалах 80...60 °С [3, 5, 16]. Установлено, что для смесей на битумах марок БН и БНД нижняя температура эффективного уплотнения меняется в интервале 94...55 °С [5]. Следовательно, температуру начала укладки и окончания укатки необходимо назначать не только с учетом типа смеси, но и марки битума.

Для достижения требуемых характеристик асфальтобетонного покрытия необходимо обеспечить требуемое количество проходов по одному следу при заданной рабочей скорости движения. Поэтому для обеспечения технологических режимов уплотнения покрытий необходимо знать время работы машины в заданных температурных интервалах с учетом свойств укладываемого материала и производственных условий строительства.

Известно, что продолжительность охлаждения смеси зависит от ее теплофизических свойств смесей. Экспериментально установлено, что при укладке смеси на нижележащий слой скорость охлаждения горячей смеси достигает 5...6 °С/мин. В процессе уплотнения скорость охлаждения уменьшается и составляет, в зависимости от плотности смеси, 0,5...1,5 °С/мин.

Продолжительность уплотнения асфальтобетонной смеси зависит от разных факторов, каждый из которых влияет на время укатки. Для уточнения влияния разных факторов на продолжительность уплотнения покрытий из горячих асфальтобетонных смесей использована модель «основание–покрытие» дороги и разработанная программа на ЭВМ [10]. Результаты расчетов допустимого времени уплотнения горячих асфальтобетонных смесей при разных температурах воздуха и толщине слоя покрытия представлены на рис. 6.1.

Из представленных зависимостей видно, что допустимая продолжительность уплотнения, независимо от толщины слоя, увеличивается с повышением температуры окружающего воздуха. Следует отметить, что повышение температуры окружающего воздуха влияет в большей степени на укладку тонких слоев покрытия, чем толстых. Так, повышение температуры воздуха с 5 до 40 °С при укладке слоя смеси толщиной 0,03 м, приводит к увеличению продолжительности времени в 2,94 раза, а при этих же условиях увеличение толщины слоя до 0,1 м приводит к увеличению продолжительности времени в 2,2 раза. Аналогичная закономерность характерна и для остальных слоев.

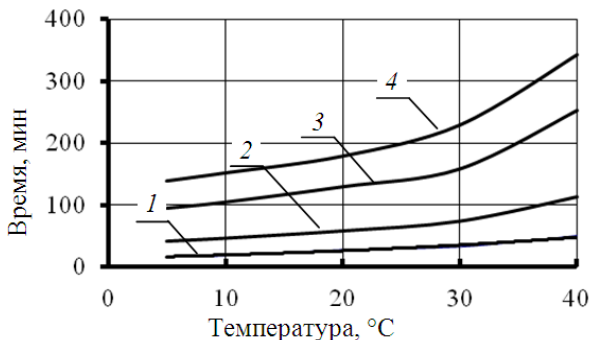


Рис. 6.1. Зависимость продолжительности работ от температуры окружающего воздуха при разной толщине укладываемых слоев (температура смеси при укладке – 160 °С, скорость ветра – 0 м/с; температура окончания уплотнения 60 °С):
 1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Анализ полученных зависимостей показывает, что они имеют одинаковый характер влияния температуры воздуха на возможную продолжительность уплотнения слоя и в общем виде их можно представить уравнением

$$\tau_{уп} = K_h e^{\alpha t_v}, \text{ мин}, \quad (6.2)$$

где $\tau_{уп}$ – время уплотнения, мин; α – коэффициент, зависящий от свойств материала; e – основание натурального логарифма; t_v – температура воздуха, °С; K_h – коэффициент, зависящий от толщины укладываемого слоя, безразмерная величина.

Численное значение коэффициентов K_h и α определяется по формулам:

$$K_h = 7072h^{1,7723}; \quad \alpha = -76,19h^3 + 16,257h^2 - 1,1572h + 0,05. \quad (6.3)$$

Коэффициент корреляции равен единице.

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что температура основания в летний период может превышать, при определенных условиях, температуру окружающего воздуха на 10...20 °С за счет потока солнечной радиации. Это влияет на интенсивность охлаждения слоя асфальтобетонной смеси, а, следовательно, на время нахождения слоя в температурных интервалах, когда могут выполняться процессы уплотнения покрытий. Установлено, что продолжительность процесса уплотнения покрытия увеличивается про-

порционально росту температуры окружающего воздуха до 15...20 °С. При дальнейшем увеличении температуры воздуха рост продолжительности работ происходит более интенсивно, что характерно для солнечных дней и температуры окружающей среды свыше 20 °С. Экспериментально установлено, что в зависимости от климатических условий, температура поверхности покрытия за счет солнечной радиации может превышать температуру окружающего воздуха на 10...30 °С, особенно при отсутствии ветра, что подтверждается работами других авторов [1]. При расчете продолжительности строительства покрытий нежесткого типа учитывают влияние температуры основания за счет коэффициента, зависящего от температуры основания (K_{oc}), определение которого приведено в главе 4.

Процесс уплотнения смеси характеризуется более длительным промежутком времени, чем при укладке смеси. Отмечалось, что с повышением плотности смеси, темп охлаждения замедляется. Влияние скорости ветра на продолжительность работ, при разной толщине слоя покрытия, представлено на рис. 6.2.

Из представленных данных видно, что не зависимо от толщины уплотняемого слоя, характер влияния скорости ветра не меняется, что позволяет установить общую закономерность влияния скорости ветра на процесс охлаждения асфальтобетонной смеси. Представим данные на рис. 6.1 в относительных величинах, приняв за единицу продолжительность охлаждения горячей смеси при скорости ветра, равной нулю, и обозначим ее через коэффициент влияния скорости ветра (K_v). Влияние скорости ветра на коэффициент влияния скорости ветра представлено на рис. 6.3.

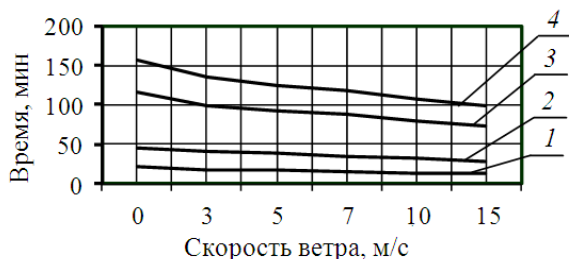


Рис. 6.2. Продолжительность процесса уплотнения в зависимости от скорости ветра (температура воздуха 20 °С, температура смеси при распределении 160 °С):

1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

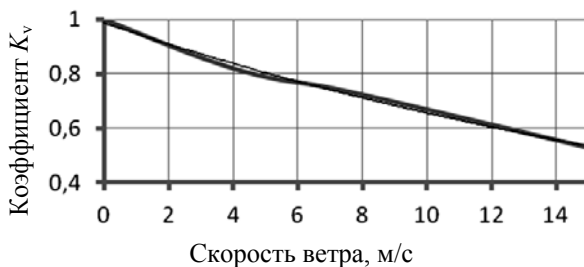


Рис. 6.3. Зависимость K_v от скорости ветра

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что скорость ветра, независимо от толщины укладываемого слоя, влияет на допустимое время уплотнения покрытия нежесткого типа. Увеличение скорости ветра приводит к значительному сокращению продолжительности работ при укладке тонких слоев. Так, при укладке слоя толщиной 0,03 м и скорости ветра 3...5 м/с, продолжительность работ уменьшается на 20...25 % и при дальнейшем увеличении скорости ветра время сокращается на 30...50 % . Зависимость коэффициента влияния скорости ветра от скорости ветра для слоя толщиной 0,03 м имеет вид

$$K_v = 0,98e^{-0,0491v}, \quad (6.4)$$

где K_v – коэффициент, зависящий от скорости ветра, безразмерная величина; v – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции равен 0,97.

С увеличением толщины слоя (0,05 м и более) влияние скорости ветра проявляется в меньшей степени. При толщине слоя 0,05 м это влияние проявляется при скорости ветра до 7 м/с. Для таких слоев коэффициент влияния скорости ветра определяется по формуле

$$K_v = 0,99e^{-0,041v}, \quad (6.5)$$

где K_v – коэффициент, зависящий от скорости ветра, безразмерная величина; v – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Уплотнение покрытия начинается после укладки смеси асфальтоукладчиком при температуре, соответствующей началу уплотнения. Время доставки асфальтобетонной смеси к месту производства работ зависит от времени транспортировки и погодных условий. Поэтому температура смеси в момент укладки может быть разной, что влияет на продолжительность работ. С целью определения допустимой продолжительности работы по уплотнению покрытий от температуры смеси при укладке, при разной толщине слоя, смоделированы тепловые процессы при уплотнении покрытия, результаты которых представлены на рис. 6.4.

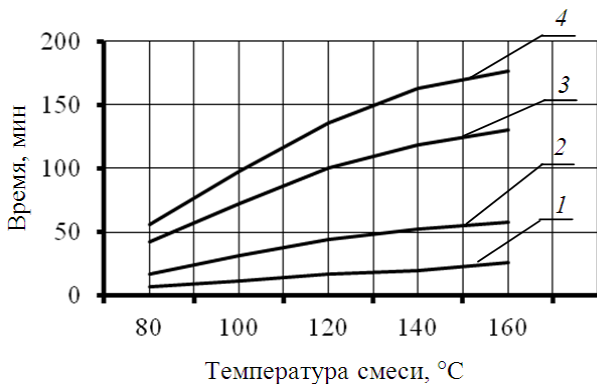


Рис. 6.4. Влияние температуры смеси при укладке на продолжительность работ по уплотнению покрытий (скорость ветра 0 м/с, температура воздуха 20 °C):
 1 – толщина слоя 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Из представленных данных видно, что температура смеси в момент укладки влияет на допустимое время уплотнения покрытия. Поэтому в процессе транспортировки смесей необходимо принимать меры для уменьшения потерь тепла в окружающую среду, особенно при производстве работ в условиях пониженных температур окружающего воздуха и укладке тонких слоев покрытия. Допустимая продолжительность работ по уплотнению слоя, при разной толщине, с учетом влияния температуры смеси при укладке, определяется по формулам:

при толщине слоя

$$\begin{aligned}
 0,03 \text{ м} \quad \tau &= 26,24 \ln(t_{\text{см}}) - 109,1; \\
 0,05 \text{ м} \quad \tau &= 59,66 \ln(t_{\text{см}}) - 247,54; \\
 0,08 \text{ м} \quad \tau &= 128,1 \ln(t_{\text{см}}) - 516,74; \\
 0,10 \text{ м} \quad \tau &= 174,98 \ln(t_{\text{см}}) - 707,4.
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

Коэффициент корреляции составляет 0,96...0,99.

Из рисунка 6.4 видно, что независимо от толщины слоя покрытия, характер зависимостей сохраняется. Для уточнения влияния температуры укладываемой смеси на допустимое время уплотнения при разной толщине покрытия представим данные на рис. 6.4 в относительных величинах, принимая температуру смеси при укладке слоя покрытия 160 °C за единицу. Обозначим влияние температуры смеси при укладке на возможную продолжительность уплотнения через $K_{\text{тс}}$. Влияние температуры смеси на продолжительность уплотнения в относительных величинах представлено в табл. 6.1.

6.1. Влияние температуры смеси при укладке на допустимое время уплотнения (в относительных значениях)

Температура смеси, °С		160	140	120	100	80
Толщина слоя, м	0,03	1,0	0,80	0,63	0,44	0,25
	0,05	1,0	0,90	0,74	0,53	0,29
	0,08	1,0	0,91	0,77	0,55	0,32
	0,10	1,0	0,92	0,76	0,55	0,31
	$\sum n/n$	1,0	0,91	0,76	0,54	0,31

Из таблицы 6.1 видно, что с понижением температуры смеси при укладке, независимо от толщины слоя, допустимое время уплотнения уменьшается. В большей степени этот фактор влияет при укладке слоев толщиной 0,03 м. Это объясняется тем, что поверхность покрытия имеет значительные размеры при небольшой толщине укладываемого слоя. Для покрытий с толщиной 0,05 м и более, закономерность носит общий характер, подчиняется логарифмической зависимости и имеет вид

$$K_{тс} = 1,005 \ln(t_{см}) - 4,0791, \quad (6.7)$$

где $K_{тс}$ – коэффициент влияния температуры смеси, безразмерная величина; $t_{см}$ – температура смеси при укладке, °С. Коэффициент корреляции равен 0,99.

Для слоя покрытия толщиной 0,03 м зависимость имеет вид

$$K_{тс} = 0,009 \ln t_{см} - 0,44, \quad (6.8)$$

где $t_{см}$ – температура смеси при укладке, °С; коэффициент корреляции 0,98.

Согласно исследованиям, предельные температурные границы эффективного уплотнения горячих асфальтобетонных смесей зависят от марки битума и представлены в табл. 5.29 [5]. Рассматривая процесс охлаждения горячих асфальтобетонных смесей во времени, с применением различных марок битумов, уложенных при одинаковых условиях устройства дорожного покрытия, получены данные по продолжительности охлаждения слоя в зависимости от температуры окончания процесса уплотнения (табл. 6.2).

Представим данные таблицы в относительных величинах, условно принимая за единицу время окончания процесса уплотнения 60 °С. Принимаем полученную относительную величину за коэффициент, учитывающий нижнюю температурную границу укладки смеси и обозначим его $K_{о,р}$ (табл. 6.3).

6.2. Продолжительность процесса охлаждения смесей типа А, Б, В на битумах марок БНД 40/60, 60/90 , 90/130 в зависимости от температуры окончания уплотнения при различной толщине слоя (мин)

Температура смеси, °С	120	110	100	90	80	70	60	
Толщина слоя, м	0,03	1,0	3,0	5,0	6,0	10,0	15,0	25
	0,05	5,0	9,0	14,0	21,0	29,0	41,0	58
	0,08	10,0	21,0	33,0	48,0	66,0	91,0	129
	0,10	13,0	28,0	45,0	66,0	92,0	125	179

6.3. Продолжительность процесса охлаждения смесей в зависимости от температуры окончания уплотнения

Температура смеси, °С	120	110	100	90	80	70	60	
Толщина слоя, м	0,03	0,04	0,11	0,19	0,23	0,38	0,58	1,0
	0,05	0,09	0,16	0,25	0,37	0,51	0,72	1,0
	0,08	0,08	0,16	0,26	0,38	0,52	0,72	1,0
	0,10	0,08	0,16	0,26	0,38	0,53	0,72	1,0
	$\sum n/n$	0,08	0,16	0,26	0,38	0,52	0,72	1,0

На рисунке 6.5 представлена зависимость коэффициента окончания уплотнения смеси от температуры окончания работы.



Рис. 6.5. Зависимость коэффициента окончания уплотнения смеси от температуры окончания работы

Из данных табл. 6.5 видно, что при укладке слоев толщиной 0,03 м температура укладываемой смеси значительно влияет на процесс охлаждения слоя, и численное значение $K_{o,p}$ для данных марок битума определяется по формуле

$$K_{o,p} = -4,788 (t_{o,p} / 100)^3 + 15,85 (t_{o,p} / 100)^2 - 17,979 (t_{o,p} / 100) + 7,09. \quad (6.9)$$

Коэффициент корреляции – 0,998.

Для покрытий с толщиной 0,05 м и более, численное значение $K_{o,p}$ определяется по формуле

$$K_{o,p} = 12,57 e^{-0,04 t_{o,p}}, \quad (6.10)$$

где $t_{o,p}$ – температура окончания уплотнения данным типом катка, °С. Коэффициент корреляции – 0,998.

В общем виде допустимое время уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей имеет вид

$$\tau_{уп} = K_{тс} K_v K_h K_m K_{o,p} e^{at_v}, \text{ мин}, \quad (6.11)$$

где $K_{тс}$, K_v , K_h , K_m , $K_{o,p}$ – коэффициенты, определяемые по формулам 6.3; 6.5; 6.8; 6.10; 6.12.

Процесс укатки горячих асфальтобетонных смесей производится в заданных температурных интервалах, которым соответствует время работы катка. Время работы катка (легкого, среднего и тяжелого) в заданном температурном интервале будет определяться по формуле (6.12), где численное значение $K_{o,p}$ будет зависеть от температуры начала и окончания процесса уплотнения. В этом случае величина K_m будет определяться

$$K_{o,p} = K_{o,p1} - K_{o,p2}, \quad (6.12)$$

где $K_{o,p1}$ и $K_{o,p2}$ – коэффициенты, соответствующие заданным значениям температуры окончания и начала работы катка.

Таким образом, полученная зависимость позволяет определить возможную продолжительность уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей с учетом температурных интервалов работы каждой уплотняющей машины в зависимости от условий производства работ, что дает возможность выбора технологических параметров применяемых машин.

6.1. ВЫБОР ЗВЕНА УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ УПЛОТНЕНИЯ

Анализ применяемых технологий для устройства покрытий показал, что звено уплотняющих машин состоит из катков, отличающихся как по массе, так и по принципу воздействия на уплотняемый материал. С увеличением плотности материала необходимо повышать нагрузку

на валец, что является основанием для увеличения массы катка для последующего этапа уплотнения покрытия.

Обеспечение прочностных параметров покрытия достигается в определенных температурных интервалах смеси, которыми определяется продолжительность уплотнения. Учитывая, что продолжительность работы катка определенного типа в установленных температурных интервалах незначительна, стали уменьшать количество полос укатки за счет увеличения ширины вальца. Ширина вальца при одной и той же массе катка бывает разной, поэтому в качестве критерия иногда принимают линейное давление вальца [9, 22, 31, 37].

Площадь контакта вальца, при одной и той же массе катка и ширине вальца, зависит от диаметра. С увеличением диаметра поверхность контакта вальца возрастает, что уменьшает силовое воздействие на уплотняемый материал, а, следовательно, на достигаемую плотность асфальтобетона. По величине контактных напряжений, в первом приближении, сравнивают параметры катков. Такой сравнительный анализ параметров катков можно применять при одинаковом методе уплотнения. При назначении катков с разными методами уплотнения сравнение параметров необходимо проводить по необратимой деформации материала, величина которой характеризует не только силовое воздействие вальца, но и время действия нагрузки.

Наряду с катками статического действия, находят применение вибрационные катки, которые по уплотняющему эффекту заменяют более тяжелые катки статического действия. Известно, что характер колебаний вальца не влияет на качество уплотнения. С увеличением вынуждающей силы ходовые качества катка снижаются. Поэтому величина относительной вынуждающей силы в самоходных вибрационных катках ограничена.

Эффективность работы катка зависит от скорости передвижения. Увеличение рабочей скорости приводит к снижению достигаемой плотности покрытия и требует увеличения проходов по одному следу. Время действия нагрузки на частицу материала за один проход катка в статическом режиме при разных скоростях укатки составляет 0,2...0,4 с. Время действия нагрузки при работе вибрационного катка зависит также от относительной вынуждающей силы и частоты колебаний. Объективным показателем, позволяющим сравнивать параметры катков между собой при укатке, является величина необратимой деформации, которая достигается при одинаковом напряженном состоянии материала.

Установлено, что время контакта вальца вибрационного катка с материалом зависит от параметров вибрации и определяется, в зависимости от относительной вынуждающей силы, из выражения

$$t_{\text{к}}^{\text{в}} = t_{\text{к}} e^{-0,084(P/Q)}, \quad (6.13)$$

где t_k^B – время контакта вальца катка вибрационного действия, с; t_k – время контакта вальца катка при статическом режиме уплотнения, с; P/Q – величина относительной вынуждающей силы.

Свойства горячей асфальтобетонной смеси зависят от температуры. С понижением температуры увеличиваются прочностные характеристики асфальтобетона. Увеличение же вязкости битума способствует усилению связей между частицами материала и образованию монолитного слоя, обладающего большей распределяющей способностью. Это приводит к снижению эффективности работы всех уплотняющих машин. На рисунке 6.6 представлены зависимости изменения остаточной деформации смеси от ее температуры при равных контактных давлениях.

Из представленных зависимостей видно, что с понижением температуры смеси эффективность уплотнения снижается, независимо от способа уплотнения.

Величина относительной деформации материала от параметров вибрации катка и температуры смеси определяется из выражения

$$\varepsilon_{\text{общ}} = 0,67e^{0,0007t + 0,0026\omega - 0,0756(P/Q)}, \quad (6.14)$$

где t – температура смеси, °С; ω – частота колебаний вальца, Гц; P/Q – относительная вынуждающая сила.

При одинаковых контактных напряжениях под вальцами катков статического и вибрационного действия, соотношение между параметрами катков имеет вид

$$\sqrt{q_1 E_1 / R_1} = \varepsilon_{\text{отн}} K_1 \sqrt{q_2 E_2 / R_2}, \quad \text{МПа}, \quad (6.15)$$

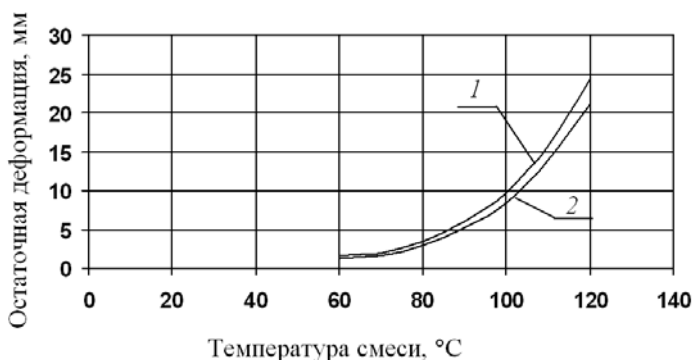


Рис. 6.6. Влияние температуры смеси на остаточную деформацию материала:

1 – каток статического действия; 2 – каток вибрационного действия (при относительной вынуждающей силе, равной 2, и частоте колебаний вальца 50 Гц)

где q_1, q_2 – линейные давления, Кн/м, R_1, R_2 – радиусы вальцов, м, статического и вибрационного катков соответственно; E_1 и E_2 – модули деформации уплотняемых материалов, МПа; K_1 – коэффициент, зависящий от относительной вынуждающей силы, определяемый из выражения

$$K_1 = \varepsilon_{\text{отн}} (1,67 + 1,31 \ln(P/Q)), \quad (6.16)$$

где $\varepsilon_{\text{отн}}$ – относительная деформация материала.

При работе на захватках с одинаковым модулем деформации уплотняемого материала и равных диаметрах вальцов, соотношение имеет вид

$$q_1 = K_2 q_2, \quad (6.17)$$

где K_2 – безразмерная величина, зависящая от параметров вибрации, определяется из выражения

$$K_2 = \varepsilon_{\text{отн}}^2 (1,67 + 1,31 \ln(P/Q))^2. \quad (6.18)$$

Для определения соотношений по массе катков вибрационного и статического действия, при равном модуле деформации, зависимость имеет вид

$$Q_1 = Q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 B_1 R_1 / B_2 R_2, \quad (6.19)$$

где B_1, B_2, Q_1, Q_2 – ширина вальцов и масса катков.

При одинаковой ширине уплотняемой полосы и разных линейных давлениях зависимость имеет вид

$$q_1 = q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 R_1 / R_2. \quad (6.20)$$

В качестве силового фактора, влияющего на величину напряжений под вальцом катка, принимается отношение линейного давления вальца к его радиусу. В этом случае сравнение параметров катков можно осуществлять по формуле

$$q_1 / R_1 = q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 / R_2. \quad (6.21)$$

Для существующих параметров катков статического действия отношение линейного давления к радиусу вальца находится в пределах 0,22...1,7. У вибрационных катков это отношение принимается в пределах 0,29...0,65. На рисунке 6.7 представлены зависимости коэффициента эффективности вибрационного катка от относительной вынуждающей силы при разных критериях сравнения параметров катков.

Из представленных зависимостей видно, что эффективность вибрационных катков по отношению к каткам статического действия при уплотнении материала с одинаковой деформативной способностью зависит от величины относительной вынуждающей силы. Интенсивный рост напряжений под вибрационным вальцом наблюдается при увеличении относительной силы до трех, затем темп роста уменьшается. При одинаковых статических параметрах катков (радиус и ширина



Рис. 6.7. Зависимость коэффициента эффективности вибрационного катка от относительной вынуждающей силы:

1 – по контактным напряжениям; 2 – с учетом деформаций при равных радиусах и ширине вальцов – ($K_1 \epsilon_{отн}$); 3 – по уплотняющей способности катков при условии равной ширины укатываемой полосы ($K_1^2 \epsilon_{отн}^2$)

вальца) и деформативной способности материала, коэффициент эффективности интенсивно увеличивается до относительной силы, равной трем, затем практически стабилизируется на величине коэффициента, равного двум. При применении катков с разными силовыми параметрами, коэффициент эффективности вибрационного катка увеличивается до относительной силы, равной четырем, а затем происходит снижение эффективности, что объясняется уменьшением времени воздействия вальца на уплотняемый материал.

Установлено, что эффективность вибрационного катка по отношению к катку статического действия зависит также от температуры уплотняемой смеси. На рисунке 6.8 представлена зависимость коэффициента эффективности от температуры смеси.

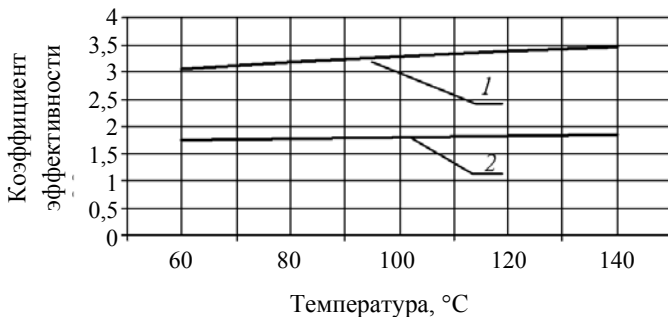


Рис. 6.8. Зависимость коэффициента эффективности вибрационного катка от температуры смеси:

1 – по напряжениям; 2 – по деформациям

Таким образом, зная относительную вынуждающую силу и параметры вибрационного вальца катка, можно определить эквивалентный каток статического действия.

Установлено, что эквивалент вибрационного катка зависит от относительной возмущающей силы, и при постоянной частоте колебаний находится в интервале 1,6...4.

6.2. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Строительство дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей ведется механизированным звеном машин, состоящим из асфальтоукладчика и уплотняющих машин, параметры которых зависят от заданного темпа строительства, условий производства работ и свойств применяемого материала. С учетом непрерывности строительства дорожных покрытий эффективность работы машин зависит от результатов совместной работы, при которой каждая машина (асфальтоукладчик, каток) выполняет свои функции в заданных температурных интервалах и создает фронт работы для других машин.

Продолжительность выполнения отдельных операций (укладка смеси, уплотнение слоя определенным типом катка) зависит от конкретных условий строительства и свойств применяемого материала. Достичь требуемых показателей качества строительства покрытия можно при условии, что температура доставляемой смеси и работа механизированного звена машин будет осуществляться в определенных температурных интервалах, зависящих от свойств материала при соответствующих параметрах машин. Результаты работы каждой машины по устройству покрытия из горячих асфальтобетонных смесей зависят от температурных и технологических режимов укладки и уплотнения слоя, к которым относятся рабочие скорости передвижения машин, число проходов катков по одному следу и соответствие параметров машин свойствам материала. Обеспечить требуемое число проходов с соответствующими скоростями необходимо за время, в течение которого асфальтобетонная смесь находится в заданном температурном интервале. Поэтому параметры машин, входящие в комплект оборудования для строительства дорожных покрытий из горячих смесей, должны быть взаимосвязаны между собой как по продолжительности выполнения операций, так и температурным режимам.

Температура материала, доставляемого к месту производства работ, зависит от свойств смеси, температуры при загрузке, дальности перемещения и скорости движения транспортных средств, температу-

ры воздуха и использования защитных устройств от охлаждения смеси при транспортировке смеси. Температура смеси влияет как на величину коэффициента уплотнения, так и прочность асфальтобетона .

В практике строительства дорожных покрытий существует мнение, что горячие асфальтобетонные смеси можно уплотнять при пониженных температурах смеси при наличии тяжелых катков. Это приводит к снижению эффективности работы уплотняющих машин и низкому качеству покрытий. Исследованиями В. Б. Пермякова установлено, что при одном и том же коэффициенте уплотнения (0,995...0,996) прочность образцов на сжатие при температуре 50 °С ($R_{сж}^{50}$) уменьшается с понижением температуры, при которой они формовались. Наиболее существенное снижение прочности образцов наблюдается для смесей с высоким содержанием щебня типа А (31,1 %). Для смесей типа В снижение прочности образцов составляет 12,2 % [31].

Продолжительность транспортировки асфальтобетонных смесей устанавливается из условия обеспечения минимально допустимой температуры при укладке. Анализ температуры смеси при отгрузке и укладке показывает, что в процессе транспортировки смеси тепловые потери должны быть сведены к минимуму, что возможно только при использовании различных защитных устройств. При движении транспортных средств температура слоев смеси, расположенной у боковой поверхности кузова и верхней части транспортируемой смеси, за счет конвективной теплоотдачи, снижается. Это способствует образованию некоторых объемов смеси с более высокой вязкостью, что приводит к укладке смесей с разными температурами и образованию участков на покрытии с пониженными коэффициентами уплотнения и прочностными характеристиками. Для обеспечения однородности смеси загрузки автотранспорта смесью необходимо производить в несколько приемов. При заполнении емкости кузова транспортной машины с одной стоянки крупный наполнитель скатывается по боковой поверхности образующей конуса, что способствует расслоению смеси. При загрузке такой смесью бункера асфальтоукладчика образуются участки с неоднородной структурой, снижающие качество устройства покрытия.

При заданном темпе устройства покрытия и работе одного асфальтоукладчика, для сопряжения двух параллельных полос, длина полос укладки зависит от температуры окружающего воздуха и условий производства работ и принимается по рекомендациям [3, 16, 41]. Процесс устройства покрытия нежесткого типа ведется звеном машин непрерывно. За время охлаждения смеси, с момента укладки до начала процесса укатки, асфальтоукладчик производит распределение и предварительное уплотнение. В зависимости от типа смеси и марки битума,

также условий строительства и конструктивных параметров покрытия продолжительность охлаждения слоя будет разной. За этот промежуток времени асфальтоукладчик должен обеспечить фронт работы для катков, уплотняющих покрытие в заданных температурных границах с обеспечением требуемого качества покрытия. Длина полосы укладки будет определяться

$$L_{\text{ук}} = v_a \tau_{\text{ук}}, \text{ м}, \quad (6.22)$$

где v_a – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; $\tau_{\text{ук}}$ – время укладки, мин.

Проведенными исследованиями установлено, что время охлаждения смеси зависит от многих факторов и изменяется в широких интервалах.

Рабочая скорость асфальтоукладчика принимается исходя из требуемого темпа устройства покрытия, при условии обеспечения требуемых качественных показателей строительства покрытия. Ведущей машиной, определяющей производительность механизированного звена машин, является асфальтоукладчик, который не только укладывает слой смеси с заданными параметрами, но и производит предварительное уплотнение. Качество укладки смеси зависит от конструктивных параметров машины, температуры смеси при укладке, ее свойств и рабочей скорости перемещения асфальтоукладчика. Анализ технических характеристик асфальтоукладчиков показал, что рабочие скорости машин позволяют вести процесс укладки смесей в пределах от 0,8 до 27 м/мин при темпах укладки от 0,3 до 10 км/смену. По результатам экспериментальных исследований установлено, что применение при укладке смеси трамбующего бруса и вибрационной плиты повышает модуль деформации слоя в два–три раза по отношению к конструкциям асфальтоукладчиков с пассивными рабочими органами.

При выборе скорости укладки необходимо учитывать следующие факторы:

1. Рабочая скорость асфальтоукладчика должна обеспечивать заданный темп строительства покрытия.

2. Рабочая скорость асфальтоукладчика должна быть согласована со скоростными режимами и типами катков, при использовании которых реализуется требуемая прочность покрытия.

3. С учетом непрерывности устройства асфальтобетонного покрытия длина захваток укладки и уплотнения катком, в заданных температурных интервалах, должны быть равны между собой. Для обеспечения требуемого качества уплотнения каток должен совершить необходимое количество проходов по одному следу за время, в течение которого его параметры соответствуют температурному интервалу уплотняемой смеси.

Существующим нормативным документом регламентирована температура смеси начала уплотнения с учетом типа смеси и марки битума [41]. Для приготовления смеси любого типа могут быть использованы разные марки битума БНД, свойства которых зависят от температуры, а, следовательно, имеют разные температуры окончания работ. Существующие рекомендации по температурным режимам уплотнения учитывают только тип смеси, в соответствии с которыми определяются рациональные температурные режимы уплотнения смесей катками разных типов.

Количество проходов катков для обеспечения требуемой плотности асфальтобетона соответствует 18 – 21 проходам.

Из представленных зависимостей видно, что температура окончания процесса уплотнения асфальтобетонного покрытия зависит от марки битума. При достижении в процессе уплотнения нижнего интервала температуры смеси, характерного для каждой марки битума и для дальнейшего достижения требуемой плотности асфальтобетона, требуется увеличение числа проходов катка, что свидетельствует о снижении уплотняемости смеси. Можно полагать, что температура, при которой происходит изменение уплотняемости смеси, является критической, ниже которой уплотнение становится неэффективным. На основании установленных зависимостей рекомендуются температуры окончания уплотнения покрытий с учетом типа смеси и марки битума, которые представлены в табл. 6.4.

Анализ полученных значений температуры окончания процесса уплотнения асфальтобетонных смесей при разных марках битума показывает, что для смесей с битумами марок БНД 40/60, 60/90 и 90/130 необходимо увеличить температуру окончания эффективного уплотнения. Повышение температуры окончания эффективного уплотнения смесей приводит к уменьшению времени работы уплотняющих машин, что требует тщательной проработки технологических процессов работы применяемых машин при устройстве покрытий из горячих асфальтобетонных смесей и постоянного контроля температуры поставляемой смеси.

Для достижения требуемых показателей качества уплотнения каток должен совершить необходимое количество проходов по одному следу за время, в течение которого его параметры соответствуют температурному интервалу уплотняемого покрытия. В зависимости от уплотняемого типа смеси и марки битума температурные границы работы машин отличаются между собой. Используя полученные результаты, разработаны рекомендуемые температуры уплотнения асфальтобетонных смесей с учетом типа смеси и марки битума, которые представлены в табл. 6.4.

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

Марка битума	Рекомендуемые интервалы температуры уплотнения дорожных покрытий на этапах, °С					
	Предварительный		Основной		Окончательный	
	начало	конец	начало	конец	начало	конец

Асфальтобетон типа А

БНД 40/60	160...150	140...130	140...130	110...105	110...105	100...95
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	115...105	115...105	95...90
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	105...100	105...100	90...85
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	95...90	95...90	80...75

Асфальтобетон типа Б

Марка битума	Рекомендуемые интервалы температуры уплотнения дорожных покрытий на этапах, °С							
	Предварительное		Укладка		Промежуточное		Окончательное	
	начало	конец	начало	конец	начало	конец	начало	конец
БНД 40/60	160... 150	140... 135	140... 135	125... 120	125... 120	110... 105	110... 105	95...90
БНД 60/90	155... 145	135... 130	135... 130	120... 115	120... 115	105... 100	105... 100	90...85
БНД90/130	150... 140	130... 125	130... 125	115... 110	115... 110	100... 95	100... 95	85...80
БНД130/200	140... 130	115... 110	115... 110	105... 110	105... 110	90... 85	90... 85	75...70

Асфальтобетон типа В

Марка битума	Рекомендуемые интервалы температуры уплотнения дорожных покрытий на этапах, °С							
	Укладка		Предварительное		Промежуточное		Окончательное	
	начало	конец	начало	конец	начало	конец	начало	конец
БНД 40/60	160... 150	140... 135	140... 135	125... 120	125... 120	110... 105	110... 105	95...90
БНД 60/90	155... 145	135... 130	135... 130	120... 115	120... 115	105... 100	105... 100	90...85
БНД 90/130	150... 140	130... 125	130... 125	115... 110	115... 110	100... 95	100... 95	85...80
БНД130/200	140... 130	115... 110	115... 110	105... 110	105... 110	90... 85	90... 85	75...70

Из представленных данных видно, что в зависимости от типа смеси и барки битума температурные режимы работы катков отличаются. Длина захватки при работе катка в заданном температурном интервале, с учетом количества укатываемых полос (ϵ) и числа проходов по одному следу (n) определяется

$$L_{\text{уп}} = v_{\text{к}} \tau_{\text{уп}} / \epsilon n, \text{ м}, \quad (6.23)$$

где $v_{\text{к}}$ – средняя рабочая скорость катка, м/мин; $\tau_{\text{уп}}$ – возможное время работы катка в заданном температурном интервале, мин.

Для обеспечения непрерывности устройства покрытия нежесткого типа необходимо, чтобы длина укладываемой полосы и длина захватки при работе катка определенного типа, в заданных температурных интервалах, были равны между собою. Это условие имеет вид

$$L_{\text{ук}} = L_{1\text{уп}} = L_{2\text{уп}} = L_{3\text{уп}}, \quad (6.24)$$

где $L_{1\text{уп}}$, $L_{2\text{уп}}$, $L_{3\text{уп}}$ – длина захватки при уплотнении легким, средним, тяжелым катками в соответствующих температурных интервалах, м.

Исходя из этого условия, соотношения между рабочими скоростями асфальтоукладчика и катками в заданных температурных интервалах, имеют вид

$$V_{\text{а}} = V_{\text{к}} \tau_{\text{уп}} / \tau_{\text{ук}} \epsilon n, \text{ м/мин}. \quad (6.25)$$

Из представленного выражения видно, что скорость укладки слоя покрытия зависит не только от средней скорости укатки и числа проходов по одному следу, но и продолжительности укладки и уплотнения слоя в заданных температурных интервалах. Данная зависимость позволяет решать и другие задачи. При заданных скоростях укладки слоя и числа проходов катка в установленном температурном интервале уплотнения смеси можно определить среднюю скорость катка, на основании которой, с учетом существующих рекомендаций, можно выбирать тип уплотняемой машины. Аналогичным образом можно определить число проходов катка по одному следу.

Таким образом, данная зависимость позволяет осуществлять выбор технологических параметров машин для строительства покрытий их горячих асфальтобетонных смесей.

Анализ представленной зависимости показывает, что при работе механизированного звена машин по устройству дорожных покрытий возможны следующие варианты производства работ, при условии обеспечения заданного числа проходов катка и скорости потока:

1. Время работы асфальтоукладчика и катка в заданном температурном интервале равны между собой, т.е. $\tau_{\text{уп}} / \tau_{\text{ук}} = 1$. При таком соотношении обеспечивается непрерывность устройства покрытия, и предложенная зависимость имеет вид, аналогичный представленному

в работе [27]. Проведенные исследования показали, что данное условие не всегда выполняется, что подтверждается результатами других авторов. Так, при укладке слоя толщиной 0,03...0,04 м, температуре смеси при укладке 140 °С и температуре окружающего воздуха 23...25 °С время укладки составляет 3–4 мин. Время работы среднего катка в интервале температур 105...85 °С составляет 11 – 13 мин, а время работы тяжелого катка при этих же условиях в интервале температур 85...70 °С равняется 18 – 20 мин [16].

2. Время уплотнения определенным типом катка превышает время укладки смеси, т.е. $\tau_{уп} / \tau_{ук} > 1$. Это возможно при условии, когда асфальтоукладчик работает с низкими скоростями укладки смеси и каток простаивает из-за отсутствия фронта работ. Для обеспечения непрерывности процесса строительства необходимо увеличить скорость укладки слоя или уменьшить скорость катка, что снижает эффективность применяемых машин.

3. Время укладки смеси больше времени ее уплотнения, т.е. $\tau_{уп} / \tau_{ук} < 1$. При этом условии каток не успевает уплотнять укладываемый слой смеси в заданном интервале температур. Следовательно, необходимо уменьшать скорость укладки смеси, так как каток будет уплотнять горячую смесь при пониженных температурах, что влияет на эффективность его работы. В этом случае необходимо увеличить звено уплотняющих машин катками аналогичного типа или применять катки с более эффективными методами уплотнения.

Установлено, что качество строительства покрытия зависит от числа проходов по одному следу и скоростных режимов уплотнения. Необходимое количество проходов и рабочие скорости катков для обеспечения требуемой плотности различных типов асфальтобетонных смесей регламентированы нормативным документом [41].

Из представленной зависимости видно, что для обеспечения непрерывности строительства покрытия необходимо знать время укладки и уплотнения покрытия в заданных температурных интервалах. Проведенными исследованиями установлено, что время охлаждения слоя горячей смеси зависит от погодных условий, конструкции покрытия и свойств уплотняемого материала. В общем виде продолжительность нахождения слоя в определенном температурном интервале, с учетом влияния перечисленных факторов, может быть определена по формуле

$$\tau = K_C K_{тс} K_v K_{ос} K_{ш} K_M K_h e^{at_b}, \text{ мин}, \quad (6.26)$$

где K_C , $K_{тс}$, K_v , K_M , $K_{ос}$, $K_{ш}$, K_h – безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств смеси, температуры при укладке, скорости ветра, температуры основания и окончания уплотнения покрытия, толщины слоя; t_b – температура окружающего воздуха, °С.

6.5. Зависимости для определения значений коэффициентов

Коэффициент	При укладке смеси	При уплотнении слоя
$K_{тс}$	$0,015t_{см} - 1,43$	$1,005 \ln(t_{см}) - 4,0791$
K_v	$0,98e^{-0,047v}$	$0,98e^{-0,049v}$
$K_{ос}$	$0,99e^{0,013\Delta t}$	$0,99e^{0,013\Delta t}$
K_M	$-2,092 \ln t_0 + 10,62$	$-2,62A^3 + 9,096A^2 - 11,293A + 5,061$ при $h = 0,05$ м и более $-4,788A^3 + 15,85A^2 - 17,979A + 7,09$ при $h = 0,03 - 0,04$ м
K_h	$3586,9h^{1,8876}$	$7072h^{1,7723}$
α	$20h^3 - 5,11h^2 + 0,38h - 0,0004$	$-76,19h^3 + 16,25h^2 - 1,1572h + 0,05$

Обозначения: $t_{см}$ – температура смеси при укладке, °С; v – скорость ветра, м/с; Δt – разница в температурах основания и окружающего воздуха, °С; e – основание натурального логарифма; \ln – натуральный логарифм; h – толщина укладываемого слоя, м; A – условная величина, определяемая выражением $(t_{о,р}/100)$; $t_{о,р}$ – температура окончания уплотнения покрытия, °С.

Численные значения коэффициентов определяются по зависимостям, представленным в табл. 6.5.

При расчете возможной продолжительности работы катков в заданных температурных интервалах величина коэффициента K_M будет определяться

$$K_M = K_{M2} - K_{M1}, \quad (6.27)$$

где K_{M2} – коэффициент, учитывающий температуру смеси при окончании работы катка; K_{M1} – коэффициент, учитывающий температуру смеси начала работы катка.

Анализ полученных зависимостей показал, что при назначении температурных режимов работы механизированного звена машин по устройству покрытий из горячих смесей и организации производства работы продолжительность операций определяется по предложенным формулам.

Известно, что выбор уплотняющих машин для устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей зависит от пара-

метров асфальтоукладчика, который определяет не только темп строительства, но и определяет состав машин для уплотнения покрытий. Ранее отмечалось, что модуль деформации уложенного слоя асфальтобетонной смеси зависит от режимов работы уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчика. Анализ современных конструкций асфальтоукладчиков показал, что в настоящий момент они оборудуются рабочими органами, работающими в динамическом режиме. Это позволяет, одновременно с укладкой, производить и предварительное уплотнение горячих смесей при высоких температурах, обеспечивая при этом сравнительно высокий коэффициент предварительного уплотнения ($K_{п.у}$). Коэффициент предварительного уплотнения горячей смеси зависит от ее состава, температуры смеси при укладке и рабочей скорости асфальтоукладчика. На величину коэффициента предварительного уплотнения смеси значительное влияние оказывает скорость укладки смеси. В таблице 6.7 представлены значения коэффициента предварительного уплотнения смеси, характеризующие его зависимость от скорости укладки смеси, при совместной работе трамбующего бруса и вибрационной плиты. Данные получены при частоте вибрации вибрационной плиты 50 Гц и трамбующего бруса 12 Гц. Значения получены на основе данных, представленных в работе [31].

Из таблицы 6.7 видно, что независимо от типа смеси, с увеличением рабочей скорости асфальтоукладчика коэффициент предварительного уплотнения смеси ($K_{п.у}$) снижается. Для обеспечения требуемого коэффициента уплотнения асфальтобетонного покрытия необходимо применение уплотняющих машин. Типы катков и их количество зависит от скорости укладки смеси и качества работы уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчика, что влияет на технологию производства работ по устройству дорожных покрытий.

6.6. Зависимость коэффициента предварительного уплотнения от скорости укладки смеси в дорожное покрытие

Коэффициент уплотнения	Период уплотнения	Тип катка
0,7 0,85	Начало Конец	Легкий
0,85 0,92	Начало Конец	Средний
0,92 1,0	Начало Конец	Тяжелый

6.7. Влияние коэффициента уплотнения на выбор уплотняющих машин

Тип смеси	$K_{п.у}$ от рабочей скорости асфальтоукладчика, м/мин			
	1,0	2	3	5
А	0,98	0,94	0,93	0,92
Б	0,87	0,87	0,83	0,92
В	0,88	0,87	0,87	0,84
Г	0,83	0,88	0,82	0,82

Установлено, что каждому значению коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси соответствует определенный тип катка, что влияет технологию производства работ (табл. 6.8) [22].

Следовательно, зная заданный темп устройства покрытия и параметры укладываемого слоя смеси, на основании данных зависимостей можно определить степень предварительного уплотнения смеси асфальтоукладчиком с учетом ее типа и произвести выбор типов катков для обеспечения заданного качества строительства покрытия.

Практика строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей показала, что качество уплотнения зависит также от применяемого метода уплотнения. При укладке многощелебнистых смесей (с содержанием щебня свыше 60 %), а также смесей типа А и Б, хорошие результаты достигаются при использовании вибрационных катков. Применение при уплотнении таких смесей других катков (статических, на пневматических шинах) менее эффективно. При уплотнении смесей типа В, Г и Д применение вибрационных катков дает меньший эффект уплотнения. Требуемой плотности при уплотнении таких смесей можно достичь при применении легких, средних и тяжелых катков статического действия

По результатам проведенных исследований и полученных закономерностей разработана программа на ЭВМ, позволяющая рассчитывать параметры технологических процессов укладки и уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей с учетом прочностных характеристик уплотняемого материала [11, 12]. Алгоритм программы представлен на рис. 6.9. Результаты расчетов технологических параметров процесса укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей представлены в табл. 6.9.

6.8. Результаты расчетов технологии укладки и уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей

Исходные данные	Численное значение	Расчетные значения	Численное значение
Температура воздуха, °С	20	Длина захватки, м	25,74
Расстояние от завода до места укладки, км	12	Ширина полосы, м	7,0
Скорость машины, км/ч	40	Время транспортировки, мин	18,0
Температура смеси в бункере, °С	165	Толщина слоя, м	0,07
Толщина слоя укладки	0,07	Время укладки, мин	6,2
Удельный вес, кг/м ³	2300	Время работы среднего катка, мин	13,6
Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	1680	Время работы тяжелого катка, мин	21,6
Температура основания, °С	26	Общее время работы, мин	41,3
Темп строительства, м/см	2000	Скорость укладки, м/мин	4,2
Ширина укладываемой полосы, м	7,0	Производительность укладчика, т/час	205,8
Скорость ветра, м/с	2,0	Асфальтоукладчик	Super 800
Тип асфальтобетона	А	Скорость среднего катка, км/час	2,7
Марка битума	БНД 60/90	Скорость тяжелого катка, км/час	0,5
Тип смеси	Мелкозернистая	Количество проходов среднего катка	8
Каток средний	ДУ-54А с балластом	Коэффициент уплотнения	0,98
Каток тяжелый	ДУ-18 с балластом	Количество проходов тяжелого катка	2
		Коэффициент уплотнения	1,001

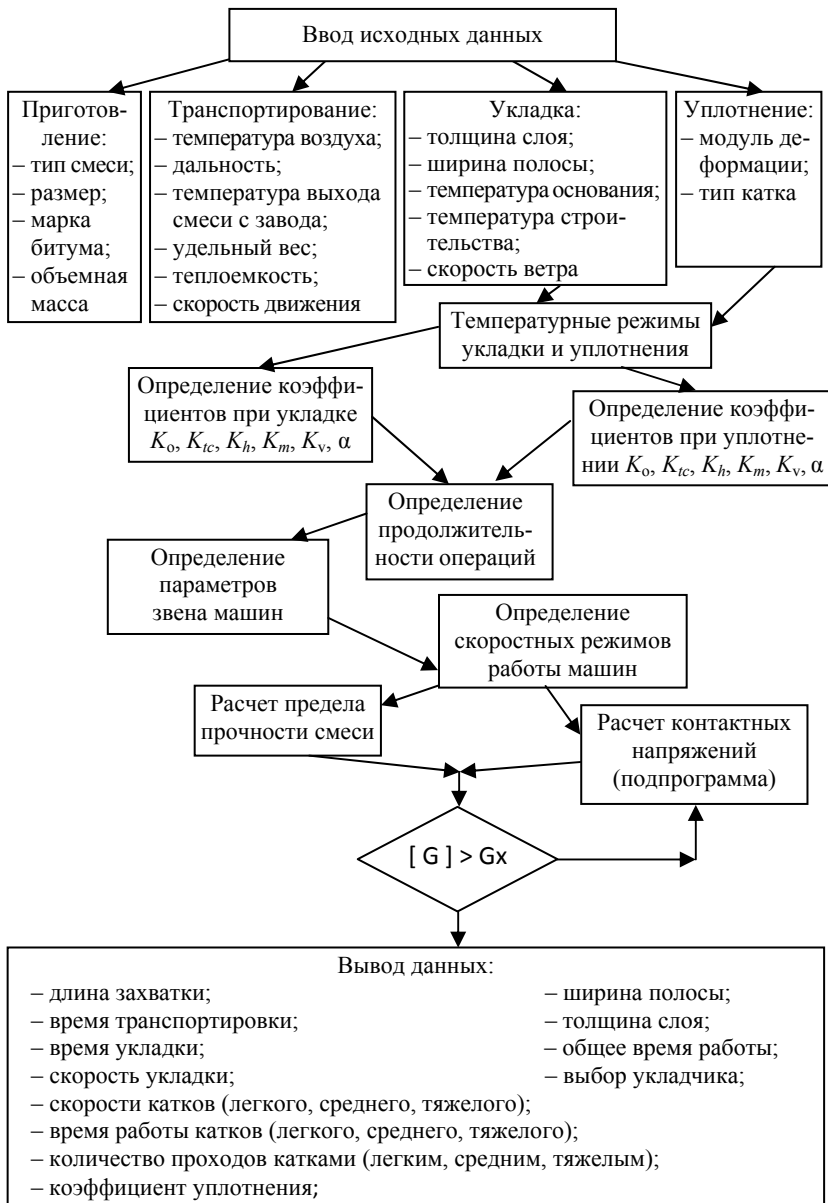


Рис. 6.9. Алгоритм расчета технологического процесса устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей

6.3. ОСОБЕННОСТИ УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА В ЗОНЕ СТЫКА СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛОС

Независимо от способа устройства многополосных дорожных покрытий нежесткого типа температурные режимы асфальтобетонных смесей при укладке и уплотнении должны быть обеспечены не только по полосе движения транспортных средств, но и на стыках сопряженных полос покрытия, поскольку от этого зависит срок службы покрытий дороги.

Применение способа устройства многополосных покрытий с устройством отдельных полос требует в обязательном порядке применения асфальтопрогревателей. В этом случае до начала укладки сопряженного слоя производят обрезку края ранее уложенной полосы ширины до 0,05 м, наносят слой горячего вяжущего. Затем с применением асфальтопрогревателя прогревают край уложенной полосы покрытия на ширину до 0,15 м. Нагрев края асфальтобетона полосы, в зависимости от типа смеси и марки битума, осуществляют до температуры 100...110 °С. Высота нового укладываемого слоя должна быть равна высоте ранее уложенного слоя с учетом коэффициента уплотнения. Нарушение этого условия, независимо с какой стороны полосы покрытия будет перемещаться каток, способствует снижению коэффициента уплотнения асфальтобетона в зоне стыка полос. Применение способа нагрева края уложенной полосы за счет температуры сопряженного слоя покрытия не обеспечивает нагрева до требуемой температуры смеси.

Уплотнение асфальтобетона в зоне стыка сопряженных полос при перемещении катка по уплотненной полосе является неэффективным способом, поскольку в этом случае передаваемая нагрузка от вальца на слой материала снижается за счет ее передачи на ранее уплотненную поверхность покрытия. Это приводит к снижению достигаемого коэффициента уплотнения в зоне стыка.

При организации работ по укладке асфальтобетонных смесей сопряженных полос одним асфальтоукладчиком со смещением его с одной полосы на другую, необходимо определить длину захватки, обеспечивающей температурные режимы горячей смеси в зоне стыка сопряженных полос с учетом рабочей скорости асфальтоукладчика и темпа охлаждения смеси. Технологический процесс уплотнения асфальтобетонной смеси в зоне стыка полос предусматривает первый проход катка по свежеложенной полосе с перекрытием смежной полосы покрытия на 150 мм. Причем первый проход выполняется через 5 – 7 мин после укладки смежной полосы, что позволяет дополнитель-

но прогреться краю первой полосы на 10...20 °С за счет температуры смеси смежной полосы.

При совместной работе двух и более асфальтоукладчиков может применяться метод уплотнения асфальтобетона в зоне стыка с отступом от шва сопряжения.

При этом методе край первой и второй полосы не уплотняют на расстоянии 0,15 м. После укатки сопряженных полос производят уплотнение асфальтобетона в зоне стыка полос. Данный метод эффективен при устройстве покрытий с повышенной толщиной слоя покрытия.

Широкое применение при устройстве многополосных покрытий получила технология уплотнения с перекрытием смежной полосы покрытия на 0,15 м, при которой предусматривается первый проход катка по свежеложенной полосе с перекрытием смежной полосы покрытия на 150 мм.

Из рассмотренных способов устройства стыка сопряженных полос более эффективным является уплотнение смеси с «горячей» стороны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение требований к качеству строительства автомобильных дорог предъявляет более высокие требования к производству работ по укладке и уплотнению дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей. Добиться требуемых показателей качества строительства покрытий возможно при соблюдении технологических режимов производства работ, правильном выборе применяемого оборудования и соответствующем качестве материала. Обеспечение требуемых температурных режимов при укладке и уплотнении горячих смесей с учетом ее свойств и соответствия им силовых параметров уплотняющих машин позволяет повысить качество строительства покрытий.

Предложенная методика разработки технологических процессов строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей позволяет учитывать свойства применяемых смесей и с их учетом выбирать параметры уплотняющих машин. Возможность определения температурных режимов асфальтобетонной смеси в зоне стыка сопряженных полос, а также определение продолжительности строительства покрытий и длительности операций по укладке и уплотнению смесей с учетом влияния разных факторов позволяет организовать во времени производственный процесс и повысить срок службы покрытия.

Полученные результаты могут быть использованы как при проектировании технологии устройства покрытий из горячих смесей, так и при строительстве и ремонте покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алиев А. М.** Строительство автомобильных дорог и аэродромов. – М., 2013. – Т. 2. – 340 с.
2. **Богословский В. Н.** Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1970. – С. 197.
3. **Васильев А. П. и др.** Строительство и реконструкция автомобильных дорог. СЭД / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2005. – Т. 1. – С. 207.
4. **Владимиров В. Н., Андрейченко Ю. Я., Шульгинский И. П.** Опыт устройства покрытий из битумоминеральных смесей толщиной до 25 см за один рабочий проход укладчика: труды СоюздорНИИ. – Вып. 84. – С. 133 – 142.
5. **Дорожный асфальтобетон** / Л. Б. Гезенцев, Н. В. Горельшев, А. М. Богуславский, И. В. Королев; под ред. Л. Б. Гезенцева. – М.: Транспорт, 1995.
6. **Горельшев Н. Г.** Технология и организация строительства автомобильных дорог / под ред. д-ра техн. наук, проф. Н. Г. Горельшева. – М.: Интеграл, 2013. – 551 с.
7. **Емельянов Р. Т., Прокопьев А. П., Климиов А. С.** Исследование процесса уплотнения асфальтобетонной смеси по ширине укладки // Строительно-дорожные машины. – 2009. – № 7. С. 1 – 5.
8. **Зубков А. Ф.** Технология устройства дорожных покрытий с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей: научное издание. – Тамбов: Изд-во Першина Р. В., 2006. – 151 с.
9. **Зубков А. Ф.** Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. – М.: Машиностроение, 2009. – 223 с.
10. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613129. Моделирование и расчет температурных режимов дорожных одежд нежесткого типа в нестационарных условиях / А. Ф. Зубков. – М., 2006.
11. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610256. Моделирование и расчет технологических параметров машин при строительстве покрытий / Зубков А. Ф., Берестов В. П. – М., 2007.
12. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610903. Моделирование процесса строительства покрытий и выбор параметров машин для укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей / Зубков А. Ф., Подольский Вл. П., Берестов В. П. – М., 2007.

13. **Зубков А. Ф.** О нестационарной теплопередаче в процессах строительства дорожных покрытий нежесткого типа // Вестник ТГТУ, 2007. – № 2. – С. 589 – 597.

14. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661215. Расчет температуры горячего асфальтобетона в ограниченном объеме выемки дорожного покрытия / Зубков А. Ф., Хребтова О. А., Матвеев В. Н., Евсеев Е. Ю. зарег. в Реестре программ для ЭВМ от 02.12.2013 г.

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

16. **Ищенко И. С., Калашникова Т. Н., Семенов Д. А.** Технология устройства и ремонта асфальтобетонных покрытий. – М.: Аир-АРТ, 2001.

17. **Иноземцев А. А.** Битумоминеральные материалы. – Ленинград: Изд-во литературы по строительству, 1972. – 120 с.

18. **Ильев Э. Б., Нисневич А. Я.** Выбор параметров разогревателей асфальтобетонного покрытия с инфракрасным излучением. Строительные и дорожные машины. – М., 1970. – № 3. – С. 8 – 10.

19. **Владимиров В. Н., Андрейченко Ю. Я., Шульгинский И. П.** Опыт устройства покрытий из битумоминеральных смесей толщиной до 25 см за один рабочий проход укладчика: труды СоюздорНИИ. – Вып. 84, 1980. – С. 133 – 142.

20. **Костелов М. П., Посадский Я. М.** Технологические особенности и параметры уплотнения горячего асфальтобетона гладковальцовыми катками. Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд: тр. СоюздорНИИ. – 1980. – С. 72 – 91.

21. **Кирюхин Г. Н., Смирнов Е. А.** Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона. – М.: Изд-во «Элит», 2009. – 176 с.

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

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

24. **Ладыгин Б. И.** Прочность и долговечность асфальтобетона / под редакцией Ладыгина Б. И. – Минск: Изд-во «Наука и техника», 1972. – 187 с.

25. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 596 с.

26. **Маслов А. Г.** Исследование параметров вибрационного оборудования для уплотнения асфальтобетонных смесей: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1973.

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

28. **Мучник Г. Ф., Рубашов И. Б.** Методы теории. – М., 1979.

29. **Малютин Л.** Перегрузжатели асфальтобетонной смеси // Основные средства. – 2005. – № 11.

30. **Новый** эффективный способ оценки сдвигоустойчивости асфальтобетона / Ю. Е. Никольский, Б. С. Гмыря, Л. С. Губач, Г. Б. Старков // Автомобильные дороги. – 1992. – № 11–12.

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

32. **Протождьяконов М. М., Тедер Р. И.** Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Изд-во «Наука», 1970.

33. **Подольский Вл. П.** Технология и организация строительства автомобильных дорог. Дорожные покрытия / под ред. Вл. П. Подольского. – М.: Академия, 2012. – Т. 2. – 297 с.

34. **Пехович А. И., Жидких В. Т.** Расчеты теплового режима теплых тел. – Л.: Энергия, 1968.

35. **Сергеева Т. Н.** Выбор параметров катков при уплотнении асфальтобетонных покрытий: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Ленинград: ЛИСИ. – 981 с.

36. **Стебаков А., Кирюхин Г, Гопин О.** Щебеночно-мастичный асфальтобетон – будущее российских дорог // Строительная техника и технологии. – 2002. – № 3. – С. 68 – 70.

37. **Хархута Н. Я. и др.** Дорожные машины / под ред. Н. Я. Хархута. – Л.: Машиностроение, 1976. – 523 с.

38. **Цупилов С. Г.** Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог. – М.: Изд-во «Инфра-Инженерия», 2005. – С. 654.

39. **Якунин О. А., Горельшев Н. В.** Исследование процесса охлаждения слоев асфальтобетонной смеси: сб. науч. тр. СоюздорНИИ. – М., 1972.

40. **СНиП 2.05.02–85***. Автомобильные дороги. – М.: ФГУП ЦПП, 2005.

41. **41.СНиП 3.06.03–85.** Автомобильные дороги. – М.: Госстрой, 1986.
42. **СП 78.13330–2012.** Автомобильные дороги. – М., 2012.
43. **ГОСТ 9128–2009.** Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромы и асфальтобетон. Технические условия. – М.: МНТКС, 2009.
44. **ГОСТ 31015–2002.** Смеси асфальтобетонные, щебеночно-мастичные и асфальтобетон. Технические условия. – М.: МНТКС, 2009.
45. **Департамент** строительства. Инструкция по строительству дорожных асфальтобетонных покрытий. ВСН 14–95. – М, 1995. – 42 с.
46. **Руководство** по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах. Министерство транспорта Российской Федерации. Государственная служба дорожного хозяйства (Росавтодор). – М, 2003.
47. **Технические рекомендации** по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона ТР 103-00. – М.: ГУП НИИ Мосстрой, 2000. – 43 с.
48. **Методические рекомендации** по устройству верхних слоев дорожных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА). – М.: СоюздорНИИ, 2002. – 36 с.
49. **Методические рекомендации** по оценке сдвигоустойчивости асфальтобетона. – М.: Росавтодор, 2002. – 20 с.
50. **Автомобильные** дороги общего пользования Российской Федерации (справочник о наличии и протяженности по состоянию на 01.01.2005 г.). – М.: ФГУ «Дороги России», 2005.
51. **URL:** <http://www.gosthelp.ru/text/SpravochnikSpravochnayaen3.html>
52. **Состояние** автомобильных дорог в России. Клинцы.RU Размещено: 09.04.2011 www.klintsy.ru/.../sostojanie-av...ossii_2014.html.
53. **L. John Fleckenstein, David L. Allen, David B. Schultz.** Compaction at the longitudinal construction joint in asphalt pavements, Kentucky Transportation Center, May 2002.
54. **Cindy K. Estakhri, Thomas J. Freeman, and Clifford H. Spiegelman,** Density evaluation of the longitudinal construction joint of hot-mix asphalt pavements, Texas Transportation Institute, August 2000.
55. **Rajib B. Mallick, Prithvi S. Kandhal, Randy Ahlrich, Skip Parker.** Improved performance of longitudinal joints on asphalt airfield, Airfield Asphalt Pavement Technology Program, December 2007.
56. **Loos H. Paulmann G.** Bituminöser Strassenbau in Winter. Strasse und Autobahn. – 1967. – No 9.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА	4
1.1. Развитие автомобильного парка страны и его влияние на безопасность дорожного строительства	4
1.2. Влияние интенсивности движения на конструктивные параметры автомобильных дорог с учетом безопасности движения транспорта	6
1.3. Анализ технологий для строительства дорожных покрытий нежесткого типа	10
1.4. Анализ технологий и организации работ по распределению горячих асфальтобетонных смесей при устройстве многополосных дорожных покрытий нежесткого типа	17
2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	22
2.1. Выбор материала для устройства дорожных покрытий нежесткого типа с учетом эксплуатационных показателей автомобильной дороги	22
2.2. Влияние температуры на характеристики горячих асфальтобетонных смесей	26
2.3. Влияние температуры на теплофизические характеристики горячих асфальтобетонных смесей	29
2.4. Определение нижнего значения эффективной температуры уплотнения горячей асфальтобетонной смеси	37
2.5. Влияние температуры горячей смеси на прочностные характеристики асфальтобетона	39
2.6. Экспериментальные исследования по определению технологических режимов щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей	42
2.6.1. Определение температуры эффективного окончания процесса воздействия нагрузки на уплотняемый слой покрытия	43
2.6.2. Влияние температурных режимов на деформационно-прочностные характеристики щебеночно-мастичного асфальтобетона ...	45
2.6.3. Влияние толщины укладываемого слоя на деформационно-прочностные характеристики щебеночно-мастичного асфальтобетона	47
3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ПОКРЫТИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ	50
3.1. Особенности технологии строительства многополосных дорожных покрытий нежесткого типа	52
3.2. Разработка математической модели для определения температурных режимов асфальтобетонной смеси при строительстве многополосных покрытий	63
3.3. Определение температуры асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий нежесткого типа с учетом условий производства работ	68

3.4. Определение температуры горячей асфальтобетонной смеси по ширине полосы покрытия	79
3.5. Моделирование распределения температуры асфальтобетона по ширине полосы покрытия	81
3.6. Экспериментальные исследования по определению распределения температуры по ширине полосы покрытия	85
4. ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОЛОСЫ ПОКРЫТИЯ НЕЖЕСТКОГО ТИПА С УВЕЛИЧЕННОЙ ШИРИНОЙ ОДНИМ АСФАЛЬТОУКЛАДЧИКОМ	87
4.1. Разработка математической модели для определения температурных режимов асфальтобетонной смеси при строительстве многополосных покрытий одним асфальтоукладчиком	89
4.2. Определение продолжительности строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	93
4.3. Обоснование применения перегрузчиков горячей асфальтобетонной смеси (Шаттл–Багги)	107
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УКЛАДКИ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ОДНОЙ ПОЛОСОЙ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ	110
5.1. Технология устройства дорожного покрытия отдельными полосами	124
5.1.1. Разработка математической модели распределения температуры асфальтобетона в зоне стыка сопряженных полос покрытия ...	135
5.1.2. Экспериментальные исследования по распределению температуры в зоне стыка полос за счет температуры горячей смеси сопряженного слоя покрытия	141
5.2. Обоснование применения законов нестационарных теплопередач к устройству многополосных дорожных покрытий нежесткого типа	145
5.3. Экспериментальные исследования по определению ширины полосы покрытия при кладке горячей смеси с пониженной температурой асфальтобетонной смеси	148
5.4. Расчет технологических режимов инфракрасного разогревателя при нагреве асфальтобетонного покрытия нежесткого типа	157
5.5. Разработка технологии укладки асфальтобетонной смеси одним асфальтоукладчиком со смещением полос покрытия при укладке	170
5.6. Определение температурных режимов при совместной работе двух и более асфальтоукладчиков по устройству дорожных покрытий нежесткого типа с применением горячих асфальтобетонных смесей	193
6. ТЕХНОЛОГИЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	198
6.1. Выбор звена уплотняющих машин при разных методах уплотнения	206
6.2. Методика разработки технологических процессов устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	211
6.3. Особенности уплотнения асфальтобетона в зоне стыка сопряженных полос	223
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	225
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	226

Научное издание

ЗУБКОВ Анатолий Федорович
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич
КУПРИЯНОВ Роман Валерьевич

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОПОЛОСНЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Редактор И. В. Калистратова
Инженер по компьютерному макетированию И. В. Евсева

Сдано в набор 20.08.2015.

Подписано в печать 02.09.2015. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 13,48. Уч.-изд. л. 14,9. Тираж 400 экз. Заказ № 366

ISBN 978-5-4442-0105-3



ООО «Издательский дом «Спектр»,
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: idspektr@rambler.ru

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

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