

А.Ф. Зубков, В.Г. Однолько

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМО- БИЛЬНЫХ ДОРОГ



**Москва
"Машиностроение"
2009**

УДК 625.7/8
ББК 0311-044
3-913

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук
директор Института транспортного строительства Волгоградского
государственного архитектурно-строительного университета
С.В. Алексигов

Доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой "Конструкции зданий и сооружений"
Тамбовского государственного технического университета
В.В. Леденев

Зубков, А.Ф.

3-913 Технология строительства асфальтобетонных покрытий ав-
томобильных дорог / А.Ф. Зубков, В.Г. Однолько. – М.: Маши-
ностроение, 2009. – 224 с.
ISBN 978-5-94275-510-2.

Рассмотрены вопросы технологии строительства асфальтобетонных дорожных покрытий с применением горячих смесей и устройства покрытия с учетом прочностных характеристик горячего асфальтобетона и продолжительности выполнения процессов укладки и уплотнения смесей. Представлен анализ применяемых технологий устройства покрытий при разных условиях производства работ и раскрыты физические процессы, протекающие в слоях покрытия при укладке и уплотнении горячих асфальтобетонных смесей. Предложены температурные режимы для укладки и уплотнения горячих смесей с учетом типа смеси и марки битума. Представлен анализ возможных нарушений в технологиях при производстве работ с горячей асфальтобетонной смесью и их влияния на качество асфальтобетонного покрытия.

Для работников дорожных и проектных организаций, преподавателей, аспирантов и студентов дорожно-строительных специальностей.

УДК 625.7/8
ББК 0311-044

ISBN 978-5-94275-510-2

© Зубков А.Ф., Однолько В.Г., 2009

А.Ф. Зубков, В.Г. Однолько

**ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Москва
"Машиностроение"
2009

Научное издание

ЗУБКОВ Анатолий Федорович,
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Редактор Т.М. Глинкина
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Сдано в набор 02.11.2009. Подписано в печать 09.12.2009
Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman
Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 13,00
Тираж 400 экз. Заказ 590

ООО "Издательство Машиностроение",
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение требуемых транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог достигается в процессе строительства и зависит от качества применяемого материала, условий производства работ, принятой технологии и параметров механизированного звена машин.

Значительное место при достижении требуемого качества строительства занимает технология устройства дорожных покрытий. В настоящее время при строительстве, ремонте и реконструкции автомобильных дорог наибольшее применение находят асфальтобетонные покрытия, на долю которых приходится свыше 60 % от общей протяженности дорог.

При устройстве асфальтобетонного покрытия с применением горячих смесей их температура является основным фактором, влияющим на эксплуатационные показатели покрытия. В зависимости от конкретных условий строительства (конструкции покрытия, погодных условий, типа смеси и марки битума, применяемого оборудования) температура смеси может изменяться в значительных интервалах, что оказывает влияние на выбор применяемой технологии, а также продолжительность выполнения технологических операций по укладке и уплотнению горячих асфальтобетонных смесей в заданных интервалах температур. С учетом непрерывности процесса устройства асфальтобетонного покрытия параметры применяемого механизированного звена машин должны быть увязаны со свойствами горячей смеси, зависящими от ее температуры. Для обеспечения требуемых транспортно-эксплуатационных параметров покрытия в процессе его устройства и повышения эффективности применяемого механизированного звена машин необходимо учитывать влияние всех факторов на технологические процессы при устройстве покрытия.

Г л а в а 1

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ НА ВЫБОР СВОЙСТВ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

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

Автомобильные дороги являются составляющей транспортной системы страны и оказывают решающее влияние на ее экономическое развитие, повышение жизненного уровня и благосостояние населения, эффективное использование природных, трудовых, производственных и инвестиционных ресурсов области. В связи с ростом интенсивности движения и увеличением осевой нагрузки от транспортных средств на дорожные одежды к транспортно-

эксплуатационным показателям асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог предъявляют повышенные требования, которые можно обеспечить только в процессе строительства. Величина достигаемых показателей асфальтобетона в процессе устройства покрытия зависит как от качества применяемого материала, так и принятой технологии строительства. Нарушение технологии при выполнении процессов приготовления горячей смеси, транспортирования, укладки и уплотнения, а также выбор режимов работы механизированного звена машин без учета конкретных условий производства работ приводят к снижению эксплуатационных показателей асфальтобетонного покрытия. К основным параметрам, характеризующим эксплуатационные показатели асфальтобетона, относятся его прочность при разных температурах окружающего воздуха, 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 60...70 °С, что приводит к снижению прочностных и деформативных параметров асфальтобетона. Под действием нагрузок от транспортных средств в дорожных покрытиях возникают пластические деформации, способствующие образованию волн и колеи на поверхности покрытия. Поэтому применяемые смеси должны обладать определенной теплоустойчивостью к температуре, характерной для района строительства дорожного покрытия. В зимний период эксплуатации автомобильной дороги, при низких температурах окружающего воздуха, в асфальтобетоне возникают температурные деформации, что способствует образованию трещин на поверхности покрытия. Следовательно, применяемый вяжущий материал должен обладать свойствами, характеризующими его трещиностойкость. Поэтому в зависимости от конкретных условий строительства нормативными документами предусматривается применение разных материалов и конструктивных параметров дорожного покрытия с учетом требований к транспортно-эксплуатационным показателям автомобильной дороги.

Согласно действующему межгосударственному стандарту ГОСТ 9128–97 асфальтобетонными смесями называют рационально подобранную смесь минеральных материалов (щебня, гравия и песка с минеральным порошком или без него) с битумом, взятых в определенных пропорциях и перемешанных в нагретом состоянии [77]. В зависимости от дорожно-климатической зоны строительства автомобильной дороги нормативными документами определены конкретные марки битума, которые рекомендовано использовать при приготовлении горячих асфальтобетонных смесей, представленных в табл. 1.1. В зависимости от вида минеральной составляющей горячие асфальтобетонные смеси подразделяются на щебеночные, гравийные и песчаные. С учетом показателя вязкости применяемого битума и принятой температуры при укладке различают смеси:

- горячие,готавливаемые с использованием вязких (БНД 40/60, 60/90, 90/190, 130/200, 200/300) и жидких (СГ 130/200) нефтяных дорожных битумов и укладываемые с температурой не менее 120 °С;
- холодные,готавливаемые с использованием жидких нефтяных дорожных битумов (СГ 70/130, 130/200) и укладываемые с температурой не менее 5 °С.

С учетом крупности 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.

В зависимости от 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 %.

С учетом 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 %.

1.1. 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
I	Плотный и высокоплотный	I	БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300	II	БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 СГ 130/200 МГ 130/200 МГО 130/200	III	БНД 90/130 БНД 130/200 БНД 200/300 СГ 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 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 СГ 130/200 МГ 130/200 МГО 130/200

Дорожно-климатическая зона	Вид асфальтобетона	Категория автомобильной дороги					
		I, II		III		IV	
		Марка смеси	Марка битума	Марка смеси	Марка битума	Марка смеси	Марка битума
II, III	Из холодных смесей	–	–	I	СГ 70/130 СГ 130/200	II	СГ 70/130 СГ 130/200 МГ 70/130 МГ 130/200 МГО 70/130 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 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
	Из холодных смесей	–	–	I	СГ 70/130 СГ 130/200	II	СГ 70/130 СГ 130/200 МГ 70/130 МГ 130/200 МГО 70/130 МГО 130/200

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 – рекомендуемых для дорог III категории; для остальных улиц и дорог – рекомендуемых для дорог IV категории.

2. Битумы марок БН рекомендуется применять в мягких климатических условиях, характеризующихся средними температурами самого холодного месяца года выше -10°C .

3. Битум марки БН 40/60 должен соответствовать технической документации, утвержденной в установленном порядке.

1.2. Разделение горячих смесей по маркам

Вид и тип смесей	Марка
Горячие:	
Высокоплотные	I
Плотные типов:	
А	I, II
Б, Г	I, II, III
В, Д	II, III
Пористые и высокопористые	I, II

По виду песка горячие песчаные смеси подразделяются на типы:

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, представленные в табл. 1.2.

Прочность и морозоустойчивость щебня и гравия для горячих смесей должны соответствовать показателям, приведенным в табл. 1.3.

Существующими технологиями строительства дорожных покрытий нежесткого типа для обеспечения высоких прочностных показателей асфальтобетона, который обладает устойчивостью к воздействию погодно-климатических факторов в процессе эксплуатации дороги, применяют высокоплотные и плотные марки I. При устройстве покрытия в два слоя применяется раздельная укладка горячей смеси. В этом случае материал слоя покрытия регламентируется нормативным документом и зависит от категории дороги (табл. 1.4) [74].

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 уплотненном состоянии в зависимости от категории дороги и размера минеральных зерен должна быть не менее данных, представленных в табл. 1.5 [74].

1.3. Прочностные показатели для марок и типов смесей

Наименование показателя	Значения для смесей марки							
	I				II		III	
	Горячих типа		Пористых и высокопористых	Горячих типа		Пористых и высокопористых	Горячих типа	
	А, Б высокоплотных	Г		А, Б	Г		Б, В	Г, Д
Марка по прочности песка и отсевов дробления горных пород и гравия	800	1000	600	600	800	400	400	600
Содержание глинистых частиц, определяемое методом набухания, % по массе, не более	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0

1.4. Материал слоя покрытия при раздельной укладке покрытия

Категория дорожки	Материал слоя покрытия	
	верхнего	нижнего
I, II	Горячие смеси для плотного асфальтобетона типов А, Б, В и Г марки I	Горячие смеси для пористого асфальтобетона марки I
II	Горячие смеси для плотного дегтебетона типа Б марки I	Горячие смеси для пористого дегтебетона марки I
III	Горячие смеси для плотного асфальтобетона типов А, Б, В, Г и Д марки II. Холодные асфальтобетонные смеси типов Б _х , В _х и Г _х марки I. 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. Холодные асфальтобетонные смеси типов Б _х , В _х , Г _х и Д _х марки II. Горячие смеси для плотного дегтебетона типов Б и В и песчаные смеси марки II. Холодные дегтебетонные мелкозернистые и песчаные смеси марки II	Горячие смеси для пористых асфальтобетона и дегтебетона марки II. Каменные материалы, обработанные органическим вяжущим. Горячие и теплые смеси для высокопористого асфальтобетона марки I
IV и первая стадия двухстадийного строительства дорог III категории	Каменные материалы, обработанные органическими вяжущими методами смешения в установке, пропитки, смешения на дороге, поверхностной обработки (слоя износа)	—

Примечания. 1. Асфальтобетонные смеси должны отвечать требованиям ГОСТ 9128–97, дегтебетонные – ГОСТ 25877–83.

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

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

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.

1.5. Минимальная толщина асфальтобетонных слоев

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

В последнее время наблюдается тенденция к применению следующих разновидностей асфальтобетонов: щебеночно-мастичных, полимербетонов и других. Так, полимерасфальтобетоны, обладая повышенной долговечностью по отношению к обычному асфальтобетону, применяются на дорогах с высокой интенсивностью движения и повышенными осевыми нагрузками от транспортных средств, а также на мостах, путепроводах, в местах остановок транспортных средств.

1.2. ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАШИН ДЛЯ УСТРОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Достижение требуемых параметров асфальтобетонного покрытия зависит не только от качества применяемого материала и обоснованного состава асфальтобетона, но и особенностей применяемой технологии при приготовлении и уплотнении горячей асфальтобетонной смеси. Проведенными исследованиями Н.Н. Ивановым, Л.Б. Гезенцевым, Н.В. Горельшевым, А.М. Богуславским, И.В. Королевым установлено, что при устройстве дорожного покрытия можно выделить три периода, оказывающих влияние на формирование структуры асфальтобетона [19, 20]:

- стадия приготовления горячей смеси в момент перемешивания битума с минеральным материалом;
- стадия укладки и уплотнения горячей смеси в дорожное покрытие;

– процесс 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 силового воздействия рабочего органа уплотняющей машины происходит перемещение частиц материала относительно друг друга, вытесняется защемленный воздух, возникают новые контакты между частицами материала и происходит перераспределение свободного битума в зонах контакта. За счет сближения частиц материала между собой повышается плотность смеси, которая пропорциональна росту уплотняющей нагрузки. С повышением плотности горячей 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 повышением прочности битумных пленок процесс деформирования прекращается. При дальнейшем понижении температуры горячей асфальтобетона за счет увеличения вязкости битума происходит возрастание связей между частицами материала, и прочность асфальтобетона повышается.

Величинами, характеризующими плотность, являются водонасыщение и пористость асфальтобетона. Установлено, что снижение пористости на 1 % повышает усталостную долговечность асфальтобетонного покрытия на 10...30 % [61]. Увеличение коэффициента уплотнения на 0,01 в пределах 0,98...1,00 аналогично увеличению толщины слоя покрытия на 5...10 мм [45].

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 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 недостаточном перемешивании часть битума образует некоторые объемы вяжущего материала, заполняющие пространство между минеральными частицами, образуя агрегаты. Установлено, что время перемешивания компонентов смеси влияет на получаемые физико-механические свойства горячей смеси [20]. 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 являются 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. Горельшева и К.Я. Лобзовой, увеличение плотности асфальтобетона повышает сдвигоустойчивость и трещиностойкость асфальтобетонного покрытия. По данным И.В. Королева, асфальтобетон при одном и том же коэффициенте уплотнения может иметь разную прочность [19]. 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. В зоне контакта органа машины с материалом 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 достичь требуемых параметров асфальтобетона можно при условии соблюдения температурных режимов укладки и уплотнения горячей смеси и соответствующей им нагрузке [16]. Выбор уплотняющих машин для устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей зависит от параметров асфальтоукладчика, который определяет не только темп строительства, но и состав машин для уплотнения покрытий. Анализ показал, что современные конструкции асфальтоукладчиков оборудуются рабочими органами, работающими в динамическом режиме. Это позволяет одновременно с распределением горячей смеси производить и предварительное ее уплотнение при температуре доставки смеси 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 [27, 48]. Наибольший эффект воздействия нагрузки на горячую смесь достигается при малой вязкости битума, что соответствует высокой температуре смеси. Экспериментально доказано, что с увеличением температуры смеси до 140...150 °С численное значение коэффициента предварительного уплотнения возрастает. При дальнейшем росте температура не влияет на величину коэффициента предварительного уплотнения [49]. При постоянных параметрах асфальтоукладчика и температуре смеси величина коэффициента предварительного уплотнения зависит от типа смеси. Следует отметить, что практически коэффициент предварительного уплотнения ($K_{п. \text{упл}}$) горячей асфальтобетонной смеси после укладки смеси асфальтоукладчиком может достигнуть 1. Анализ результатов исследований, посвященных данному вопросу, показывает, что если для смесей с высоким содержанием минерального материала (тип А) за счет выбора режимов работы катка можно обеспечить коэффициент предварительного уплотнения смеси 0,96 и выше, то для других типов смесей значение $K_{п. \text{упл}}$ составляет 0,85...0,90 [27]. Значение $K_{п. \text{упл}}$ смеси зависит от скорости укладки смеси. В таблице 1.6 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 бруса 12 Гц. Значения получены на основе данных, представленных в работе [27]. 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 зависят от скорости укладки смеси и качества работы уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчика, что влияет на технологию производства работ по устройству дорожных покрытий.

1.6. Зависимость коэффициента предварительного уплотнения $K_{п. упл}$ 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

1.3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН НА КАЧЕСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Достижение заданного качества асфальтобетонного покрытия при строительстве обеспечивается уплотняющими машинами. В соответствии с нормативными документами и рекомендациям для этих целей могут быть использованы разные методы уплотнения и типы катков в зависимости от конкретных условий производства работ по устройству покрытия [3, 4, 8, 16, 17, 19, 20, 27, 73]. Традиционными машинами для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей являются катки статического действия. Эти машины могут быть использованы на всех этапах уплотнения дорожных покрытий. Наблюдается тенденция совершенствования конструктивных параметров катков, оснащения их приборами и аппаратурой для оперативного контроля качества работ, что позволяет повысить эффективность применения.

В настоящее время широкое применение при уплотнении дорожных покрытий получили технологические схемы укатки с помощью самоходных катков на пневматических шинах. Наличие регулируемой системы давления в шинах позволяет использовать их при температуре укладываемой смеси до 160 °С, обеспечивая при этом диапазон давлений в шинах 0,2...0,8 МПа [3, 27, 43]. Катки на пневматических шинах имеют высокую производительность, прорабатывают слои сравнительно большей толщины, обеспечивают равномерное распределение плотности по толщине слоя. При уплотнении горячих смесей этими катками на поверхности покрытия не образуются продольные и поперечные волосяные трещины, не происходит дробление каменных составляющих асфальтобетона, что значительно улучшает водонепроницаемость поверхности покрытия. Однако поперечная и продольная ровность покрытия после уплотнения этими катками остается неудовлетворительной. Этот недостаток заложен в конструкции машин и объясняется колебаниями катка в вертикальной плоскости за счет упругих пневматических шин во время его движения [11, 43]. Поэтому такие катки,

согласно существующим рекомендациям, работают совместно с гладковальцовыми катками [4, 20, 26, 27].

При динамическом воздействии на уплотняемый материал по сравнению со статическим уплотнением интенсивнее пробуждаются вяжущие свойства у активных минеральных материалов. Это позволяет получать более высокую плотность и меньшую водонепроницаемость [19, 20, 53, 60]. Характерная при работе некоторая миграция вяжущего к поверхности укатываемого покрытия и возможность расслоения смеси вызывали осторожное, а иногда и отрицательное отношение к вибрационным каткам. Проведенные исследования и опыт применения этих катков при уплотнении дорожных покрытий нежесткого типа показал, что существенного расслоения смеси не наблюдается [63]. Вибрационные катки имеют высокую производительность, для них требуется более низкое тяговое усилие, имеют меньшую массу и способны работать при разных режимах уплотнения. Это привело к тому, что значительно увеличен выпуск вибрационных катков практически во всех странах мира. Способствует этому и более высокая их эффективность при уплотнении других конструктивных слоев дорожных одежд и некоторых видов грунтов.

Эффективность уплотнения дорожных покрытий нежесткого типа зависит от типа применяемых машин и применяемого материала, а также технологических факторов, к которым можно отнести толщину укладываемого слоя, температуру начала и окончания укатки материала, рабочие скорости катков. Одним из факторов, оказывающих влияние на эффективность уплотнения, является температура смеси начала и окончания работ по уплотнению дорожных покрытий. Температура смеси влияет на деформативную способность и прочностные характеристики горячего асфальтобетона. Под деформативной способностью понимается способность материала сопротивляться внешней нагрузке и ее величина может быть выражена через модуль деформации [48, 66, 67]. Установлено, что предел прочности асфальтобетона, а также модуль деформации, при одном и том же составе смеси, зависит от температуры [55, 63]. Изменение температуры асфальтобетона от 150 до 50 °С приводит к увеличению предела прочности в 2,0 – 2,5 раза и модуля деформации в 4 раза. Следовательно, наибольший эффект уплотнения может быть получен при высокой температуре смеси, когда битум имеет малую вязкость. При высокой температуре способность смеси сопротивляться внешней нагрузке небольшая и для уплотнения требуется незначительное силовое воздействие вальца катка, что позволяет использовать сверхлегкие катки. Однако время, в течение которого смесь имеет высокую температуру после ее укладки, незначительно и составляет около 8...10 % от продолжительности работы в заданном температурном интервале. Поэтому применение таких катков считается нецелесообразным. С понижением температуры смеси вязкость битума увеличивается, образуются прочные связи между частицами материала и снижается эффективность работы катков.

Для повышения качества уплотнения и эффективности применения уплотняющих машин необходимо знать температурные границы перехода от одного типа катка к другому с учетом их силовых параметров. На основании экспериментальных данных Н.Я. Хархута рекомендована зависимость выбора параметров катков от температуры уплотняемой смеси с учетом силовых параметров катков, которая представлена на рис. 1.1 [67].

Укатка смесей при температурах, расположенных выше кривой 1, приводит к значительным неровностям на уплотняемой поверхности покрытия, которые не исчезают при дальнейшей работе даже тяжелых катков. Продолжение укатки смеси при температуре ниже кривой 2 эффекта уплотнения не дает и может привести к появлению поверхностных трещин. Следует заметить, что представленная зависимость носит обобщенный характер, не конкретизирована к типам смесей и маркам битума и в основу положены температурные интервалы работы катков без учета прочностных характеристик смесей. На практике для каждого типа смеси и применяемых катков существуют рекомендуемые температурные интер-

валы, в пределах которых должен вестись процесс уплотнения. Однако рекомендуемые температурные интервалы уплотнения горячих смесей имеют значительные расхождения в численных значениях и не конкретизированы с учетом марки битума.

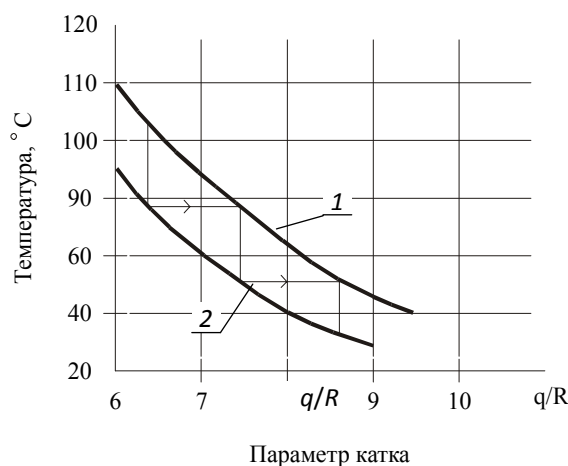


Рис. 1.1. Зависимость температуры начала (1) и конца (2) укатки горячих асфальтобетонных смесей от параметров катков

(q и R – линейное давление и радиус вальца катка)

Анализ взаимодействия вальца катка с уплотняемым материалом при определении напряжений в зоне контакта вальца показал, что практически расчетные схемы рассматривают процесс уплотнения на заключительной стадии и условно принимают, что упругая деформация материала отсутствует. Такой подход при моделировании взаимодействия вальца с материалом не соответствует физике процесса контакта вальца катка и вносит погрешности в конечные результаты. Аналитические решения вопроса взаимодействия вальца катка с материалом не доведены до логического завершения. Отсутствуют зависимости для расчета напряжений в зоне контакта вальца с уплотняемым материалом [7, 10, 18, 48].

Рассматривая процесс взаимодействия жесткого вальца катка статического действия с уплотняемым слоем асфальтобетонной смеси с учетом остаточной деформации материала и используя приближенные методы расчетов напряжений, В.В. Бадаловым получены значения сжимающих напряжений под вальцом катка статического действия в зоне контакта вальца с материалом. На основании теоретических и экспериментальных данных им сделан вывод, что метод расчета контактных напряжений по величине остаточной деформации материала может быть применен как при уплотнении грунтового полупространства, так и при уплотнении слоев материала ограниченной величины, лежащих на упругом основании. Вопрос распределения касательных напряжений в зоне контакта вальца остался не исследованным.

Моделированию взаимодействия вальца катка статического действия с горячей асфальтобетонной смесью посвящена работа Т.Н. Сергеевой [63]. В результате проведенных исследований установлено, что толщина слоя влияет на величину сжимающих напряжений на контакте вальца. С увеличением модуля деформации смеси влияние проявляется в большей степени. Толщина слоя незначительно влияет на величину касательных напряжений. С увеличением модуля деформации смеси рост касательных напряжений происходит интенсивнее, чем нормальные напряжения. При действии вертикальной нагрузки на уплотняемую смесь частицы материала по глубине слоя распределяются по линейному закону. Закономерность справедлива при любой толщине слоя. Следует заметить, что перемещение частиц материала

перед вальцом катка происходит под действием сил, действующих в горизонтальной плоскости. С увеличением модуля деформации и повышения плотности материала для перемещения частицы материала требуется увеличение горизонтальных напряжений под вальцом катка, зависящих от действующих сил на валец. Учитывая, что приложенные силы к вальцу остаются постоянными при укатке, сделанный вывод о возрастании касательных напряжений с увеличением модуля деформации материала требует уточнения.

Для повышения сдвигоустойчивости дорожных покрытий используют смеси с содержанием щебня до 80 % [4, 17]. Такие смеси обладают большей жесткостью и уплотнение их катками статического действия малоэффективно. Более эффективно их уплотняют вибрационными катками, работающими в виброударном режиме, или звеном катков, состоящим из катков на пневматических шинах и вибрационных. Рекомендованные для самоходных вибрационных катков параметры вибрации составляют: частота колебаний вынуждающей силы 40...50 Гц; отношение вынуждающей силы к силе тяжести вибратора 1,8 – 2,0 [15, 67]. При соответствующих параметрах катков вибрационные машины способны уплотнять асфальтобетонные смеси при температуре 60...70 °С [15, 67]. На основании экспериментального материала М.П. Зубанов рекомендует величину относительной вынуждающей силы для самоходных вибрационных катков в пределах 3...4. Влияние относительной вынуждающей силы на качество уплотнения исследовалось С.А. Варгановым [15]. Полученные результаты представлены на рис. 1.2.

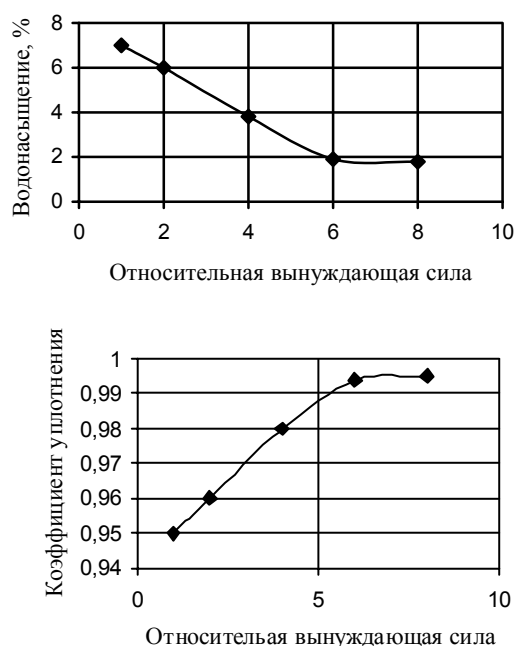


Рис. 1.2. Зависимость параметров уплотнения от относительной вынуждающей силы

Из представленных данных видно, что с увеличением относительной вынуждающей силы до шести качество уплотнения улучшается. Следует учесть, что работа самоходных вибрационных катков при относительно большой возмущающей силе приводит к возникновению значительных динамических нагрузок в конструкции машин, что снижает долговечность и надежность ее конструкции. При большой вынуждающей силе работа катка становится неустойчивой, что приводит к неуправляемости или пробуксовке вальца, а следовательно, к повреждению дорожного покрытия. Поэтому для устранения этих явлений величи-

ну относительной вынуждающей силы ограничивают, что приводит к снижению эффективности работы вибрационных катков.

Установлено, что характер колебаний (круговые или вертикально-направленные) вальца не влияет на качество уплотнения. Поэтому вибрационные катки работают с круговыми колебаниями. Максимальная производительность машины достигнута при скорости 1,5 км/ч. Установлено, что требуемая плотность не может быть достигнута при недостаточной массе рабочего органа даже при больших величинах относительной возмущающей силы. Считается, что легкий вибрационный каток может заменить более тяжелый каток статического действия. Определением эффективности вибрационных катков занимается Бруно Хилле. Установлено, что уплотняющая способность вибрационного катка с линейным давлением 18 кН/м такая же, как у статического катка с линейным давлением 60 кН/м. Аналогичные сравнительные испытания проведены Н. Штеффеном. Установлено, что вибрационный каток с линейным давлением 25 кН/м по уплотняющему эффекту эквивалентен катку статического действия с линейным давлением 66 кН/м. Уплотняющее воздействие катка увеличивается с ростом частоты колебаний вынуждающей силы до 50 Гц. При дальнейшем увеличении объемный вес смеси практически не повышается. Определение эквивалента по массе катков проведено И. Латхат. Вибрационный каток, имеющий силу тяжести 1,8 т и частоту колебаний 52 Гц, сравнивался с катком статического действия массой 8 т при устройстве основания из крупнозернистых смесей с содержанием 65 % известнякового щебня крупностью до 32 мм и при устройстве верхнего слоя покрытия из мелкозернистой асфальтобетонной смеси. Наибольшая плотность материала достигнута при уплотнении вибрационным катком.

Из представленных данных видно, что вибрационный каток по уплотняющим возможностям заменяет более тяжелые катки статического действия. Поэтому нормативными документами и технологическими схемами при уплотнении покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей предусматривается работа вибрационных катков совместно с другими уплотняющими машинами. При назначении звена уплотняющих машин выбор параметров катков необходимо производить с учетом уплотняющей способности. В качестве критерия при сравнении параметров катков принимают разные показатели (масса катка, линейное давление, контактные напряжения, плотность материала). При определении уплотняющей способности вибрационных катков, по данным голландских исследователей, коэффициент уплотняющей способности статического катка умножают на коэффициент, характеризующий дополнительный эффект уплотнения от действия вибрации. Согласно результатам исследований С.А. Варганова, уплотняющая способность вибрационного катка такая же, как и статического, нагрузка на валец которого в 6 – 10 раз превышает нагрузку на вибрационный валец катка [15]. По данным зарубежных исследований, вибрационный каток эффективнее статического в 1,5 – 2 раза. Следует отметить, что эффект уплотнения должен оцениваться по остаточной деформации, которая образуется в результате воздействия вальца. Деформация уплотняемого материала зависит не только от напряжения под вальцом катка, но и от времени его действия. При работе вибрационного катка, по сравнению с катком статического действия, напряженное состояние возникает быстрее и поддерживается более короткое время. В связи с этим величина необратимой деформации будет меньше, чем при действии статической нагрузки, при условии одинакового напряженного состояния материала. Однако до настоящего времени нет единого мнения относительно коэффициента эффективности вибрационного катка при уплотнении асфальтобетонных смесей.

При работе вибрационного катка его тягово-сцепные качества зависят от параметров вибрации. Если вибрационный валец ведомый, то с увеличением вынуждающей силы он становится неуправляемым. При ведущем вибрационном вальце происходит пробуксовка вальца относительно поверхности покрытия. Следовательно, при определенной относительной вынуждающей силе работа катка становится неустойчивой, что является основанием для ограничения относительной вынуждающей силы в самоходных катках. В настоящий момент имеются самоходные катки со сдвоенной вибрацией. В каждом вальце установлен вибратор с

круговыми колебаниями, их вращение синхронизировано [39, 44]. Примером может служить каток модели BW200 фирмы "Bomag", силой тяжести 7 тс и суммарной вынуждающей силой 32 т.

В некоторых конструктивных схемах катков вальцы имеют разные частоты и амплитуды колебаний. Имеются трехвальцовые соосные катки, где вибрационный валец сочетается с пневмошинными колесами и расположен в передней части катка. Такая конструкция позволяет использовать большую по величине возмущающую силу с одновременным соблюдением санитарных норм по технике безопасности.

При строительстве двухслойных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей в нижний слой укладывают смеси с большим содержанием минерального материала, при уплотнении которых наиболее эффективно применение самоходных вибрационных катков. В этом случае вибрационный каток может применяться самостоятельно, предварительно сделав на начальной стадии уплотнения два-три прохода по одному следу без включенного вибратора. Ровность, полученная после уплотнения, находится в пределах нормы. Следует заметить, что вопрос о влиянии параметров вибрации вальца на ходовые качества вибрационных катков исследован в недостаточной степени. Решение данного вопроса позволяет оценить эффективность работы вибрационного катка с учетом его ходовых возможностей.

Эффективность работы катка зависит от скорости его передвижения в процессе уплотнения. Установлено, что увеличение рабочей скорости катка вызывает снижение достигаемой плотности асфальтобетонной смеси и требует увеличения числа проходов по одному следу. Рекомендуемая скорость катка в процессе работы находится в пределах 1,2...1,5 км/ч [16, 67, 73].

Анализ выпуска уплотняющих машин и практика дорожного строительства показали, что в настоящий момент ведущие фирмы-производители уплотняющих машин, в основном, выпускают вибрационные катки, которые применяются при строительстве оснований и дорожных одежд. При строительстве дорожных покрытий нежесткого типа с учетом условий производства работ и конструктивных параметров дорожного покрытия применяются разные технологии с использованием статических, вибрационных и катков на пневматических шинах [4, 17, 26, 27, 73].

1.4. АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ И ПРИНЯТЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ К ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Увеличение интенсивности движения и повышение осевой нагрузки транспортных средств предъявляют повышенные требования к качеству строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей. Особенностью строительства таких покрытий является зависимость всех процессов, начиная от момента приготовления и до окончания уплотнения покрытия, от температуры асфальтобетонной смеси. Качество строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей зависит от целого ряда факторов, каждый из которых оказывает влияние на эксплуатационные показатели автомобильной дороги.

Строительство дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей производится механизированным звеном машин, параметры которых должны обеспечить непрерывность укладки и уплотнения горячих смесей и соответствовать технологическим процессам. Достигнуть требуемых эксплуатационных показателей качества асфальтобетонных покрытий можно только в процессе строительства при условии выполнения предъявляемых требований к материалам, технологическим процессам и параметрам применяемых машин, связанным с

приготовлением, транспортировкой, распределением и уплотнением горячих асфальтобетонных смесей.

Действующими нормативными документами предъявляются требования к качеству применяемых материалов и технологическим процессам при приготовлении асфальтобетонных смесей. Согласно им осуществляется контроль за приготовлением горячей смеси [73, 77]. По окончании приготовления горячая смесь перемещается в накопительный бункер, что позволяет сохранить требуемую температуру смеси в течение определенного времени, устранить неравномерность в подаче смеси в транспортные средства и сократить время на их загрузку. Следует заметить, что существующие конструкции бункеров для хранения горячей асфальтобетонной смеси в недостаточной степени предохраняют горячие смеси от окислительных процессов, влияющих на качество смеси.

Транспортировка смеси к месту строительства покрытия производится автосамосвалами. С целью уменьшения потерь тепла при перемещении смеси к месту производства работ используют транспортные средства большой грузоподъемности, требующие при загрузке значительной массы смеси. Загрузка такого транспорта должна осуществляться в несколько приемов. При загрузке транспорта смесью с высоким содержанием щебня за один прием наблюдается образование объемов материала в кузове автосамосвала с разными гранулометрическими составами, что приводит в дальнейшем к неоднородности смеси при укладке и уплотнении покрытия.

Согласно нормативным документам температура смеси при отгрузке потребителю регламентирована и зависит от типа смеси и марки битума. Минимальная температура смеси при укладке установлена рекомендациями и, согласно им, позволяет определить дальность транспортировки смеси [16, 20, 22, 26, 73]. Следует учесть, что часто для транспортировки горячих смесей используют транспорт общего назначения без применения дополнительного оборудования (чехлы, брезент). Это способствует повышению темпа охлаждения смеси и уменьшает время нахождения смеси в заданном температурном интервале при производстве работ. При транспортировке смеси за счет отдачи тепла в окружающую среду и стенкам кузова автосамосвала происходит снижение температуры на поверхности объема смеси в кузове транспортной машины, что приводит к неравномерности распределения температуры по объему смеси при ее разгрузке и укладке в дорожные покрытия. Распределение и уплотнение горячей смеси с разной температурой и гранулометрическим составом являются причинами образования на поверхности покрытия участков с разными прочностными характеристиками, коэффициентами уплотнения и плотностью, что впоследствии приводит к образованию дефектов покрытия в процессе эксплуатации дороги.

Существующими нормативными документами горячие асфальтобетонные смеси классифицированы на типы с учетом процентного содержания минерального материала (щебня). В зависимости от типа смеси нормативными документами и рекомендациями предусмотрены разные температурные режимы укладки и уплотнения. В то же время в соответствии с нормативными документами для приготовления смеси заданного типа могут быть использованы разные марки битумов [73, 77]. Это необходимо учитывать при разработке технологических процессов строительства покрытий, так как от этого зависят температурные режимы укладки и уплотнения смесей, что влияет на эксплуатационные показатели асфальтобетонных покрытий.

Установлено, что достичь заданной прочности асфальтобетона и требуемых коэффициентов уплотнения можно только при соблюдении температурных режимов укладки и уплотнения смесей при соответствующих параметрах уплотняющих машин [16, 48, 56, 67, 73]. Исследованиями В.Б. Пермякова доказано, что уплотнение горячих смесей с пониженной температурой и применением тяжелых катков позволяет получить высокий коэффициент уплотнения 0,995...0,996. При этом требуемая прочность асфальтобетона не достигается [55].

Распределение и предварительное уплотнение горячей смеси производится асфальтоукладчиками, параметры которых выбираются с учетом заданного темпа строительства дорожных покрытий. В зависимости от технической характеристики асфальтоукладчика и свойств горячих смесей производится выбор параметров уплотняющих машин. Для обеспечения непрерывности строительства покрытий необходимо согласование скоростных режимов асфальтоукладчика и катков с учетом допустимого времени работы в наиболее эффективных температурных интервалах, что возможно только при учете конкретных условий производства работ. Допустимая продолжительность операций по укладке и уплотнению горячих асфальтобетонных смесей зависит от конструкции покрытия, применяемых материалов, метеорологических условий производства работ и используемого механизированного звена машин. В настоящее время за основу определения продолжительности строительства и операций по укладке и уплотнению горячих смесей положены экспериментальные данные, полученные при конкретных условиях производства работ [4, 26, 27]. В действительности условия производства работ отличаются между собой, что необходимо учитывать при выборе и назначении технологических режимов процессов укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей [31, 32, 47].

Уплотняющие машины эффективно работают при условии, если контактные напряжения не превышают предела прочности уплотняемого материала и по величине близки к нему [30, 48, 67]. Известно, что предел прочности горячего асфальтобетона зависит от температуры и с понижением температуры предел прочности возрастает по экспоненциальной зависимости. В то же время прочностные характеристики горячего асфальтобетона зависят от толщины укладываемого слоя и степени предварительного уплотнения смеси асфальтоукладчиками [48, 56, 63].

Величина напряжений под вальцом зависит от параметров катка, свойств уплотняемого материала и конструктивных параметров покрытия. При работе катка в связи с изменением свойств смеси меняется площадь контакта вальца с материалом при проходах по одному следу, что приводит к увеличению напряжений в зоне контакта вальца катка. Однако рост контактных напряжений под вальцом катка отстает от увеличения предела прочности асфальтобетона, связанного с изменением его свойств. В зависимости от прочностных характеристик горячего асфальтобетона и силового параметра вальца каждый каток соответствует определенным температурным интервалам, в пределах которых достигается эффект от его воздействия. Для повышения качества строительства покрытий и эффективности работы уплотняющих машин выбор их параметров необходимо осуществлять с учетом прочностных характеристик применяемого материала.

Практикой строительства установлено, что для повышения ровности при уплотнении дорожных одежд первые проходы катка необходимо производить ведущим вальцом. Изучение закономерностей распределения напряжений в зоне контакта вальца с материалом и установление их зависимостей от параметров применяемых машин и свойств уплотняемой смеси позволят обеспечить технологический процесс укатки с учетом ровности покрытия.

Из представленного анализа требований к устройству дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей видно, что для повышения эксплуатационных качеств асфальтобетонных покрытий необходимо обеспечить выбор технологических процессов устройства покрытий и параметров механизированного звена машин с учетом свойств применяемого материала и условий производства работ.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

Основной операцией при строительстве автомобильных дорог, обеспечивающей их эксплуатационные качества, является уплотнение дорожных одежд. В зависимости от условий производства работ и применяемого материала для дорожных одежд используются разные технологические схемы уплотнения, содержащие разные методы и типы машин. В связи с восприятием конструктивными слоями дороги динамической нагрузки от транспорта и необходимостью обеспечения одинаковой деформативной способности уложенного материала укладку и уплотнение дорожных одежд производят слоями незначительной толщины. Требуемая деформативная способность слоя обеспечивается при соответствующей плотности материала, которая достигается за счет силового воздействия рабочих органов катков на уплотняемый материал. Эффективным методом уплотнения таких конструктивных слоев является метод укатки, который позволяет получить требуемое качество уплотнения при сравнительно малой стоимости работ. При движении вальца по поверхности материала происходит перемещение частиц материала за счет силового воздействия машины, которое передается на уплотняемый материал через площадь контакта вальца катка с материалом и обеспечивает изменение плотности материала. Установлено, что достижение требуемой плотности материала зависит от свойств материала, силовых параметров катков и соблюдения технологических режимов уплотнения. С повышением плотности материала возрастает деформативная способность материала, что приводит к изменению площади контакта вальца с материалом и передаваемой нагрузке от вальца катка на уплотняемый материал.

Установление закономерностей влияния разных факторов на величину контактной поверхности вальца является основой для моделирования процесса взаимодействия вальца катка с материалом и позволяет решать вопрос о напряженном состоянии материала в процессе уплотнения. Данная задача решалась в производственных условиях при строительстве дорожных одежд нежесткого типа, а также в лабораторных условиях при уплотнении грунтов и асфальтобетонных смесей. Измерение модуля деформации уплотняемого материала производилось модулемером, длина дуги контакта вальца с материалом определялась по осциллограммам и непосредственным измерением дуги контакта, плотность материала определялась взятием образцов и приборами для определения плотности.

2.1. ВЛИЯНИЕ УПЛОТНЯЮЩЕЙ НАГРУЗКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ

Рост интенсивности движения и увеличение осевой нагрузки от транспортных средств на дорожные одежды предъявляют повышенные требования к транспортно-эксплуатационным показателям асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, которые можно обеспечить только в процессе строительства. В настоящее время на долю асфальтобетонных покрытий приходится около 60 % общей протяженности дорог.

Величина достигаемых показателей асфальтобетона в процессе устройства покрытия зависит как от качества применяемого материала, так и от принятой технологии строительства. Нарушение технологии при выполнении процессов приготовления горячей смеси, транспортирования, укладки и уплотнения, а также выбор режимов работы механизированного звена

машин без учета конкретных условий производства работ приводят к снижению эксплуатационных показателей асфальтобетонного покрытия.

Основными параметрами, характеризующими эксплуатационные показатели асфальтобетона, являются:

- прочность, характеризующая сопротивление асфальтобетона сжимающим силовым воздействиям от движущегося транспорта при различных температурах окружающего воздуха;
- водостойкость, характеризующая потерю прочности асфальтобетона при его водонасыщении;
- водонасыщение, характеризующее остаточную пористость материала;
- сдвигоустойчивость, характеризующая способность материала сопротивляться действию касательных напряжений;
- трещиностойкость, характеризующая сопротивление материала покрытия растягивающим силовым воздействиям при низких температурах.

Значительное влияние на обеспечение требуемых показателей асфальтобетона в процессе эксплуатации оказывает температура горячей смеси на всех этапах устройства покрытия. В процессе эксплуатации транспортно-эксплуатационные показатели дорожного покрытия также зависят от температуры окружающего воздуха. В летний период, за счет солнечной радиации температура асфальтобетонного покрытия может достигать температуры 60...70 °С, что приводит к снижению прочностных и деформативных характеристик асфальтобетона, и, как следствие, под действием нагрузок от транспортных средств могут возникать пластические деформации, способствующие образованию волн и колеи на поверхности покрытия. При низких температурах окружающего воздуха объем асфальтобетона уменьшается, в покрытии возникают растягивающие напряжения, что способствует образованию трещин на поверхности.

Установлено, что обеспечить требуемые эксплуатационные параметры асфальтобетонного покрытия можно только в процессе его устройства при выборе силовых параметров уплотняющих машин, соответствующих свойствам применяемых горячих смесей. На рисунке 2.1 представлены зависимости, характеризующие влияние уплотняющей нагрузки на параметры, определяющие эксплуатационные показатели асфальтобетонного покрытия. Данные зависимости получены по результатам обработки экспериментальных исследований, представленных в работе [11]. Видно, что достигаемые значения параметров покрытия в процессе уплотнения горячей смеси, характеризующие свойства асфальтобетона и влияющие на работоспособность дорожного покрытия, зависят от напряжений в зоне контакта рабочего органа машины с уплотняемым материалом.

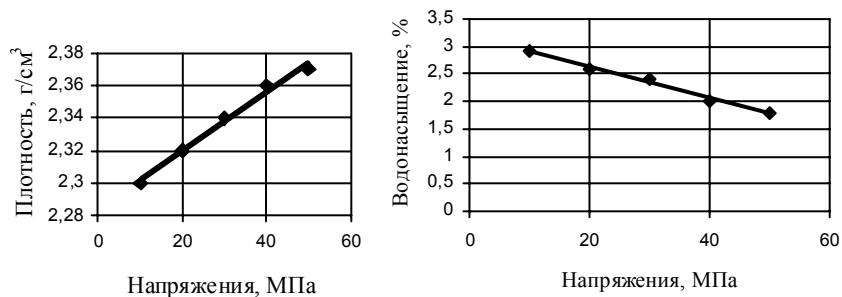


Рис. 2.1. Влияние контактных напряжений на эксплуатационные показатели асфальтобетона

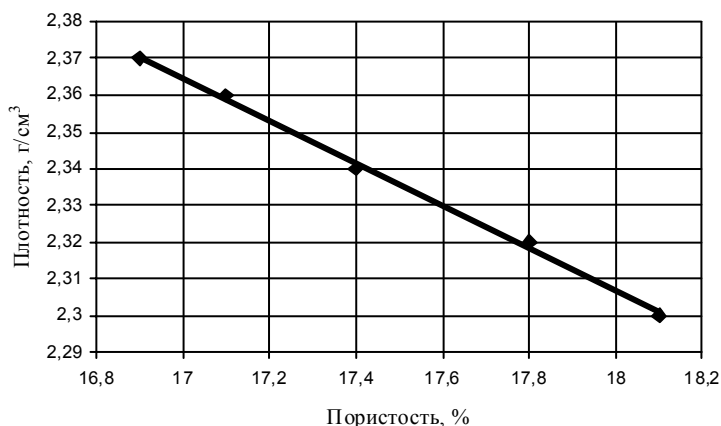


Рис. 2.2. Влияние пористости асфальтобетона на его плотность

Установлено, что величина контактных напряжений влияет на получаемую пористость асфальтобетона по линейному закону. Плотность асфальтобетона характеризуется величиной остаточной пористости. Установлена связь между этими параметрами, которая представлена на рис. 2.2.

Установлено, что плотность асфальтобетона влияет на прочностные характеристики при условии отсутствия разрушения минерального материала в процессе уплотнения, а также на водонасыщение. Установленные зависимости представлены на рис. 2.3.

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

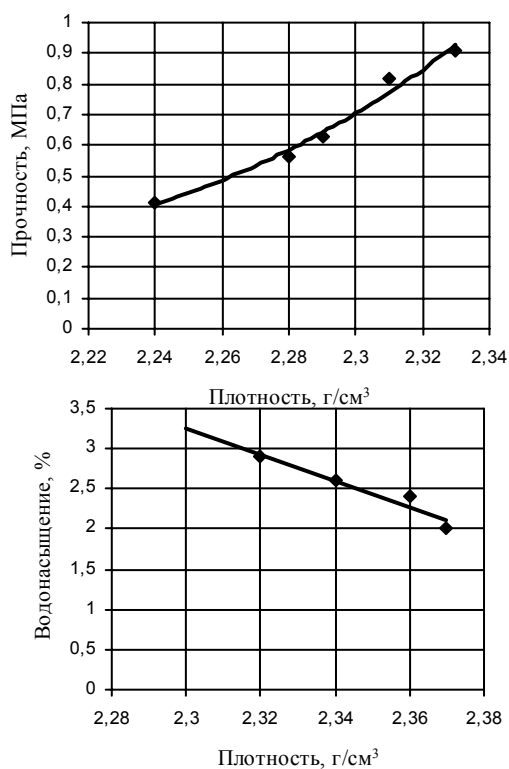


Рис. 2.3. Влияние плотности асфальтобетона на прочность при сжатии и водонасыщение

Существующими документами при устройстве асфальтобетонного покрытия в качестве нормируемого параметра принят коэффициент уплотнения. Установлено, что обеспечить требуемый коэффициент уплотнения можно только при условии соответствия контактных напряжений под рабочим органом катка прочностным параметрам горячего асфальтобетона.

На основании представленных зависимостей видно, что каждой величине уплотняющей нагрузке соответствуют определенные показатели асфальтобетона, характеризующие его эксплуатационные параметры. С ростом уплотняющей нагрузки плотность асфальтобетона увеличивается при одновременном снижении водонасыщения. Поэтому для обеспечения заданных эксплуатационных параметров асфальтобетонного покрытия необходимо выбор параметров уплотняющих машин осуществлять с учетом свойств горячей смеси.

2.2. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КАТКОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВАЛЬЦОМ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

В результате проведенных исследований М.П. Костельовым и Я.М. Посадским установлено, что работоспособность дорожных одежд зависит от качества уплотнения. На участках с недеформированными покрытиями коэффициент уплотнения составляет не менее 0,97...0,98, на участках с деформированными и разрушенными покрытиями его величина составляет менее 0,95...0,97, а на участках со значительными разрушенными покрытиями – менее 0,9. Одновременно с повышением коэффициента уплотнения улучшаются и свойства материалов. Увеличение коэффициента уплотнения асфальтобетонного покрытия на 0,01 (в пределах 0,96...1,0) увеличивает его прочность на 4...8 %, что равнозначно увеличению толщины покрытия на 5...10 мм [45].

При строительстве дорожных одежд применяется материал с разными физико-механическими свойствами. Анализ применяемых технологических схем для строительства автомобильных дорог показал, что в зависимости от используемого материала и его свойств применяются разные машины для распределения и уплотнения дорожных одежд. Парк уплотняющих машин представляет группу машин, отличающихся не только техническими характеристиками, но и принципом воздействия рабочего органа машины на уплотняемый материал, что регламентируется нормативным документом и существующими рекомендациями [4, 16, 26, 73]. Для уплотнения дорожных одежд рекомендуется применять катки статического и вибрационного действия, катки на пневматических шинах и катки комбинированного действия. Катки статического действия могут применяться на всех этапах строительства дорожных одежд и покрытий и в обязательном порядке на заключительной стадии уплотнения покрытий нежесткого типа. Эти машины при правильном выборе их параметров обеспечивают требуемое качество уплотнения, но характеризуются высокой металлоемкостью.

В дорожном строительстве широкое применение получили самоходные катки на пневматических шинах. Применение таких машин целесообразно при незначительном сопротивлении движению, так как в противном случае требуется большое тяговое усилие. Они эффективны при уплотнении дорожных одежд с применением материала с низкими прочностными характеристиками. На начальной стадии уплотнения за счет малой способности материала сопротивляться внешней нагрузке пневматическая шина ведет себя как жесткий валец. С увеличением плотности материала и повышением его способности сопротивляться нагрузке пневматическая шина начинает деформироваться, что приводит к увеличению площади контакта шины с материалом, более равномерному распределению нагрузки в зоне контакта и увеличению времени действия нагрузки. Применяемая система регулирования давления в пневматических шинах позволяет за счет деформации шины менять площадь контакта, а

следовательно, и величину контактных напряжений, что позволяет использовать их при уплотнении разных материалов. Однако ряд недостатков, заложенных в конструкцию машин, снижают эффективность их применения. Высоко расположенный центр тяжести машины способствует недостаточной устойчивости на поворотах, а наличие зазоров между шинами способствуют поперечному перемещению материала на начальном этапе укатки асфальтобетонного покрытия. Поэтому для обеспечения ровности покрытия необходимо на заключительной стадии уплотнения применять катки с жесткими вальцами [67, 73].

Анализ выпуска уплотняющих машин в нашей стране и ведущими фирмами мира, а также состав механизированных звеньев уплотняющих машин при устройстве асфальтобетонных покрытий показал, что широкое применение в настоящее время получили вибрационные катки. При работе вальца его колебательные движения передаются частицам уплотняемого материала, что способствует уменьшению сил трения и сцепления между ними и повышает эффективность уплотнения такими катками. Установлено, что при равном уплотняющем эффекте масса вибрационного катка может быть уменьшена от 1,3 до 5 раз в зависимости от свойств материала [4, 15, 41, 48]. При уплотнении покрытий из горячих асфальтобетонных смесей вибрационные катки могут быть использованы как на начальной стадии уплотнения (без вибрации), так и на основной стадии уплотнения, что позволяет уменьшить количество применяемых машин.

Исследованиями установлено, что динамический эффект от воздействия вибрации зависит от частоты колебаний и величины относительной вынуждающей силы. Такие катки наиболее эффективны при уплотнении смесей с высоким содержанием щебня (до 80 %), а также смесей типа А и Б. В зависимости от конкретных условий строительства и параметров машин вибрационные машины могут работать как в статическом, так и динамическом режимах. Одним из недостатков, характерным для вибрационных катков при работе в динамическом режиме, является снижение их ходовых качеств за счет уменьшения коэффициентов трения при управляемом и сцепления при ведущем вибрационном вальце, что влияет на качество уплотнения дорожных покрытий. Анализ конструкций самоходных катков показал, что у существующих катков вибрационный валец может иметь разное расположение относительно направления движения. Применяемые модели катков изображены схемами, представленными на рис. 2.4.

Статистический анализ выпуска вибрационных катков показал, что наибольший процент приходится на традиционную схему, когда вибрационный валец является ведущим (42 %), а ведомый – управляемый, статического действия. Применяются катки, у которых вибрационный валец является ведомым, а ведущий валец – управляемый, статического действия (19 %). Широкое распространение получили самоходные вибрационные катки, у которых оба вальца являются вибрационными и ведущими (36 %). Конструкции катков, у которых вибрационный валец является управляемым, составляют 3 %.

В последние годы широкое применение при строительстве дорожных одежд получили комбинированные катки, сочетающие положительные эффекты пневматического колеса и жесткого вибрационного вальца. Такие машины позволяют уплотнять дорожные одежды из разных материалов. Анализ конструкций комбинированных катков показал, что в основном (90 %) выпускаются катки, сочетающие вибрационный валец с пневматическими шинами. Практически все комбинированные катки имеют шарнирно-сочлененную раму, что позволяет уменьшить радиус поворота и снизить воздействие вибрации на машиниста. В зависимости от области применения конструкции комбинированных катков отличаются между собой.

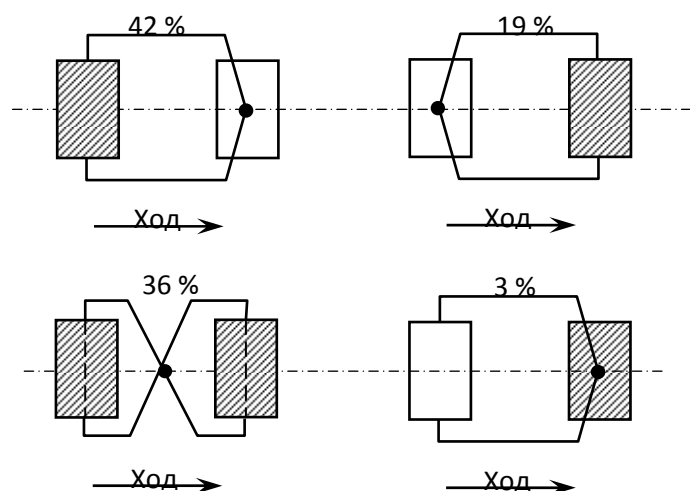


Рис. 2.4. Конструктивные схемы самоходных вибрационных катков

Осуществление процессов уплотнения на разных режимах работы, а также возможность замены ими катков статического действия при одинаковом уплотняющем эффекте позволяют расширить области их применения. Это послужило основанием для увеличения массы самоходных вибрационных катков. Изменение массы вибрационных катков по годам (с учетом прогноза) представлено на рис. 2.5. Из представленных данных видно, что с течением времени масса вибрационных катков увеличивается, что позволяет расширить области их применения и на определенных этапах уплотнения, без применения вибрации, заменять катки статического действия. Все большее применение находят катки с дистанционным управлением, позволяющие повысить их эффективность за счет увеличения относительной вынуждающей силы вибрационного вальца и отсутствия воздействия вибрации на оператора.

Эффективность воздействия вибрационного катка на уплотняемый материал зависит от его параметров. К таким параметрам относятся масса катка (Q), ширина и радиус вальца (B , r), а также параметры вибрации (P , ω).

Анализ параметров катков показал, что между массой катка и параметрами вальца существуют зависимости, которые представлены на рис. 2.6.

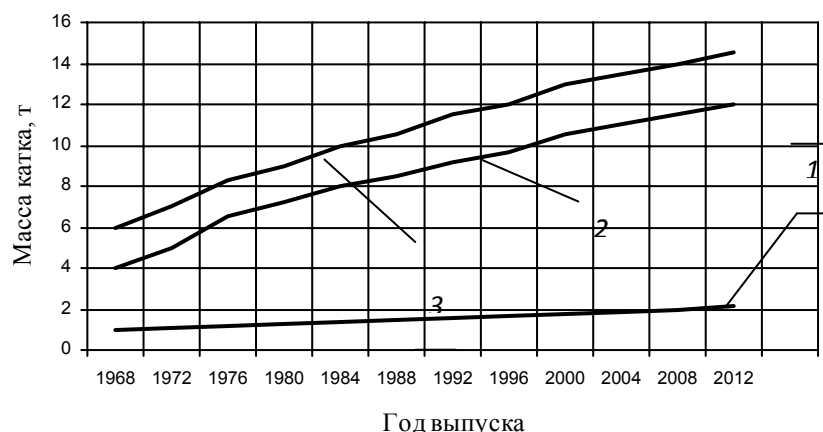


Рис. 2.5. Изменение массы самоходных вибрационных катков по годам:

1 – управляемые; 2 – тандем; 3 – комбинированные

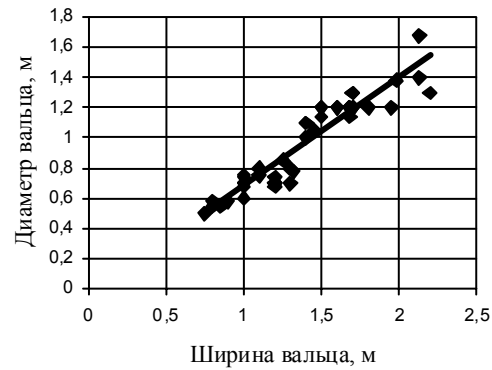
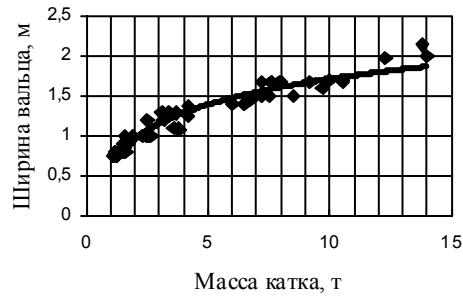


Рис. 2.6. Зависимости между параметрами катков

Обобщающим параметром, характеризующим воздействие вальца на материал, является отношение Q/Br (кН/м^2) или q/r , где q – линейное давление вальца (кН/м). Зависимость от-ношения силового воздействия вальца в статическом режиме от массы катка представлено на рис. 2.7.

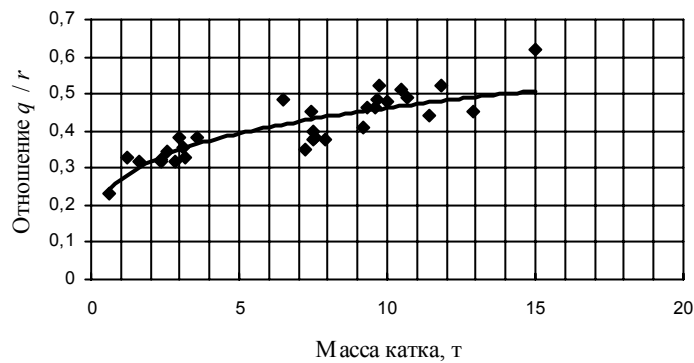


Рис. 2.7. Влияние силового воздействия вальца в статическом режиме в зависимости от массы катка

Данная зависимость может быть аппроксимирована уравнением

$$q / r = 0,27Q^{0,229}, \text{ кН/см}^2. \quad (2.1)$$

Коэффициент корреляции равен 0,77.

Из представленных данных видно, что с увеличением массы машины силовое воздействие на уплотняемый материал возрастает, что способствует увеличению контактных напряжений под вальцом катка. Данная зависимость характеризует параметры самоходных вибрационных катков типа тандем.

Отмечалось, что эффективность работы вибрационных катков зависит как от статических параметров машины, так и от параметров вибрации. Обработка статистического материала по параметрам выпускаемых катков показала, что между массой катка и вынуждающей силой существует прямая зависимость (рис. 2.8). Аналогичная зависимость была получена ранее [30].

Экспериментально установлено, что качество уплотнения вибрационными машинами зависит от относительной вынуждающей силы (P/G) и ее частоты колебаний (рис. 2.9) [15].

Из данных видно, что увеличение относительной вынуждающей силы до шести повышает качество уплотнения смеси. Дальнейшее повышение относительной вынуждающей силы практически нецелесообразно. Поэтому при создании вибрационных машин конструктивно принималась величина относительной вынуждающей силы в пределах 4 – 6. При таких параметрах вибрации работа машин в динамическом режиме происходит в виброударном режиме, что приводит к увеличению контактных напряжений под вальцом, уменьшению времени контакта вальца с материалом и росту нагрузок на конструкцию машины. С увеличением массы вибрационных катков для обеспечения требуемого условия укатки необходимо уменьшать величину вынуждающей силы, так как величина контактных напряжений превышает предел прочности материала, что приводит к разуплотнению материала. Изменение относительной вынуждающей силы в зависимости от массы катка представлено на рис. 2.10 (кривая 1). Следует заметить, что эффективность уплотнения вибрационного катка зависит от массы вальца и передаваемой нагрузки на него от рамы катка (кривая 2).

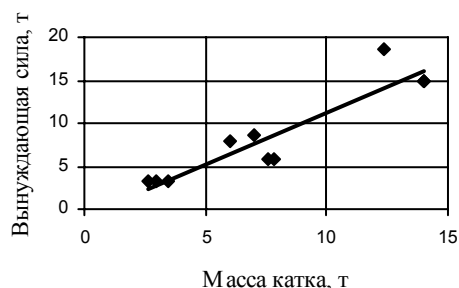


Рис. 2.8. Зависимость вынуждающей силы от массы катка



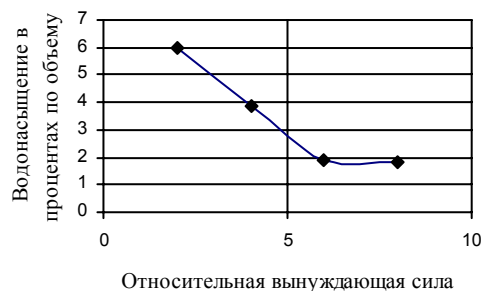


Рис. 2.9. Зависимость качества уплотнения смеси типа Г от относительной вынуждающей силы

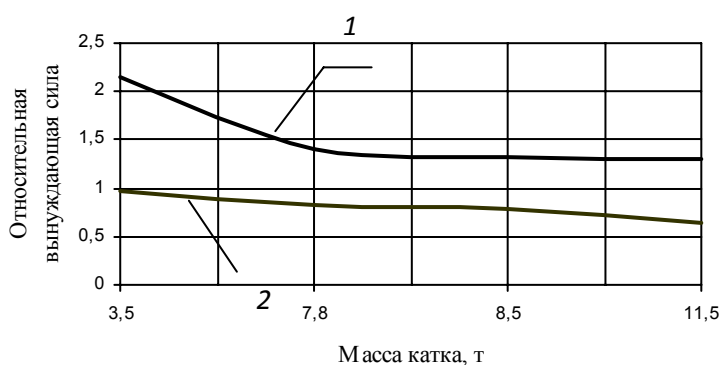


Рис. 2.10. Зависимость относительной вынуждающей силы от массы катка:

1 – масса катка; 2 – масса вибрационного вальца и части рамы катка

Изменение вынуждающей силы возбудителя колебаний возможно за счет частоты колебаний или статического момента. Установлено, что лучший эффект уплотнения материала достигается при определенной частоте колебаний вибрационного вальца в зависимости от свойств материала и чем меньше размеры фракций уплотняемого материала, тем больше должна быть частота возбудителя колебаний. Экспериментально установлено, что при уплотнении асфальтобетонных покрытий лучший эффект достигается при частоте колебаний 40...60 Гц [15, 63].

Отмечалось, что обеспечить требуемое качество уплотнения можно при условии близости контактных напряжений пределу прочности материала. Анализ параметров вибрационных катков показал, что в настоящее время выпускаемые модели катков имеют фиксированные значения относительной вынуждающей силы, что позволяет применять их на определенных этапах уплотнения дорожных одежд. Расширение области применения и повышение эффективности работы вибрационных катков возможно при многоступенчатом изменении вынуждающей силы или когда конструкция возбудителя колебаний позволяет бесступенчато менять его статический момент при постоянной частоте колебаний вынуждающей силы.

В настоящее время ряд зарубежных фирм освоила выпуск вибрационных катков, в которых вынуждающая сила меняется за счет статического момента возбудителя при постоянной частоте колебаний. С учетом технологических требований к работе вибрационных катков целесообразным явля-

ется создание такой системы управления вибровозбудителем, которая позволяет менять эти параметры независимо друг от друга.

Из представленного анализа конструкций вибрационных катков видно, что наибольшая доля выпускаемых катков приходится на двухвальцовые катки с ведущим вибрационным вальцом. В настоящий момент все большее применение находят катки со сдвоенной вибрацией. Увеличение массы катков привело к применению более мощных силовых установок (рис. 2.11). Так, по результатам статистической обработки параметров вибрационных катков начала 1980-х годов соотношение между мощностью двигателя и массой машины составляло 4,62, а в настоящий момент это отношение равняется 8.

Следует заметить, что в зависимости от области применения энергоемкость катков отличается между собою. Расчетные зависимости для выбора мощности двигателя катка с учетом области применения представлены в табл. 2.1, где Q – масса катка.

Для повышения эффективности применения уплотняющих машин разработаны устройства, позволяющие осуществлять оперативный контроль за качеством уплотнения при работе катка. В качестве контролируемых параметров используются разные показатели (температурасмеси, воздухопроницаемость и другие). При работе вибрационных катков широкое применение получили приборы, принцип действия которых основан на поглощении энергии от действия вибрационного вальца с уплотняемым материалом в зависимости от степени его уплотнения. С увеличением плотности материала меняется характер движения вибрационного вальца, что учитывается амплитудой или скоростью его перемещения, поскольку уплотняемый материал начинает отражать прилагаемое усилие от вальца. Эти изменения в движении вальца улавливаются датчиками, установленными в системе амортизации вибрационного вальца, и подаются в преобразователь, который выдает информацию в виде цифровой или световой индикации. Практика применения таких приборов показала, что они дают положительные результаты при уплотнении материала дорожных одежд сравнительно большой толщины.

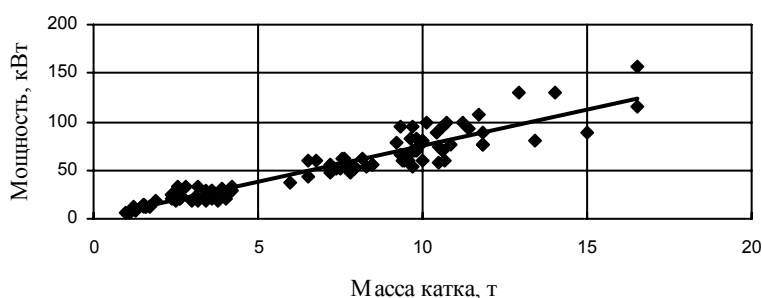


Рис. 2.11. Зависимость мощности силовой установки от массы катка

2.1. Расчетные зависимости для выбора мощности двигателя

Область применения	Расчетная зависимость	Коэффициент корреляции
Дорожные покрытия	$6Q + 1,82$	0,86
Дорожные одежды	$8,65Q - 18,1$	0,95
Дорожные одежды и грунт	$8,56Q - 11,89$	0,89

2.3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ НА ХОДОВЫЕ КАЧЕСТВА УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН

Из представленного анализа технологических схем для строительства асфальтобетонных покрытий, а также отмеченных тенденций в создании уплотняющих машин видно, что вибрационные катки широко применяются при строительстве дорожных покрытий нежесткого типа. При работе катков статического действия тягово-сцепные качества машин зависят от свойств материала и параметров катка. При работе вибрационных катков они зависят также и от параметров вибрации. Следует отметить, что при определенных параметрах вибрации происходит несоблюдение условия движения катка по уплотняемой поверхности, что приводит к скольжению вальца или его пробуксовке по поверхности слоя покрытия и, как следствие, образованию неровностей на дорожном покрытии. Поэтому эффективность вибрационных катков будет определяться не только силовым воздействием на уплотняемый материал, но и тягово-сцепными качествами машины.

Анализ выпуска уплотняющих машин показал, что вибрационные машины являются основным видом уплотняющих машин и применяются как в сочетании с другими машинами, так и самостоятельно. При работе в динамическом режиме они заменяют более тяжелые катки статического действия. Применение гидравлического привода позволяет использовать гидравлические двигатели для привода вальцов и для создания колебаний вальца. Такие модели катков позволяют бесступенчато менять рабочие скорости при выполнении технологических процессов, а также изменять частоту колебаний в зависимости от физико-механических свойств уплотняемого материала. Ряд фирм выпускает катки со вдвоянной вибрацией. У таких катков оба вальца являются ведущими и вибрационными. Привод вальцов синхронный. Возбудители колебаний установлены таким образом, что фазы колебаний одного вальца относительно другого смещены на 180° . Такое конструктивное решение обеспечивает надежный контакт с уплотняемым материалом одного из вальцов в течение периода колебаний вынуждающей силы. Такие катки имеют более высокую проходимость и устойчивость в процессе работы, что является недостатком для вибрационных катков-танDEM с одним вибрационным вальцом [2, 28].

Экспериментально установлено, что наибольший эффект воздействия вальца на уплотняемый материал достигается при оптимальных параметрах вибрирования. Так, для уплотнения асфальтобетонных смесей относительная вынуждающая сила должна быть равна 6, для грунтов – в пределах 0,9...2,3 [59, 66]. Использование в самоходных катках такой относительной вынуждающей силы приводит к работе вибрационного вальца в субгармоническом режиме, т.е. когда один удар вальца о поверхность уплотняемого материала происходит за несколько оборотов небалансного вала. Поэтому такой режим работы вибрационного вальца оказывает влияние на ходовые качества машин. При устройстве вибрационного вальца ведомым и управляемым с увеличением относительной вынуждающей силы снижается коэффициент сопротивления движению, и машина становится неуправляемой. При ведущем вибрационном вальце снижается коэффициент сцепления вальца с поверхностью, что влияет на движение катка и уплотняющую поверхность покрытия. Поэтому для обеспечения ходовых качеств машины снижают величину относительной вынуждающей силы, что снижает эффективность воздействия вальца на уплотняемый материал. Анализ параметров самоходных вибрационных катков показал, что величина относительной возмущающей силы колеблется в интервале от 0,34 до 3,24, а частота колебаний – в пределах 40...75 Гц.

Для установления закономерностей влияния параметров вибрации на ходовые свойства вибрационных катков рассмотрим процесс взаимодействия вальца с уплотняемым материалом. Конструктивные решения применения вибрационных вальцов в конструкциях самоходных катков показал, что возможны следующие варианты их применения:

- вибрационный валец является ведомым, ведущий валец – невибрационный;
- вибрационный валец является ведущим, ведомый – невибрационный;
- оба вальца вибрационные и ведущие.

Рассмотрим случай, когда вибрационным является ведомый валец. Схема сил, приложенных к такому валцу, представлена на рис. 2.12, где Q – сила тяжести вальца и передаваемой на него нагрузки от рамы катка; P – вынуждающая сила; R_P – реакция рамы, равная по величине толкающему усилию, необходимому для перемещения ведомого вальца; R_{σ} , R_{τ} – реакции нормальных и касательных напряжений; ω – частота колебаний вынуждающей силы.

Из условия динамического равновесия ведомого вальца имеем:

$$\begin{aligned} \sum X = 0 \quad R_P - P \cos \omega t + R_{\tau_x} - R_{\sigma_x} - m\ddot{x} &= 0; \\ \sum Y = 0 \quad -Q_1 + P \sin \omega t + R_{\sigma_y} + R_{\tau_y} - m\ddot{y} &= 0; \\ \sum M = 0 \quad R_{\sigma_y} \Delta + R_{\tau_y} \Delta - R_{\sigma_x} r + R_{\tau_x} r - I\ddot{\phi} &= 0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

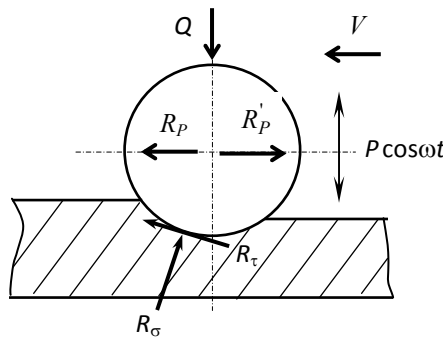


Рис. 2.12. Схема сил, приложенных к ведомому валцу

Принимаем, что движение катка равномерное, следовательно, $\ddot{\phi} = 0$. Горизонтальная реакция уплотняемого материала на валец будет равна:

$$R_P - P \cos \omega t - m\ddot{x} = R_{\sigma_x} - R_{\tau_x}. \quad (2.3)$$

Вертикальная реакция уплотняемого материала на валец равна:

$$Q_1 - P \sin \omega t + m\ddot{y} = R_{\sigma_y} + R_{\tau_y}. \quad (2.4)$$

Подставляя значения (2.3) и (2.4) в уравнение (2.2), получаем:

$$\Delta(Q_1 - P \sin \omega t + m\ddot{y}) = r(R_P - P \cos \omega t - m\ddot{x}). \quad (2.5)$$

Разделим обе части полученного уравнения на величину

$$\Delta(Q_1 - P \sin \omega t + m\ddot{y}) / r = R_P - P \cos \omega t - m\ddot{x}. \quad (2.6)$$

Учитывая, что отношение величин Δ/r есть коэффициент сопротивления качению (передвижению), имеем:

$$f' = (R_P - P \cos \omega t - m\ddot{x}) / (Q_1 - P \sin \omega t + m\ddot{y}). \quad (2.7)$$

Обозначим величину $R_P - P \cos \omega t - m\ddot{x}$, равную силе тяги, через T , передаваемой ведомому валцу, а величину $Q_1 - P \sin \omega t + m\ddot{y}$ равной реакции грунта, то получим зависимость, аналогичную для определения коэффициента сопротивления перекачиванию вальца статического действия. Анализ полученного уравнения показывает, что реакция материала зависит от пе-

редаваемого давления на него со стороны вальца катка и в отдельные моменты она может быть меньше собственной массы рабочего органа машины за счет возмущающей силы и, следовательно, для движения требуется меньшее усилие. Но в следующий период, когда давление на материал возрастает, требуется большее усилие для движения. Следовательно, если принять толкающее усилие постоянным, будет иметь место неравномерное движение вальца. В то же время, как видно из зависимости, величина толкающего усилия является неравномерной величиной и зависит от направления действия величины возмущающей силы.

Учитывая данную особенность работы вибрационного вальца катка, по аналогии с принятыми в работах [12, 18, 62] примем величину f' за эффективный коэффициент трения.

Учитывая, что величина толкающего усилия для ведомого вальца в нашем случае будет равна $Q_1 f_1$, где f_1 – коэффициент сопротивления движению вальца при статическом движении, зависимость (2.6) можно представить следующим образом:

$$f' = (f_1 Q_1 - P \cos \omega t - m\ddot{x}) / (Q_1 - P \sin \omega t + m\ddot{y}). \quad (2.8)$$

Разделим полученное выражение на величину Q_1 . Тогда имеем:

$$f' = (f_1 - P \cos \omega t / Q_1 - \ddot{x} / g) / (1 - P \sin \omega t / Q_1 + \ddot{y} / g). \quad (2.9)$$

Анализ работы вибрационных катков показал, что вид колебаний (направленные или круговые) не оказывает существенного влияния на получаемую плотность материала. С целью упрощения конструкции возбудителя колебаний в катках в настоящее время используются круговые колебания. Величины ускорений \ddot{x} и \ddot{y} , входящие в уравнение (2.2), с учетом результатов исследований, изложенных в [68], можно представить в виде

$$\ddot{x} = -A\omega^2 \cos \omega t; \quad \ddot{y} = A\omega^2 \sin \omega t. \quad (2.10)$$

Тогда в окончательном виде уравнение (2.9) имеет вид

$$f' = (f_1 - P \cos \omega t / Q_1 + A\omega^2 \cos \omega t / g) / (1 - P \sin \omega t / Q_1 + A\omega^2 \sin \omega t / g). \quad (2.11)$$

Анализ данной зависимости показывает, что в случае отсутствия вибрации, т.е. $P = 0$ и $\omega = 0$, получаем $f = f'$.

Из данного уравнения видно, что реакция уплотняемого материала зависит от относительной возмущающей силы и сил инерции. Минимальное значение нормальной реакции материала будет при $\sin \omega t = 1$ и равно

$$R_{\min} = 1 - P / Q_1 + A\omega^2 / g. \quad (2.12)$$

Решение данного уравнения дает возможность определить величину относительной возмущающей силы, при превышении которой рабочий орган машины работает в виброударном режиме, т.е. с отрывом от поверхности уплотняемого материала. При отрыве вальца от поверхности материала $R_{\min} \leq 0$, тогда

$$P / Q_1 = 1 + A\omega^2 / g. \quad (2.13)$$

Решение данного уравнения дает возможность установить зависимость амплитуды колебаний вальца от величины P/Q для разных частот колебаний рабочего органа, при превышении которой рабочий орган машины начинает работать в виброударном режиме. Исследованиями установлено, что наиболее эффективно вибрационные катки работают при периодических колебаниях вальца [15, 28]. С учетом экспериментальных данных получены численные значения f' при разных значениях относительной вынуждающей силы (P/Q) и частоты коле-

баний, которые представлены на рис. 2.13.

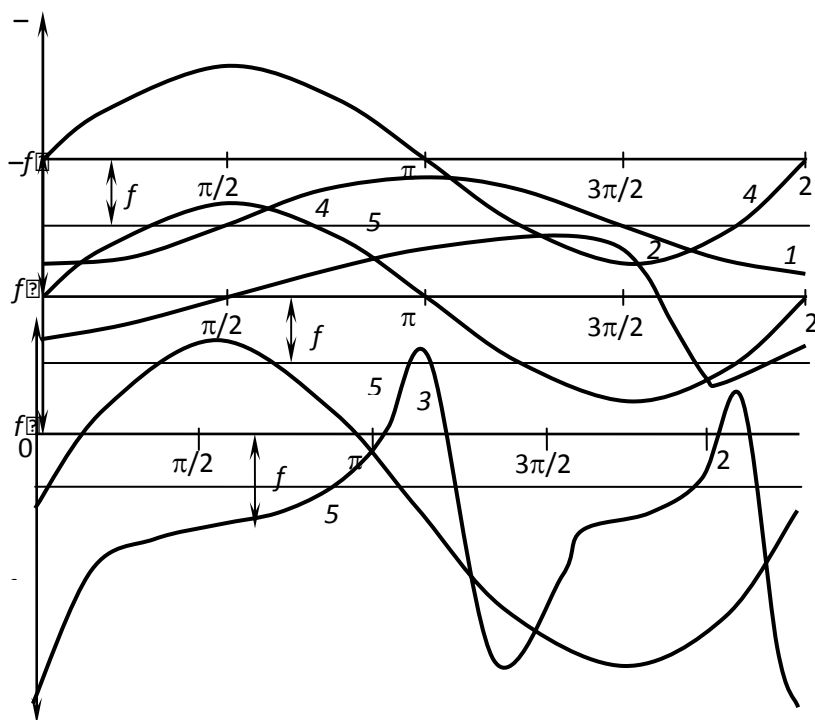


Рис. 2.13. Зависимость коэффициента сопротивления движения от относительной возмущающей силы с периодом колебаний 50 Гц:
 1 – $P/Q = 1$; 2 – $P/Q = 3$; 3 – $P/Q = 8$; 4 – величина возмущающей силы;
 5 – статический коэффициент сопротивления движению

Из представленных данных видно, что при незначительной относительной возмущающей силе ($P/Q \leq 1$) отрыва вальца от поверхности уплотняемого материала не происходит. При увеличении относительной возмущающей силы ($P/Q > 3$) наблюдается отрыв вальца от уплотняемой поверхности покрытия и рабочий орган работает в виброударном режиме с периодом, равным периоду возмущающей силы. При дальнейшем увеличении относительной возмущающей силы ($P/Q = 8$) наблюдаются более сложные колебания и рабочий орган работает в субгармоническом режиме.

Анализ результатов расчетов эффективного коэффициента трения рабочего органа вибрационной машины с уплотняемым материалом показывает, что численное значение f' в течение периода колебаний меняется от f'_{\min} до f'_{\max} . Экспериментальными исследованиями установлено, что с увеличением скорости перемещения рабочего органа машины численное значение f' стабилизируется и составляет 0,9...0,92 коэффициента сопротивления движению машины в статическом режиме. Аналогичные результаты представлены в работах [2, 62], хотя и отмечается увеличение f' по отношению к коэффициенту сопротивления передвижению катка без вибрации. Такой вывод можно объяснить тем, что тягово-сцепные свойства катка определяются по среднему давлению в гидравлической системе привода машины.

Результатами экспериментальных и теоретических исследований установлено, что величина амплитуды колебаний рабочего органа вибрационной машины зависит от величины относительной возмущающей силы, жесткости амортизаторов и уплотняемого материала, частоты возмущающей силы и собственной частоты вальца [2, 12, 62].

В некоторых вибрационных машинах, с целью увеличения интенсивности воздействия

рабочего органа на уплотняемый материал, частоту колебаний возмущающей силы подбирают таким образом, чтобы она совпадала с собственной частотой рабочего органа, т.е. чтобы машина работала в резонансном режиме. Конструкцию вибрационного катка, в зависимости от его назначения, можно моделировать с некоторыми допущениями как одномассную или двухмассную систему.

Тогда амплитуда колебаний вальца катка может быть определена по следующим формулам:

– для одномассной системы

$$A = P / (c_{гр} - m_0 \omega^2); \quad (2.14)$$

– для двухмассной системы

$$A = P(c_{п} / m_p - \lambda^2) / (\omega^2 - \lambda^2) m_0, \quad (2.15)$$

где $c_{гр}$ – коэффициент упругости грунта; m_0 – масса вальца; $c_{п}$ – коэффициент упругости подвески; m_p – масса рамы катка; ω – частота колебаний возмущающей силы; λ – собственные частоты колебаний, величины которых могут быть определены по формуле

$$\lambda_{1-II}^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{c_{гр} + c_{п}}{m_0} + \frac{c_{п}}{m_p} \pm \sqrt{\left(\frac{c_{гр} + c_{п}}{m_0} - \frac{c_{п}}{m_p} \right)^2 + \frac{4c_{п}^2}{m_0 m_p}} \right]. \quad (2.16)$$

При ведущем вибрационном вальце условия равновесия имеют вид:

$$\sum X = 0 \quad -R_p - P \cos \omega t + R_{\tau_x} - R_{\sigma_x} - m\ddot{x} = 0; \quad (2.17)$$

$$\sum Y = 0 \quad -Q_2 + P \sin \omega t + R_{\sigma_y} + R_{\tau_y} - m\ddot{y} = 0; \quad (2.18)$$

$$\sum M = 0 \quad R_{\sigma_y} \Delta + R_{\tau_y} \Delta - R_{\sigma_x} r + R_{\tau_x} r - M - I\ddot{\phi} = 0, \quad (2.19)$$

где M – момент, приложенный к вальцу; R_p – реакция рамы. Принимаем также, что $\ddot{\phi} = 0$. Преобразуем уравнения:

$$-R_p - P \cos \omega t - m\ddot{x} = R_{\sigma_x} - R_{\tau_x}; \quad (2.20)$$

$$Q_2 - P \sin \omega t + m\ddot{y} = R_{\sigma_y} + R_{\tau_y}; \quad (2.21)$$

$$\Delta(R_{\sigma_y} + R_{\tau_y}) - r(R_{\sigma_x} - R_{\tau_x}) = M. \quad (2.22)$$

Произведя подстановку, получаем

$$\Delta(m\ddot{y} + Q_2 - P \sin \omega t) + r(P \cos \omega t + m\ddot{x} + R_p) = M. \quad (2.23)$$

Разделим уравнение на величину r :

$$M / r = \Delta(m\ddot{y} + Q_2 - P \sin \omega t) / r + P \cos \omega t + m\ddot{x} + R_p. \quad (2.24)$$

Полученное значение M/r представляет величину окружной силы ведущего колеса S_0 , а отношение Δ/r – есть величина коэффициента сопротивления качению f .

Тогда выражение 2.24 можно представить в виде

$$S_0 = f(Q_2 - P \sin \omega t + m\ddot{y}) + P \cos \omega t + m\ddot{x} + R_p. \quad (2.25)$$

Следовательно, под действием окружной силы ведущего колеса преодолевается сопротивление качению (передвижению) и создается сила тяги, которая позволяет перемещаться машине.

При ведущем вибрационном вальце на ходовые качества машины оказывает влияние величина коэффициента сцепления, которая представляет собой отношение максимальной окружной силы (S), при которой еще не наблюдается проскальзывание вальца, к вертикальной реакции грунта (R_B):

$$\varphi = S / R_B. \quad (2.26)$$

Исходя из уравнения (2.21) вертикальная реакция грунта будет равна

$$R_B = Q_2 - P \sin \omega t + m\ddot{y}. \quad (2.27)$$

Условие тягового баланса катка имеет вид

$$S_{oc} \geq S_0 \geq W. \quad (2.28)$$

где S_{oc} – окружная сила по условию сцепления; S_0 – сила тяги; W – величина сопротивлений, возникающих при движении катка.

Принимая $S_{oc} = S_0$, с учетом уравнения 2.26 получим выражение для определения коэффициента сцепления в зависимости от параметров вибрационного катка:

$$\varphi = f_2 + (P \cos \omega t + R_p + m\ddot{x}) / (Q_2 - P \sin \omega t + m\ddot{y}). \quad (2.29)$$

Принимая, что величина сопротивления при движении ведомого вальца катка равна $Q_1 f_1$, и проведя преобразования, в конечном виде получим:

$$\varphi = f_2 + (f_1 Q_1 / Q_2 + P \cos \omega t / Q_2 - A \omega^2 \cos \omega t / g) / (1 - P / Q_2 + A \omega^2 \sin \omega t / g). \quad (2.30)$$

Из данной зависимости видно, что коэффициент сцепления для ведущего вальца вибрационного катка равен коэффициенту сопротивления движению вальца, параметрам вибрации, коэффициенту сопротивления ведомого вальца с учетом отношения масс рамы, входящих на ведущий и ведомый вальцы катка. Данное уравнение позволяет определить величину коэффициента сцепления для катка статического действия при условии отсутствия вынуждающей силы, которая имеет вид:

$$\varphi > f_1 Q_1 / Q_2 + f_2. \quad (2.31)$$

Анализ существующих методик определения значений коэффициента сцепления колеса (вальца) показал, что при определении численного значения φ принимают отношение максимальной окружной силы ведущего колеса, при которой не происходит проскальзывания вальца относительно поверхности, к реакции поверхности материала на колесо. Установлено, что φ зависит от состояния поверхности материала, на которой перемещается машина, и

параметров колеса. Применяемые в практических расчетах значения φ при проведении тяговых расчетов машин определены для статических условий, т.е. без учета динамики работы машины и практически определяют коэффициент трения покоя, который и назвали коэффициентом сцепления колеса с опорной поверхностью, численное значение которого всегда больше коэффициента сопротивления движению [18]. Обозначим составляющую выражения (2.30) через f^* , т.е.

$$f^* = (f_1 Q_1 / Q_2 + P \cos \omega t / Q_2 - A \omega^2 \cos \omega t / g) / (1 - P / Q_2 + A \omega^2 \sin \omega t / g). \quad (2.32)$$

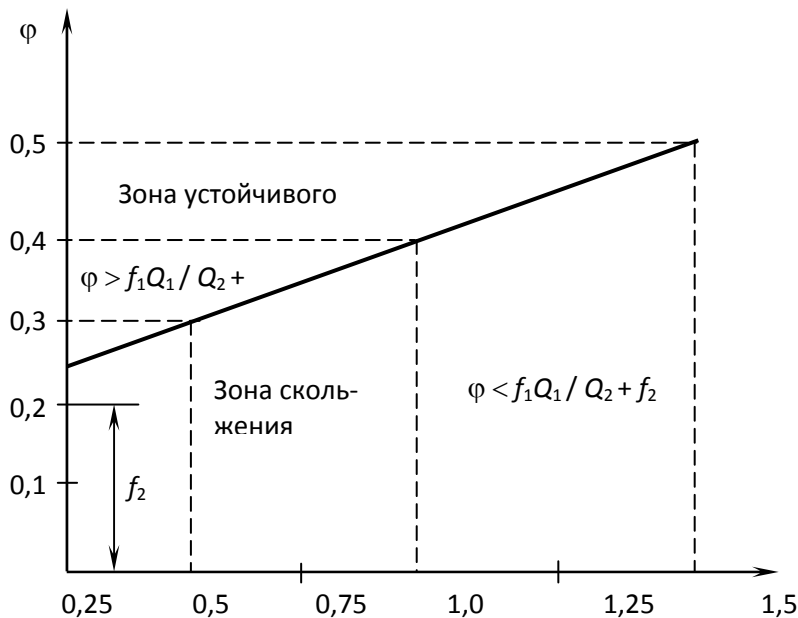


Рис. 2.14. Влияние распределения силы тяжести машины на величину коэффициента сцепления вальца при статистическом режиме работы

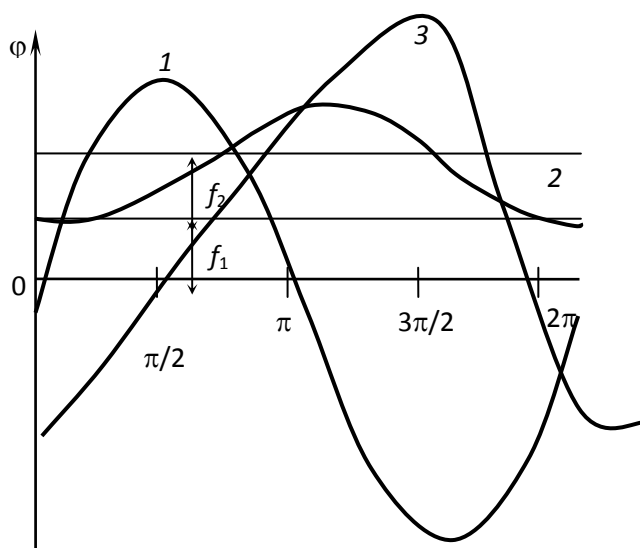


Рис. 2.15. Зависимость коэффициента сцепления ведущего вальца катка от параметров вибрации:

1 – возмущающая сила; 2 – при $P/Q = 1$; 3 – при $P/Q = 3$

Тогда скольжение вибрационного вальца будет происходить при условии, когда $\varphi < f_1 + f^*$. Для того, чтобы валец дорожного катка перекатывался по поверхности уплотняемого материала, необходимо соблюдение условия:

$$\varphi > f_1 + f^* \quad (2.33)$$

Влияние распределения силы тяжести машины между ведомым и ведущим вальцами в статическом режиме работы катка на величину коэффициента сцепления представлено на рис. 2.14. Влияние относительной вынуждающей силы на коэффициент сцепления вибрационного вальца представлено на рис. 2.15. На основании представленных

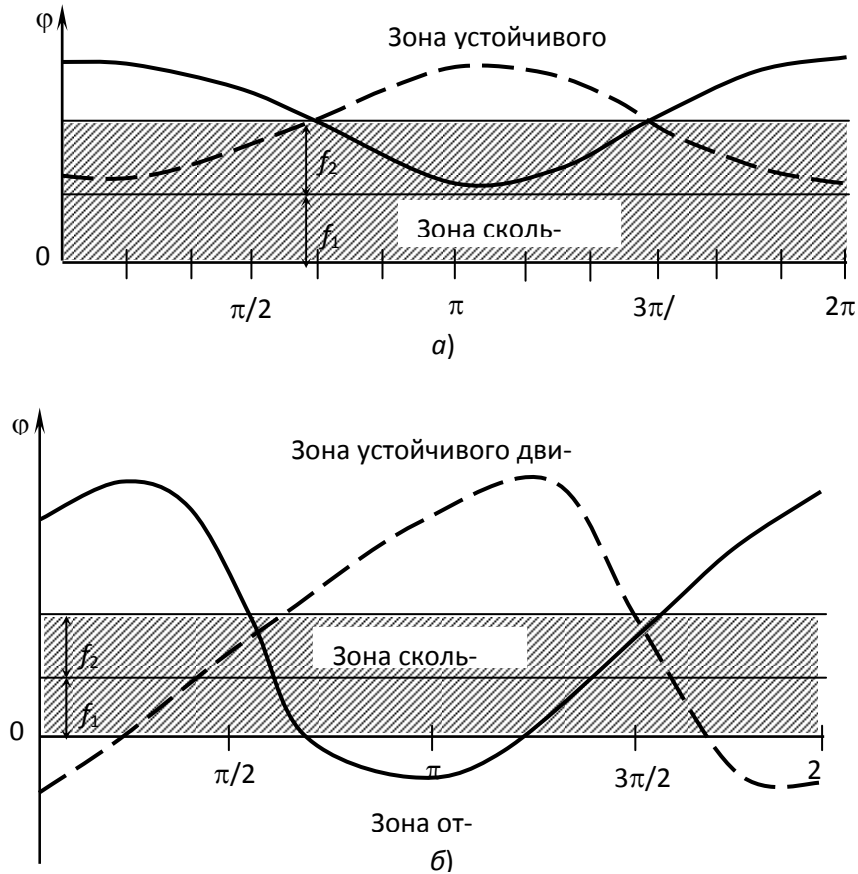


Рис. 2.16. Зависимость коэффициента сцепления вальца катка со сдвоенной вибрацией от параметров машины:

$$a - P/Q = 1, \omega = 50 \text{ Гц}; \quad б - P/Q = 3, \omega = 50 \text{ Гц}$$

результатов можно сделать вывод, что значение коэффициента сцепления для вибрационных катков зависит как от статических параметров машины и свойств материала, так и параметров вибрации. Таким образом, условие (2.43) характеризует движение машины с учетом ее тягово-сцепных качеств.

Результаты расчетов величины коэффициента сцепления для вибрационного катка со сдвоенной вибрацией при разных параметрах вибрации представлены на рис. 2.16.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что при работе катков со сдвоенной вибрацией за счет контакта одного из вальцов с уплотняемым материалом тягово-сцепные качества выше, чем у катка с одним вибрационным вальцом. Следовательно, при устройстве дорожных одежд на участках с уклонами следует отдавать предпочтение каткам с обоими вибрационными вальцами. Полученные теоретические результаты подтверждаются экспериментальными исследованиями других авторов [2, 62].

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СВОЙСТВА
ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ****3.1. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧЕГО АС-
ФАЛЬТОБЕТОНА**

Одним из факторов, влияющих на достижение требуемых эксплуатационных параметров асфальтобетонного покрытия, является температура смеси при укладке и уплотнении горячей смеси. Изменение прочностных параметров горячего асфальтобетона, связанное с температурой, происходит на всех этапах устройства покрытия. Влияние температуры смеси в начале уплотнения на достигаемый коэффициент уплотнения асфальтобетона представлено на рис. 3.1 [16].

На практике существует мнение, что можно обеспечить требуемое качество асфальтобетонного покрытия и при пониженных температурах смеси начала уплотнения. Реализация такого подхода к процессу уплотнения горячих асфальтобетонных смесей приводит к снижению эффективности работы механизированного звена машин и низким показателям дорожного покрытия. В.Б. Пермяковым экспериментально установлено, что при разных температурах начала уплотнения горячей асфальтобетонной смеси и заданном коэффициенте уплотнения (0,995...0,996) прочность на сжатие асфальтобетона уменьшается. Наибольшее снижение предела прочности на сжатие наблюдается для смесей типа А (31,1 %) [56].

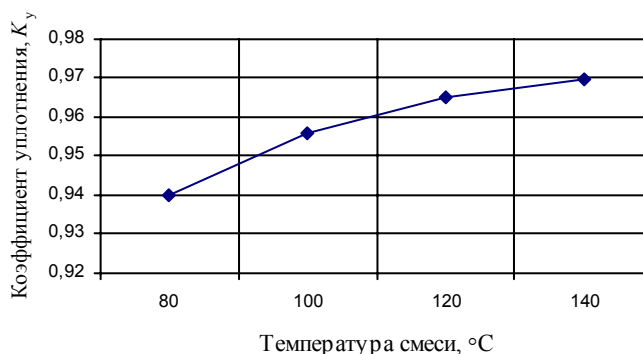


Рис. 3.1. Зависимость коэффициента уплотнения асфальтобетона от начальной температуры уплотнения смеси

Экспериментально установлено, что предел прочности горячего асфальтобетона и его деформативная способность при одном и том же составе смеси зависят от ее температуры [19, 56, 63]. Снижение температуры горячего асфальтобетона от 150 до 50 $^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению предела прочности в 2,0 – 2,5 раза при одновременном повышении деформативной способности материала в 4 раза. Наибольший эффект уплотнения достигается при высокой температуре асфальтобетонной смеси, когда битум, а следовательно и смесь, имеют наименьшую вязкость. Распределение и предварительное уплотнение горячей смеси укладчиком осуществляются при температуре, с которой она доставляется к месту производства работ. Согласно нормативным документам температура смеси при отгрузке потребителю и при ее распределении укладчиком регламентированы [77, 73]. Качество укладываемой смеси в покрытия зависит от технической характеристики асфальтоукладчика и его технологических режимов работы. Установлено, что укладка горячей смеси при высоком содержании

щебня с малыми скоростями и при работе трамбуемого бруса и вибрационной плиты позволяет достичь коэффициента уплотнения асфальтобетона порядка 0,96...0,99 [27].

Следовательно, требуемые параметры асфальтобетонного покрытия могут быть обеспечены только при соответствии параметров применяемых машин прочностным и деформативным показателям материала, величина которых меняется в процессе выполнения технологического процесса. Зависимость предела прочности на сжатие горячего асфальтобетона от температуры, по данным ряда авторов, представлено на рис. 3.2 [48, 55]. Из представленных на рисунке данных видно, что численные значения предела прочности горячего асфальтобетона зависят от типа смеси и температуры на протяжении всего процесса уплотнения. В то же время зависимость между пределом прочности и температурой носит нелинейный характер. Если на начальной стадии укатки численные значения пределов прочности в зависимости от типа смеси отличаются незначительно, то в конце уплотнения различие в значениях уже существенно. Установлено, что предел прочности на сжатие асфальтобетона зависит не только от процентного содержания битума и щебня, но и марки битума [48].

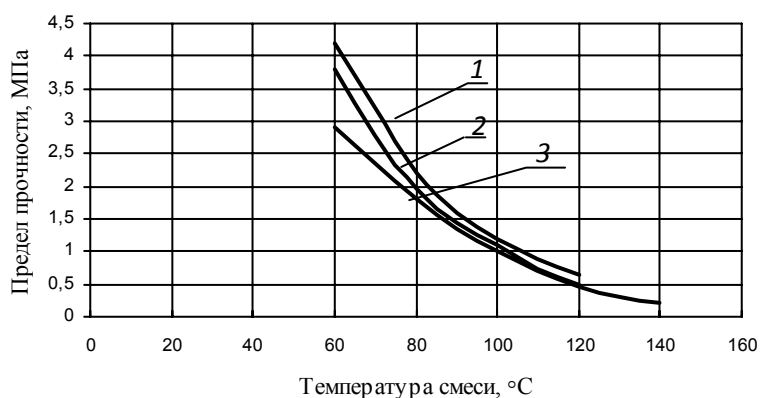


Рис. 3.2. Влияние температуры на предел прочности при сжатии горячего асфальтобетона:

1 – смеси типа А (56 % щебня);
2 – смеси типа В (25 % щебня) по данным [55]; 3 – по данным [48]

В зависимости от принятой конструкции дорожного покрытия укладка и уплотнение горячей асфальтобетонной смеси осуществляются слоями разной толщины, что влияет на предел прочности материала.

Установлено, что предел прочности горячего асфальтобетона увеличивается с уменьшением толщины уплотняемого слоя. Максимальная толщина слоя, при которой основание влияет на прочностные характеристики асфальтобетона, равна двум диаметрам штампа. С увеличением плотности материала наблюдается рост предела прочности материала [63].

Характеристикой, влияющей на процесс уплотнения покрытий, является деформативная способность, под которой понимается способность материала сопротивляться внешней нагрузке, величина которой оценивается модулем деформации. Модуль деформации асфальтобетона зависит от свойств горячего асфальтобетона и технологических параметров устройства покрытия, к которым относятся состав смеси, плотность и температура, толщина слоя и коэффициент предварительного уплотнения смеси асфальтоукладчиком.

Исследованиями Т.Н. Сергеевой установлено влияние температуры, плотности и состава смеси на модуль деформации асфальтобетона, результаты которых представлены на рис. 3.3 [63]. Из данных видно, что модуль деформации смеси зависит от температуры. Наибольшее влияние температуры на модуль деформации проявляется в диапазоне температур от 80 до 50 °C, что объясняется увеличением вязкости битума с понижением температуры и способностью смеси к восприятию большей нагрузки. Зависимость носит нелинейный характер. При температуре свыше 80 °C влияние проявляется в меньшей степени и зависимость носит линейный характер.

На практике существует мнение, что при понижении температуры начала уплотнения горячей смеси, способствующей увеличению ее деформативной способности за счет повышения вязкости битума, начинать укатку покрытия можно катками среднего или тяжелого типа. С целью установления характера влияния температуры на деформативную способность смеси в производственных условиях были проведены измерения температуры и модуля деформации при свободном охлаждении слоя песчаного асфальтобетона. Укладка смеси производилась асфальтоукладчиком ДС-126А на нижний слой асфальтобетонного покрытия. Толщина уложенного слоя составляла 0,06 м. Измерение модуля деформации осуществлялось после предварительной укатки катком массой 1,5 т (ДУ-10А, без вибрации).

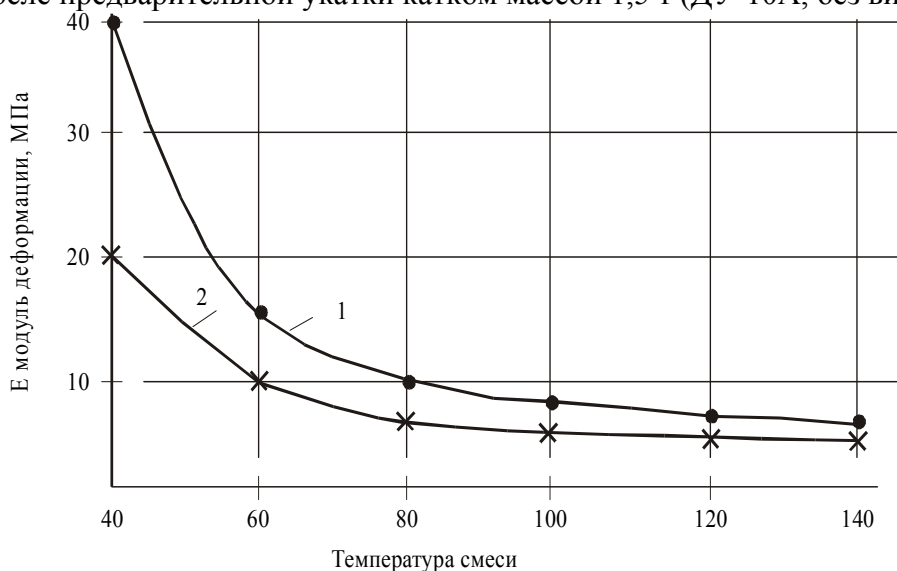


Рис. 3.3. Зависимость модуля деформации асфальтобетонной смеси от ее температуры:

1 – относительная плотность 0,90; 2 – 0,85

Установлено, что при свободном охлаждении слоя горячего асфальтобетона и изменении его температуры в интервале 85...120 °С интенсивного роста модуля деформации смеси не происходит. Для смесей типа В, Г и Д из-за малой деформативной способности на начальном этапе уплотнения требуется применение легких катков. Выявлено, что в данном интервале температур при свободном остывании асфальтобетонного покрытия между модулем деформации и температурой смеси существует линейная зависимость. Объясняется это тем, что с понижением температуры смеси увеличивается вязкость битумных пленок, обволакивающих минеральный материал, что способствует повышению деформативной способности материала. Величина модуля деформации смеси зависит также от плотности материала, причем более существенно это влияние проявляется в интервале относительной плотности материала (0,9...1,0) δ / δ_{\max} . При уплотнении дорожного покрытия модуль деформации асфальтобетона изменяется под действием силового давления вальца и температуры смеси. Поэтому при уплотнении горячей смеси модуль деформации зависит от действия обоих факторов. Данные по изменению модуля деформации слоя песчаного асфальтобетона при уплотнении катком ДУ-10А представлены на рис. 3.4 и в табл. 3.1.

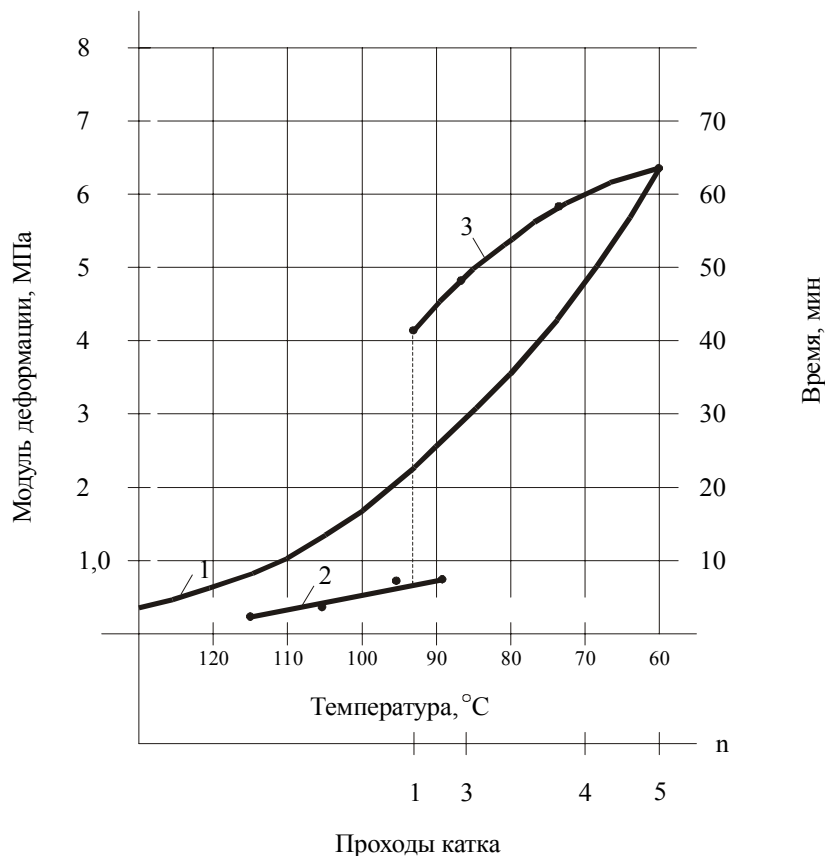


Рис. 3.4. Изменение модуля деформации в процессе укладки и уплотнения песчаной асфальтобетонной смеси

(толщина слоя 0,05 м; температура воздуха 26 °С):

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

Из представленных данных видно, что при свободном охлаждении горячей смеси в диапазоне температур 115...90 °С за счет интенсивного понижения температуры смеси и повышения вязкости битума имеет место линейная зависимость между модулем деформации и температурой. С началом процесса укатки за счет силового воздействия вальца наблюдается резкий рост модуля деформации.

Следует заметить, что прирост модуля деформации асфальтобетона после первого прохода катка не соизмерим с его ростом при свободном охлаждении смеси. Модуль деформации асфальтобетона возрастает в недостаточной степени, чтобы отказаться от применения катков легкого типа. При достижении определенного количества проходов рост модуля деформации прекращается. Для обеспечения более высокого модуля деформации горячего асфальтобетона необходимо применение других типов катков. Результаты исследований по уплотнению смеси катками разных типов представлены на рис. 3.5.

3.1. Изменение модуля деформации песчаной смеси при уплотнении

Время, мин	5	10	15	25	28	32	35	75
Температура поверхности, °С	116	106	96	89	92	86	70	60
Проходы катка	–				1	3	4	6

Модуль деформации, МПа	0,26	0,41	0,53	0,65	4,1	4,84	5,8	6,3
------------------------	------	------	------	------	-----	------	-----	-----

ном охлаждении смеси. При дальнейших проходах катка приращение модуля деформации уменьшается. На основании этого можно сделать вывод, что с понижением температуры

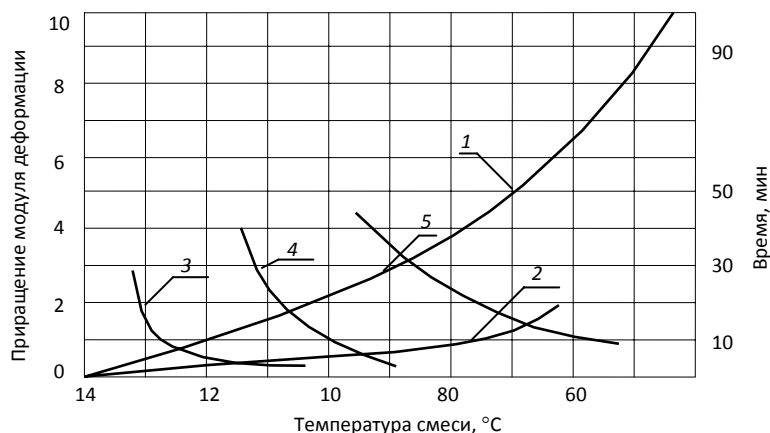


Рис. 3.5. Приращение модуля деформации в процессе укладки и уплотнения песчаной асфальтобетонной смеси (температура воздуха 26 °С):

- 1 – изменение температуры поверхности слоя во времени;
- 2 – зависимость приращения модуля деформации от температуры при свободном охлаждении смеси; 3, 4 и 5 – изменения приращения модуля деформации смеси в процессе уплотнения катками ДУ-10А, ДУ47Б (без вибрации) и ДУ-11А

Из представленных на рисунке данных видно, что с началом процесса уплотнения происходит интенсивное приращение модуля деформации. При последующих проходах интенсивность приращения модуля деформации снижается и при достижении определенного количества проходов катка прироста модуля деформации не наблюдается. При совершении проходов катка с интервалами во времени, в течение которого температура смеси снижается и силы сцепления между частицами увеличиваются, наступает момент, когда приращение модуля деформации за счет снижения температуры превышает приращение модуля деформации за счет деформации материала от вальца катка. Температуру, при которой пересекаются кривые изменения приращения модулей деформации от снижения температуры смеси и укатки, можно считать окончанием укатки данным типом катка и началом работы более тяжелого катка [7].

Следует отметить, что качество уплотнения зависит от деформативной способности слоя на момент начала уплотнения, которая зависит от свойств смеси после укладки асфальтоукладчиком. Из-за низкой деформативной способности смеси при укладке асфальтоукладчиком на первых проходах среднего или тяжелого катка, несмотря на допустимую температуру начала процесса уплотнения, появляются пластические деформации, приводящие к появлению неровностей на поверхности покрытия.

Из представленных данных видно, что с ростом температуры укладываемой смеси за счет уменьшения вязкости битума подвижность смеси увеличивается, что позволяет асфальтоукладчику обеспечить более высокую деформативную способность укладываемого слоя смеси. Особенно важно учитывать температуру смеси при укладке материала с высоким содержанием щебня, поскольку при укладке образуется каркасная структура и возрастает внутреннее трение между частицами материала. Это приводит к снижению уплотняемости смеси, следовательно, и более низкой деформативной способности. Аналогичные выводы были получены А.Г. Масловым при исследовании работы асфальтоукладчиков [49]. На основании исследований им сделаны выводы, что температура укладки асфальтоукладчиком должна быть в пределах 130...150 °С, что подтверждается проведенными исследованиями. В

то же время, как видно из данных табл. 3.1, модуль деформации уложенной смеси после асфальтоукладчика обладает недостаточной способностью воспринимать нагрузку, следствием чего является невозможность начинать процесс уплотнения при высоких температурах смеси. В свою очередь это приводит к задержкам начала процесса уплотнения и уменьшению продолжительности его выполнения.

Ранее отмечалось, что качество покрытий зависит от температуры начала уплотнения смеси. Температура начала уплотнения зависит не только от типа смеси и марки битума, но конструкции асфальтоукладчика. Известно, что укладка горячей смеси асфальтоукладчиком при неработающем трамбуемом брусом или с помощью автогрейдера обеспечивает коэффициент уплотнения асфальтобетона 0,75...0,80. Использование асфальтоукладчиков с малоэффективным трамбуемым брусом и выглаживающей плитой статического действия обеспечивает получение коэффициента предварительного уплотнения асфальтобетона 0,84...0,87. При таких коэффициентах предварительного уплотнения способность смеси воспринимать уплотняющую нагрузку незначительная, что требует применения на начальном этапе уплотнения покрытия катков легкого типа. Применение асфальтоукладчика с работающим трамбуемым брусом и вибрационной выглаживающей плитой обеспечивает получение коэффициента предварительного уплотнения покрытия 0,9...0,94 [48]. Экспериментально установлено, что значение модуля деформации горячего асфальтобетона в зависимости от параметров применяемого асфальтоукладчика с пассивным или активным уплотняющим органом отличается в два-три раза. Анализ зависимостей предела прочности и модуля деформации асфальтобетона от температуры показал, что модуль деформации возрастает более интенсивно со снижением температуры, чем предел прочности. Это обстоятельство говорит о том, что при уплотнении асфальтобетонного покрытия увеличение плотности смеси за счет повышения давления на контакте рабочего органа катка приведет к появлению пластических деформаций и, следовательно, к снижению качества покрытия. Поэтому для обеспечения требуемых показателей при устройстве дорожного покрытия необходим контроль за соответствием параметров звена машин деформационно-прочностным характеристикам горячего асфальтобетона в процессе укладки и уплотнения горячего асфальтобетона.

3.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЦЕССЫ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Применение в качестве вяжущего материала нефтяных битумов для приготовления горячих асфальтобетонных смесей, свойства которых зависят от температуры, предъявляет повышенные требования к соблюдению температурных режимов приготовления и устройства дорожных покрытий. Асфальтобетонная смесь состоит из подобранного состава компонентов, свойства которых влияют на физико-механические характеристики асфальтобетона, а также и на тепловые процессы, происходящие в слое горячей смеси, уложенной в дорожное покрытие. Характер протекания тепловых процессов влияет на темп охлаждения покрытия, от которого зависит продолжительность нахождения смеси в заданном температурном интервале. Скорость охлаждения слоя горячей смеси зависит от теплофизических характеристик применяемого материала, погодных условий производства работ и конструктивных параметров дорожного покрытия дороги. С учетом свойств применяемых смесей и условий производства работ производится выбор технологии для устройства дорожного покрытия нежесткого типа.

Достижение требуемых эксплуатационных параметров дорожного покрытия зависит от многих факторов, каждый из которых оказывает влияние на технологию производства работ, выбор параметров и режимов работы звена машин. Экспериментально установлено, что достигаемая при уплотнении плотность асфальтобетона, независимо от типа смеси, зависит от начальной температуры процесса уплотнения смеси [16]. Температура начала уплотнения влияет также и на другие показатели асфальтобетонного покрытия, характеризующие качество покрытия дороги (коэффициент уплотнения, плотность, водонасыщение) [19]. На рисунке 3.6

представлена зависимость коэффициента уплотнения асфальтобетона при работе катков статического и вибрационного действия от температуры начала уплотнения горячей смеси [16].

Из представленных на рисунке данных видно, что независимо от применяемого метода уплотнения обеспечить максимальный коэффициент уплотнения для конкретного типа катка можно только при определенной температуре начала уплотнения горячей смеси. В то же время на достижение заданных параметров уплотнения влияет и применяемый метод уплотнения. При динамическом режиме уплотнения максимальная величина коэффициента уплотнения может быть достигнута при более низких температурах смеси начала уплотнения, что подтверждается результатами других авторов [15, 48]. Эффективность работы механизированного звена машин при устройстве асфальтобетонного покрытия зависит от соответствия параметров машин свойствам применяемых смесей с учетом их температурных режимов. Установлено, что каждому типу катка соответствует определенный температурный интервал уплотняемой смеси [16, 26, 48, 67].

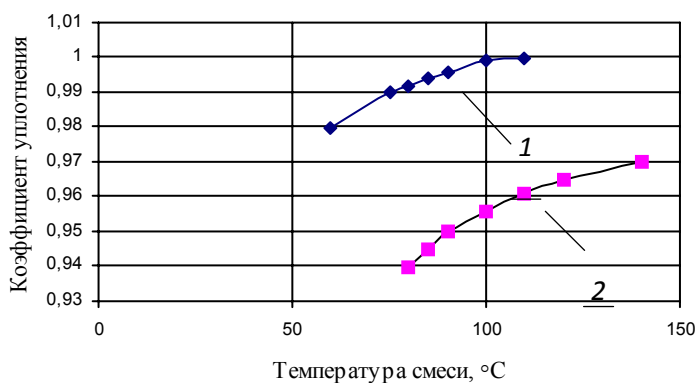


Рис. 3.6. Зависимость коэффициента уплотнения от температуры начала уплотнения асфальтобетонной смеси при одинаковой массе катков:

1 – вибрационный каток, ДУ-47Б; 2 – каток статического действия

Вязкость битума и температура начала уплотнения смеси влияют на получаемую плотность асфальтобетонного покрытия. Чем больше вязкость битума, тем в большей степени влияет температура начала уплотнения смеси на плотность асфальтобетона. Установлено, что максимальная плотность асфальтобетонных смесей может быть достигнута в определенных температурных интервалах, зависящих от марки битума [16]. Увеличение температуры смеси выше определенной максимальной величины не дает положительного эффекта, так как происходит снижение получаемой плотности. Это связано с разрушением структуры битума. При высокой температуре смеси частицы материала сжимаются под действием вальца катка, вытесняя битум в зонах контакта. При снятии нагрузки пленка вяжущего за счет раскливающего давления восстанавливает начальную толщину, уменьшая тем самым получаемую плотность смеси. Чем меньше вязкость битума, тем быстрее протекает этот процесс. С понижением температуры смеси увеличивается вязкость битума, что приводит к увеличению сопротивления при сжатию частиц материала и ухудшению уплотняемости смеси при действии постоянной нагрузки.

На основании экспериментальных исследований Н.В. Горельшевым установлено, что асфальтобетонная смесь независимо от марки битума лучшим образом уплотняется вальцами статического действия в диапазоне вязкостей битумов от 10 до 25 Па·с, что позволяет определять температурные границы эффективного уплотнения горячих смесей при использовании разных марок битума (табл. 3.2) [22]. Температура смеси при укладке и окончании уплотнения покрытия влияет на организацию и продолжительность работ по строительству покрытий. Продолжительность работ по строительству покрытий определяется темпом охлаждения смеси и зависит от разных факторов. Влияние температуры на свойства материала и

характер охлаждения смеси в зависимости от метеорологических условий устройства покрытия рассмотрены в работе А.А. Иноземцева [25].

Установлено, что охлаждение горячей асфальтобетонной смеси независимо от ее состава, температуры воздуха и скорости ветра подчиняется экспоненциальному закону, согласно которому

$$\ln (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{В}} / t_{\text{П}} - t_{\text{В}}) = m \tau, \quad (3.1)$$

3.2. Эффективные температурные границы уплотнения горячих асфальтобетонных смесей

Марка битума	Температура, при которой динамическая вязкость равна	
	10 Па·с	25 Па·с
СГ 130/200	53	42
БНД 200/300	65	55
БНД 130/200	75	62
БНД 90/130	80	69
БНД 60/90	93	81
БНД 40/60	105	94

где τ – время, ч; $t_{\text{ВЫХ}}$ – температура в начальный момент времени, °С; $t_{\text{П}}$ – температура в расчетный момент времени, °С; $t_{\text{В}}$ – температура воздуха, °С; m – скорость охлаждения, которая определяется выражением:

$$m = 2\alpha / \gamma ch, \text{ 1/ч}, \quad (3.2)$$

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

Предложенная зависимость позволяет определять температуру покрытия на заключительной стадии строительства, когда температура равномерно распределяется по толщине покрытия. При устройстве покрытия данная зависимость не учитывает неравномерности распределения температуры смеси по толщине слоя. Работами В.Н. Богословского, Г.Ф. Мучника, М.А. Михеева установлено, что скорость охлаждения (темп охлаждения) в регулярных нестационарных теплопередачах не зависит от времени и начального распределения температуры [13, 50, 51]. Величина скорости охлаждения зависит от размеров тела, его теплофизических характеристик и условий теплообмена на поверхности тела. Установлено, что скорость охлаждения плоского тела (пластины) зависит также от характеристики неравномерности распределения температуры в сечении тела и определяется по формуле:

$$\Psi = t_{\text{П}} - t_{\text{В}} / t_{\text{С}} - t_{\text{В}}, \quad (3.3)$$

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

Для определения темпа охлаждения тела предложена зависимость:

$$m = 2\alpha\Psi / \gamma ch, \text{ 1/ч}. \quad (3.4)$$

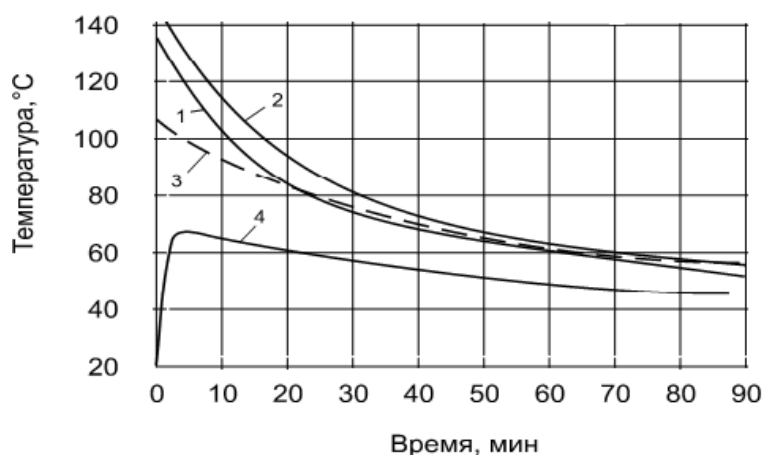
Анализ зависимостей для определения темпа охлаждения показывает, что при коэффициенте неравномерности распределении температуры по толщине слоя, равном единице, зависимости идентичны. Следовательно, в предложенной зависимости (3.4) величина Ψ равна единице, что соответствует охлаждению слоя на заключительной стадии строительства покрытия.

В работе Б.И. Ладыгина фактор нагрева основания учитывается за счет введения коэффициента влияния температуры основания [46]. При расчете длины укладки асфальтоукладчиком Н.В. Горельшев также учитывает влияние температуры основания введением коэффициента, зависящего от температуры основания. Однако существуют различия в принятии численного значения этого коэффициента. Так, по данным Б.И. Ладыгина рекомендуется принимать значение коэффициента влияния температуры основания 1,25 при температуре основания 40...45 °С. При равенстве температур основания и окружающего воздуха рекомендуемый коэффициент равен единице. Согласно рекомендациям Н.В. Горельшева коэффициент принимается равным единице при условии равенства температур основания и воздуха и температуре воздуха 25 °С. При повышении температуры воздуха свыше 25 °С коэффициент принимается 1,25 [20]. Экспериментально установлено, что значение коэффициента влияния температуры основания на продолжительность охлаждения смеси в зависимости от производственных условий отличается от рекомендуемых значений. Поэтому необходимо уточнить влияние температуры основания на процесс охлаждения слоя и получить общую закономерность влияния данного фактора на процесс охлаждения горячей смеси.

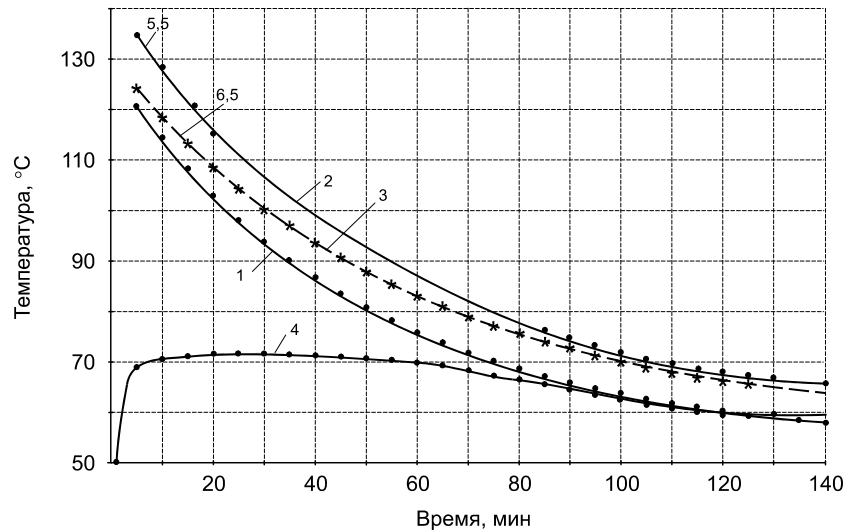
Строительство покрытий из горячих асфальтобетонных смесей представляет собой процессы укладки смеси асфальтоукладчиком и уплотнения катками. Горячая асфальтобетонная смесь доставляется к месту производства работы с заданной температурой, зависящей от марки битума и типа смеси, и распределяется по основанию дороги. За счет разницы в температурах смеси и основания, а также окружающего воздуха происходят тепловые процессы, влияющие на качество работ. Понижение температуры смеси способствует изменению теплофизических и деформационно-прочностных характеристик, что необходимо учитывать при расчете технологических параметров строительства покрытий из горячих смесей.

3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Продолжительность строительства покрытия определяется темпом охлаждения слоя смеси и зависит от факторов, к которым можно отнести толщину слоя, температуру смеси при укладке и погодные-климатические условия, теплофизические свойства и применяемое оборудование. На рисунке 3.7 представлены экспериментальные зависимости процесса охлаждения смеси во времени при разной толщине слоя покрытия.



а)



б)

Рис. 3.7. Зависимость остывания асфальтобетонного покрытия во времени:

а – 1 – на глубине 0,0015 м; 2 – 0,03 м; 3 – 0,05 м; 4 – 0,07 м (основание);

б – 1 – на глубине 0,015 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м (основание)

Из представленных данных видно, что температура смеси по толщине слоя распределяется неравномерно и при охлаждении слоя происходит передача тепла из средней части к поверхности и основанию. После укладки смеси происходит интенсивная передача тепла от уложенного слоя смеси на нижележащий слой, что способствует повышению его температуры. Анализ распределения температуры в слое покрытия дороги во времени и по толщине показывает, что процессы охлаждения смеси в дорожных покрытиях относятся к нестационарным тепловым процессам.

В зависимости от принятой конструкции дорожное покрытие может устраиваться в один или два слоя, что влияет на продолжительность работ по их устройству. Поэтому с целью исследования влияния разных факторов (конструктивных, климатических, технологических и свойств материалов) на процесс охлаждения смеси при укладке и уплотнении дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, а также влияния температуры на свойства смесей рассмотрены расчетные модели конструкций дорог, которые представлены на рис. 3.8.

Расчетные модели приняты с учетом следующих предпосылок:

- процесс строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей ограничен во времени температурным интервалом 160...50 °С;
- в начальный момент времени распределения 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;

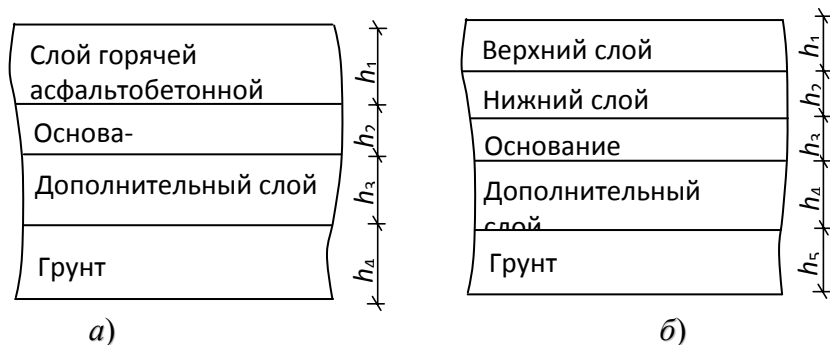


Рис. 3.8. Расчетные схемы "покрытие–основание дороги":

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

- 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 термоконтакт;
- процесс укладки осуществляется самоходными катками с жесткими металлическими вальцами с обеспечением контроля за расходом жидкости для смачивания поверхности вальца;
- температура окружающей среды и скорости воздушных масс с момента укладки слоя смеси и до окончания процесса уплотнения остаются постоянными.

Принятые расчетные модели представлены системой дифференциальных уравнений, отражающих процесс нестационарной теплопроводности в слоях с разными физико-механическими и теплофизическими свойствами, лежащих на бесконечной полуограниченной стенке из однородного материала.

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

- для однослойного покрытия:
 - для верхнего слоя

$$\partial t_1 / \partial \tau = (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2);$$

- для основания

$$\partial t_2 / \partial \tau = (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2);$$

- для дополнительного слоя основания

$$\partial t_3 / \partial \tau = (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2);$$

- для грунта

$$\partial t_4 / \partial \tau = (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2); \quad (3.5)$$

- для двухслойного покрытия:
 - для верхнего слоя

$$\partial t_1 / \partial \tau = (\lambda_1 / c_1 \gamma_1) (\partial^2 t_1 / \partial x^2 + \partial^2 t_1 / \partial y^2 + \partial^2 t_1 / \partial z^2);$$

- для нижнего слоя

$$\partial t_2 / \partial \tau = (\lambda_2 / c_2 \gamma_2) (\partial^2 t_2 / \partial x^2 + \partial^2 t_2 / \partial y^2 + \partial^2 t_2 / \partial z^2);$$

- для основания

$$\partial t_3 / \partial \tau = (\lambda_3 / c_3 \gamma_3) (\partial^2 t_3 / \partial x^2 + \partial^2 t_3 / \partial y^2 + \partial^2 t_3 / \partial z^2);$$

- для дополнительного слоя основания

$$\partial t_4 / \partial \tau = (\lambda_4 / c_4 \gamma_4) (\partial^2 t_4 / \partial x^2 + \partial^2 t_4 / \partial y^2 + \partial^2 t_4 / \partial z^2);$$

- для грунта

$$\partial t_5 / \partial \tau = (\lambda_5 / c_5 \gamma_5) (\partial^2 t_5 / \partial x^2 + \partial^2 t_5 / \partial y^2 + \partial^2 t_5 / \partial z^2), \quad (3.6)$$

где x, y, z – координатные оси.

С учетом допущений и данных экспериментальных исследований принимаем, что температура укладываемого слоя смеси и ее распределение в нижерасположенных слоях имеют одинаковое значение в двух плоскостях ($x; z$) и меняются 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. Учитывая вышесказанное, запишем систему уравнений в общем виде:

$$\partial t_i / \partial \tau = (\lambda_i / c_i \gamma_i) (\partial^2 t_i / \partial y_i^2), \quad \tau > 0, \quad 0 < y_i < h_i, \quad i = 1, \dots, 5. \quad (3.7)$$

Начальные условия имеют вид

– для однослойного покрытия:

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

– для двухслойного покрытия:

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

$$t_4'|_{\tau=0}^{y=h_4} = t_4|_{\tau=0}^{y=h_4=0}; \quad t_5'|_{\tau=0}^{y=h_5} = t_5 + \Delta t_5 e^{-\mu_5 y};$$

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; $\Delta t_i e^{-\mu_i y}$ – 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

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

– условие равенства тепловых потоков на границах слоев имеет вид:

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

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

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

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

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

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

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

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

Коэффициент теплоотдачи за счет конвективного обмена с окружающей средой зависит от скорости ветра и его расчетное значение может быть определено на основе эмпирической зависимости [46]

$$\alpha = 4,23 V^{1,6} + 3,25 \exp(-1,28V), \quad (3.7)$$

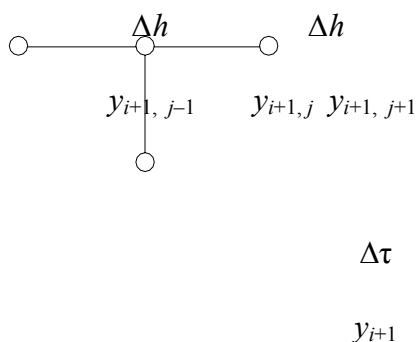
где V – скорость ветра, м/с.

Экспериментальными исследованиями А.А. Иноземцевым установлено, что численное значение суммарного коэффициента теплоотдачи асфальтобетонной смеси составляет от 15,6 до 20,4 Вт / (м²·°С). Установлено также влияние скорости перемещения воздушных масс на охлаждение слоя смеси. Увеличение скорости ветра на 1 м/с способствует повышению коэффициента теплоотдачи горячей асфальтобетонной смеси на 2,236 Вт / (м²·°С) [25]. Однако представленные А.А. Иноземцевым данные по теплофизическим характеристикам смесей получены при пониженных температурах окружающего воздуха. Для уточнения теплофизических характеристик горячих смесей при разных температурах окружающего воздуха были использованы экспериментальные данные по измерению температуры смеси в процессе ук-

ладки и уплотнения, полученные при строительстве покрытий при разных температурах окружающего воздуха.

Моделирование процесса охлаждения горячей смеси осуществлялось с помощью программы Elcut, разработанной для решения одно- и двумерных задач теплопроводности [52]. Особенностью данной программы явилась возможность с использованием экспериментальных данных моделировать тепловые процессы и получить теплофизические характеристики горячих смесей, соответствующие условиям проведения измерения температур.

Однако данная программа не полностью позволила решать поставленные задачи по моделированию тепловых процессов при строительстве покрытий, поэтому была разработана программа для расчета температуры по толщине конструктивных слоев дороги с учетом изменения ее во времени [29]. Для решения систем уравнений (3.5–3.6) был использован метод сеток и принята неявная разностная схема [24]. Шаблон разностной схемы имеет вид:



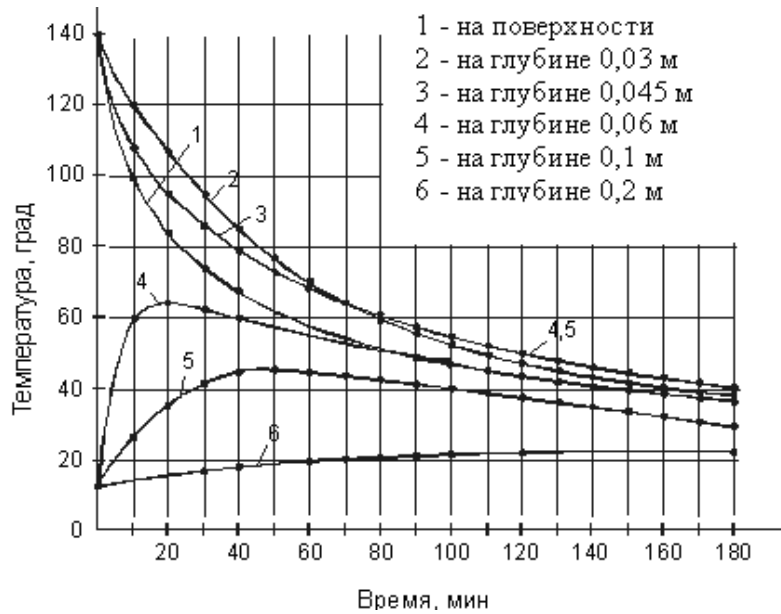
Заменяя производные разностями аналогов, получим:

$$(y_{i+1, j-1} - y_{i, j}) / \Delta \tau = \lambda / c \gamma [(y_{i+1, j+1} - 2y_{i+1, j} + y_{i+1, j-1}) / (\Delta h)^2], \quad i = 1, \dots, \bar{n} - 1;$$

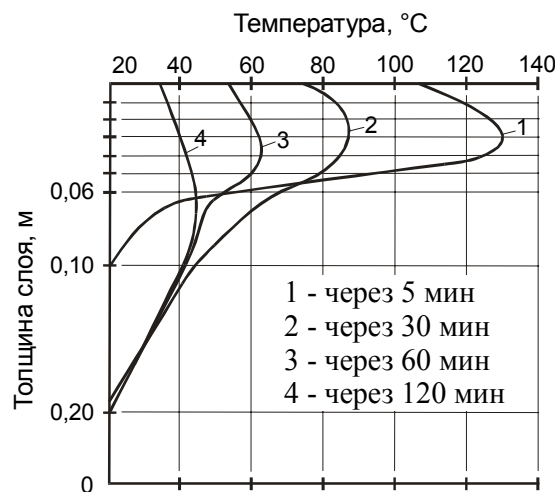
$$\lambda (y_{i+1, j+1} - y_{i, j}) / (\Delta h) = 2 (y_{i+1, 0} - t_0);$$

$$y_{i+1, n} = t \Big|_{y=h}. \quad (3.8)$$

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



а)



б)

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

При решении таких систем применяется метод прогонки. Приведем систему уравнений к виду:

$$y_{i+1,j} = c_j(\alpha_j + y_{i+1,j+1}), \quad j = 0, \dots, \bar{n} - 1. \quad (3.9)$$

Введя обозначения

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

получим выражения для вычисления коэффициентов c_j и d_j (прямой ход):

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

$$d_j = c_{j-1} d_{j-1} + Sy_{i,j}; \quad i = 1, \dots, \bar{n} - 1. \quad (3.10)$$

Из граничных условий находим температуру в нижней точке:

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

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

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

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

Результаты расчетов по изменению температуры во времени при толщине укладываемого слоя горячей асфальтобетонной смеси 0,05 м в дорожное покрытие и распределение ее по толщине слоя покрытия представлены на рис. 3.9. Установлено, что время остывания слоя асфальтобетонной смеси зависит от ряда факторов, к которым можно отнести толщину слоя смеси, температуры смеси, воздуха и основания, теплофизические свойства смесей, теплообмен на поверхности слоя, скорость ветра.

Экспериментально установлено, что разница температур поверхности уплотняемого слоя горячей асфальтобетонной смеси и средней части слоя может достигать 10...20 °С.

3.4. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Темп охлаждения слоя покрытия зависит как от конструктивных параметров покрытия, так и теплофизических характеристик асфальтобетона. Известно, что удельная теплоемкость зависит от температуры горячей смеси. Исследованиями Л.Б. Гезенцева, Н.В. Горельшева, А.М. Богуславского и И.В. Королева установлено, что удельная теплоемкость каменных материалов в два раза ниже удельной теплоемкости битума [19]. Численные значения удельной теплоемкости битума приведены в табл. 3.3 [5].

Обработка представленных данных позволяет сделать вывод, что между температурой и удельной теплоемкостью битума существует зависимость, которая имеет вид:

$$c_b = 1,1386e^{0,3553(t/100)}, \quad (3.11)$$

где c_b – удельная теплоемкость битума, кДж / (кг·°С); t – температура битума, °С.

Согласно принятой классификации асфальтобетонные смеси в зависимости от процентного содержания щебня (гравия) в их составе делятся на типы. С учетом этого удельная теплоемкость смесей будет разной. Следовательно, продолжительность охлаждения слоя смеси при равных условиях зависит от типа смеси. Численное значение удельной теплоемкости смеси можно определить по формуле [47]:

$$c_{см} = 0,01[(100 - z) c_b + z c_{ар}], \quad \text{кДж / (кг·°С)}, \quad (3.12)$$

где z – процент массы агрегатов от общей массы смеси; $c_{ар}$ – удельная теплоемкость агрегатов смеси, кДж / (кг·°С); c_b – удельная теплоемкость битума, которая зависит от температуры смеси.

Используя данную зависимость, определены численные значения удельной теплоемкости смесей при разных температурах с учетом процентного содержания агрегатов (табл. 3.4). Из представленных данных видно, что с ростом температуры независимо от типа смеси удельная теплоемкость увеличивается. В то же время удельная теплоемкость смеси уменьшается с увеличением содержания минеральных агрегатов.

Удельная теплоемкость влияет на продолжительность охлаждения смеси. В таблице 3.5 представлено расчетное время в зависимости от теплоемкости смеси при разных ее температурах.

3.3. Значение удельной теплоемкости битума от температуры

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

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

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

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

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

Для установления общей закономерности принимаем условно продолжительность охлаждения смеси при удельной теплоемкости, равной 1,65 кДж/(кг·°С), за единицу. Тогда в относительных величинах данные имеют значения, представленные в табл. 3.6.

Из данных таблицы видно, что величина удельной теплоемкости смеси влияет на продолжительность охлаждения и не зависит от температуры смеси при укладке. В интервале

температур 160...80 °С эта закономерность носит общий характер и может быть определена по формуле:

3.6. 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

$$K_{см} = 0,758c_{см} - 0,263, \quad (3.13)$$

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

Перераспределение тепла внутри слоя зависит от коэффициента теплопроводности (λ), на значение которого влияют температура смеси и плотность материала.

Обработка экспериментальных данных, представленных в работе [5], позволила установить выражение для определения коэффициента теплопроводности горячей асфальтобетонной смеси в зависимости от плотности, которое при температуре смеси 120 °С имеет вид:

$$\lambda = 0,649\gamma - 0,229, \text{ Вт / (м·°С)}, \quad (3.14)$$

где γ – плотность смеси, т/м³.

Экспериментально доказано, что коэффициент теплопроводности зависит от температуры смеси. В таблице 3.7 представлены значения, характеризующие влияние температуры смеси на коэффициент теплопроводности при разной плотности материала. Данные таблицы представлены в относительных величинах, при этом коэффициент теплопроводности при температуре смеси 120 °С принят за единицу.

Анализ полученных значений показал, что независимо от плотности материала между коэффициентом теплопроводности и температурой смеси имеется зависимость, которая может быть определена из выражения

$$K_T = 0,895e^{0,0898(t/100)}, \quad (3.15)$$

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

3.7. Влияние температуры смеси на коэффициент теплопроводности (в относительных значениях)

Плотность, т/м ³ Температура, °С	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	Σn/n
	20	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,92
120	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
170	1,04	1,05	1,04	1,04	1,04	1,05	1,04

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

$$\lambda = K_T (0,649\gamma - 0,229), \text{ Вт / (м}\cdot\text{°С)}. \quad (3.16)$$

Следовательно, задаваясь типом и температурными режимами смеси с учетом марки битума можно определить теплофизические характеристики смесей, влияющие на технологические процессы укладки и уплотнения горячих смесей.

3.5. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОВ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЧ К СТРОИТЕЛЬСТВУ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Распределение температуры смеси по толщине слоя покрытия и характер изменения ее во времени показал, что тепловые процессы при устройстве асфальтобетонного покрытия, с точки зрения тепловых процессов, можно разделить на два периода.

– На *первом этапе* тепловой режим подчиняется сложным закономерностям. За счет разницы температуры нижележащего слоя основания и слоя укладываемой смеси покрытия происходит передача тепла, что способствует повышению температуры нижележащего слоя до определенной температуры. Часть тепла через поверхность уложенного слоя передается в окружающую среду. Это приводит к интенсивному снижению температуры в граничных слоях уложенного покрытия, вследствие чего происходит неравномерное распределение температуры по толщине слоя дорожного покрытия. Потери тепла на границе покрытия восполняются за счет теплового потока из средней части слоя. Установлено, что в зависимости от климатических условий строительства, принятой технологии и температуры горячей смеси при укладке нижележащий слой за счет передачи тепла от уложенного слоя покрытия может прогреваться до температуры 30...70 °С. Это позволяет увеличить время на технологические процессы уплотнения покрытия, а также способствует улучшению сцепления слоев покрытия между собой, что особенно важно в случае производства работ по устройству асфальтобетонных покрытий при пониженных температурах окружающего воздуха. Согласно законам нестационарных теплопередач процесс может быть отнесен к этой группе при условии, если продолжительность этапа интенсивного прогрева нижележащего слоя, при погрешности расчета 5 %, принимается в пределах $Fo = 0,12$, где Fo – критерий Фурье [50 – 52]. Численное значение критерия подобия Фурье определяется из выражения:

$$Fo = \tau\lambda / \gamma\tilde{n} h^2, \quad (3.17)$$

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

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

при $h_{\text{сл}} = 0,05 \text{ м } \tau = 0,075 \text{ ч}; \quad h_{\text{сл}} = 0,10 \text{ м } \tau = 0,29 \text{ ч};$

$h_{\text{сл}} = 0,15 \text{ м } \tau = 0,65 \text{ ч}; \quad h_{\text{сл}} = 0,2 \text{ м } \tau = 1,15 \text{ ч}.$

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

$$H / 2 \cdot (a \tau)^{1/2} > 0,6, \quad (3.18)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, определяемый выражением

$$a = \lambda / c\gamma, \text{ м}^2/\text{ч}. \quad (3.19)$$

Результаты расчетов по уточнению критических значений продолжительности охлаждения дорожного покрытия в зависимости от толщины слоя горячей смеси представлены в табл. 3.8.

3.8. Влияние толщины слоя на продолжительность охлаждения

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

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

3.6. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Обеспечение работоспособности автомобильных дорог в значительной степени зависит от состояния дорожного покрытия, которое должно иметь требуемые деформационно-прочностные характеристики для восприятия нагрузок от транспорта с учетом погодноклиматических условий эксплуатации дороги и возможности перераспределения их на нижележащие слои дорожной одежды. При недостаточном обеспечении прочности асфальтобетона в процессе устройства такие покрытия подвержены образованию остаточных деформаций при движении транспортных средств, что способствует появлению неровностей, а также разрушению структуры асфальтобетона и образованию дефектов на поверхности покрытия. Поэтому выбор правильной технологии устройства асфальтобетонных покрытий позволяет регулировать процесс формирования макроструктуры в процессе устройства дорожного покрытия.

Отмечалось, что достичь требуемых параметров дорожного покрытия в процессе уплотнения можно при соблюдении определенного соотношения между контактными напряжениями под рабочим органом уплотняющей машины и прочностными характеристиками уплотняемого материала. Это условие имеет вид [67]:

$$\sigma_k = (0,9 \dots 1,0) [\sigma], \quad (3.20)$$

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

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.

При малых значениях контактных напряжений, по отношению к пределу прочности материала, невозможно получить требуемую плотность материала даже при большом числе проходов машины. Если контактные напряжения превышают предел прочности материала, то происходит перемещение частиц материала относительно друг друга без изменения объема. Такая деформация приводит к неравномерности уплотнения материала и получению неровной поверхности, а также к образованию микро- и макротрещин, что способствует снижению качества устройства дорожных покрытий. Поэтому для качественного уплотнения покрытий должно быть обеспечено соответствие параметров уплотняющих машин прочностным и деформативным характеристикам уплотняемого материала, численное значение которых меняется при работе уплотняющих машин. Установлено, что предел прочности горячего асфальтобетона зависит от температуры, типа смеси, степени уплотнения и толщины уплотняемого слоя. В общем виде данная зависимость имеет виде (58):

$$\sigma_{пр} = f(t_{см}^0; K_y; h/d), \quad (3.21)$$

где $t_{см}^0$ – температура смеси, °С; K_y – коэффициент уплотнения; h/d – отношение толщины слоя к дуге контакта вальца катка с материалом.

Вопрос влияния температуры на предел прочности горячего асфальтобетона рассматривался многими авторами [16, 19, 27, 48, 56, 63]. Установлено, что с увеличением содержания щебня в смеси предел прочности повышается в среднем на 14...17 % [56]. С понижением температуры увеличивается предел прочности смеси. На рисунке 3.10 показана зависимость предела прочности разных типов смеси от температуры, полученная на основании данных, представленных в работах [4, 5, 8].

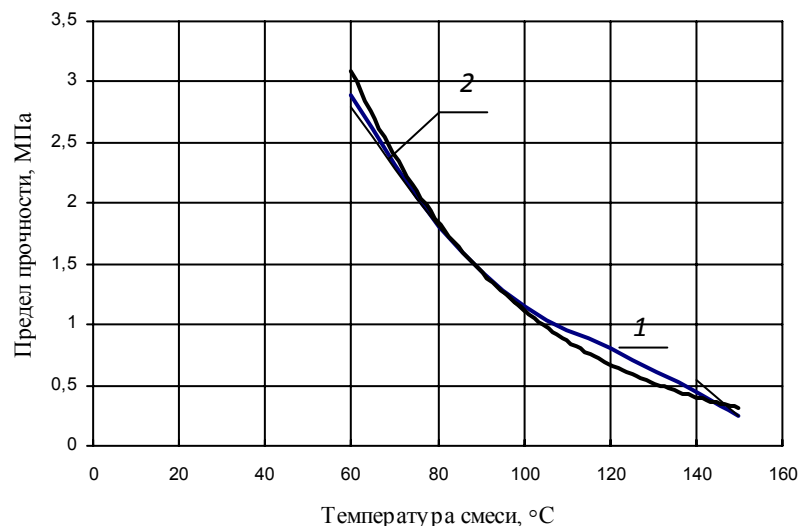


Рис. 3.10. Изменение предела прочности смеси от температуры:

1 – по данным исследований В.Б. Пермякова, В.П. Ложечко, Т.Н. Сергеевой;
2 – аппроксимированная зависимость

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

$$[\sigma] = 14,24 e^{-0,0255 t_{\text{см}}}, \quad (3.22)$$

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

Экспериментальными исследованиями Н.Я. Хархута установлено, что при уплотнении грунтов каждой величине относительного напряжения под рабочим органом катка соответствует определенная относительная плотность уплотняемого материала, которая представлена на рис. 3.11 [30].

Экспериментальными исследованиями В.Б. Пермякова и А.В. Захаренко установлено, что при уплотнении асфальтобетонных смесей между пределом прочности смеси и коэффициентом уплотнения также существует определенная связь [55]. Используя полученные ими данные и принимая предел прочности при температуре окончания процесса уплотнения за единицу, установлена связь между относительной величиной контактных напряжений и коэффициентом уплотнения, которая для смесей типа А и В представлена на рис. 3.12. Численное значение определяется из выражения:

$$\sigma_{\text{к}} / [\sigma] = 0,0028 e^{5,878 K_y}, \quad (3.23)$$

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

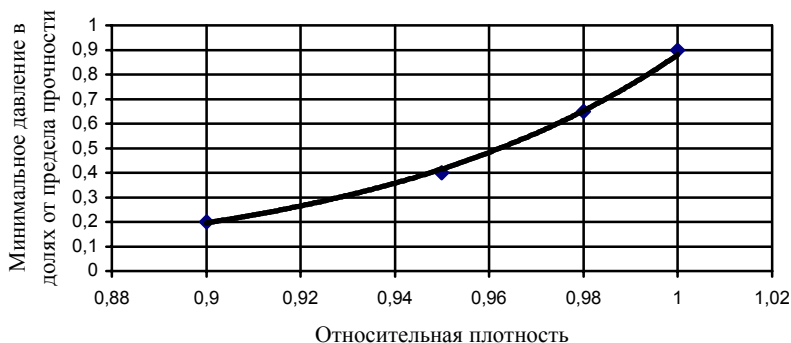


Рис. 3.11. Зависимость минимального давления под вальцом катка от относительной плотности грунта

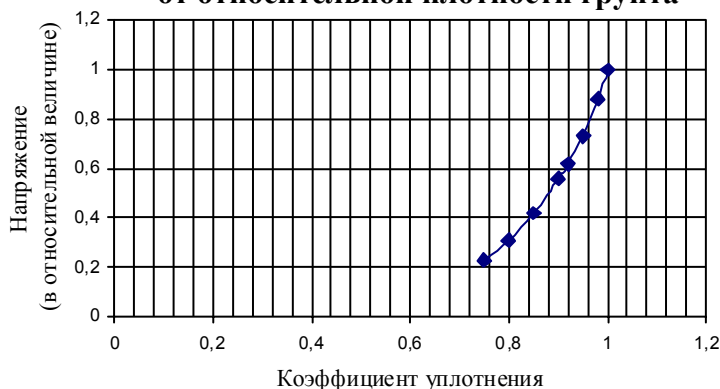


Рис. 3.12. Зависимость между относительной величиной напряжения и коэффициентом уплотнения смеси

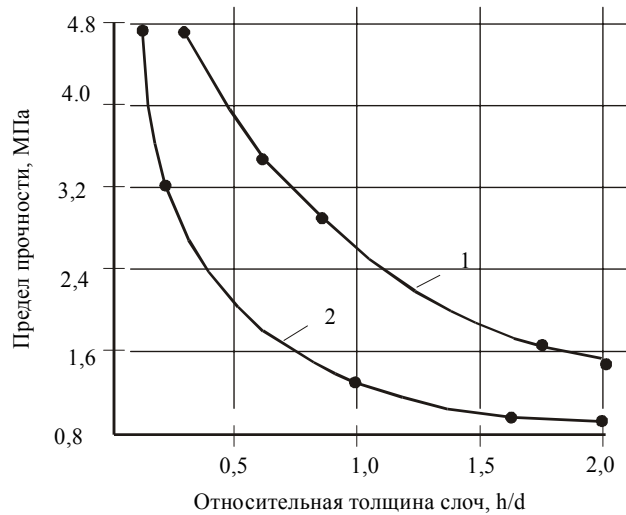


Рис. 3.13. Влияние толщины асфальтобетонного слоя при температуре 100 °С на предел прочности:

1 – при коэффициенте уплотнения 0,99; 2 – при коэффициенте уплотнения 0,95;
h – толщина слоя, м; *d* – диаметр штампа, м

Укладка и уплотнение асфальтобетонных смесей осуществляется слоями разной толщины. Исследованиями Т.Н. Сергеевой установлено, что предел прочности смесей увеличивается с уменьшением толщины слоя [63]. Максимальная толщина слоя, при которой основание оказывает влияние на прочностные характеристики слоя смеси, равно двум диаметрам штампа. С увеличением плотности материала наблюдается рост предела прочности материала (рис. 3.13).

Выразим представленные данные в относительных величинах. Принимаем за единицу предел прочности асфальтобетона при условии равенства толщины слоя длине дуги контакта вальца с материалом. Тогда в преобразованном виде зависимость имеет вид, представленный на рис. 3.14.

Из представленных данных видно, что независимо от коэффициента уплотнения между пределом прочности смеси и толщиной слоя в относительных величинах существует зависимость, которая имеет вид

$$\sigma_{п} / \sigma_{п1} = 2,09 e^{-0,697(h/d)}, \quad (3.24)$$

где $\sigma_{п}$ – предел прочности смеси, МПа; $\sigma_{п1}$ – предел прочности смеси, при относительной толщине слоя, равной единице; *h* – толщина слоя, м; *d* – диаметр штампа, соответствующий длине дуги контакта вальца с материалом, м. Коэффициент корреляции 0,99.

В общем виде предел прочности смеси с учетом влияния перечисленных факторов имеет вид:

$$\sigma_{пр} = 0,08 e^{[5,87K_y - 0,697(h/d) - 0,025t_{см}]}, \quad (3.25)$$

где K_y – коэффициент уплотнения; *e* – основание натурального логарифма.

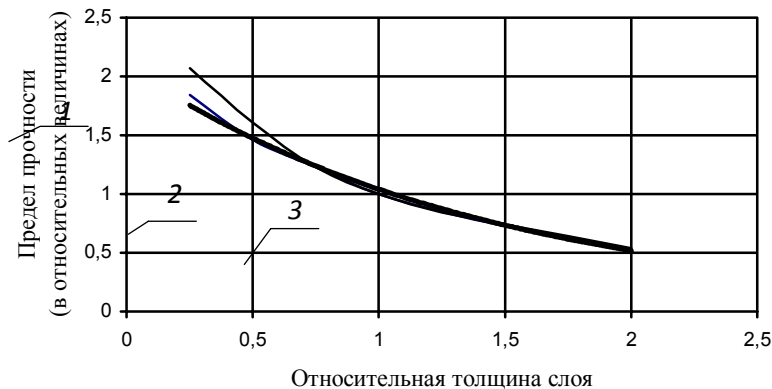


Рис. 3.14. Влияние толщины слоя смеси на предел прочности в относительных величинах:

1 – коэффициент уплотнения 0,99; 2 – коэффициент уплотнения 0,95;
3 – аппроксимированная зависимость

Следует отметить, что качество уплотнения зависит от свойств смеси после укладки ее асфальтоукладчиком. При низкой деформативной способности смеси на первых проходах среднего или тяжелого катка, несмотря на допустимую температуру начала процесса уплотнения, появляются пластические деформации, способствующие появлению неровностей на поверхности покрытия. Установлено, что с увеличением температуры смеси при укладке за счет уменьшения вязкости битума подвижность смеси увеличивается, что позволяет асфальтоукладчику обеспечить более высокую деформативную способность слоя смеси. Особенно важно учитывать температуру смеси при укладке материала с высоким содержанием щебня, поскольку при укладке образуется каркасная структура и возрастает внутреннее трение между частицами материала. Это приводит к снижению уплотняемости смеси, следовательно, и более низкой ее деформативной способности. Аналогичные результаты были получены А.Г. Масловым при исследовании работы асфальтоукладчиков [49]. Им сделан вывод, что температура укладки уплотнения асфальтоукладчиком должна быть в пределах 130...150 °С, что подтверждается проведенными исследованиями. В то же время модуль деформации уложенной смеси после асфальтоукладчика обладает недостаточной способностью к восприятию внешней нагрузки, следствием чего является невозможность начинать процесс уплотнения при высоких температурах смеси. В свою очередь это приводит к задержкам начала процесса уплотнения и уменьшения продолжительности его выполнения.

Глава 4

ВЛИЯНИЕ ТЕМПА ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ НА ТЕХНОЛОГИЮ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Для достижения требуемых показателей, характеризующих эксплуатационные показатели асфальтобетонного покрытия, необходимо время на выполнение технологических операций по укладке и уплотнению горячих смесей, в пределах которого обеспечиваются заданные параметры покрытия. Продолжительность работ по устройству таких покрытий опреде-

ляется температурными режимами укладки и окончания уплотнения дорожного покрытия. Температура смеси в момент укладки в зависимости от типа и марки битума регламентирована нормативным документом [73, 77]. В то же время температура асфальтобетона при окончании эффективного уплотнения покрытия, согласно существующим рекомендациям, ориентирована на тип смеси без учета марки вяжущего [4, 16, 26, 27, 73]. Нормативными документами предусматривается приготовление определенного типа смеси с разными марками битумов. Установлено, что горячие асфальтобетонные смеси в зависимости от марки битума имеют разные температурные границы эффективного уплотнения и понижение температуры за пределы этих границ значительно снижает эффект уплотнения. Поэтому температура окончания уплотнения смеси, как и при укладке, должна определяться не только типом смеси, но и маркой битума. Анализ существующих рекомендаций показывает, что для смесей типа В и Д с битумами марок БНД минимальная температура смеси при окончании уплотнения принимается 60 °С. Применение для этих типов смесей битума марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 с указанной температурой окончания работы уплотняющих машин приводит к нарушению температурных режимов при устройстве покрытия, что способствует снижению достигаемых эксплуатационных показателей асфальтобетонного покрытия.

Устройство покрытий нежесткого типа производится комплектом машин, обеспечивающих непрерывность технологических процессов на всех этапах строительства. Обязательным условием непрерывности строительства дорожных покрытий из горячих смесей является обеспечение одинаковых по длине захваток укладки и уплотнения смеси катками заданного типа. Для этого необходимо знать время работы асфальтоукладчика от момента укладки смеси до начала процесса уплотнения, так как от этого зависят рабочие скорости уплотняющих машин. Достижение требуемых эксплуатационных показателей асфальтобетонного покрытия обеспечивается за счет действия требуемой нагрузки на уплотняемый материал в течение определенного времени, зависящего от свойств горячей смеси. Каждый каток в механизированном звене должен совершить определенное количество проходов по одному следу с заданными рабочими скоростями в установленном температурном интервале. Поэтому для обеспечения непрерывности работы механизированного звена машин скоростные режимы асфальтоукладчика и уплотняющих машин должны быть взаимосвязаны между собой. Для этого необходимо знать допустимое время работы катков разных типов в заданных температурных интервалах. В настоящий момент имеются данные по продолжительности нахождения горячих асфальтобетонных смесей в определенных температурных интервалах, полученные по результатам экспериментальных исследований при конкретных условиях производства работ [26, 27, 47]. В таблице 4.1 представлены данные, полученные при фиксированных значениях температуры воздуха, температуры смеси при укладке в покрытие, скорости ветра и толщине укладываемого слоя [27]. Следует заметить, что представленные данные соответствуют температуре смеси при укладке в покрытие 160 °С, что отвечает температуре смеси на выходе из накопительного бункера асфальтобетонного завода при использовании битума марки БНД 40/60 [77]. Применение других марок битума характеризуется разными температурами смеси при отгрузке в транспортные средства.

Продолжительность охлаждения зависит от многих факторов, в том числе от типа смеси и ее теплофизических характеристик, температуры окружающего воздуха и основания, температуры окончания уплотнения дорожного покрытия, скорости ветра и толщины укладываемого слоя смеси и других. Следовательно, данные табл. 4.1 учитывают одновременное действие всех факторов на процесс охлаждения смеси.

4.1. Влияние температуры воздуха и толщины укладываемого слоя на процесс охлаждения горячей асфальтобетонной смеси

Толщина слоя асфальтобетона, см	Максимальное время (мин) укладки и уплотнения при скорости ветра не более 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

При выполнении работ по устройству дорожного покрытия влияющие факторы могут меняться в широких пределах, что оказывает влияние на выбор применяемой технологии и продолжительность операций по устройству покрытия. Отсутствие установленных закономерностей, раскрывающих влияние условий производства работ на продолжительность устройства дорожных покрытий, не позволяет конкретизировать длительность процессов укладки и уплотнения с учетом температурных режимов смесей и согласовывать силовые параметры звена машин между собой. Поэтому для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей при устройстве дорожных покрытий нежесткого типа и повышения эффективности применяемых машин необходимо знать закономерности влияния разных факторов на продолжительность охлаждения, что позволит определять продолжительность процессов укладки и уплотнения покрытия с учетом их действия.

4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ УСТРОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ

Продолжительность устройства дорожного покрытия с применением горячих асфальтобетонных смесей можно представить как функцию, зависящую от ряда переменных величин. К таким переменным величинам относятся: температура смеси при укладке и окончании уплотнения покрытия, толщина слоя, температура воздуха и основания, скорость ветра, теплофизические характеристики применяемого материала. При выводе общей зависимости использована методика рационального планирования экспериментов [58]. Продолжительность устройства покрытия, с учетом перечисленных факторов можно представить в виде функции:

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

где $\tau_{\text{стр}}$ – продолжительность строительства, мин; $t_{\text{см}}$ – температура смеси при укладке; $h_{\text{сл}}$ – толщина слоя; $t_{\text{в}}$ – фактор влияния температуры окружающего воздуха; $t_{\text{осн}}$ – температура основания; $V_{\text{в}}$ – скорость ветра; $M_{\text{с}}$ – фактор, учитывающий свойства смеси; $t_{\text{ор}}$ – температура окончания уплотнения.

При выводе зависимости продолжительности устройства покрытия с учетом действия перечисленных факторов необходимо установить закономерности влияния каждого из них на общую продолжительность работы. Согласно существующим нормативным документам температура смеси при отгрузке потребителю с асфальтобетонного завода зависит от марки битума и находится в пределах от 160 до 110 °С [73]. Дальность транспортировки смеси не регламентирована нормативными документами и определяется, согласно рекомендациям, ми-

нимальной температурой при ее доставке к месту производства работы. Учитывая, что качество устройства дорожного покрытия с применением горячих асфальтобетонных смесей зависит от температуры смеси в начале уплотнения покрытия, температура смеси при ее отгрузке и доставке к месту производства работ должна контролироваться постоянно.

Горячая асфальтобетонная смесь доставляется транспортными средствами к месту производства работ по строительству асфальтобетонного покрытия. Температура смеси при доставке к месту распределения зависит от погодных условий, типа смеси и марки битума и может быть разной. Численное значение доставляемой температуры смеси определяется выражением [25]:

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

где $t_{\text{вых}}$ – температура смеси при выходе из бункера, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, $^\circ\text{C}$; e – основание натурального логарифма; τ – время доставки, которое определяется в зависимости от дальности транспортировки смеси и средней скорости передвижения транспортных средств, ч; m – темп охлаждения смеси в процессе транспортировки, $1/\text{ч}$.

Моделирование тепловых процессов при устройстве дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей осуществлялось с применением программы на ЭВМ, позволяющей учесть влияние разных факторов на изменение температуры смеси во времени [29]. В таблице 4.2 представлены результаты расчета продолжительности охлаждения горячей смеси с момента укладки до окончания уплотнения при разной толщине слоя.

4.2. Продолжительность охлаждения горячей смеси в дорожном покрытии в зависимости от температуры смеси при укладке, мин

Толщина слоя, м	Температура смеси при укладке, $^\circ\text{C}$					
	160	140	120	100	80	60
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	201 –	175 236	136 193	78 148	56 71	– 45

4.3. Определение продолжительности устройства покрытия в зависимости от температуры смеси при укладке (температура воздуха 20°C , скорость ветра 0 м/с)

Толщина слоя, м	Марка битума БНД 40/60, 60/90, 90/130	Марка битума БНД 130/200, 200/300
0,03	$\tau = 0,29t_{\text{ук}} - 17,4$	$\tau = 0,35t_{\text{ук}} - 17,05$
0,05	$\tau = 0,63t_{\text{ук}} - 33,2$	$\tau = 0,80t_{\text{ук}} - 33,0$
0,08	$\tau = 1,42t_{\text{ук}} - 72,19$	$\tau = 1,89t_{\text{ук}} - 87,2$
0,10	$\tau = 1,94t_{\text{ук}} - 103$	$\tau = 2,52t_{\text{ук}} - 113,4$

Примечания. $t_{\text{ук}}$ – температура смеси при укладке, $^\circ\text{C}$. Коэффициент корреляции для уравнений составляет от 0,98...0,99. В числителе для смесей с битумом марок

БНД 40/60, 60/90, 90/130; в знаменателе – марок БНД
130/200 и 200/300.

Установлено, что продолжительность охлаждения смеси в определенном температурном интервале в зависимости от температуры смеси при распределении и толщины слоя определяется по формулам, представленным в табл. 4.3.

Из представленных данных видно, что характер зависимостей не зависит от толщины укладываемого слоя и между температурой при укладке смеси и продолжительностью ее охлаждения существует линейная зависимость. Для установления общей закономерности влияния температуры смеси при укладке на продолжительность ее охлаждения принимаем время охлаждения каждого слоя с момента укладки смеси и достижения им температуры, ниже которой уплотнение покрытия не дает эффекта, за единицу. Для смесей с маркой битумов БНД 40/60, 60/90, 90/130 приняты температура укладки 160 °С и температура окончания уплотнения 60 °С. Для смесей с битумом марок БНД 130/200 или 200/300 – соответственно 140 и 50 °С. Обозначим влияние температуры горячей смеси при укладке на продолжительность охлаждения в относительных величинах через коэффициент $K_{тс}$ (табл. 4.4).

Из таблицы 4.4 видно, что значение коэффициента влияния температуры смеси при укладке на продолжительность охлаждения не зависит от толщины укладываемого слоя смеси и с учетом марки битума определяется выражениями:

– при толщине слоя 0,03 м:

- для смесей с битумом марок БНД 40/60, 60/90, 90/130

$$K_{тс} = 0,0094t_{см} - 0,566;$$

- для смесей с битумом марок БНД 130/200, 200/300

$$K_{тс} = 0,0105t_{см} - 0,475;$$

4.4. Влияние температуры смеси при укладке на продолжительность строительства (температура воздуха 20 °С, скорость ветра 0 м/с)

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
Средняя величина	1,0	0,84 1,0	0,65 0,82	0,47 0,62	0,27 0,41	0,18

– при толщине слоев 0,05 м и более:

- для смесей с битумом марок БНД 40/60, 60/90, 90/130

$$K_{тс} = 0,0092t_{см} - 0,452;$$

- для смесей с битумом марок БНД 130/200, 200/300

$$K_{тс} = 0,0103t_{см} - 0,419, \quad (4.3)$$

где $t_{см}$ – температура смеси при укладке, °С. Коэффициент корреляции для уравнений равен 0,98...0,99.

Нормативным документом предусмотрено, что устройство дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей производится при положительной температуре окружающего воздуха. Минимальная температура окружающего воздуха при производстве работ по устройству дорожных покрытий с применением горячих смесей регламентирована [73]. В некоторых случаях техническими регламентами на производство работ допускается строительство асфальтобетонных покрытий при пониженных температурах окружающего воздуха [73, 76]. На рисунке 4.1 представлены результаты моделирования влияния температуры окружающего воздуха на продолжительность охлаждения покрытия при разной толщине слоя. Из представленных на рисунке данных видно, что с повышением температуры воздуха, независимо от толщины укладываемого слоя смеси, время охлаждения увеличивается. Характер зависимостей носит нелинейный характер, и с учетом толщины укладываемого слоя продолжительность охлаждения определяется зависимостями, представленными в табл. 4.5.

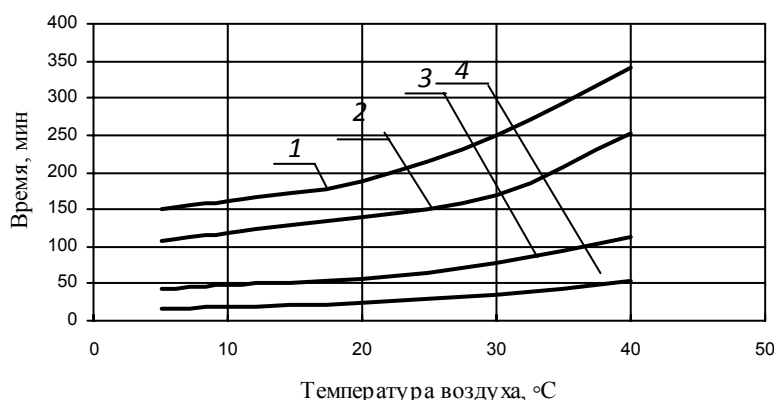


Рис. 4.1. Влияние температуры воздуха на продолжительность охлаждения слоя покрытия (температура смеси при укладке 160 °С, скорость ветра 0 м/с):

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

4.5. Влияние температуры воздуха на продолжительность охлаждения слоя покрытия

Толщина слоя, м	Битум марок БНД 40/60, 60/90, 90/130	Битум марок БНД 130/200, 200/300
	0,03	$\tau = 15,921e^{0,0345t_B}$
0,05	$\tau = 45,74e^{0,021t_B}$	$\tau = 42,585e^{0,0333t_B}$
0,08	$\tau = 103,43e^{0,0196t_B}$	$\tau = 87,895e^{0,0377t_B}$
0,10	$\tau = 134,1e^{0,022t_B}$	$\tau = 121,48e^{0,0369t_B}$

Анализ полученных уравнений показал, что они имеют одинаковый характер и отличаются между собою значениями коэффициентов. В общем виде уравнение, характеризующее продолжительность охлаждения слоя горячей смеси в зависимости от температуры окружающего воздуха, имеет вид:

$$\tau = K_h e^{\alpha t_B}, \text{ мин,} \quad (4.4)$$

где τ – продолжительность строительства, мин; e – основание натурального логарифма; α – коэффициент, зависящий от свойств материала; t_b – температура воздуха, °С; K_h – коэффициент, зависящий от толщины укладываемого слоя, безразмерная величина. Коэффициент корреляции данных уравнений составляет 0,98...0,99.

С учетом толщины слоя численное значение коэффициентов K_h и α определяется по формулам:

– с битумами марок БНД 40/60, 60/90, 90/130

$$K_h = 1756,3h - 38,71, \text{ безразмерная величина;}$$

$$\alpha = 36,41h^3 - 8,67h^2 + 0,467h - 0,02, \text{ 1/град;} \quad (4.5)$$

– с битумами марок БНД 130/200, 200/300

$$K_h = 1509h - 31,13, \text{ безразмерная величина;}$$

$$\alpha = 0,0212h^{0,1858}, \quad (4.6)$$

где h – толщина слоя, м. Коэффициенты корреляции равны: для коэффициента K_h – 0,99; для коэффициента α – 0,8.

По результатам моделирования установлено, что темп охлаждения горячей смеси интенсивно снижается при повышении температуры воздуха выше 20 °С.

При устройстве дорожного покрытия горячая асфальтобетонная смесь распределяется слоем незначительной толщины. Значительное влияние на процесс охлаждения горячей смеси в заданном температурном интервале оказывает скорость перемещения воздушных масс, так как от этого зависит конвективный теплообмен между окружающей средой и поверхностью уложенного слоя смеси. Установлено, что характер охлаждения слоя смеси не зависит от толщины слоя и подчиняется экспоненциальной зависимости. Увеличение скорости ветра приводит к более интенсивной отдаче тепла в окружающую среду за счет повышения коэффициента теплоотдачи и уменьшает время на выполнение технологических операций по устройству асфальтобетонного покрытия. В таблице 4.6 представлены результаты расчетов продолжительности нахождения слоя смеси в температурных интервалах, соответствующих устройству асфальтобетонных покрытий, в зависимости от скорости ветра при укладке слоя разной толщины (температура смеси при укладке 160 °С, температура воздуха 20 °С).

4.6. Влияние скорости ветра на продолжительность устройства покрытия (мин)

Толщина слоя, м \ Скорость ветра, м/с	0	3	5	7	10	15
0,03	31	27	24	22	20	16
0,05	68	58	53	50	45	36
0,08	150	129	121	114	101	86
0,10	201	175	152	143	132	110

Из представленных данных видно, что с увеличением скорости ветра темп охлаждения смеси увеличивается. За счет увеличения теплообмена поверхности слоя с окружающей средой происходит перераспределение теплового потока по толщине слоя покрытия, что приводит к уменьшению времени нахождения слоя смеси в заданном температурном интервале. Установлено, что при отсутствии ветра перепад температуры при толщине слоя покрытия

0,05 м составляет 5...6 °С, а с увеличением скорости ветра неравномерность температуры достигает 18...20 °С.

Неравномерность распределения температуры смеси приводит к изменению свойств смеси по толщине покрытия, что способствует неравномерности уплотнения по толщине слоя и, на начальном этапе уплотнения, появлению пластических деформаций, а также развитию процесса волнообразования и появлению микротрещин на поверхности укатываемого слоя покрытия.

В результате статистической обработки представленных в таблице данных получены зависимости, устанавливающие связь между продолжительностью охлаждения слоя горячей смеси и скоростью перемещения воздушных масс, которые имеют вид при толщине слоя:

$$0,03 \text{ м} \quad \tau = 30,51e^{-0,0435V}, \text{ мин};$$

$$0,05 \text{ м} \quad \tau = 66,56e^{-0,0409V}, \text{ мин};$$

$$0,08 \text{ м} \quad \tau = 146,57e^{-0,0363V}, \text{ мин};$$

$$0,10 \text{ м} \quad \tau = 194,19e^{-0,0394V}, \text{ мин},$$

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

С целью установления общей закономерности влияния скорости ветра на продолжительность охлаждения слоя смеси данные табл. 4.6 представлены в относительных величинах. Время строительства при отсутствии ветра принято за единицу. Обозначим эту величину через коэффициент влияния скорости ветра (K_V). Тогда данные в относительных единицах имеют значения, представленные в табл. 4.7. Из данных видно, что значение коэффициента влияния скорости ветра на продолжительность работ не зависит от толщины укладываемого слоя.

Численное значение коэффициента определяется по формуле

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

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

4.7. Влияние скорости ветра на продолжительность охлаждения смеси (относительных величинах)

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

Ранее отмечалось, что в зависимости от применяемой марки битума для приготовления горячей асфальтобетонной смеси нижняя температурная граница эффективного уплотнения меняется от 94 до 42 °С, что влияет на продолжительность устройства покрытия [19].

С целью установления зависимости продолжительности устройства покрытия от марки битума проведены расчеты, результаты которых представлены в табл. 4.8. Толщина укладываемых слоев составляла от 0,03 до 0,10 м, температура смеси при укладке 160 °С, скорость ветра 0 м/с.

Из представленных данных видно, что продолжительность строительства покрытия зависит от температуры окончания уплотнения. Чем ниже температура окончания работы, тем больше продолжительность строительства. Толщина слоя оказывает существенное влияние на продолжительность достижения слоем нижней температурной границы уплотнения. Так, если при укладке слоя толщиной 0,03 м и температуре окончания работ 80 °С время охлаждения смеси составляет 15 мин, то при понижении температуры уплотнения до 60 °С время увеличивается и будет равно 31 мин. Аналогичная закономерность наблюдается при укладке слоев любой толщины.

4.8. Зависимость допустимой продолжительности устройства покрытия от температуры окончания уплотнения

Толщина слоя, м \ Температура слоя, °С	Температура слоя, °С						
	140	120	100	80	60	50	40
0,03	2,5	5,5	9,5	15	31	38	62
0,05	7	15	24,5	39	68	94	144
0,08	17,5	35	58	91	151	206	306
0,10	21	46	78	125	205	277	380

Для установления общей закономерности влияния температуры окончания уплотнения асфальтобетона на продолжительность устройства покрытия представим данные табл. 4.8 в относительных величинах (табл. 4.9), принимая условно время устройства слоя при разной толщине и температуре окончания уплотнения 60 °С за единицу. Обозначим эту величину через коэффициент K_m , который характеризует температуру окончания уплотнения дорожно-го покрытия.

Из таблицы 4.9 видно, что коэффициент влияния температуры окончания уплотнения не зависит от толщины слоя и определяется типом смеси и маркой битума. Зависимость коэффициента K_m от температуры окончания уплотнения покрытия представлена на рис. 4.2.

4.9. Влияние температуры окончания уплотнения на допустимую продолжительность устройства покрытия нежесткого типа

Толщина слоя, м \ Температура, °С	Температура, °С						
	150	140	120	100	80	60	40
0,03	0,05	0,08	0,18	0,31	0,48	1,0	2,0
0,05	0,05	0,10	0,23	0,37	0,59	1,0	2,18
0,08	0,06	0,08	0,23	0,38	0,60	1,0	2,03
0,10	0,05	0,1	0,27	0,38	0,61	1,0	1,85
Среднее значение	0,05	0,09	0,24	0,38	0,60	1,0	2,02

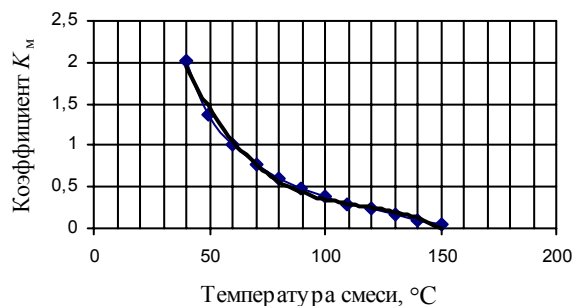


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента K_M от температуры окончания строительства

Численное значение коэффициента K_M в зависимости от температуры окончания работ определяется по формулам:

- для смесей с битумами марок БНД 40/60, 60/90, 90/130

$$K_M = -1,3189(t_M / 100)^3 + 5,2205(t_M / 100)^2 - 7,3915(t_M / 100) + 3,8518; \quad (4.8)$$

- для смесей с битумами марок БНД 130/200, 200/300

$$K_M = -1,6189(t_M / 100)^3 + 5,7951(t_M / 100)^2 - 7,4123(t_M / 100) + 3,4532, \quad (4.9)$$

где t_M – температура окончания уплотнения смеси, зависящая от марки битума, °C. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,99.

На основании проведенных исследований установлено, что с повышением температуры окружающего воздуха от -10 до $+15 \dots 20$ °C продолжительность строительства увеличивается в среднем на $0,5 \dots 1,0$ мин с повышением температуры окружающего воздуха на 1 °C. При изменении температуры воздуха от -10 до 0 °C увеличение продолжительности работ составляет $0,5$ мин на 1 °C. С повышением температуры воздуха от 0 до $15 \dots 20$ °C эта величина составляет 1 мин на 1 °C. При дальнейшем возрастании температуры воздуха увеличение продолжительности работ происходит более интенсивно, что характерно для солнечных дней и температуры окружающего воздуха свыше 20 °C. Экспериментально установлено, что температура поверхности основания дорожной одежды за счет солнечной радиации может превышать температуру окружающего воздуха на $10 \dots 30$ °C, особенно при отсутствии ветра, что подтверждается работами других авторов [1]. Повышение температуры основания за счет этого фактора приводит к уменьшению темпа охлаждения смеси и, следовательно, способствует увеличению продолжительности строительства. С целью уточнения влияния температуры основания на время устройства покрытия проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 4.3 (толщина слоя $0,05$ м, скорость ветра 0 м/с, температура смеси при укладке 140 °C). Из представленных данных видно, что повышение температуры нижележащего слоя по отношению к температуре окружающего воздуха на 1 °C при температуре воздуха от 20 до 30 °C приводит к увеличению продолжительности работ на $0,5$ мин, при температуре воздуха от 30 до 40 °C это увеличение в среднем составляет $0,7$ мин на 1 °C, а при дальнейшем увеличении температуры воздуха рост времени достигает более одной минуты на 1 °C.

Этим объясняется тот факт, что с повышением температуры окружающего воздуха интенсивность охлаждения смеси уменьшается. Следовательно, на продолжительность работ влияет температура основания. Для установления общей закономерности влияния температуры основания на продолжительность строительства представим данные на рис. 4.3 в относительных величинах, принимая время устройства покрытия при равенстве температуры основания и окружающего воздуха за единицу (обозначим его через коэффициент влияния температуры основания – $K_{осн}$).

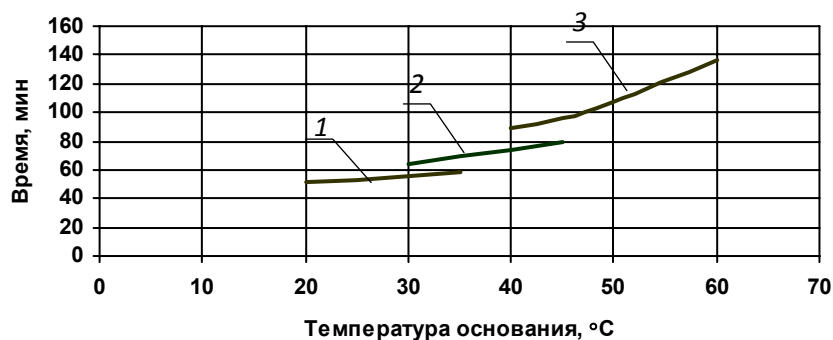


Рис. 4.3. Влияние температуры основания на время строительства (толщина слоя 0,05 м, скорость ветра 0 м/с, температура смеси при укладке 140 °C):
1 – температура основания 20 °C; 2 – 30 °C; 3 – 40 °C

Совместим полученные значения при разных температурах воздуха и основания, принимая за начало отсчета равенство температуры основания и окружающего воздуха. По оси X отложим разницу температур основания и окружающего воздуха с интервалом 5 °C. По оси Y отложим относительное время строительства в связи с увеличением температуры основания. Полученные численные значения коэффициента влияния температуры основания в зависимости от разницы температур основания и окружающего воздуха представлены в табл. 4.10.

4.10. Влияние температуры нижележащего слоя основания на продолжительность устройства покрытия при разных температурах воздуха

Разница температуры основания и воздуха, °C	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

Из таблицы 4.10 видно, что независимо от температуры окружающего воздуха закономерность влияния температуры нижележащего слоя на продолжительность охлаждения уложенного слоя смеси носит общий характер и может быть представлена в виде

$$K_{осн} = 0,987e^{0,013\Delta t}, \quad (4.10)$$

где Δt – разница температур основания и окружающего воздуха, °C. Коэффициент корреляции равен 0,97.

Анализ представленных данных показывает, что с увеличением разницы температуры нижележащего слоя и окружающей среды влияние данного фактора на продолжительность строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей возрастает.

Таким образом, с учетом влияния теплофизических характеристик смеси продолжительность устройства покрытия из горячих асфальтобетонных смесей определяется выражением:

$$\tau_{\text{стр}} = K_c K_{\text{тс}} K_h K_M K_V K_{\text{осн}} e^{at_b}, \text{ мин}, \quad (4.11)$$

где K_c – коэффициент, учитывающий влияние теплофизических свойств смеси.

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

Достижение требуемых показателей асфальтобетонного покрытия в значительной степени зависит от температуры поставляемой смеси к месту ее распределения. Нормативными документами регламентирована минимальная температура смеси при ее распределении и зависит от марки битума, толщины укладываемого слоя и температуры воздуха [73, 76].

В зависимости от заданного темпа устройства покрытия производится выбор параметров механизированного звена машин, состоящего из асфальтоукладчика и звена уплотняющих машин. Производительность комплекта машин при строительстве покрытий нежесткого типа определяется производительностью ведущей машины, в качестве которой принимается асфальтоукладчик. В процессе работы асфальтоукладчика обеспечивается укладка слоя покрытия с заданными параметрами и предварительное уплотнение горячей асфальтобетонной смеси. В зависимости от ширины дорожного покрытия укладка смеси производится одной или несколькими полосами. При укладке покрытия несколькими полосами асфальтоукладчики смещаются относительно друг друга на некоторое расстояние, обеспечивая сопряжение стыка укладываемых полос с учетом температуры горячей смеси. Минимальная длина участка с учетом требуемых условий работы катка должна быть более 10...15 м. Для обеспечения непрерывности устройства покрытия должно соблюдаться условие:

$$S_y = >[S], \text{ м},$$

где $[S]$ – предельно минимальная длина участка уплотнения, м; S_y – длина полосы, укладываемая асфальтоукладчиком за время работы на захватке, м.

Величина смещения (длина захватки) зависит от температуры воздуха и организации производства работ. Согласно принятым рекомендациям длина захватки определяется по формулам:

– на открытых участках

$$L = 18,92e^{0,0583t_b};$$

– на закрытых участках

$$L = 21,95e^{0,063t_b};$$

– на двух полосах

$$L = 42,67e^{0,0049 t_b}, \quad (4.12)$$

где L – длина участка, м; t_b – температура окружающего воздуха, °С. Коэффициент корреляции для уравнений составляет 0,96...0,97.

С учетом неравномерности скорости передвижения катков в процессе укатки покрытия требуемая длина полосы должна быть более 10...15 м, т.е. должно соблюдаться условие [16, 22, 26, 27]:

$$S_y = >[S], \text{ м,}$$

где $[S]$ – предельно минимальная длина участка уплотнения, м; S_y – длина полосы, укладываемая асфальтоукладчиком за время работы на захватке, м.

Для обеспечения непрерывности устройства асфальтобетонного покрытия при заданном темпе строительства с учетом температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси длина захватки определяется скоростью укладки смеси и временем ее охлаждения от момента укладки до начала работы уплотняющих машин, т.е.

$$S_y = V_a \tau_y, \text{ м,} \quad (4.13)$$

где S_y – длина захватки, м; V_a – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; τ_y – время укладки, зависящее от разницы температур смеси при укладке и начале уплотнения катками, мин.

Анализ технических характеристик асфальтоукладчиков показал, что в зависимости от заданного темпа строительства рабочие скорости находятся в пределах от 1,2 до 21,64 м/мин. Исходя из условия обеспечения непрерывности устройства покрытия необходимо, чтобы длина захватки асфальтоукладчика была равна длине захватки уплотняющей машины с учетом температурного режима их работы. Температура укладки смесей зависит от марки битума. Согласно нормативным документам 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 битумах марки 130/200 – не ниже 90 °С; высокоплотных смесей и смесей на полимерно-битумных вяжущих – на 20 °С выше [73]. Минимально допустимая температура смеси при укладке зависит от температуры воздуха, вязкости битума и толщины слоя и определена техническими рекомендациями [184]. Установлено, что между температурой воздуха и минимально допускаемой температурой смеси при укладке существует прямая зависимость. Влияние температуры смеси при укладке на качество предварительного уплотнения асфальтоукладчиками исследовалось А.Г. Масловым [49]. На основании проведенных исследований сделан вывод, что повышение температуры смеси при укладке до 150 °С способствует уменьшению водонасыщения и увеличению коэффициента предварительного уплотнения. Дальнейшее повышение температуры смеси при укладке не оказывает существенного влияния на качество предварительного уплотнения.

Установлено, что длина полосы укладки смеси асфальтоукладчиком в зависимости от условий производства работ определяется выражением [20]:

$$L = K_1 K_2 h (c\gamma - 2t) v_1 v_2 / (a_1 - a_2) (v_1 - v_2), \quad (4.14)$$

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

$$K_1 = 7,5 (t_{yn} - t_b) / (t_k - t_b), \quad (4.15)$$

где t_{yn} – температура смеси начала уплотнения, °С; t_b – температура воздуха, °С; t_k – допускаемая температура смеси 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 перехода 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·°С); a_2 – коэффициент теплоотдачи смеси за счет конвекции (при скорости ветра 1 м/мин принимается равным 5, при 10 м/мин – 12, при большей скорости принимается равным 16).

Анализ предложенной зависимости показывает, что теплофизические свойства асфальтобетонной смеси не учитывают процентное содержание щебня и температуру смеси, что оказывает влияние на темп охлаждения слоя. Не учитывается продолжительность укладки смеси в покрытие, что определяется температурой смеси от момента ее укладки до начала процесса уплотнения.

Температура асфальтобетонных смесей, отгружаемых потребителю, зависит от применяемого вяжущего и находится в пределах 160...70 °С [73]. С учетом потерь тепла при доставке смеси к месту укладки в зависимости от дальности и способа транспортировки температура снижается на определенную величину. Существующими нормативными документами дальность транспортировки горячих асфальтобетонных смесей не регламентирована и ее пригодность к укладке осуществляется в виде контроля за поставляемой температурой смеси согласно существующим рекомендациям. Температура смеси начала уплотнения рекомендована СНиПом, что позволяет определять температурные границы укладки горячей асфальтобетонной смеси в дорожное покрытие. Продолжительность охлаждения горячей асфальтобетонной смеси зависит от температуры поставляемой смеси, погодных условий производства работ, конструктивных параметров покрытия и теплофизических характеристик смеси. Толщина дорожной одежды определяется конструктивными параметрами дороги и должна быть не менее 0,03 м из песчаного асфальтобетона и 0,07 м для крупнозернистого [74].

По результатам моделирования тепловых процессов, протекающих в дорожных асфальтобетонных покрытиях при их устройстве, выявлено, что время охлаждения смеси в интервале температуры 160...70 °С прямо пропорционально температуре смеси при укладке и не зависит от толщины слоя. Результаты расчетов представлены в табл. 4.11.

4.11. Продолжительность охлаждения слоя горячей смеси с учетом марки битума (температура воздуха 20 °С, скорость ветра 0 м/с)

Толщина слоя, м \ Температура смеси, °С	0,03		0,05		0,08		0,10	
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
160	9,5	0	24,5	0	58,0	0	78,5	0
150	8,0	0	21,0	0	50,0	0	68,0	0
140	6,5	15,5	18,0	41,0	42,0	96	56,5	130,5
130	5,5	13,5	14,0	36,0	34,0	84,0	44,0	114,5
120	4,0	11,5	10,0	31,0	24,5	72,0	30,5	99,0
110	2,5	9,5	5,0	26,0	14,0	61,0	16,0	82,0
100	0	7,5	0	20,0	0	48,0	0	65,0
80	0	3,5	0	8,0	0	20,0	0	25,0
70	0		0		0		0	

Примечание. А – для битумов марок БНД 40/60, 60/90, 90/130; Б – для битумов марок БНД 130/200, 200/300.

Анализ данных показывает, что они могут быть аппроксимированы с учетом толщины слоя следующими уравнениями.

Для смесей с битумами марок БНД 40/60, 60/90, 90/130, при толщине слоя:

$$0,03 \text{ м } \tau_{\text{вк}} = 0,15t_{\text{вк}} - 14,36 \text{ мин};$$

$$0,05 \text{ м } \tau_{\text{вк}} = 0,41t_{\text{вк}} - 40,11 \text{ мин};$$

$$0,08 \text{ м } \tau_{\text{вк}} = 0,94t_{\text{вк}} - 90,55 \text{ мин};$$

$$0,10 \text{ м } \tau_{\text{вк}} = 1,31t_{\text{вк}} - 127,77 \text{ мин}, \quad (4.16)$$

где $\tau_{\text{вк}}$ – продолжительность охлаждения смеси от момента укладки смеси до начала процесса уплотнения; $t_{\text{вк}}$ – температура смеси при укладке на нижележащий слой, °С. Коэффициент корреляции составляет 0,98.

Аналогичные закономерности имеют место при укладке смесей на битумах марок БНД 130/200, 200/300. Следовательно, чем выше температура смеси при укладке, тем больше промежуток времени до начала работы уплотняющих машин. Таким образом, повышение температуры смеси при укладке позволяет увеличить длину захватки и тем самым повысить эффективность работы звена машин при условии обеспечения требуемого качества уплотнения. На практике часто используют эту закономерность, особенно при строительстве покрытий в условиях пониженных температур воздуха. Для получения общей закономерности влияния температуры на продолжительность укладки слоя из горячих смесей представим полученные данные в относительных величинах. Принимаем время охлаждения каждого слоя при максимально допустимой температуре укладки за единицу. Обозначим влияние температуры смеси при укладке (в относительных величинах) на время охлаждения через коэффициент $K_{\text{тс}}$, представляющий собой отношение времени охлаждения слоя при укладке с разной 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. 4.12. Из данных таблицы видно, что коэффициент $K_{\text{тс}}$ зависит от температуры смеси при укладке и не зависит от толщины слоя. Численное значение $K_{\text{тс}}$ в зависимости от марки битума определяется по формулам:

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

$$K_{\text{тс}} = 0,015t_{\text{см}} - 1,43;$$

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

$$K_{\text{тс}} = 0,013t_{\text{см}} - 0,81.$$

Коэффициент корреляции составляет 0,99.

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

Температура смеси, °С	Толщина слоя, м				Средняя величина $\sum n/n$	Погрешность, %
	0,03	0,05	0,08	0,10		
140	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	–
130	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	–
120	0,74	0,75	0,75	0,76	0,75	2,7
110	0,61	0,63	0,64	0,63	0,63	1,7
100	0,48	0,48	0,5	0,5	0,49	4,7
80	0,23	0,2	0,21	0,19	0,21	9,5
70	0	0	0	0	0	–

Численное значение $K_{тс}$ в зависимости от марки битума определяется по формулам:

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

$$K_{тс} = 0,015t_{см} - 1,43;$$

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

$$K_{тс} = 0,013t_{см} - 0,81. \quad (4.17)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,99.

В то же время, как видно из данных табл. 4.12, с увеличением толщины слоя время охлаждения смеси в заданном температурном интервале возрастает, зависимость носит нелинейный характер. Анализ представленных данных показал, что они характеризуются степенными зависимостями и с учетом температуры смеси при укладке характеризуются следующими уравнениями, при температуре смеси:

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

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

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

$$130 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \tau = 1168,9 h_{сл}^{1,77}, \text{ мин}, \quad (4.18)$$

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

Следовательно, увеличение толщины укладываемого слоя смеси приводит к повышению времени охлаждения независимо от температуры смеси при укладке. Установлено, что такая закономерность сохраняется при разной температуре окружающего воздуха.

При укладке горячей смеси в дорожном покрытии происходят сложные тепловые процессы, характеризующиеся высоким темпом охлаждения. За короткий промежуток времени (5...7 мин) происходит интенсивная отдача тепла нижнему слою, что способствует повышению его температуры и резкому охлаждению температуры слоя смеси. Результатами моделирования и экспериментальных исследований установлено, что на продолжительность охлаждения смеси в заданных температурных интервалах укладки смеси температура окружающего воздуха оказывает незначительное влияние. В большей степени на продолжитель-

ность охлаждения влияет толщина укладываемого слоя. Результаты расчетов представлены на рис. 4.4.

Из представленных данных видно, что с повышением температуры окружающего воздуха время на укладку горячей асфальтобетонной смеси возрастает. Зависимость носит нелинейный характер и с учетом толщины слоя продолжительность укладки определяется по следующим формулам, при толщине слоя:

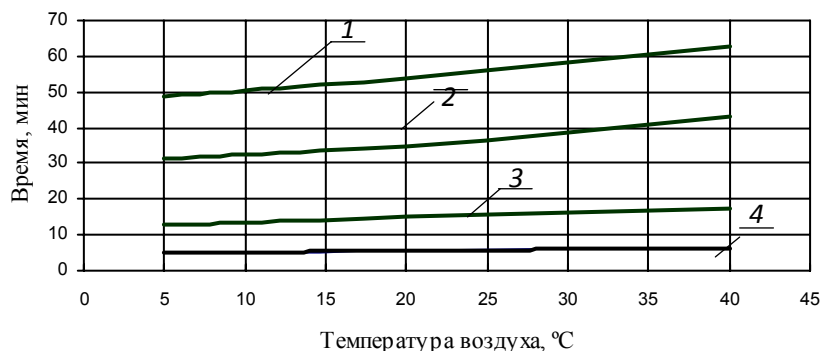


Рис. 4.4. Зависимость времени охлаждения слоя от температуры воздуха для смесей типа А и Б на битумах марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 (температура смеси при укладке 160 °С, скорость ветра 0 м/с) при толщине слоя:
 1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

$$0,03 \text{ м} \quad \tau_y = 7,56e^{0,01t_b};$$

$$0,05 \text{ м} \quad \tau_y = 19,73e^{0,01t_b};$$

$$0,08 \text{ м} \quad \tau_y = 47,6e^{0,01t_b};$$

$$0,10 \text{ м} \quad \tau_y = 64,32e^{0,01t_b}, \quad (4.19)$$

где τ_y – время охлаждения смеси в заданном температурном интервале, мин; t_b – температура воздуха, °С. Коэффициент корреляции данных уравнений находится в пределах 0,98...0,99.

Из представленных уравнений видно, что независимо от толщины слоя они имеют одинаковый характер. В общем виде продолжительность укладки в зависимости от температуры воздуха можно представить выражением

$$\tau_y = K_h e^{\alpha t_b}, \text{ мин}, \quad (4.20)$$

где K_h – коэффициент, зависящий от толщины слоя, численное значение которого можно определить по формуле

$$K_h = 4294 h_{\text{сл}}^{1,8}, \quad (4.21)$$

где $h_{\text{сл}}$ – толщина укладываемого слоя, м; α – коэффициент, принимающий для распределения смесей значение 0,01.

4.13. Продолжительность охлаждения горячей асфальтобетонной смеси в зависимости 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

Интенсивность охлаждения горячей смеси зависит от скорости ветра, так как перемещение воздушных масс способствует отводу тепла в окружающую среду и понижению температуры смеси. В таблице 4.13 представлены данные по продолжительности охлаждения смеси в зависимости от скорости ветра (температура смеси при укладке 160 °С, температура воздуха 20 °С). Из представленных данных видно, что с увеличением скорости ветра время охлаждения смеси уменьшается. Следует отметить, что при укладке покрытия толщиной 0,03 м время охлаждения смеси в заданных температурных интервалах находится в пределах от 6 до 3 минут. Поэтому при устройстве дорожного покрытия с тонким слоем процесс укладки необходимо вести с повышенными рабочими скоростями, а укатку слоя необходимо начинать сразу за асфальтоукладчиком.

Продолжительность укладки смеси с учетом скорости ветра при разной толщине укладываемого слоя можно определить по формулам при толщине слоя:

$$\begin{aligned}
 0,03 \text{ м} \quad \tau_y &= 5,88e^{-0,0047V}; \\
 0,05 \text{ м} \quad \tau_y &= 14,31e^{-0,0426V}; \\
 0,08 \text{ м} \quad \tau_y &= 34,57e^{-0,0448V}; \\
 0,10 \text{ м} \quad \tau_y &= 52,86e^{-0,0433V},
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

где V – скорость ветра, м/с; τ_y – продолжительность укладки смеси, мин. Коэффициент корреляции для уравнений находится в пределах 0,95...0,98.

Для установления общей закономерности влияния скорости ветра на продолжительность укладки смеси представим данные таблицы 4.13 в относительных величинах. Принимаем время укладки смеси в слой покрытия при скорости ветра, равной нулю, за единицу и обозначим его коэффициентом влияния скорости ветра (табл. 4.14).

4.14. Влияние скорости ветра на продолжительность охлаждения смеси (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
Средняя величина	1	0,86	0,78	0,67	0,61	0,51
Погрешность, %	–	1,1	3,8	1,5	4,6	5,6

Из представленных данных видно, что с увеличением скорости ветра коэффициент влияния скорости ветра уменьшается и его значение не зависит от толщины слоя. Зависимость коэффициента от скорости ветра определяется зависимостью

$$K_y = 0,98e^{-0,0466V}, \quad (4.23)$$

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

Согласно нормативным документам для приготовления горячих асфальтобетонных смесей можно использовать разные марки битума, что влияет на температурные режимы укладки горячих смесей. Марка битума влияет на температуру приготовления смеси и начало уплотнения. Результаты расчетов продолжительности охлаждения разных типов смесей и марок битума в зависимости от температуры окончания укладки смеси представлены в табл. 4.15.

**4.15. Продолжительность охлаждения смесей типа А, Б, В, Г, Д
с битумами марок БНД 40/60, 60/90, 90/130
в зависимости от температуры окончания укладки (мин)**

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

**4.16. Продолжительность охлаждения смесей типа А, Б, В, Г, Д
с битумами марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости
от температуры окончания укладки, (мин)**

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

Представим полученные значения в относительных величинах, условно принимая за единицу время окончания процесса укладки смеси при температуре 100 °С. Принимаем полученную относительную величину за коэффициент, учитывающий нижнюю температурную границу укладки смеси и обозначим его через K_M . Тогда данные будут иметь значения, которые представлены в табл. 4.16.

Из представленных данных видно, что численное значение коэффициента K_M не зависит от толщины слоя и определяется по формуле:

$$K_M = -2,092 \ln t_{op} + 10,62, \quad (4.24)$$

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

4.17. Сравнение экспериментальных данных с расчетными

№ по порядку	Температура смеси укладки, °С	Температура воздуха, °С	Температура основания, °С	Скорость ветра, м/с	Продолжительность укладки, мин		Погрешность, %
					Экспериментальное	Расчетное	
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

С учетом влияния рассмотренных факторов продолжительность укладки слоя горячей асфальтобетонной смеси имеет вид:

$$\tau_{ук} = K_h e^{at_b} K_{тс} K_V K_M K_{осн} K_c, \text{ мин}, \quad (4.25)$$

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

Сравнение экспериментальных данных продолжительности укладки горячих асфальтобетонных смесей с расчетными данными представлено в табл. 4.17 (тип смеси А, битум марки БНД 90/130, толщина слоя 0,05 м).

4.4. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО УПЛОТНЕНИЯ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Заключительной стадией строительства автомобильной дороги является уплотнение дорожного покрытия, от качественного выполнения которого зависят транспортно-эксплуатационные показатели дороги. Обеспечить заданные показатели асфальтобетонного покрытия можно при условии выполнения технологических операций в заданном температурном интервале укладываемой смеси с учетом ее прочностных свойств при соответствующих параметрах уплотняющих машин. Процесс уплотнения покрытия осуществляется во времени, продолжительность которого определяется скоростью охлаждения уложенной смеси и зависит от конструктивных параметров дороги, применяемого материала, погодных условий строительства и применяемых машин механизированного звена.

Определение допустимой продолжительности работы катков статического действия при строительстве асфальтобетонных покрытий с использованием горячих смесей рассматривались Е.С. Локшиным [47]. Им предложены зависимости, позволяющие определять допустимое время уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, температуру смеси по толщине уплотняемого слоя и ее распределение во времени с учетом свойств смеси, метеорологических условий строительства и толщины слоя. При выводе зависимости принято, что температура смеси на момент окончания работы катков равняется 80 °С, что применимо для горячих асфальтобетонных смесей определенного типа. Согласно принятым рекомендациям на производство работ по устройству асфальтобетонных покрытий температура окончания уплотнения с учетом типа смеси находится в пределах 100...60 °С [16, 27]. Поэтому предложенная зависимость с учетом температурных режимов горячей асфальтобетонной смеси уплотнения, типа смеси и марки битума требует уточнения.

Нормативными документами температура начала процесса уплотнения регламентирована. Температура окончания укатки не регламентируется. Согласно принятым рекомендациям для устройства асфальтобетонных покрытий температура окончания работы уплотняющих машин в зависимости от типа смеси принимается в интервалах 80...60 °С. В то же время в зависимости от климатической зоны для приготовления смеси определенного типа можно использовать битум разных марок. Установлено, что для асфальтобетонных смесей с использованием битума марок БНД нижняя температура эффективного уплотнения меняется в интервале 94...55 °С [19, 20]. Следовательно, температуру начала укладки и окончания укатки необходимо назначать с учетом типа смеси и марки битума.

Для достижения заданного качества дорожного покрытия необходимо время, в пределах которого уплотняющие машины воздействуют на горячую асфальтобетонную смесь и обеспечивают требуемые параметры асфальтобетона. Поэтому для организации производства работ и обеспечения технологических режимов уплотнения покрытия необходимо знать время работы машины в принятых температурных интервалах с учетом свойств применяемого материала и условий строительства.

Ранее установлено, что с изменением температуры смеси меняются и ее теплофизические свойства. Экспериментально установлено, что в начальный момент, при укладке горячей смеси на нижележащий слой, за счет отдачи тепла нижележащему слою и в окружающую среду скорость охлаждения смеси может достигать 5...6 °С/мин. При уплотнении темп охлаждения уменьшается и составляет, в зависимости от плотности смеси, 0,5...1,5 °С/мин.

Экспериментальные исследования процесса охлаждения горячих асфальтобетонных смесей, а также результаты моделирования показали, что распределение и уплотнение горячих смесей относятся к разным тепловым процессам. Следовательно, закономерности влияния факторов на темпы охлаждения горячей смеси могут отличаться между собою. Известно, что продолжительность уплотнения асфальтобетонного покрытия превышает продолжительность распределения смеси. Температура окружающего воздуха регламентирована нормативными документами и оказывает влияние на продолжительность охлаждения горячего покрытия, а следовательно, и на возможную продолжительность уплотнения. Результаты моделирования влияния температуры воздуха на продолжительность охлаждения горячей смеси при разной толщине укладываемого слоя покрытия представлены на рис. 4.5.

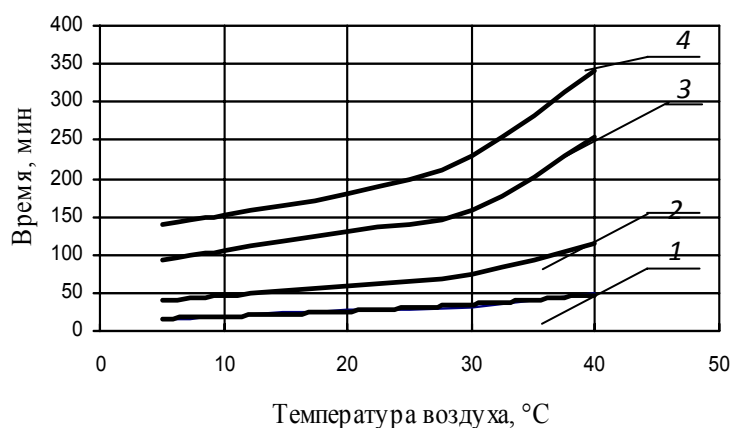


Рис. 4.5. Зависимость продолжительности работ от температуры окружающего воздуха (температура смеси при укладке 160 °С, скорость ветра 0 м/с, температура окончания уплотнения 60 °С) при разной толщине укладываемых слоев:
 1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Данные зависимости подчиняются следующим закономерностям с учетом толщины слоя:

$$\begin{aligned}
0,03 \text{ м} \quad \tau_{\text{уп}} &= 14,08e^{0,0306t_{\text{в}}}; \\
0,05 \text{ м} \quad \tau_{\text{уп}} &= 35,25e^{0,026t_{\text{в}}}; \\
0,08 \text{ м} \quad \tau_{\text{уп}} &= 80,47e^{0,0252t_{\text{в}}}; \\
0,10 \text{ м} \quad \tau_{\text{уп}} &= 119,05e^{0,0234t_{\text{в}}},
\end{aligned}
\tag{4.26}$$

где $\tau_{\text{уп}}$ – возможное время уплотнения, мин; $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, °С. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,97...0,99.

Из данных зависимостей видно, что допустимая продолжительность процесса уплотнения слоя независимо от толщины 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. При этих же условиях увеличение толщины уплотняемого слоя до 0,1 м приводит к увеличению допустимой продолжительности работы в 2,2 раза. Аналогичная закономерность характерна и для остальных слоев.

Анализ представленных зависимостей показывает, что они подчиняются общей закономерности влияния температуры воздуха на процесс охлаждения горячей смеси, которую можно представить в виде:

$$\tau_{\text{уп}} = K_h e^{\alpha t_{\text{в}}}, \tag{4.27}$$

где $\tau_{\text{уп}}$ – время уплотнения, мин; α – коэффициент, зависящий от свойств материала; e – основание натурального логарифма; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; K_h – коэффициент, зависящий от толщины укладываемого слоя, безразмерная величина.

Численное значение коэффициентов K_h и α определяется по формулам:

$$K_h = 7072h^{1,7723}; \quad \alpha = -76,19h^3 + 16,257h^2 - 1,1572h + 0,05. \tag{4.28}$$

Коэффициент корреляции равен единице.

При устройстве асфальтобетонного покрытия с использованием горячих смесей на темп охлаждения значительное влияние оказывает скорость перемещения воздушных масс, способствующая отдаче тепла от поверхности слоя в окружающую среду. Влияние скорости ветра на продолжительность охлаждения горячей смеси при разной толщине слоя покрытия представлено на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Продолжительность процесса уплотнения в зависимости от скорости ветра (температура воздуха 20 °С, температура смеси при распределении 160 °С) при толщине слоя:
1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Численное значение продолжительности охлаждения смеси в заданном интервале температур может быть определено из следующих выражений при толщине слоя:

$$\begin{aligned}
 0,03 \text{ м} \quad \tau_{\text{уп}} &= 18,88e^{-0,0287V}; \\
 0,05 \text{ м} \quad \tau_{\text{уп}} &= 45,46e^{-0,0332V}; \\
 0,08 \text{ м} \quad \tau_{\text{уп}} &= 110,38e^{-0,031V}; \\
 0,10 \text{ м} \quad \tau_{\text{уп}} &= 149,78e^{-0,0031V}.
 \end{aligned}
 \tag{4.29}$$

где V – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции данных уравнений составляет 0,96...0,99.

Для установления общей закономерности влияния скорости ветра на продолжительность охлаждения горячей смеси данные на рис. 4.6 представим в относительных величинах, приняв за единицу продолжительность охлаждения при скорости ветра, равной нулю. Влияние скорости ветра на продолжительность охлаждения горячей смеси в относительных единицах представлено в табл. 4.18.

Таким образом, проявляется общая закономерность влияния скорости перемещения воздушных масс на продолжительность охлаждения горячего слоя асфальтобетонной смеси. Наиболее существенное влияние скорости ветра проявляется при небольшой толщине укладываемого слоя. Так, при укладке слоя толщиной 0,03 м и скорости ветра 3...5 м/с продолжительность работ уменьшается на 20...25 %, а при дальнейшем увеличении скорости ветра время сокращается на 30...50 %. Зависимость охлаждения горячей смеси от скорости ветра носит экспоненциальный характер. Для слоя толщиной 0,03 м зависимость имеет вид

$$K_V = 0,98e^{-0,0491V}, \tag{4.30}$$

где K_V – коэффициент, зависящий от скорости ветра, безразмерная величина; V – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции равен 0,92.

4.18. Влияние скорости ветра на продолжительность охлаждения горячей смеси в заданных температурных интервалах

Толщина слоя, м	Скорость ветра, м/с					
	0	3	5	7	10	15
0,03	1	0,80	0,76	0,68	0,60	0,48
0,05	1	0,86	0,79	0,74	0,66	0,58
0,08	1	0,85	0,79	0,75	0,68	0,62
0,10	1	0,85	0,79	0,75	0,68	0,62
Средняя величина	1	0,86	0,795	0,75	0,67	0,53

С увеличением толщины слоя ($\geq 0,05$ м) влияние скорости ветра проявляется в меньшей степени. При толщине слоя 0,05 м это влияние проявляется при скорости ветра 7 м/с. Коэффициент, учитывающий влияние скорости ветра на возможную продолжительность работ, при уплотнении таких слоев может быть определен по формуле:

$$K_V = 0,99e^{-0,041V}, \tag{4.31}$$

где K_V – коэффициент, зависящий от скорости ветра, безразмерная величина; V – скорость ветра, м/с. Коэффициент корреляции равен 0,93.

Уплотнение асфальтобетонных покрытий начинается после распределения смеси и достижения температуры, соответствующей началу уплотнения. В производственных условиях

температура горячей смеси при доставке к месту работ зависит от продолжительности транспортировки, погодных условий и на момент распределения может находиться в широком диапазоне температур, что влияет на продолжительность нахождения горячей смеси в заданном температурном интервале. С целью определения возможной продолжительности уплотнения в зависимости от температуры смеси при укладке проведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 4.7. Из 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.

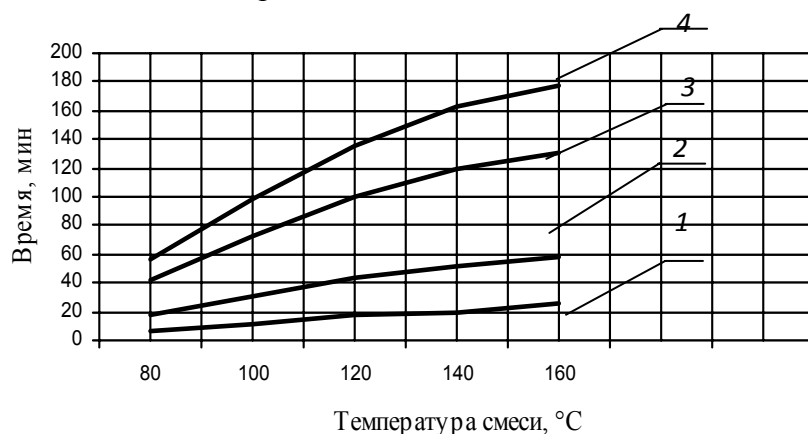


Рис. 4.7. Влияние температуры смеси при укладке на возможную продолжительность уплотнения при толщине слоя:
 1 – 0,03 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,08 м; 4 – 0,10 м

Возможная продолжительность уплотнения слоя (мин), с учетом влияния температуры смеси при укладке, определяется по формулам при толщине слоя:

$$0,03 \text{ м} \quad \tau = 26,24 \ln t_{\text{см}} - 109,1;$$

$$0,05 \text{ м} \quad \tau = 59,66 \ln t_{\text{см}} - 247,54;$$

$$0,08 \text{ м} \quad \tau = 128,1 \ln t_{\text{см}} - 516,74;$$

$$0,10 \text{ м} \quad \tau = 174,98 \ln t_{\text{см}} - 707,4. \quad (4.32)$$

Коэффициент корреляции уравнений 0,96...0,99.

Из представленных данных видно, что с увеличением толщины слоя увеличивается допустимая продолжительность эффективного уплотнения и независимо от толщины слоя характер зависимостей сохраняется. С целью установления общей закономерности влияния температуры смеси при укладке на допустимое время уплотнения представим данные в относительных величинах, принимая температуру смеси при укладке 160 °C за единицу.

Обозначим влияние температуры смеси при укладке на возможную продолжительность уплотнения через $K_{\text{тс}}$. Тогда в относительных величинах данные будут иметь значения, представленные в табл. 4.19.

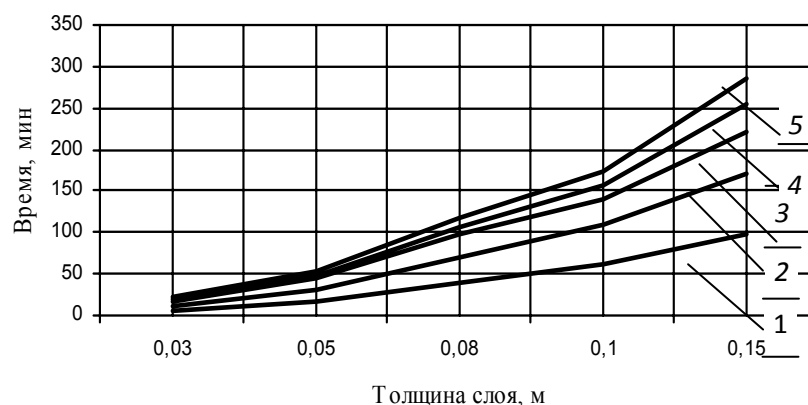


Рис. 4.8. Зависимость продолжительности охлаждения слоя от толщины при разных температурах укладываемых смесей:

1 – 80 °C; 2 – 100 °C; 3 – 120 °C; 4 – 140 °C; 5 – 160 °C

4.19. Влияние температуры смеси при укладке на допустимую продолжительность эффективного уплотнения

Толщина слоя, м \ Температура смеси, °C	160	140	120	100	80
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
Средняя величина	1,0	0,91	0,76	0,54	0,31

Из таблицы видно, что понижение температуры смеси при укладке приводит к уменьшению допустимого времени уплотнения, независимо от толщины слоя, что в большей степени проявляется при укладке тонких слоев покрытий. 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:

$$K_{TC} = 1,005 \ln t_{CM} - 4,0791, \quad (4.33)$$

где K_{TC} – коэффициент влияния температуры смеси, безразмерная величина; t_{CM} – температура смеси при укладке, °C. Коэффициент корреляции 0,99.

Для слоя покрытия толщиной 0,03 м зависимость имеет вид:

$$K_{TC} = 0,009 t_{CM} - 0,44. \quad (4.34)$$

Коэффициент корреляции 0,98.

Области применения асфальтобетонов с учетом марки битума (при устройстве верхних слоев покрытий) зависят от дорожно-климатических зон строительства дороги и рекомендуются нормативным документом [63]. Применение разных марок битумов влияет на температуру окончания уплотнения покрытия, а значит, на продолжительность работ. Предельные температурные границы эффективного уплотнения горячих асфальтобетонных смесей представлены в табл. 4.20 [19, 20].

Моделируя процесс охлаждения горячей смеси при устройстве дорожного покрытия из горячих смесей с применением разных марок битумов, получены данные по продолжитель-

ности допустимого времени эффективного уплотнения в зависимости от температуры окончания процесса уплотнения, которые представлены в табл. 4.20. Для установления общей закономерности влияния температуры окончания уплотнения на допустимую продолжительность работы катков представим значения в относительных величинах. Условно принимаем для данных смесей температуру окончания уплотнения 60 °С в относительных величинах за единицу.

4.20. Продолжительность охлаждения смесей типа А, Б, В, Г, Д с использованием битумов марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 в зависимости от температуры окончания уплотнения (мин)

Толщина слоя, м \ Температура смеси, °С	120	110	100	90	80	70	60
0,03	1,0	3,0	5,0	6,0	10,0	15,0	25
0,05	5,0	9,0	14,0	21,0	29,0	41,0	58
0,08	10,0	21,0	33,0	48,0	66,0	91,0	129
0,10	13,0	28,0	45,0	66,0	92,0	125	179

Обозначим принятую относительную величину за коэффициент, который учитывает температуру окончания уплотнения покрытия и обозначим его K_M . Тогда данные табл. 4.20 будут иметь значения, представленные в табл. 4.21.

Видно, что температура смеси при окончании уплотнения значительно влияет на продолжительность работы катков. Значение коэффициента K_M для слоя толщиной 0,03 м и указанных марок битума определяется по формуле:

$$K_M = -4,788 (t_{op} / 100)^3 + 15,85 (t_{op} / 100)^2 - 17,979 (t_{op} / 100) + 7,09. \quad (4.35)$$

Коэффициент корреляции 0,998.

4.21. Влияние температуры окончания уплотнения на возможную продолжительность работы катка

Толщина слоя, м \ Температура смеси, °С	120	110	100	90	80	70	60
0,03	0,04	0,11		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
Средняя величина	0,08	0,16	0,26	0,38	0,52	0,72	1,0

Для покрытий с толщиной 0,05 м и более численное значение K_M определяется по формуле:

$$K_M = -2,6202 (t_{op} / 100)^3 + 9,096 (t_{op} / 100)^2 - 11,293 (t_{op} / 100) + 5,061, \quad (4.36)$$

где t_{op} – температура окончания уплотнения определенным типом катка, °С. Коэффициент корреляции 0,998.

На основании установленных закономерностей влияния разных факторов возможную продолжительность процесса уплотнения можно представить в виде:

$$\tau_{уп} = K_{тс} K_V K_h K_M K_o K_{уд. см} K_\lambda e^{aV}, \quad (4.37)$$

где $K_{тс}$, K_V , K_h , K_M , K_λ , $K_{уд. см}$, K_o – коэффициенты, значения которых представлены в данной работе.

Процесс уплотнения горячих асфальтобетонных смесей производится в заданных температурных интервалах смеси с учетом типа катка. Время работы катка (легкого, среднего и тяжелого) в заданном температурном интервале определяется по предложенной зависимости, где численное значение K_M будет зависеть от температуры начала и окончания процесса уплотнения данным типом катка. В этом случае величина K_M будет определяться:

$$K_M = K_{M1} - K_{M2}, \quad (4.38)$$

где K_{M1} и K_{M2} – коэффициенты, соответствующие температурам окончания и начала работы катка данного типа.

Таким образом, полученная зависимость позволяет определять возможную продолжительность уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей с учетом температурных режимов работы уплотняющих машин, условий производства работ, типа катка и свойств смесей, что дает возможность выбора технологических параметров применяемых катков.

4.5. УСТРОЙСТВО ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА

Нормативными документами регламентируется устройство дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей производить летом и весной при минимальной температуре воздуха +5 и осенью +10 °С. Однако на практике, в некоторых случаях, производятся работы по устройству покрытий из горячих асфальтобетонных смесей при пониженных температурах окружающей среды, когда температура воздуха опускается ниже нулевой отметки. Существующими техническими регламентами допускается устраивать асфальтобетонные покрытия из горячих асфальтобетонных смесей при соблюдении следующих условий.

При температуре воздуха не ниже 0 °С:

- основание должно быть построено до наступления периода пониженных температур и коэффициент уплотнения должен соответствовать проекту;
- при устройстве покрытия из двух слоев следует устраивать только нижний слой;
- при одновременной укладке двухслойного покрытия верхний слой укладывают на свежеложенный нижний слой при температуре нижнего слоя не ниже 20 °С;
- толщина укладываемого слоя должна быть не менее 0,04 м;
- не допускается простоя асфальтоукладчика;
- транспортировка смесей должна осуществляться автосамосвалами большой грузоподъемности;
- автотранспорт должен быть оснащен обогреваемыми кузовами и утеплительными устройствами (брезентовые чехлы, маты);
- при работе одним асфальтоукладчиком длина захватки должна быть минимальной, чтобы новая полоса укладки примыкала к ранее уложенной неостывшей кромке полосы;

В некоторых случаях допускается устройство покрытия из горячих асфальтобетонных смесей при температуре воздуха –10 °С при следующих условиях [77]:

- толщина укладываемого слоя не менее 0,05 м;

- устройство только нижнего слоя двухслойного покрытия;
- устройство верхнего слоя только по свежееуложенному нижнему слою при температуре нижнего слоя не ниже 10 °С;
- повышение подвижности смеси за счет применения ПАВ и повышения температуры смеси при укладке;
- повышения интенсивности уплотнения смеси;
- уплотнение покрытия должно производиться при температуре смеси не ниже 80 °С.
- выбор уплотняющих машин необходимо осуществлять с учетом конкретных условий производства работ.

При пониженных температурах воздуха происходит интенсивное охлаждение горячей смеси за счет отдачи тепла в окружающую среду и основание, а также за счет контакта поверхности слоя с рабочими органами уплотняющих машин. Интенсивное охлаждение смеси способствует уменьшению продолжительности устройства покрытия и для обеспечения требуемых параметров покрытия необходима увязка свойств применяемых смесей, технологических режимов работы механизированного звена машин и их технических характеристик. В зависимости от конструктивных параметров покрытия возможно применение разных технологий при их устройстве: укладка одного нижнего слоя или двух слоев при условии, что температура свежееуложенного нижнего слоя покрытия не менее 10 °С. Если предусмотрено устройство покрытия из нескольких слоев одинакового состава смеси, то целесообразно укладку вести одним слоем повышенной толщины. При укладке покрытия с двумя слоями и разными по составу смесями можно применять немецкую технологию "компактасфальт" – т.е. "горячее по горячему" [22]. Применение такой технологии позволяет производить уплотнение покрытия как одного слоя с повышенной толщиной.

С понижением температуры окружающего воздуха темп охлаждения смеси увеличивается, меняются теплофизические характеристики материалов, что в конечном итоге влияет на продолжительность устройства покрытия. Используя полученные ранее зависимости влияния температуры на теплофизические характеристики смеси, были смоделированы тепловые режимы при устройстве нижнего слоя покрытия, уложенного на слой из гранитного щебня толщиной 0,3 м. Результаты представлены в табл. 4.22.

В числителе представлена продолжительность охлаждения смесей с марками битумов БНД 60/90, 90/130, 40/60 и температурами смеси при укладке 160 °С и окончания уплотнения 60 °С, в знаменателе для смесей с битумами марок БНД 130/200, 200/300 и температурами при укладке 140 °С и окончания уплотнения 50 °С при скорости ветра, равной нулю.

4.22. Влияние температуры на продолжительность устройства покрытия

Толщина слоя, м \ Температура воздуха, °С	-10	-5	0	+5	+10	Расчетная зависимость
	0,04	$\frac{25}{25}$	$\frac{26}{27}$	28 30	30 32	
0,05	35	37	40	43	47	$\tau = 40,17e^{0,0148t}$ $\tau = 44,49e^{0,0165t}$
	38	41	44	48	53	
0,08	89	95	101	108	117	$\tau = 101,5e^{0,0135t}$ $\tau = 105,38e^{0,0152t}$
	91	98	104	113	124	
0,10	122	129	138	149	161	$\tau = 139,11e^{0,014t}$ $\tau = 144,64e^{0,0145t}$
	131	135	144	156	167	

Анализ показал, что полученные зависимости подчиняются общим закономерностям, полученным для расчета продолжительности строительства покрытий из горячих смесей при положительных температурах воздуха, и могут быть представлены в виде:

$$\tau_{\text{стр}} = K_h e^{\alpha t_{\text{в}}}, \quad (4.39)$$

$\tau_{\text{стр}}$ – продолжительность строительства, мин; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; α – коэффициент, зависящий от свойств материала; K_h – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние толщины слоя.

Численное значение коэффициентов определяется по формулам:

– для смесей с битумами марок БНД 40/60, 60/90, 90/130

$$K_h = -402667h^3 + 89337h^2 - 4375h + 85,91,$$

$$\alpha = 128,33h^3 - 28,15h^2 + 1,96h - 0,0289; \quad (4.40)$$

– для смесей с битумами марок БНД 130/200, 200/300

$$K_h = -271817h^3 + 60937h^2 - 2373,4h + 44,42;$$

$$\alpha = 4,16h^3 - 0,79h^2 + 0,0058h + 0,0177, \quad (4.41)$$

где h – толщина слоя, м.

Из представленных результатов видно, что понижение температуры воздуха с +5 до –10 °С приводит к уменьшению продолжительности устройства покрытия на 20...22 % независимо от толщины слоя. Очень часто на практике для увеличения продолжительности устройства асфальтобетонного покрытия повышают температуру смеси при укладке или увеличивают толщину укладываемого слоя. Повышение температуры смеси выше допустимой приводит к необратимым структурным изменениям битума и его свойств, происходящим в результате термоокислительных процессов при высоких температурах, что ухудшает качество смеси и снижает работоспособность покрытия. Увеличение толщины слоя способствует повышению расхода смеси, что приводит к росту стоимости строительства. Строительство покрытий при пониженных температурах воздуха с укладкой тонких слоев для обеспечения требуемого качества, с точки зрения организации работ, вызывает некоторые сложности по следующим причинам:

- поверхность покрытия велика по сравнению с объемом укладываемого материала, что приводит к интенсивному охлаждению слоя смеси;
- на выполнение работ по укладке и уплотнению горячих смесей остается недостаточно времени из-за быстрого снижения температуры смеси.

4.23. Влияние температуры смеси при укладке на продолжительность устройства покрытия (скорость ветра 0 м/с)

Толщина слоя, м		0,05			0,10			0,15		
		–10	0	10	–10	0	10	–10	0	10
Температура смеси, °С	Температура воздуха, °С									
	180	41	47	55	137	154	177	278	312	356
	160	36	41	47	119	134	154	243	272	306
	140	31	35	40	101	113	130	206	231	264
	120	24	28	32	81	91	104	166	187	214
	100	18	20	23	59	66	76	123	138	158
80	11	12	14	33	38	44	73	82	94	

С целью уточнения влияния этих факторов на продолжительность устройства покрытия были смоделированы тепловые режимы с учетом влияния температуры смеси при укладке и толщины слоя. Полученные результаты представлены в табл. 4.23.

Из представленных результатов видно, что увеличение толщины слоя, как и повышение температуры смеси при укладке, способствует увеличению продолжительности устройства покрытия. Следует заметить, что температура нижележащего слоя зависит от толщины укладываемого слоя горячей смеси и ее температуры. Так, при укладке слоя толщиной 0,04 м и температуре смеси при укладке 160 °С температура основания нагревается до температуры 40...43 °С. При увеличении толщины слоя до 0,1 м нижележащий слой прогревается до температуры 60 °С, что обеспечивает лучшее сцепление слоев между собой.

С целью установления закономерности влияния отмеченных факторов на продолжительность устройства покрытия представим данные табл. 4.23 в относительных величинах, принимая продолжительность строительства покрытия при температуре смеси (условно) 120 °С за единицу. Тогда в относительных величинах данные имеют значения, представленные в табл. 4.24.

Из данных таблицы видно, что повышение температуры смеси при укладке способствует увеличению продолжительности процесса уплотнения. Увеличение температуры смеси от 120 до 160 °С увеличивает продолжительность работ на 40...50 % независимо от толщины укладываемого слоя и температуры окружающего воздуха. При снижении

4.24. Влияние температуры смеси при укладке на продолжительность устройства покрытия (в относительных величинах)

Толщина слоя, м	0,05			0,10			0,15			Средняя величина
	Температура воздуха, °С	Температура смеси, °С	Температура смеси, °С	Температура воздуха, °С	Температура смеси, °С	Температура смеси, °С	Температура воздуха, °С	Температура смеси, °С	Температура смеси, °С	
180	-10	0	10	-10	0	10	-10	0	10	1,68
160	1,70	1,67	1,71	1,69	1,69	1,70	1,67	1,61	1,66	1,46
140	1,50	1,46	1,46	1,47	1,47	1,48	1,46	1,45	1,45	1,25
120	1,29	1,25	1,25	1,25	1,24	1,25	1,24	1,24	1,23	1,0
100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,74
80	0,70	0,71	0,72	0,72	0,70	0,73	0,74	0,74	0,74	0,43

температуры поставляемой смеси ниже 120 °С продолжительность работ снижается на 25...50 % независимо от толщины укладываемого слоя. На основании полученных результатов установлено, что существует прямая связь между температурой смеси при укладке в покрытие и продолжительностью охлаждения, которая имеет вид:

$$K_{тс} = 0,0124t_{тс} - 0,515, \quad (4.42)$$

где $K_{тс}$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры смеси при укладке на продолжительность строительства, безразмерная величина; $t_{тс}$ – температура смеси при укладке, °С.

С увеличением толщины укладываемого слоя продолжительность процесса уплотнения также увеличивается. При этом основание прогревается до более высокой температуры (50...60 °С), что сказывается на качестве уплотнения. Обработка данных, представленных в табл. 4.24 позволяет сделать вывод, что с точки зрения допустимой продолжительности устройства асфальтобетонного покрытия из горячих смесей повышение толщины укладываемого слоя является более эффективным методом, чем увеличение температуры смеси. Принимая

время устройства покрытия при толщине слоя 0,05 м за единицу, установим эффективность влияния повышения толщины укладываемого слоя горячей смеси на продолжительность работ. Результаты представлены в табл. 4.25. Из представленных данных видно, что с увеличением толщины слоя допустимая продолжительность устройства покрытия увеличивается в несколько раз независимо от температуры окружающего воздуха. Поэтому повышение толщины укладываемого слоя при пониженных температурах окружающего воздуха является более эффективным методом повышения допустимого времени устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, позволяющим достичь требуемое качество работ.

4.25. Влияние относительной толщины слоя на продолжительность процесса уплотнения при различной температуре смеси при укладке

Температура смеси при укладке, °С	Температура воздуха, °С					
	-10	0	+ 10	-10	0	+ 10
180	3,26	3,27	3,22	6,62	6,63	6,47
160	3,30	3,27	3,27	6,75	6,63	6,50
140	3,25	3,22	3,25	6,64	6,60	6,60
120	3,30	3,25	3,25	6,92	6,67	6,69
100	3,27	3,30	3,30	6,68	6,90	6,87
80	3,30	3,17	3,14	7,30	6,83	6,70

Из представленных данных видно, что с увеличением толщины слоя допустимая продолжительность устройства покрытия увеличивается в несколько раз независимо от температуры окружающего воздуха. Поэтому повышение толщины укладываемого слоя при пониженных температурах окружающего воздуха является более эффективным методом повышения допустимого времени устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, позволяющим достичь требуемое качество работ. Используя данные, опубликованные в работах [21, 63], а также результаты полученных экспериментальных исследований, представленные в относительных величинах, на рис. 4.9 показано влияние толщины укладываемого слоя горячей смеси на продолжительность устройства покрытия. Из представленных данных видно, что при увеличении толщины укладываемого слоя смеси время возрастает более интенсивно и зависимость имеет нелинейный характер. При одной и той же относительной толщине укладываемого слоя смеси допустимое время на процесс уплотнения зависит от типа смеси. С увеличением крупности фракций минерального материала допустимая продолжительность работы уменьшается.

При увеличении толщины слоя из песчаной асфальтобетонной смеси в два раза время на ее уплотнение увеличивается в три раза, для среднезернистых смесей время возрастает в 2,5 раза, а для крупнозернистых – в два раза.



Рис. 4.9. Влияние относительной толщины уплотняемого слоя на продолжительность работ по устройству покрытия из горячей смеси:
 1 – по данным Н.В. Горелышева, крупнозернистая асфальтобетонная смесь;
 2 – по данным К. Нижбойера, мелкозернистая смесь;
 3 – по данным эксперимента, песчаная асфальтобетонная смесь

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

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

В процессе строительства при пониженных температурах воздуха значительное влияние на возможное время укладки и уплотнения смесей оказывает скорость ветра. В соответствии с существующими рекомендациями разрешается укладывать горячую асфальтобетонную смесь на подготовленное основание при условии, что скорость ветра не превышает пределов, указанных в табл. 4.26 [34].

Установлено, что характер влияния скорости ветра на продолжительность работ по устройству покрытий не зависит от толщины укладываемого слоя. Увеличение скорости ветра приводит к снижению продолжительности процесса строительства за счет интенсивной отдачи тепла в окружающую среду. Обозначим влияние скорости ветра на возможную продолжительность устройства покрытия через коэффициент K_V . Зависимость коэффициента влияния скорости ветра на продолжительность работ представлено на рис. 4.10.

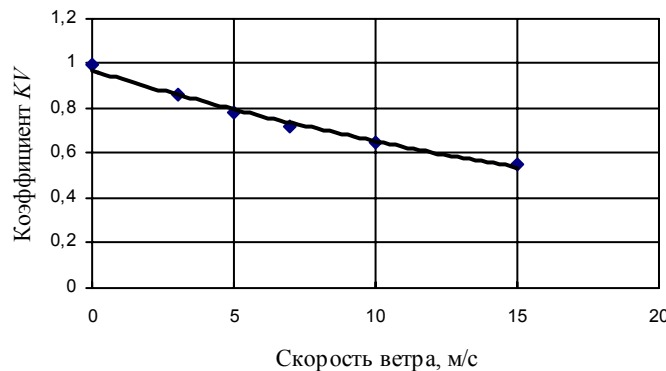


Рис. 4.10. Зависимость K_V от скорости ветра

Численное значение K_V определяется по формуле:

$$K_V = 0,98e^{-0,039V}, \quad (4.43)$$

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

В зависимости от конструкции дорожного покрытия используются разные типы смеси, а также технологические схемы производства работ, влияющие на продолжительность строительства. При строительстве дорожных покрытий в два слоя используется раздельная укладка смеси. В этом случае материал слоя покрытия регламентирован СНиП 2.05.02–85* и зависит от категории дороги [74]. В нижние слои укладывают крупнозернистые смеси. В верхний слой покрытия укладывают 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). Если предусмотрена укладка разных по составу смесей, то укладку ведут в два слоя и верхний слой покрытия укладывают после уплотнения нижнего слоя и снижения температуры покрытия до 20...30 °С при температуре окружающего воздуха до +10 °С.

В условиях пониженных температур окружающего воздуха при устройстве двухслойного покрытия допускается укладывать верхний слой на свежеложенный нижний слой при его температуре 20...40 °С и температуре воздуха ниже +10 °С [43]. Наличие нижнего слоя покрытия с более высокой температурой по отношению к температуре окружающего воздуха способствует уменьшению отдачи тепла основанию, а, следовательно, приводит к увеличению допустимого времени устройства верхнего слоя покрытия. Аналогичная закономерность была установлена при определении продолжительности строительства покрытий при высоких температурах окружающего воздуха.

4.27. Влияние температуры основания на продолжительность строительства

Температура основания, °С	–10	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160
Время строительства, мин	44	47	50	54	59	64	70	76	92	111	132	155	179
Время укладки, мин	12	12	12	12,5	13	13,5	14	15	15,5	17	19	21	26
Время уплотнения, мин	32	35	38	42	46	51	56	61	77	94	113	134	153

В таблице 4.27 представлены данные по продолжительности строительства покрытия при укладке верхнего слоя горячей асфальтобетонной смеси толщиной 0,05 м на уложенный ранее нижний слой асфальтобетона толщиной 0,08 м при температуре воздуха –10 °С, скорости ветра 0 м/с и температуре смеси при укладке 160 °С.

Видно, что на продолжительность устройства покрытия при пониженных температурах окружающего воздуха влияет температура нижележащего слоя, в том числе и на уплотнение покрытия. Увеличение температуры основания до 30...40 °С при температуре окружающего воздуха –10 °С способствует увеличению продолжительности устройства покрытия в интервале температур смеси 160...60 °С на 25...35 %, аналогично увеличивается и возможная продолжительность процесса уплотнения.

На продолжительность распределения смеси температура основания оказывает незначительное влияние. Продолжительность укладки смеси, исходя из непрерывности устройства покрытия, может быть увеличена за счет повышения температуры смеси в момент ее распре-

деления. На рисунке 4.11 представлена зависимость влияния температуры основания на продолжительность устройства покрытия. Численное значение коэффициента влияния температуры основания ($K_{осн}$) на продолжительность устройства покрытия определяется из выражения:

$$K_{осн} = 0,99e^{0,0086t_{см}}, \quad (4.44)$$

где $t_{см}$ – температура смеси, °С.

Установлено, что коэффициент влияния нижнего слоя не зависит от температуры укладываемой смеси.

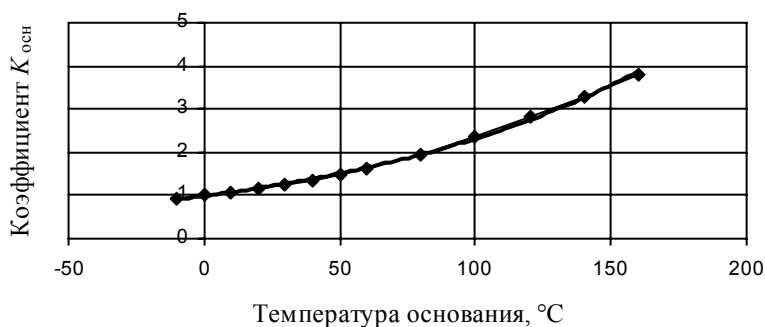


Рис. 4.11. Влияние температуры основания на продолжительность устройства покрытия

В общем виде продолжительность устройства дорожных покрытий при пониженных температурах воздуха можно определить по формуле:

$$\tau_{стр} = K_h K_{тс} K_{см} K_M K_{осн} K_{см} e^{at_B}, \text{ мин}, \quad (4.45)$$

где K_M , $K_{см}$ – безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств смеси, значения которых определяются по приведенным ранее зависимостям.

Г л а в а 5

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЖЕСТКОГО ВАЛЬЦА КАТКА С УПЛОТНЯЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

5.1. ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ САМОХОДНЫХ КАТКОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Достижение требуемых показателей уплотнения дорожных покрытий нежесткого типа обеспечивается катками с жестким вальцом. Анализ существующих технологий и применяемых машин для строительства покрытий нежесткого типа показал, что широкое распространение получили самоходные вибрационные катки. Обладая более высокой уплотняющей способностью, они практически вытеснили гладковальцовые катки статического действия. Анализ технических характеристик этих катков, выпускаемых в разные периоды времени, позволяет сделать вывод, что их параметры претерпели существенные изменения с течением времени. С целью замены катков статического действия вибрационными при работе на начальной стадии

уплотнения в статическом режиме стали увеличивать массу катков. На рисунке 5.1 представлены зависимости изменения массы вибрационных катков за период с 1970 по 2007 годы. Из данных зависимостей видно, что увеличение массы вибрационных катков в статическом режиме, в настоящий момент достигло массы катков статического действия легкого и среднего типов. Приведенные зависимости можно представить выражениями:

– управляемые

$$Q = 49,75 \ln t - 376,3;$$

– тандем

$$Q = 348,56 \ln t - 2639;$$

– комбинированные

$$Q = 382,63 \ln t - 2895,6, \quad (5.1)$$

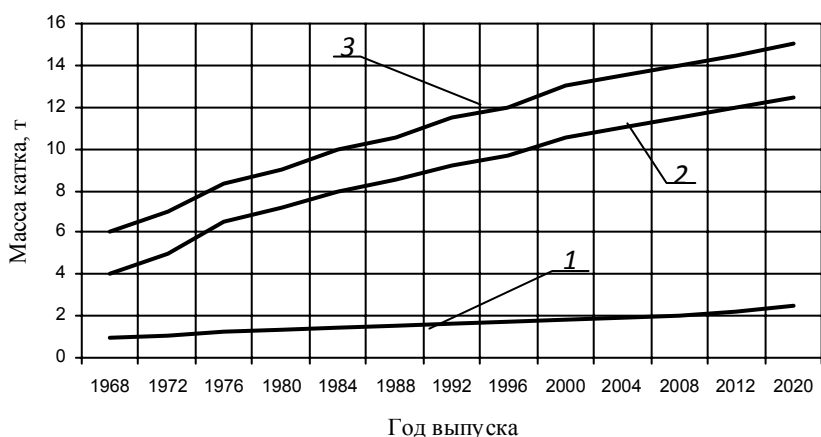


Рис. 5.1. Изменение массы самоходных вибрационных катков по годам:

1 – управляемые; 2 – тандем; 3 – комбинированные

где t – год, характеризующий массу катка; Q – масса катка, т.

На основании установленных закономерностей можно сделать вывод, что к 2020 году масса вибрационных катков может достигнуть: управляемые – 2,5...3,0 т; тандем – 12...13 т; комбинированные – 15...16 т.

Дальнейшее увеличение массы вибрационных катков можно считать нецелесообразным, так как вибрационные катки при работе в динамическом режиме по своему уплотняющему эффекту заменяют более тяжелые катки статического действия. Применение таких катков позволяет уменьшить количество используемых машин в механизированных звеньях и одновременно повысить эффективность их применения.

При уплотнении упруговязкопластического материала, к которому относится горячий асфальтобетон, уплотняющая способность вибрационного катка зависит как от параметров машины, так и свойств материала. При одинаковом силовом воздействии, под действием динамической нагрузки затухание напряжений по толщине уплотняемого слоя происходит интенсивнее, чем при действии статической нагрузки. Следует заметить, что увеличение массы катка при фиксированных остальных его параметрах (диаметр и ширина вальца) способствует росту контактных напряжений и приводит к нарушению установленного закона уплотнения. С учетом этого при возрастании массы катка увеличивают ширину вальца, что позволяет повысить производительность катков.

Анализ параметров существующих катков (ширина и диаметр вальца, вынуждающая си-

ла и ее частота колебаний) показал, что они также изменились с течением времени. С повышением радиуса вальца увеличивается его контактная поверхность, что приводит к снижению контактных напряжений. Увеличение диаметра вальца приводит к росту остальных параметров катка, что способствует увеличению габаритных размеров и массы катка. На рисунке 5.2 представлена зависимость изменения диаметра вальца от его массы.

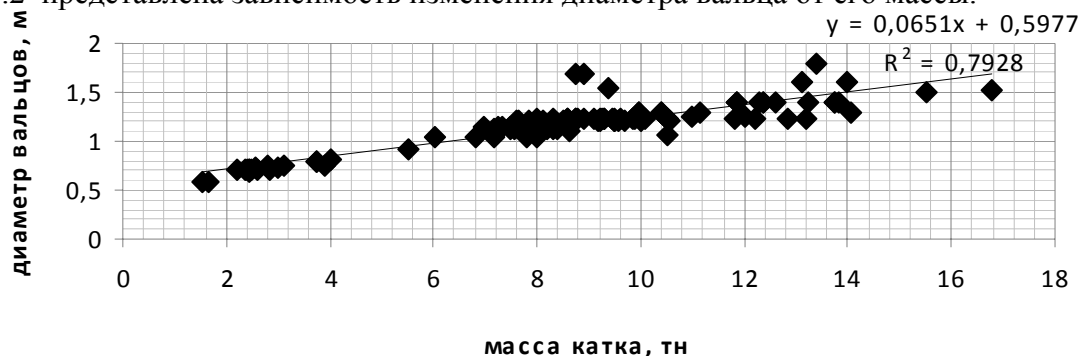


Рис. 5.2. Зависимость диаметра вальца от массы катка

Для обеспечения устойчивости машины при производстве работ с увеличением диаметра вальца увеличивают его ширину. Анализ современных катков показал, что между диаметром вальца и его шириной существует линейная зависимость. В то же время установлено различие в отношении между этими параметрами. Если раньше это соотношение принималось в пределах (0,8...1,2), то для современных катков оно составляет 0,65.

Существующими рекомендациями по выбору типа катка при составлении звена уплотняющих машин за основной параметр принята масса машины. Это положение можно считать справедливым при условии, если ширина вальца является величиной постоянной. Проведенный анализ существующих параметров катков показал, что при одной и той же массе ширина вальца может быть разной. Поэтому выбор параметров катка с учетом только его массы не всегда способствует выбору эффективного типа катка. Более объективным параметром, характеризующим передачу нагрузки на уплотняемый материал, является линейное давление вальца, т.е. нагрузка на 1 см ширины вальца. На рисунке 5.3 представлена зависимость линейного давления вальца катка от его массы.

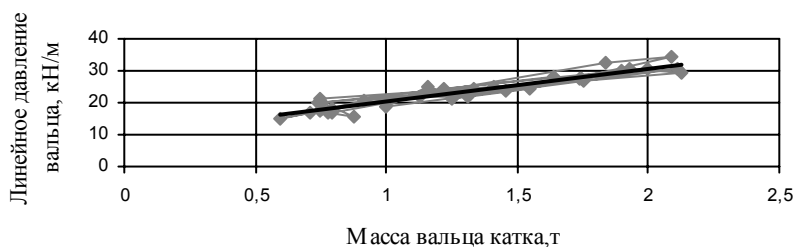


Рис. 5.3. Зависимость линейного давления вальца катка от его массы

Из представленной зависимости видно, что между линейным давлением вальца и его массой существует также линейная зависимость. Передача усилия от вальца катка на уплотняемый материал происходит через площадь контакта вальца с уплотняемым материалом, которая зависит от свойств уплотняемого материала и параметров катка. Таким обобщающим параметром, характеризующим силовое воздействие вальца на материал, является отношение

$$Q/Br \text{ или } q/r,$$

где q – линейное давление вальца, кН/м; Q – масса катка, т; B – ширина вальца, м; r – радиус вальца, м.

Зависимость силового параметра вальца в статическом режиме от массы катка представлена на рис. 5.4. При увеличении массы катков до 5 т наблюдается интенсивный рост. При дальнейшем увеличении массы катка интенсивность снижается. Данная зависимость может быть аппроксимирована уравнением:

$$q/r = 0,27Q^{0,229}, \text{ кН/см}^2, \quad (5.2)$$

где Q – масса катка, т.

Установлено, что уплотняющая способность вибрационного катка зависит от параметров вибрации. В зависимости от свойств уплотняемого материала и режима работы катка величина вынуждающей силы должна быть разной. В результате статистической обработки параметров выпускаемых катков установлено, что между массой катка и вынуждающей силой существует прямая зависимость. Для повышения эффективности вибрационных катков применяют вибрацию в обоих вальцах. На рисунке 5.5 представлена зависимость вынуждающей силы вибрационного вальца от его массы для катков типа тандем с обоими вибрационными вальцами.

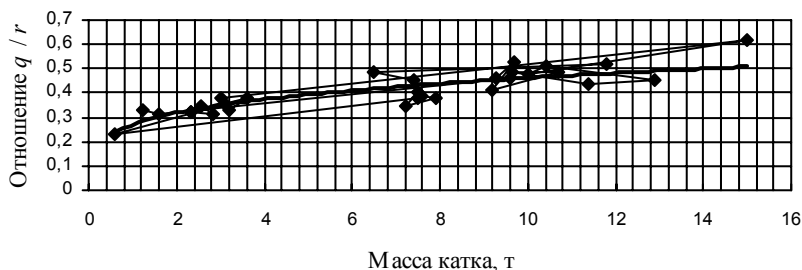


Рис. 5.4. Влияние силовых параметров вальца в статическом режиме от массы катка

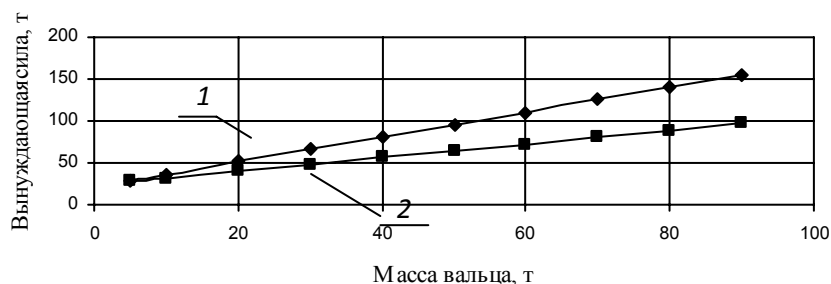


Рис. 5.5. Зависимости между нагрузкой от вальца и вынуждающей силой:
1 – ведомый валец; 2 – ведущий валец

Из представленных зависимостей видно, что и при такой конструктивной схеме катков между вынуждающей силой и массой вальца существует линейная зависимость.

Установлено, что эффективность воздействия вальца на уплотняемый материал определяется относительной вынуждающей силой, представляющей собой отношение вынуждающей силы к силе тяжести вальца и приходящейся на него части массы рамы катка. Экспериментально доказано, что при уплотнении асфальтобетонных покрытий максимальный эффект достигается при частоте колебаний 40...60 Гц. Наблюдающаяся тенденция роста вынуждающей силы с увеличением массы катка способствует интенсивному росту контактных напряжений, что может привести к процессу разуплотнения. Поэтому с увеличением массы

катка уменьшают вынуждающую силу. На рисунке 5.6 представлены зависимости изменения относительной вынуждающей силы от массы катка.

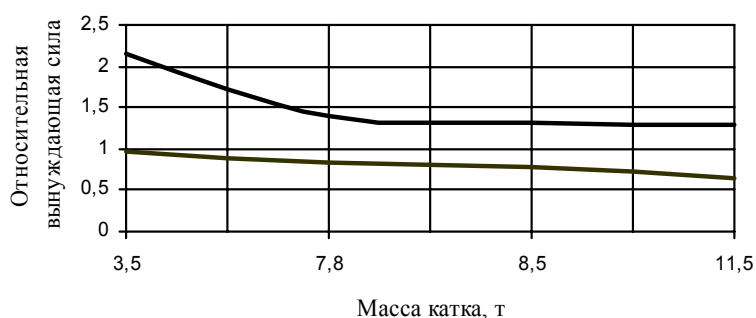


Рис. 5.6. Зависимость относительной вынуждающей силы вальца от массы катка:

1 – масса катка; 2 – масса вибрационного вальца и части рамы катка

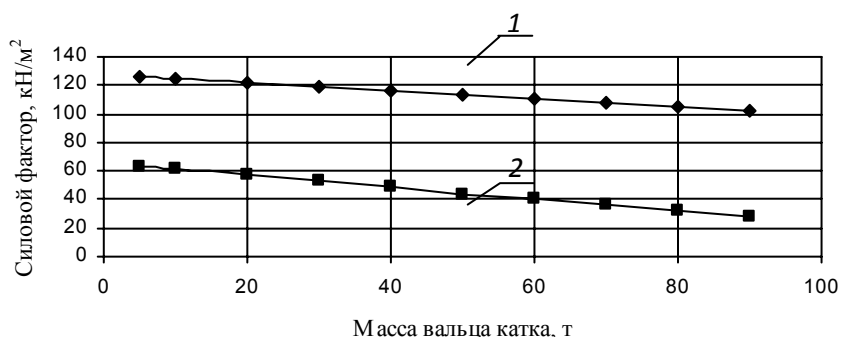


Рис. 5.7. Зависимость силового воздействия вальца от его массы при работе в:

1 – динамическом режиме; 2 – статическом режиме

При работе катка в динамическом режиме силовой (Q/Br) параметр катка меняется в зависимости от величины вынуждающей силы и определяется отношением $(Q + P)/Br$, где P – вынуждающая сила, кН. На основании статистической обработки параметров современных катков установлены закономерности изменения силового параметра вибрационного вальца катка при разных режимах работы, которые представлены на рис. 5.7.

Вопрос эффективности вибрационных катков по отношению к каткам статического действия рассматривается в ряде работ [1, 15, 16, 19]. Отмечается, что эффективность работы вибрационного катка зависит от относительной вынуждающей силы, частоты колебаний и свойств уплотняемого материала. В результате обработки параметров современных вибрационных катков установлена зависимость коэффициента эффективности катка от массы вальца, которая представлена на рис. 5.8 (за коэффициент эффективности принято отношение силовых факторов катка при работе в динамическом и статическом режимах).

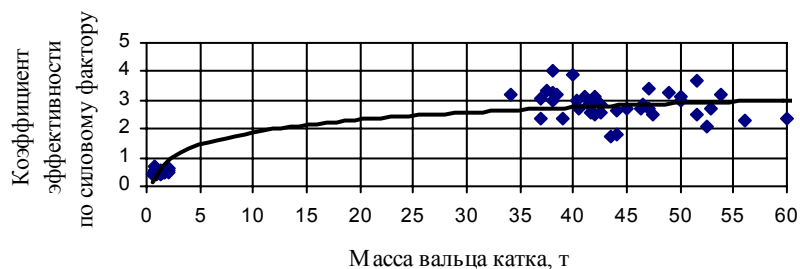


Рис. 5.8. Зависимость коэффициента эффективности вибрационного катка от массы вальца

Из представленного графика видно, что в зависимости от массы вальца и параметров вибрации, характеризующих тип катка, коэффициент эффективности для современных машин находится в пределах от 2 до 4.

Конструктивный анализ современных катков показал, что большинство катков имеют несколько значений вынуждающей силы. Это позволяет менять ее величину на разных этапах уплотнения, что расширяет область их применения. Изменение вынуждающей силы возбуждителя колебаний возможно за счет частоты колебаний или статического момента. Установлено, что лучший эффект уплотнения материала достигается при определенной частоте колебаний вибрационного вальца в зависимости от свойств материала. Чем меньше размеры фракций уплотняемого материала, тем выше должна быть частота возбуждителя колебаний.

В настоящее время освоен выпуск вибрационных катков, в которых вынуждающая сила меняется за счет статического момента возбуждителя колебаний при его постоянной частоте вращения. С учетом технологических требований к процессу уплотнения целесообразным является создание такой системы управления вибровозбудителем, которая позволяет менять параметры вибрации независимо друг от друга.

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

При движении вальца катка по поверхности покрытия происходит перемещение частиц горячей смеси под действием сил, возникающих от массы вальца катка на уплотняемый материал, что способствует сближению частиц и росту плотности асфальтобетона. С повышением плотности материала возрастает способность слоя покрытия сопротивляться нагрузке от вальца катка, что приводит к изменению площади контакта. Принято считать, что упругая деформация материала не влияет на величину контактных напряжений под вальцом катка [7, 54]. Взаимодействие жесткого вальца катка с материалом представлено на рис. 5.9, где Q – сила тяжести катка, приходящаяся на валец, кН; M – крутящий момент, приложенный к ведущему вальцу катка, кН·м; R – радиус вальца, м; E_1 и E_2 – модули деформации уплотняемого материала до прохода вальца и после него, МПа; F – сила, передаваемая от ведущего вальца на раму катка, кН; h_n , h_n , h_o – полная, необратимая и упругая деформации материала, м; β – угол контакта вальца катка с материалом, характеризующий необратимую деформацию, град; α – угол между осью движения вальца и точкой, характеризующий конец контакта вальца с материалом, характеризует упругую деформацию, град; z – угол между точкой начала контакта вальца с уплотняемым материалом и осью движения вальца, характеризующий полную деформацию материала, град.

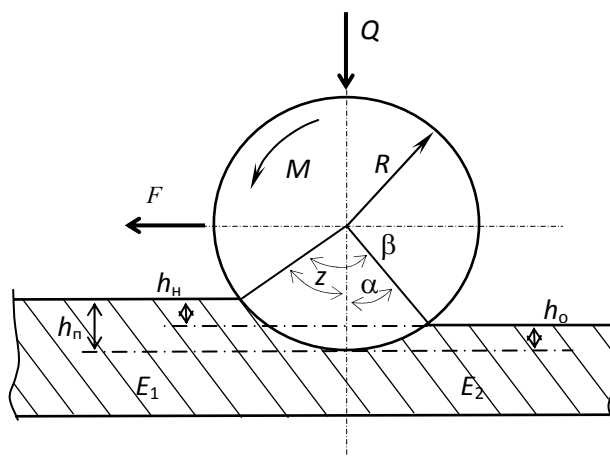


Рис. 5.9. Схема взаимодействия вальца катка с уплотняемым материалом

Из представленной схемы видно, что полная деформация уплотняемого материала определяется как сумма необратимой и обратимой деформаций, т.е.

$$h_n = h_n + h_o . \quad (5.3)$$

Установлено, что величина необратимой деформации уплотняемого материала при взаимодействии с вальцом катка статического действия определяется выражением [66]:

$$h_n = 20q / E\sqrt{R} , \quad (5.4)$$

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

Из представленной схемы выражения для определения деформаций уплотняемого материала имеют вид:

$$h_n = R(1 - \cos z) ;$$

$$h_n = R(\cos \alpha - \cos z) ;$$

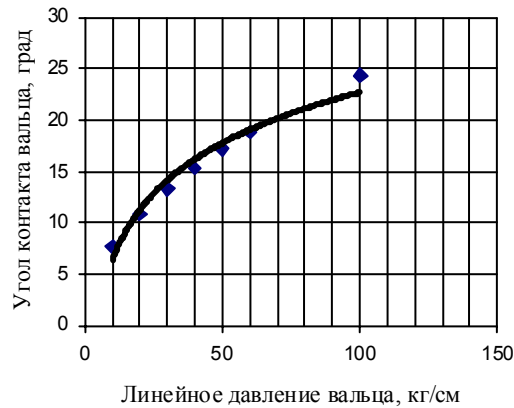
$$h_o = R(1 - \cos \alpha) . \quad (5.5)$$

Тогда угол контакта, характеризующий полную деформацию материала под вальцом катка, с учетом модуля деформации материала и параметров катка определяется из выражения:

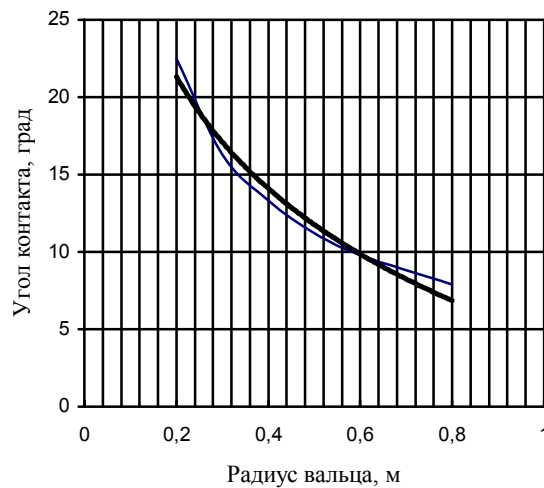
$$\cos z = \cos \alpha - 20q / ER\sqrt{R} . \quad (5.6)$$

Для начальной стадии уплотнения, когда упругие свойства материала проявляются незначительно, можно предположить, что угол α равен нулю. В этом случае угол контакта вальца с материалом может быть определен по формуле:

$$\beta = \arccos(1 - 20q / ER\sqrt{R}) . \quad (5.7)$$



а)



б)

Рис. 5.10. Влияние параметров катка на угол контакта вальца:

а – изменение угла контакта вальца от линейного давления; *б* – радиуса вальца

Из данной зависимости видно, что угол контакта β зависит от параметров уплотняющей машины (q, R) и свойств материала, характеризующих деформативные свойства грунта (E). В процессе укатки величина модуля деформации материала изменяется практически на порядок. При возрастании модуля деформации материала до бесконечно большой величины часть выражения превращается в ноль, что характеризует контакт вальца катка с материалом в точке. На заключительной стадии работы катка можно принять, что модуль деформации материала не меняется от числа проходов катка и $E_1 = E_2$. Тогда угол контакта вальца катка с уплотняемым материалом равен $\beta = 2\alpha$.

Угол контакта вальца определяется свойствами материала и параметрами катка. При одной и той же деформативной способности материала с увеличением радиуса вальца угол контакта уменьшается. Анализ параметров дорожных катков показал, что диаметр вальца колеблется в пределах от 0,4 до 1,6 м, а линейное давление катков статического действия в зависимости от типа катка принимается от 10 до 90 кН/м. На рисунке 5.10 представлено влияние параметров вальца катка на угол контакта.

При движении катка по уплотняемой поверхности деформативные свойства материала меняются. Если на начальном этапе уплотнения наблюдается интенсивный рост модуля деформации и необратимой деформации, то с увеличением проходов рост замедляется и затем практически прекращается при работе одной и той же машины. Это вызывает необходимость применения для достижения более высокой плотности и деформативной способности материала более тяжелых уплотняющих машин. На рисунке 5.11 представлена зависимость угла контакта вальца от модуля деформации материала.

Установлено, что между углом контакта вальца и получаемой плотностью грунта существует линейная зависимость. Для суглинистого грунта угол контакта вальца с материалом определяется выражением

$$B = 40,84 - 14,9\delta. \quad (5.8)$$

Для асфальтобетонных смесей угол контакта вальца (при постоянных его параметрах) в зависимости от свойств смеси определяется зависимостями:

– для мелкозернистой

$$\beta = 14,1 - 6,3 \ln E ;$$

– для крупнозернистой

$$\beta = 14 - 4,53 \ln E , \quad (5.9)$$

где β – угол контакта, град; E – модуль деформации асфальтобетона, МПа.

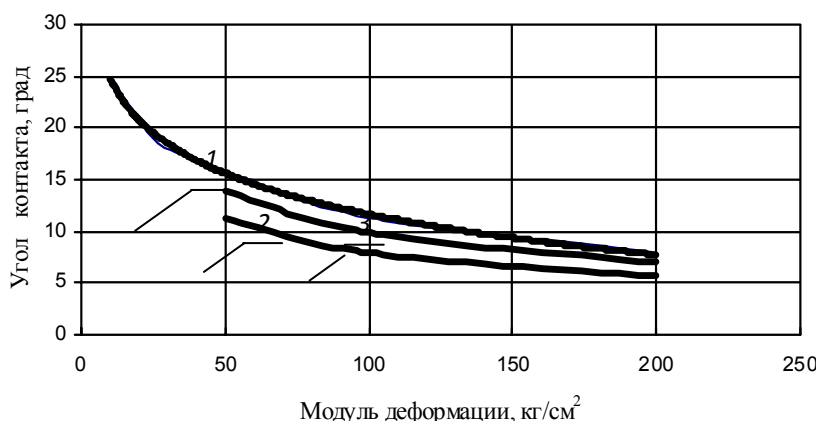


Рис. 5.11. Зависимость угла контакта вальца от модуля деформации материала:

1 – грунт глина, каток ДУ-47Б;

2 – асфальтобетон мелкозернистый, толщина слоя 0,07 м, каток ДУ-10А;

3 – асфальтобетон крупнозернистый, каток ДУ-47Б, толщина слоя 0,06 м

В процессе работы катков для достижения требуемой плотности асфальтобетона обеспечивает необходимое количество проходов по одному следу. Характер изменения угла контакта вальца от числа проходов катка подчиняется логарифмической зависимости и определяется следующими выражениями:

– для мелкозернистой смеси

$$\beta = \beta_0 - 9,5 \ln N;$$

– для крупнозернистой смеси

$$\beta = \beta_0 - 3,95 \ln N, \quad (5.10)$$

где β_0 – угол контакта при первом проходе; N – число проходов по одному следу. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,96...0,98.

С ростом плотности материала меняется величина как остаточной, так и упругой деформаций. Характер изменения деформаций при статическом и вибрационном уплотнении разного материала в зависимости от числа проходов катка представлен на рис. 5.12.

Из представленных на рисунке данных видно, что между углом контакта вальца с материалом (β) и углом, характеризующим упругую деформацию, (α) существует связь, независящая от вида материала и способа уплотнения, которая представлена на рис. 5.13.

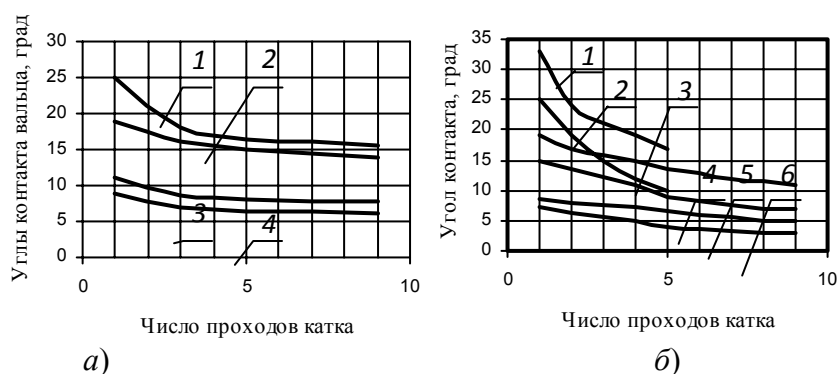


Рис. 5.12. Зависимость угла контакта вальца при уплотнении дорожных одежд от числа проходов:

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

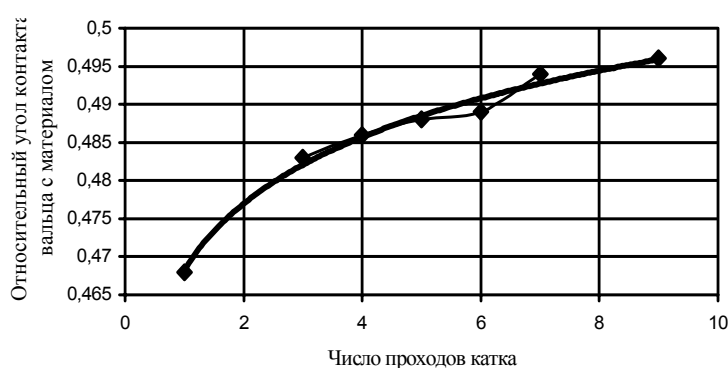


Рис. 5.13. Зависимость относительного угла контакта вальца от числа проходов катка:

грунт – глина, толщина слоя 0,15 м, каток ДУ-47Б, без вибрации

Исследованиями установлено, что отношение α/β находится в пределах от 0,2 до 0,5 и зависит от деформативной способности материала, линейного давления и радиуса вальца. Установленные закономерности позволяют определить параметры контакта вальца катка с учетом свойств уплотняемого материала.

5.3. РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ЖЕСТКИМ ВАЛЬЦОМ ДОРОЖНОГО КАТКА СТАТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Эффективность работы уплотняющих машин определяется величиной контактных напряжений под вальцом катка. Установлено, что максимальные параметры уплотнения достигается при условии, когда контактные напряжения под вальцом катка приближаются к пределу прочности уплотняемого материала [67]. При превышении контактных напряжений под рабочим органом машины предела прочности уплотняемого материала происходит разрушение его структуры, что проявляется в виде пластических деформаций и волнообразования на поверхности покрытия. При незначительной величине контактных напряжений достичь требуемых параметров уплотнения практически невозможно. Поэтому выбор катков необходимо производить с учетом их параметров, свойств уплотняемого материала и условий производства работ. При перемещении жесткого вальца катка по поверхности уплотняемого материала в зоне его контакта возникают напряжения, под действием которых происходит уплотнение материала. Анализ существующих методов определения контактных напряжений показал, что в отличие от имеющихся решений по взаимодействию контактируемых тел, при решении данной задачи свойства одного из контактируемых тел меняются в довольно широких пределах. С учетом того, что при строительстве дорожных одежд применяемый материал проявляет упруго-вязкопластические свойства в зависимости от рассматриваемого этапа уплотнения, то получение общей зависимости представляет определенные сложности. Существующие зависимости для определения сжимающих контактных напряжений получены без учета упругих деформаций и не отражают реальной картины взаимодействия жесткого вальца с уплотняемым материалом. Применяемые экспериментальные зависимости позволяют определять только сжимающие напряжения. При работе катка в зоне контакта вальца с поверхностью материала возникают также и касательные напряжения, которые также влияют на процесс уплотнения за счет перемещения частиц материала в горизонтальной плоскости. Для ведомого вальца катка статического действия силовым параметром является масса вальца и часть массы рамы катка, приходящаяся на валец, а также толкающее усилие от рамы катка на валец. При взаимодействии ведущего вальца с материалом необходимо также учитывать величину крутящего момента, приложенного к вальцу. Расчетные схемы, моделирующие процесс взаимодействия вальцов катка с материалом, представлены на рис. 5.14.

Экспериментально установлено, что при уплотнении мелкозернистых и песчаных горячих асфальтобетонных смесей, уложенных в дорожные покрытия, распределение контактных напряжений под жестким вальцом катка осуществляется равномерно по всей его ширине. Поэтому расчет контактных напряжений по дуге контакта вальца с материалом можно вести как для плоской задачи. В общем виде напряженное состояние частицы в зоне контакта вальца с материалом будет определяться выражением:

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_x + \tau_y + \tau_x + \sigma_s + \tau_s, \text{ МПа}, \quad (5.11)$$

где σ_y , σ_x , τ_y , τ_x , σ_s , τ_s – составляющие общего напряжения частицы от действия вертикальных и горизонтальных силовых факторов.

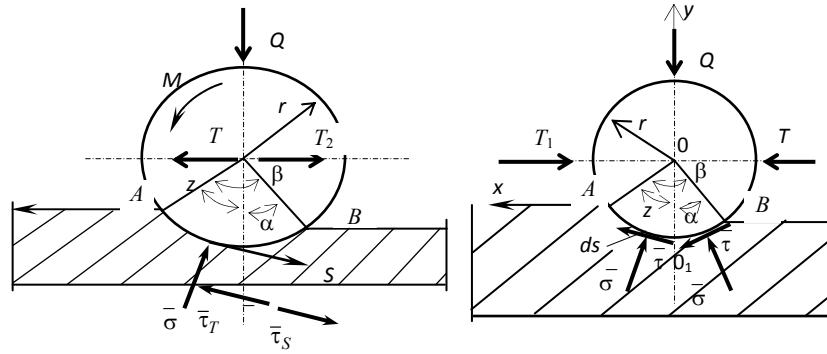


Рис. 5.14. Схема взаимодействия валцов катка с уплотняемым материалом:

Q – масса вальца и передаваемая на него нагрузка от рамы катка;
 T – толкающее усилие, передаваемое от рамы на валец; β – угол контакта вальца катка с уплотняемым материалом; α – угол, характеризующий упругую деформацию материала; z – угол, характеризующий полную деформацию материала под вальцом; ds – единичная площадка поверхности вальца катка; $\bar{\sigma}$, $\bar{\tau}$ – нормальные и касательные напряжения в уплотняемом материале контакта вальца; r – радиус вальца; T_1 – сила сопротивления движению вальца катка со стороны уплотняемого материала; M – крутящий момент

Исходя из условия равновесия напряженного состояния материала в зоне контакта вальца, с учетом начальных и граничных условий взаимодействие валцов с материалом можно представить системой уравнений:

– для ведомого вальца

$$\begin{aligned} \sum x = 0; \quad & - \int_0^z Br\sigma \sin(z - \varphi) d\varphi + \int_0^z Br\tau \cos(z - \varphi) d\varphi + \\ & + \int_z^\beta Br\sigma \sin(\varphi - z) d\varphi + \int_z^\beta Br\tau \cos(\varphi - z) d\varphi + T = 0; \\ \sum y = 0; \quad & \int_0^z Br\sigma \cos(z - \varphi) d\varphi + \int_0^z Br\tau \sin(z - \varphi) d\varphi + \\ & + \int_z^\beta Br\sigma \cos(\varphi - z) d\varphi - \int_z^\beta Br\tau \sin(\varphi - z) d\varphi - Q = 0; \end{aligned} \quad (5.12)$$

– для ведущего вальца

$$\begin{aligned} \sum x = 0; \quad & - \int_0^z \sigma \sin(z - \varphi) r B d\varphi + \int_0^z Br\tau_\tau \cos(z - \varphi) d\varphi - \\ & - \int_0^z Br\tau_s \cos(z - \varphi) d\varphi + \int_z^\beta \sigma \sin(\varphi - z) Br d\varphi + \end{aligned}$$

$$-\int_z^\beta Br\tau_\tau \cos(\varphi-z) d\varphi - \int_z^\beta Br\tau_S \cos(\varphi-z) d\varphi + T - S_x = 0; \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} \sum y = 0; \quad & \int_0^z Br\sigma \cos(z-\varphi) d\varphi + \int_0^z Br \sin(z-\varphi) d\varphi - \\ & - \int_0^z Br\tau_S \sin(z-\varphi) d\varphi + \int_z^\beta Br \cos(\varphi-z) d\varphi - \\ & - \int_z^\beta Br\tau_\tau \sin(\varphi-z) d\varphi + \int_z^\beta Br\tau_S \sin(\varphi-z) d\varphi - Q + S_y = 0; \end{aligned}$$

$$\sum M = 0; \quad - \int_0^z Br^2 \tau_S d\varphi = M.$$

Начальные условия имеют вид:

$$\text{— при } \varphi = 0 \rightarrow \sigma_x = \sigma_y = \tau_{y\tau} = \tau_{x\tau} = \tau_{xS} = \tau_{yS} = 0;$$

$$\varphi = \beta \rightarrow \sigma_x = \tau_{y\tau} = \sigma_y = \tau_{x\tau} = \tau_{xS} = \tau_{yS} = 0.$$

Граничные условия можно представить в виде:

$$\text{— при } \varphi = z \rightarrow \frac{d\tau_y}{d\varphi} = 0; \frac{d\tau_{x\tau}}{d\varphi} = 0; \frac{d\tau_{xS}}{d\varphi} = 0; \sigma_x = \tau_{y\tau} = \tau_{yS} = 0;$$

$$\varphi = z \rightarrow \frac{d\sigma_y}{d\varphi} = \frac{d\tau_x}{d\varphi} = 0, \quad y_1 = 1, \quad y_2 = 2z, \quad y_3 = 3z^2, \quad y_4 = 4z^3;$$

$$\varphi = z \rightarrow \sigma_x = \tau_y = 0, \quad y_1 = z, \quad y_2 = z^2, \quad y_3 = z^3, \quad y_4 = z^4.$$

В представленной системе уравнений приняты τ_τ и τ_S – касательные напряжения в зоне контакта вальца от действия сил T и S ; S_x и S_y – проекции силы S на оси x и y . Из уравнения моментов видно, что сила S возникает за счет приложенного к оси вальца катка момента M , является величиной постоянной по всей дуге контакта вальца катка с материалом и численное значение определяется из выражения:

$$S = \int_0^\beta \tau_S d\varphi Br = M/r. \quad (5.14)$$

Из уравнений видно, что в случае $\varphi < z$ интегралы, входящие в системы уравнений, позволяют определить распределение напряжений вдоль дуги контакта вальца в зоне полной деформации уплотняемого материала. При $\varphi > z$ оставшаяся часть интегралов позволяет оп-

ределить распределение напряжений в зоне упругой деформации. В конечном виде решение системы уравнений имеет вид:

– для ведомого вальца

$$\begin{aligned}\sigma_y &= (A_1\varphi + A_2\varphi^2 + A_3\varphi^3 + A_4\varphi^4)/\Delta, \\ \tau_y &= (D_1\varphi + D_2\varphi^2 + D_3\varphi^3 + D_4\varphi^4)/\Delta, \\ \sigma_x &= (B_1\varphi + B_2\varphi^2 + B_3\varphi^3 + B_4\varphi^4)/\Delta, \\ \tau_x &= (\Phi_1\varphi + \Phi_2\varphi^2 + \Phi_3\varphi^3 + \Phi_4\varphi^4)/\Delta;\end{aligned}\quad (5.15)$$

– для ведущего вальца

$$\begin{aligned}\sigma_y &= (A_1\varphi + A_2\varphi^2 + A_3\varphi^3 + A_4\varphi^4)/\Delta, \\ \tau_x &= (\Phi_1\varphi + \Phi_2\varphi^2 + \Phi_3\varphi^3 + \Phi_4\varphi^4)/\Delta, \\ \sigma_x &= (B_1\varphi + B_2\varphi^2 + B_3\varphi^3 + B_4\varphi^4)/\Delta, \\ S_x &= (z_1\varphi + z_2\varphi^2 + z_3\varphi^3 + z_4\varphi^4)/\Delta, \\ \tau_y &= (D_1\varphi + D_2\varphi^2 + D_3\varphi^3 + D_4\varphi^4)/\Delta, \\ S_y &= (O_1\varphi + O_2\varphi^2 + O_3\varphi^3 + O_4\varphi^4)/\Delta,\end{aligned}\quad (5.16)$$

где φ – угол, характеризующий рассматриваемую точку на дуге контакта вальца с материалом; $A_i, B_i, D_i, \Phi_i, z_i, O_i$ – коэффициенты системы уравнений, зависящие от параметров машины и свойств материала. Численное значение коэффициентов определяется из выражений:

$$A_1 = R\beta^2 [\beta y_2 (C - \beta N) + y_3 (\beta^2 M - C) + y_4 (N - \beta M)];$$

$$B_1 = R\beta^2 \mu [\beta y_2 (E - \beta W) + y_3 (\beta^2 V - E) + y_4 (W - \beta V)];$$

$$O_1 = R\beta^2 \mu_1 [\beta y_2 (\beta W - E) + y_3 (E - \beta^2 V) + y_4 (\beta V - W)];$$

$$D_1 = F\beta^2 [\beta y_2 (\beta W - E) + y_3 (E - \beta^2 V) + y_4 (\beta V - W)];$$

$$\Phi_1 = F\beta^2 \mu [\beta y_2 (C - \beta N) + y_3 (\beta^2 M - C) + y_4 (N - \beta M)];$$

$$S_1 = F\beta^2 \mu_1 [\beta y_2 (\beta N - C) + y_3 (C - \beta^2 M) + y_4 (\beta M - N)];$$

$$A_2 = R\beta [\beta^2 y_1 (\beta N - C) + y_3 (C - \beta^3 K) + y_4 (\beta^2 K - N)];$$

$$B_2 = R\beta \mu [\beta^2 y_1 (\beta W - E) + y_3 (E - \beta^3 U) + y_4 (\beta^2 U - W)];$$

$$O_2 = R\beta \mu_1 [\beta^2 y_1 (E - \beta W) + y_3 (\beta^3 U - E) + y_4 (W - \beta^2 U)];$$

$$D_2 = F\beta [\beta^2 y_1 (E - \beta W) + y_3 (\beta^3 U - E) + y_4 (W - \beta^2 U)];$$

$$\begin{aligned}
\Phi_2 &= F\beta\mu [\beta^2 y_1 (\beta N - C) + y_3 (C - \beta^3 K) + y_4 (\beta^2 K - M)]; \\
S_2 &= F\beta\mu_1 [\beta^2 y_1 (C - \beta N) + y_3 (\beta^3 K - C) + y_4 (N - \beta^2 K)]; \\
A_3 &= R\beta [\beta y_1 (C - \beta^2 M) + y_2 (\beta^3 K - C) + y_4 (M - \beta K)]; \\
B_3 &= R\beta\mu [\beta y_1 (E - \beta^2 V) + y_2 (\beta^3 U - E) + y_4 (V - \beta U)]; \\
O_3 &= R\mu_1 [\beta y_1 (\beta^2 V - E) + y_2 (E - \beta^3 U) + y_4 (\beta U - V)]; \\
D_3 &= F\beta [\beta y_1 (\beta V - E) + y_2 (E - \beta^3 U) + y_4 (\beta U - V)]; \\
\Phi_3 &= F\beta\mu [\beta y_1 (C - \beta M) + y_2 (\beta^3 K - C) + y_4 (M - \beta K)]; \\
S_3 &= F\beta\mu_1 [\beta y_1 (\beta^2 M - C) + y_2 (C - \beta^3 K) + y_4 (\beta K - M)]; \\
A_4 &= R\beta [\beta y_1 (\beta M - N) + y_2 (N - \beta^2 K) + y_3 (\beta K - M)]; \\
B_4 &= R\beta\mu [\beta y_1 (\beta V - W) + y_2 (W - \beta^2 U) + y_3 (\beta U - V)]; \\
O_4 &= R\beta\mu_1 [\beta y_1 (W - \beta V) + y_2 (\beta^2 U - W) + y_3 (V - \beta U)]; \\
D_4 &= F\beta [\beta y_1 (W - \beta V) + y_2 (\beta U - W) + y_3 (V - \beta U)]; \\
\Phi_4 &= F\beta\mu [\beta y_1 (\beta M - N) + y_2 (N - \beta K) + y_3 (\beta K - M)]; \\
S_4 &= F\beta\mu_1 [\beta y_1 (N - \beta M) + y_2 (\beta K - N) + y_3 (M - \beta K)], \quad (5.17)
\end{aligned}$$

где R и F – силы, действующие на валец, значения которых определяются из выражений $R = R_1 + R_2$; $F = F_1 - F_2$, где $F_1 = T$; $F_2 = S \cos(z - \varphi)$; $R_1 = Q$; $R_2 = S \sin(z - \varphi)$; K, U, M, V, N, W, C, E – коэффициенты, зависящие от свойств материала; Δ – определитель системы уравнений, значение которого определяется из выражения

$$\begin{aligned}
\Delta &= \beta [y_2 (l_3 l_8 - l_4 l_7) + y_3 (l_1 l_6 - l_2 l_8) + y_4 (l_2 l_7 - l_3 l_6)] - \\
&- \beta^2 [y_1 (l_2 l_8 - l_4 l_6) + y_3 (l_4 l_5 - l_1 l_8) + y_4 (l_1 l_6 - l_2 l_5)] + \\
&+ \beta^3 [y_1 (l_2 l_8 - l_4 l_6) + y_2 (l_4 l_5 - l_1 l_8) + y_4 (l_1 l_6 - l_2 l_5)] + \\
&+ \beta^4 [y_1 (l_2 l_7 - l_3 l_6) + y_2 (l_3 l_5 - l_1 l_7) + y_3 (l_1 l_6 - l_2 l_5)],
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
l_1 &= K + \mu U - \mu_1 U; \quad l_2 = M + \mu V - \mu_1 V; \quad l_3 = N + \mu W - \mu_1 W; \quad l_4 = C + \mu E - \mu_1 E; \\
l_5 &= U - \mu K + \mu_1 K; \quad l_6 = V - \mu M + \mu_1 M; \quad l_7 = W - \mu N + \mu_1 N; \quad l_8 = E - \mu C + \mu_1 C;
\end{aligned}$$

μ и μ_1 – коэффициенты сопротивления движению и сцепления вальца с уплотняемым материалом;

$$K = -\beta \cos(\beta - z) + \sin(\beta - z) + \sin z; \quad U = \beta \sin(\beta - z) + \cos(\beta - z) - \cos z;$$

$$M = -\beta^2 \cos(\beta - z) + 2U ; \quad V = \beta^2 \sin(\beta - z) - 2K ;$$

$$N = -\beta^3 \cos(\beta - z) + 3V ; \quad W = \beta^3 \sin(\beta - z) - 3M ;$$

$$C = -\beta^4 \cos(\beta - z) + 4W ; \quad E = \beta^4 \sin(\beta - z) - 4N .$$

Анализ уравнения показывает, что при отсутствии крутящего момента ($\mu_1 = 0$) распределение напряжений в зоне контакта вальца имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_k = & (A_1 + B_1 + D_1 + \Phi_1) \varphi/\Delta + (A_2 + B_2 + D_2 + \Phi_2) \varphi^2/\Delta + \\ & + A_3 + B_3 + D_3 + \Phi_3) \varphi^3/\Delta + (A_4 + B_4 + D_4 + \Phi_4) \varphi^4/\Delta. \end{aligned} \quad (5.18)$$

При этом условии уравнение распределения контактных напряжений по дуге контакта ведущего вальца соответствует уравнению для ведомого вальца. При уплотнении материала с малым углом внутреннего трения, когда условно можно считать $\mu = 0$, уравнение имеет вид:

$$\sigma_k = (A_1 + D_1) \varphi/\Delta + (A_2 + D_2) \varphi^2/\Delta + (A_3 + D_3) \varphi^3/\Delta + (A_4 + D_4) \varphi^4/\Delta. \quad (5.19)$$

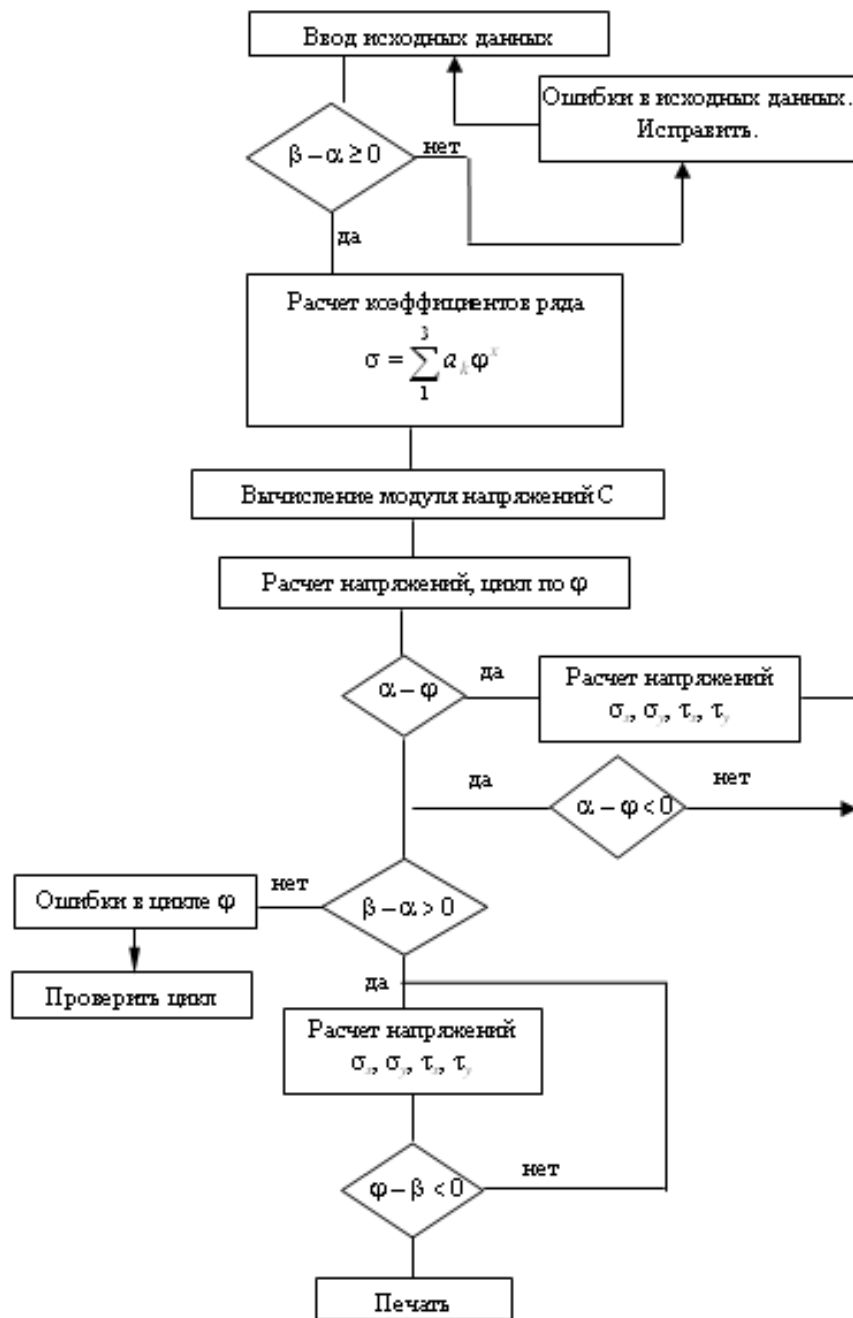


Рис. 5.15. Блок-схема алгоритма расчета напряжений под вальцом катка

При отсутствии тягового усилия, т.е. при $F = 0$ и $\mu_1 = \mu = 0$, напряжения под вальцом будут определяться из выражения:

$$\sigma_k = A_1\varphi/\Delta + A_2\varphi^2/\Delta + A_3\varphi^3/\Delta + A_4\varphi^3/\Delta. \quad (5.20)$$

При условии $\varphi = 0$ и $\varphi = \beta$ составляющие общего напряжения равны нулю. Полученное решение системы уравнений соответствует частным случаям контакта ведущего вальца катка с уплотняемым материалом на всех режимах его работы. Из полученных уравнений видно, что контактные напряжения под вальцом катка зависят от силовых характеристик уплотняющих машин (R, F) и параметров контактной поверхности, зависящих от свойств уплотняемого материала. Следовательно, полученные зависимости позволяют определять величину контактных напряжений (сжимающих и сдвигающих) в любой точке контакта вальца катка с учетом свойств материалов и его параметров. Блок-схема алгоритма расчета напряжений под вальцом катка [36] представлена на рис. 5.15.

5.4. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ВАЛЬЦОМ КАТКА

Отмечалось, что существующие методы расчета контактных напряжений под вальцом катка позволяют определять в зоне контакта вальца только сжимающие напряжения и не учитывают сдвигающие напряжения, возникающих при взаимодействии вальца с материалом. Анализ полученных зависимостей распределения напряжений в зоне контакта под вальцами катка позволяет сделать вывод, что величина нормальных напряжений зависит от передаваемой вальцами вертикальной нагрузки и площади контакта вальца с материалом. Величина сдвигающих напряжений зависит от приложенных к вальцу горизонтальных сил и направления их действия с учетом свойств уплотняемого материала. В таблицах 5.1, 5.2 представлены результаты расчетов контактных напряжений под вальцом катка при работе катка в статическом режиме и разных модулях деформации уплотняемого материала.

Из представленных данных видно, что суммарная величина сжимающих напряжений зависит, в основном, от вертикальной нагрузки, передаваемой на валец. Составляющие сжимающих напряжений от горизонтальных усилий представляют незначительную величину и составляют около 5 % от общей суммы сжимающих напряжений. На основании полученных данных на рис. 5.16 представлено распределение составляющих сжимающих и сдвигающих контактных напряжений под ведущим вальцом катка. Видно, что эпюра вертикальной составляющей нормальных напряжений не симметрична относительно оси движения вальца, а ее максимальная величина совпадает с осью движения вальца. Совмещение эпюр составляющих напряжения под ведущим вальцом катка показывает, что имеет место смещение максимальных значений от оси вальца катка. На величину смещения оказывает влияние вертикальная составляющая касательных напряжений. Следует отметить, что величина максимального значения нормальных напряжений под вальцом катка в основном зависит от массы вальца и передаваемой на него нагрузки от рамы машины, а также характеристик уплотняемого материала.

5.1. Распределение контактных напряжений под ведомым вальцом катка (асфальтобетон мелкозернистый, каток ДУ-47Б, модуль деформации 20 МПа)

Угол контакта	σ_{Qy}	σ_{Qx}	τ_{Fy}	τ_{Fx}	$\sigma_{Qy} + \tau_{Fx}$	$\sigma_{Qx} + \tau_{Fy}$
0	0	0	0	0	0	0
1	0,45	-0,47	0,24	0,22	0,68	0,25
2	2,29	-0,69	0,35	1,14	2,64	0,45

3	4,49	-0,68	0,34	2,24	4,83	1,56
4	6,28	-0,47	0,23	3,14	6,51	2,67
5	7,17	-0,12	0,06	3,58	7,23	3,46
6	6,94	0,38	-0,14	3,47	6,80	3,75
7	5,65	0,64	-0,32	2,82	5,33	3,46
8	3,61	0,82	-0,41	1,81	3,21	2,62
9	1,44	0,66	-0,33	0,72	1,11	1,38
10	0	0	0	0	0	0

**5.2. Результаты расчета контактных напряжений
под ведущим вальцом при уплотнении мелкозернистой
асфальтобетонной смеси катком ДУ-47Б и
модуле деформации 20 МПа**

Угол контакта	σ_{Qy}	σ_{Qx}	τ_{Fx}	τ_{Fy}	τ_{Sx}	τ_{Sy}	$Q_y + \tau_{Fx} +$ $+ \tau_{Sx}$	$\sigma_{Qx} + \tau_{Fy} +$ $+ \tau_{Sy}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2,19	1,67	-0,83	-1,09	0,5	-0,66	1,85	-3,42
2	6,81	-1,79	-0,89	-3,42	0,54	-2,05	6,48	-7,26
3	10,3	-0,84	-0,42	-5,15	0,25	-3,09	10,13	-9,08
4	10,65	0,58	0,29	-5,32	-0,17	3,19	10,77	-7,94
5	7,71	1,77	0,88	-3,86	-0,53	-2,31	8,07	-4,40
6	3,06	1,89	0,94	-1,53	-0,57	-0,92	3,44	-0,56
7	0	0	0	0	0	0	0	0

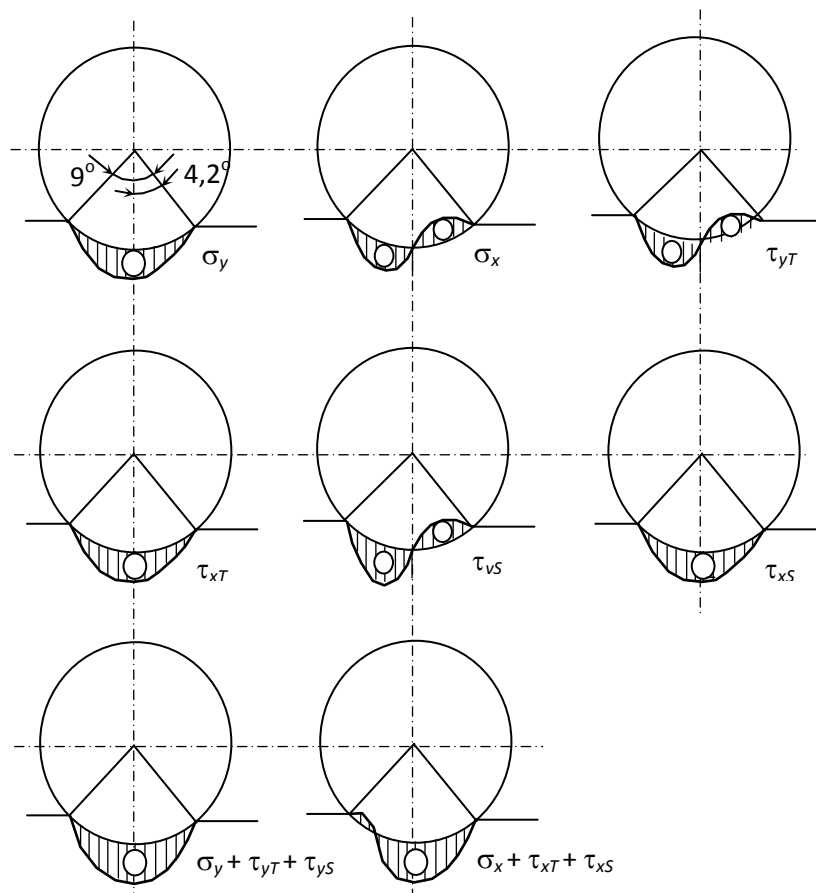


Рис. 5.16. Распределение напряжений под ведомым вальцом катка:

- σ_{Qy} – эпюра вертикальных составляющих нормальных напряжений;
- σ_{Qx} – эпюра горизонтальных составляющих нормальных напряжений;
- τ_{Fy} – эпюра вертикальных составляющих касательных напряжений;
- τ_{Fx} – эпюра горизонтальных составляющих касательных напряжений;
- совмещенная эпюра вертикальных напряжений;
- совмещенная эпюра горизонтальных напряжений

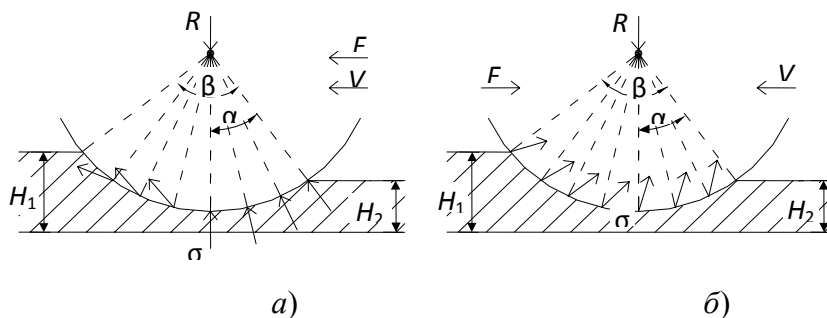
Наибольшее смещение равнодействующей нормальных напряжений наблюдается при первых проходах вальца катка. По мере повышения деформативной способности материала смещение эпюры от оси вальца катка уменьшается. Если учесть, что отношение расстояния от результирующей сжимающих напряжений до оси движения вальца к его радиусу (Δ/r_d) принимают за коэффициент сопротивления движению, то полученные результаты подтверждаются исследованиями других авторов [5, 10, 18, 23].

Для повышения ровности покрытия при строительстве дорог существующими рекомендациями предусматривается первые проходы катка после укладки смеси производить ведущим вальцом [22, 27, 48, 73]. Полученное уравнение распределения напряжений в зоне контакта вальца катка при уплотнении дорожных одежд позволяет уточнить физику процесса волнообразования на поверхности покрытия в зависимости от параметров уплотняющих машин и свойств материала. В зависимости от приложения сил к вальцу (ведомый или ведущий) наблюдается различие в совмещенных эпюрах горизонтальных напряжений. Совмещенная эпюра горизонтальных напряжений под ведомым вальцом катка смещена в сторону движения катка, и при превышении горизонтальными напряжениями предела прочности материала на сдвиг происходит смещение материала перед вальцом катка, что приводит к образованию неровностей на поверхности уплотняемого материала при движении вальца, что отмечается многими исследователями [22, 27, 48, 73]. В начальный момент контакта ведомого вальца катка результирующая напряжений направлена к поверхности уплотняемого слоя, что способствует перемещению материала перед вальцом и образованию валика на поверхности дорожной одежды. С увеличением угла контакта вальца с уплотняемым материалом результирующая напряжений направлена под меньшим углом к поверхности слоя в сторону движения катка, что способствует перемещению материала перед вальцом. При достижении горизонтальными напряжениями величины, превышающей предел прочности материала на сдвиг, наблюдается перемещение материала перед вальцом, т.е. происходит процесс волнообразования. При взаимодействии ведущего вальца с материалом суммарные горизонтальные напряжения в зоне контакта имеют направление против движения вальца, что способствует перемещению частиц уплотняемого материала в зону действия сжимающих сил. Следует отметить, что и при работе ведущего вальца, но несоответствии силовых параметров катка деформативной способности материала, возникают горизонтальные напряжения, направление действия которых соответствует направлению перемещения вальца катка, и тем самым способствуют смещению материала перед вальцом, что подтверждается экспериментальными исследованиями. Величина угла, характеризующего смещение материала перед ведущим вальцом катка, зависит от соответствия параметров уплотняющей машины свойствам уплотняемого материала и увеличивается с ростом полной деформации материала. В таблице 5.3 приведены данные, соответствующие взаимодействию ведущего вальца катка при незначительной деформативной способности уплотняемого материала.

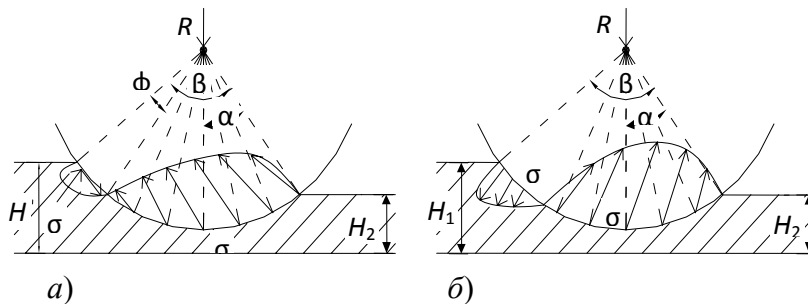
**5.3. Распределение контактных напряжений
под ведущим валцом катка (мелкозернистый асфальтобетон, толщина слоя 0,08 м, каток ДУ-47Б)**

Угол контакта	σ_y	σ_x	τ_y	τ_x	σ_S	τ_S	$\sigma_y + \tau_x + \sigma_S$	$\sigma_x + \tau_y + \tau_S$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-1,55	0,18	0,09	0,78	-0,05	0,47	-1,52	1,42
2	-0,94	0,09	0,04	0,47	-0,03	0,28	-0,92	0,84
3	1,03	-0,09	-0,05	-0,51	0,03	-0,31	1,01	-0,92
4	3,61	-0,24	-0,12	-1,8	0,07	-1,08	3,56	-3,12
5	6,14	-0,27	-0,14	-3,7	0,08	-1,84	6,08	-5,18
6	8,02	-1,18	-0,09	-4,01	0,06	-2,41	7,99	-6,6
7	8,75	0,0	0,0	-4,38	0,0	-2,63	8,75	-7,0
8	7,89	0,19	0,1	-3,94	-0,06	-2,37	7,93	-6,2
9	5,07	0,26	0,13	-2,53	-0,08	-1,52	5,12	-3,8
10	0	0	0	0	0	0	0	0

При взаимодействии ведущего валца катка результирующая контактных напряжений направлена против движения катка, способствует перемещению частиц материала в зону действия валца и прижимает частицу материала к слою материала, имеющему более высокий модуль деформации. Распределение контактных напряжений под ведомым и ведущим валцами катка представлено на рис. 5.17.



**Рис. 5.17. Распределение касательных напряжений под валцами катка при соотношении $\alpha / \beta = 0,48$:
а – ведомый; б – ведущий**



**Рис 5.18. Распределение напряжений под валцами катков при соотношении $\alpha / \beta = 0,2...0,4$:
а – ведомый; б – ведущий**

Анализ результатов расчета контактных напряжений под ведущим вальцом катка позволяет сделать вывод что при несоответствии силовых параметров катка деформативной способности материала в начале контакта вальца возникают напряжения, направленные в сторону движения вальца. Это способствует перемещению материала из зоны контакта вальца в сторону движения, что приводит к образованию неровностей на уплотняемой поверхности. Характер распределения контактных напряжений под вальцами катков представлен на рис. 5.18.

Представленные результаты расчетов показывают, что несоответствие параметров уплотняющих машин свойствам материала приводит к образованию неровностей на поверхности покрытия даже при работе катков с ведущими вальцами. Из опыта строительства дорожных одежд известно, что для обеспечения требуемых показателей качества уплотнения каток должен выполнить заданное количество проходов по одному следу при условии соответствия его параметров свойствам уплотняемого материала. На рисунке 5.19 представлены зависимости контактных напряжений под вальцом катка от числа его проходов при уплотнении разных материалов. Из представленных данных видно, что с увеличением числа проходов за счет повышения деформативной способности материала и уменьшения контактной поверхности напряжения под вальцом катка увеличиваются. С увеличением числа проходов и достижением постоянной площади контакта величина контактных напряжений стабилизируется.

Используя полученную зависимость угла контакта вальца от модуля деформации уплотняемого материала, на рис. 5.20 представлена зависимость максимальных контактных напряжений от деформативной способности материала.

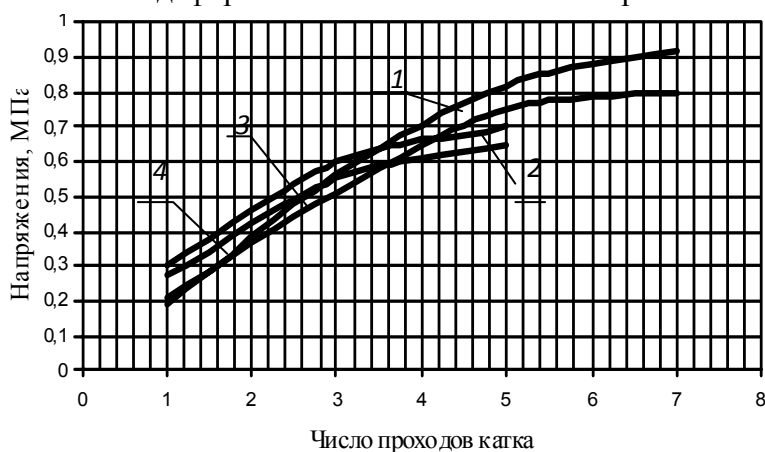


Рис. 5.19. Изменение контактных напряжений от числа проходов катка:

- 1 – экспериментальные значения по данным А.К. Бируля, грунт – тяжелый чернозем, линейное давление вальца 58 кг/см, радиус вальца 0,8 м [10];
- 2 – расчетные напряжения по предлагаемой зависимости;
- 3 – по данным эксперимента, мелкозернистый асфальтобетон, линейное давление вальца 9,6 кг/см, радиус вальца 0,365 м;
- 4 – расчетные значения

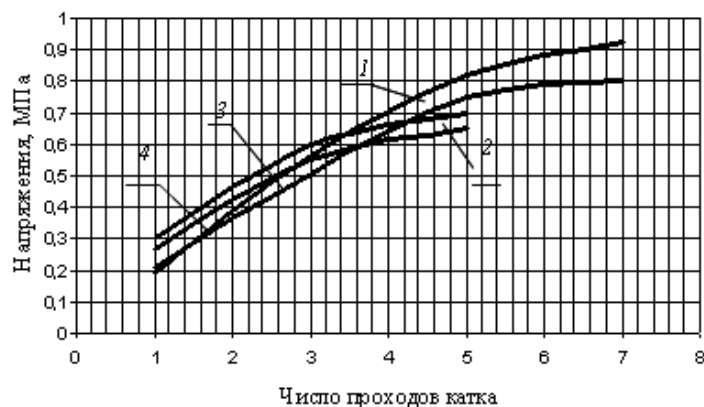


Рис. 5.20. Зависимость максимальных контактных напряжений под вальцом катка ДУ-47Б в зависимости от модуля деформации материала:
 1, 6 – нормальные и касательные напряжения, грунт;
 2 и 4 – соответственно при уплотнении крупнозернистого асфальтобетона;
 3, 5 – при мелкозернистом асфальтобетоне

Из представленных результатов видно, что с увеличением деформативной способности материала напряжения под вальцом катка возрастают, причем с увеличением модуля деформации на порядок напряжения увеличиваются в три раза. Полученные результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными и доказывают, что для достижения требуемых показателей уплотнения необходимо применять катки с разными силовыми факторами. Влияние силового фактора на величину контактных напряжений под вальцом катка представлено на рис. 5.21.

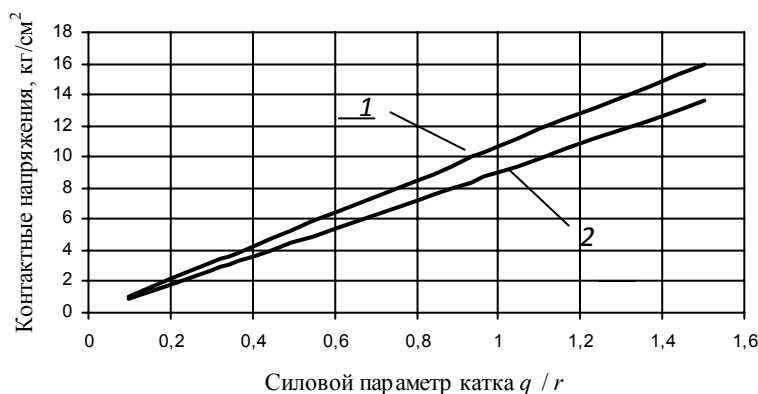


Рис. 5.21. Зависимость контактных напряжений под ведущим вальцом катка от силового параметра q/r :
 1 – напряжения сжатия; 2 – касательные напряжения

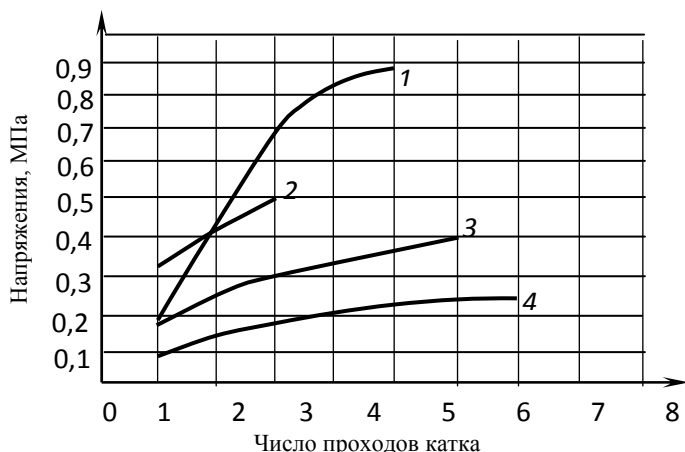


Рис. 5.22. Зависимость нормальных напряжений под ведущим вальцом катка от числа проходов:

1, 2 – по данным А.К. Бируля (1 – грунт, 2 – асфальтобетон);

3 – по данным производственного эксперимента (грунт – суглинок, каток ДУ-47А); 4 – по данным В.В. Бадалова (грунт – глина, каток ДУ-36)

Из рисунка 5.21 видно, что между силовым воздействием вальца на уплотняемый материал и развиваемыми контактными напряжениями существует линейная зависимость. Это еще раз доказывает, что выбор параметров катков необходимо производить с учетом прочностных свойств уплотняемого материала. Анализ результатов расчета по предлагаемым зависимостям показывает хорошую сходимость с результатами производственных и лабораторных исследований.

Используя данные, представленные в работах [7, 10], получены значения напряжений под ведущим вальцом катков при уплотнении различных материалов. Результаты расчетов максимальных нормальных напряжений по предлагаемым зависимостям для указанных катков представлены на рис. 5.22.

5.5. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТКА НА ХАРАКТЕР КОЛЕБАНИЙ ВИБРАЦИОННОГО ВАЛЬЦА КАТКА

Уплотняющая способность вибрационного катка и эффективность его работы зависят от статических параметров катка, свойств уплотняемого материала и параметров вибрации. При одних и тех же параметрах катка и разных свойствах уплотняемого материала перемещение вальца под действием вынуждающей силы происходит как в непрерывном контакте с уплотняемой поверхностью, так и с отрывом, что соответствует разным режимам работы катка. При работе в виброударном режиме движение вальца можно разделить на два этапа: движение в воздухе и движение в контакте с материалом. При рассмотрении процесса уплотнения вибрационными катками для упрощения расчетов принимают, что валец работает без отрыва от поверхности уплотняемого слоя. С учетом нарушения контакта вальца с поверхностью уплотняемого материала расчетную схему можно представить как двухмассную систему, опирающуюся на упругий ограничитель. Валец совершает колебательное движение под действием гармонической вынуждающей силы. Ограничитель представляет собой бесконечное множество не связанных между собой пружин. Расчетная схема представлена на рис. 5.23, где m_1 – масса части рамы катка, передающееся на валец; m_2 – масса вибрационного вальца; c_1 – коэффициент жесткости амортизаторов; g – ускорение силы тяжести; N – сопротивление перемещению вальца; P – амплитуда вынуждающей силы; φ – начальный угол.

Перемещение вибрационного вальца и рамы катка под действием приложенных сил

представлено уравнениями:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) = m_1 g; \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1(x_2 - x_1) = P \cos(\omega t + \varphi) + N + m_2 g. \end{cases} \quad (5.21)$$

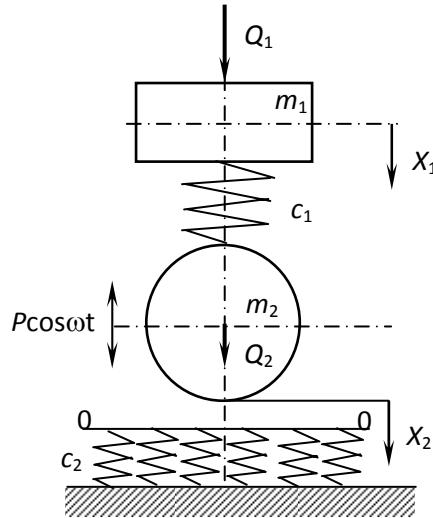


Рис. 5.23. Расчетная схема самоходного вибрационного катка

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

$$\begin{cases} \text{при } t = t_0 \quad x_1 = 0, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{10}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{20}; \\ \text{при } t = t_1 \quad x_1 = x_{t_1}, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{20}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{21}. \end{cases} \quad (5.22)$$

Сила сопротивления N перемещению вальца зависит от участка движения, т.е.

$$N = \begin{cases} 0 & \text{при } x_2 < 0; \\ -c_2 x_2 & \text{при } x_2 > 0, \end{cases}$$

где c_2 – коэффициент жесткости уплотняемого материала.

Сила сопротивления N определяется из условия равновесия сил, действующих на валец. Расчетная схема для определения силы сопротивления N представлена на рис. 5.24 [23], где P – сопротивление ограничителя вдавливания единичной площадки; b – ширина площадки; ds – длина площадки.

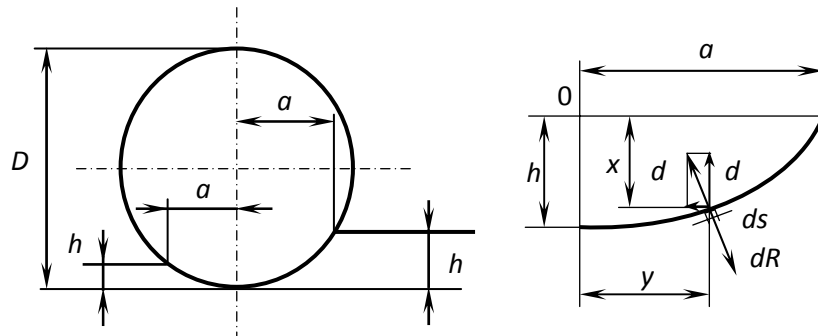


Рис. 5.24. Схема для определения силы сопротивления ограничителя при вдавливании вальца

Полное сопротивление ограничителя вдавливанию цилиндрического штампа равно [42, 57]:

$$N = \int_{-a_1}^{a_2} P b dy . \quad (5.23)$$

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

$$P = cx^\mu , \quad (5.24)$$

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

Установлено, что при скорости движения 2...3 км/ч зоной упругого контакта с вальцом можно пренебречь. Тогда выражение для определения сопротивления ограничителя вдавливанию может быть приведено к виду

$$N = cbx^\mu \left(1 - \frac{\mu}{3} \right) \sqrt{Dx} . \quad (5.25)$$

Экспериментально доказано, что при значениях $\mu = 0,5$ расчетные значения соответствуют экспериментальным данным. С учетом этого зависимость имеет вид:

$$N = \frac{5}{6} cbx\sqrt{D} = kx , \quad (5.26)$$

где $k = \frac{5}{6} cb\sqrt{D}$; D – диаметр вальца; b – ширина вальца.

Из представленного выражения видно, что величина сопротивления вдавливанию цилиндрического штампа зависит от глубины вдавливания и диаметра штампа. Дифференциальные уравнения с учетом рассматриваемого этапа движения имеют вид:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) = Q_1; \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1(x_2 - x_1) + c_2 x_2 = P \cos(\omega t + \varphi) + Q_2; \end{cases} \quad (5.27)$$

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) = Q_1; \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1(x_2 - x_1) = P \cos(\omega t + \varphi) + Q_2. \end{cases} \quad (5.28)$$

Система уравнений (5.27) описывает движение системы в контакте с уплотняемым материалом, система уравнений (5.28) соответствует системе при отрыве вальца от поверхности уплотняемого материала.

Граничные условия для системы уравнений (5.27) имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } t = t_0 \quad x_1 = 0, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{10}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{20}; \\ \text{при } t = t_1 \quad x_1 = x_{\tau_1}, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{20}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{21}. \end{array} \right. \quad (5.29)$$

Для системы уравнений (5.28) соответственно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } t = t_1 \quad x_1 = x_{\tau_1}, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{11}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{21}; \\ \text{при } t = t_2 \quad x_1 = x_{\tau_2}, \quad \dot{x}_1 = \dot{x}_{12}, \\ \quad \quad \quad x_2 = 0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_{22}. \end{array} \right. \quad (5.30)$$

Рассмотрим движение системы по этапам. Для упрощения вывода зависимостей введем безразмерные переменные:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = \frac{m_1 \omega^2}{P} x_1; \\ y_2 = \frac{m_2 \omega^2}{P} x_2; \\ \tau = \omega t. \end{array} \right. \quad (5.31)$$

Тогда система уравнений (5.27) примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{y}_1 + \varepsilon_{11}^2 y_1 - \varepsilon_{12}^2 y_2 = P_1; \\ \ddot{y}_2 + \varepsilon_{12}^2 y_2 - \varepsilon_{11}^2 y_1 + \varepsilon_{22}^2 y_2 = P_2 + \cos(\tau + \varphi), \end{array} \right. \quad (5.32)$$

где $\varepsilon_{11}^2 = \frac{c_1}{m_1 \omega^2}$; $\varepsilon_{22}^2 = \frac{c_2}{m_2 \omega^2}$; $\varepsilon_{12}^2 = \frac{c_1}{m_2 \omega^2}$; $P_1 = \frac{Q_1}{P}$; $P_2 = \frac{Q_2}{P}$.

Граничные условия в новых переменных определяются в виде:

$$\begin{array}{l} \text{при } \tau = \tau_0 \quad y_1 = 0, \quad \dot{y}_1 = \dot{y}_{10}, \\ \quad \quad \quad y_2 = 0, \quad \dot{y}_2 = \dot{y}_{20}. \end{array}$$

Установлено, что в зависимости от параметров вибрации возможны различные режимы колебания вальца катка. При виброударном уплотнении материала практический интерес представляет случай одноударного периодического движения, когда за один оборот вынуждающей силы происходит один удар вальца по уплотняемому материалу.

Общее решение системы уравнений (5.32) имеет вид:

$$\begin{aligned} y_{1в} &= A_1 + B_1 \cos(\tau + \varphi) + c_1 \sin \varepsilon_{01} \tau + D_1 \cos \varepsilon_{01} \tau; \\ y_{2в} &= A_2 + B_2 \cos(\tau + \varphi) + c_2 \sin \varepsilon_{02} \tau + D_2 \cos \varepsilon_{02} \tau, \end{aligned} \quad (5.33)$$

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

Решение системы уравнений для этапа вдавливания вальца в уплотняемый материал имеет вид:

$$\begin{aligned} y_{1в} &= \frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{22}^2 - 1} + \frac{P_1 (\varepsilon_{22}^2 - \varepsilon_{12}^2) - P_2 \varepsilon_{12}^2}{\varepsilon_{12}^2 \varepsilon_{22}^2} (1 - \cos \varepsilon_{01} \tau) + \\ &+ \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau - \varepsilon_{01} \cos \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau)}{\left[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1 \right] \varepsilon_{01}} + \frac{\dot{y}_{20} \sin \varepsilon_{01} \tau}{\varepsilon_{01}}; \\ y_{2в} &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \cos(\tau + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} - \frac{(P_1 + P_2 X 1 + \cos \varepsilon_{02} \tau)}{\varepsilon_{22}^2} + \frac{\dot{y}_{20} \sin \varepsilon_{02} \tau}{\varepsilon_{02}} + \\ &+ \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) X \sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau}{\left[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1 \right] \varepsilon_{02}}. \end{aligned} \quad (5.34)$$

Соответственно скорости движения системы определяются выражениями:

$$\begin{aligned} y_{1в} &= \frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{22}^2 - 1} + \frac{P_1 (\varepsilon_{22}^2 - \varepsilon_{12}^2) - P_2 \varepsilon_{12}^2}{\varepsilon_{12}^2 \varepsilon_{22}^2} (1 - \cos \varepsilon_{01} \tau) + \\ &+ \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau - \varepsilon_{01} \cos \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau)}{\left[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1 \right] \varepsilon_{01}} + \frac{\dot{y}_{20} \sin \varepsilon_{01} \tau}{\varepsilon_{01}}; \\ y_{2в} &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \cos(\tau + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} - \frac{(P_1 + P_2 X 1 + \cos \varepsilon_{02} \tau)}{\varepsilon_{22}^2} + \frac{\dot{y}_{20} \sin \varepsilon_{02} \tau}{\varepsilon_{02}} + \\ &+ \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) X \sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau}{\left[\varepsilon_{22}^2 (\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1 \right] \varepsilon_{02}}. \end{aligned} \quad (5.35)$$

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

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 + \varepsilon_{11}^2 y_1 - \varepsilon_{12}^2 y_2 = P_1; \\ \ddot{y}_2 + \varepsilon_{12}^2 y_2 - \varepsilon_{11}^2 y_1 = P_2 + \cos(\tau + \varphi); \end{cases} \quad \begin{cases} \text{при } \tau = \tau_1 \quad y_1'' = y_{\tau_1}'', \quad \dot{y}_1 = \dot{y}_{12}'', \\ y_2'' = 0, \quad \dot{y}_2 = \dot{y}_{21}''; \\ \text{при } \tau = \tau_2 \quad y_1'' = y_{\tau_2}'', \quad \dot{y}_1 = \dot{y}_{12}'', \\ y_2'' = 0, \quad \dot{y}_2 = \dot{y}_{22}'' \end{cases} \quad (5.36)$$

В конечном виде решение системы дифференциальных уравнений имеет вид:

$$y_{1п} = \frac{\varepsilon_{12}^2 \cos(\tau + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau - \varepsilon_{01} \cos \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau)}{\varepsilon_{01} (1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2)} +$$

$$\begin{aligned}
& + \dot{y}_{12}(\tau - \tau_2) - \frac{P_1}{2}(\tau - \tau_2)^2; \\
y_{2n} = & \frac{(\varepsilon_{12}^2 - 1) \cos(\tau + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1)(\sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau)}{\varepsilon_{02}(1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2)} + \\
& + \dot{y}_{22}(\tau - \tau_2) - \frac{P_2}{2}(\tau - \tau_2)^2. \tag{5.37}
\end{aligned}$$

Соответственно скорости определяются:

$$\begin{aligned}
\dot{y}_{1n} = & \frac{\varepsilon_{12}^2 \sin(\tau + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{\varepsilon_{12}^2 (\sin \varphi \cos \varepsilon_{01} \tau + \varepsilon_{01} \cos \varphi \sin \varepsilon_{01} \tau)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \\
& + \dot{y}_{12} - P_1(\tau - \tau_2)^2; \\
y_{2n} = & \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \sin(\tau + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1)(\sin \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau + \varepsilon_{02} \cos \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \\
& + \dot{y}_{22} - P_2(\tau - \tau_2)^2. \tag{5.38}
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
& \text{при } \tau = \tau_1 \quad y_1^B = y_1^n, \quad \dot{y}_{11}^B = \dot{y}_{11}^n; \\
& y_2^B = y_2^n = 0, \quad \dot{y}_{21}^B = \dot{y}_{21}^n.
\end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
y_{2в} &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \cos(\tau_1 + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2(\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} - \frac{P_1 + P_2}{\varepsilon_{22}^2} (1 - \cos \varepsilon_{02} \tau_1) + \frac{\dot{y}_{20}}{\varepsilon_{02}} \sin \varepsilon_{01} \tau_1 + \\
&+ \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1)(\sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau_1 - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau_1)}{[\varepsilon_{22}^2(\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1] \varepsilon_{02}} = 0; \\
y_{2п} &= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \cos(\tau_1 + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1)(\sin \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau_1 - \varepsilon_{02} \cos \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau_1)}{(1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2) \varepsilon_{02}} + \\
&+ \dot{y}_{22}(\tau_1 - \tau_2) - \frac{P_2}{2}(\tau_1 - \tau_2)^2 = 0; \\
&- \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \sin(\tau_1 + \varphi)}{\varepsilon_{22}^2(\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} + \frac{(P_1 + P_2) \varepsilon_{02} \sin \varepsilon_{02} \tau_1}{\varepsilon_{22}} + \\
&+ \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1)(\sin \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau_1 + \varepsilon_{02} \cos \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau_1)}{\varepsilon_{22}^2(\varepsilon_{11}^2 - 1) - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2 + 1} + \dot{y}_{20} \cos \varepsilon_{02} \tau_1 = \\
&= \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1) \sin(\tau_1 + \varphi)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \frac{(\varepsilon_{11}^2 - 1)(\sin \varphi \cos \varepsilon_{02} \tau_1 + \varepsilon_{02} \cos \varphi \sin \varepsilon_{02} \tau_1)}{1 - \varepsilon_{11}^2 - \varepsilon_{12}^2} + \\
&+ \dot{y}_{22} - P_2(\tau_1 - \tau_2). \tag{5.39}
\end{aligned}$$

Анализ показал, что полученные решения данной системы уравнений представляют трансцендентные уравнения, численное значение которых можно получить с использованием метода последовательных приближений. Исследование системы уравнений аналитическим методом трудоемко, а определение областей устойчивых колебаний вообще не представляется целесообразным из-за сложности получающихся уравнений.

Эффективным методом исследования таких систем является моделирование на электронных аналоговых машинах. Это позволяет получить частные решения, что дает возможность установить общую картину возможных перемещений системы. На основании полученных решений установлены границы устойчивых колебаний вальца при разных параметрах вибрации. С практической точки зрения наибольший интерес представляют одноударные колебания с периодом, равным периоду возмущающей силы. При таком режиме работы вибрационного вальца достигается максимальный эффект при уплотнении. Области существования более сложных движений довольно узки, что не позволяет с достаточной точностью определить границы между ними. На рисунке 5.25 представлены области устойчивых одноударных колебаний с периодом, равным периоду возмущающей силы, при соотношении масс, равным единице. Область A соответствует движению вибрационного вальца без отрыва от поверхности уплотняемого материала. Работа без отрыва возможна в случае, когда $A_2 < \delta$, где

$$A_2 = \frac{P(c_1 - m_1 \omega^2)}{(c_1 + c_2 - m_2 \omega^2)(c_1 - m_1 \omega^2) - c_1^2}, \quad \delta = \frac{Q_1 + Q_2}{c_2}. \tag{5.40}$$

Граница этой области определяется выражением:

$$\frac{P}{Q_1 + Q_2} = P_0 \leq \frac{(c_1 + c_2 - m_2 \omega^2)(c_1 - m_1 \omega^2) - c_1^2}{c_2(c_1 - m_1 \omega^2)}, \tag{5.41}$$

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

В области B вибратор осуществляет одноударные движения с периодом, равным периоду возмущающей силы. Область B соответствует более сложным колебаниям системы.

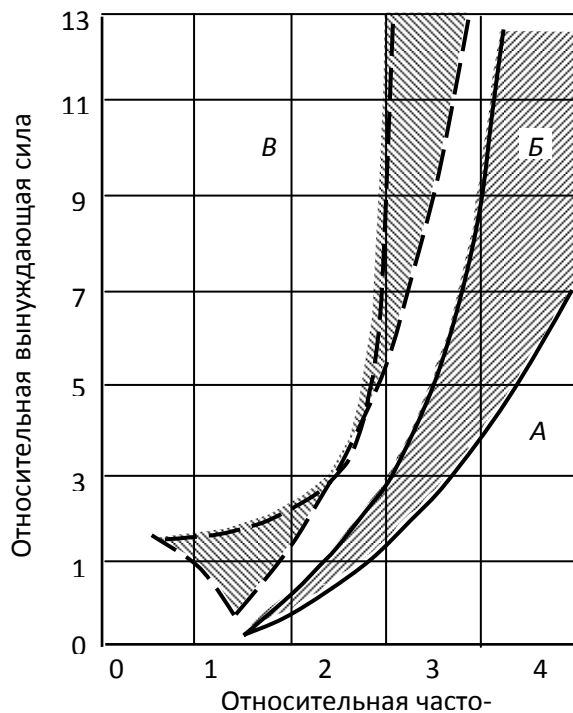


Рис. 5.25. Области устойчивых одноударных колебаний

Представляет практический интерес сравнение установленных областей устойчивых движений системы с результатами исследований О.А. Савинова и С.А. Осмакова, полученными для колебательной системы из одной массы. Сравнение полученных результатов представлено на рис. 5.25 пунктирными линиями. Из представленных данных видно совпадение областей существования и устойчивости таких колебаний. Различие наблюдается в смещении области устойчивых колебаний в сторону увеличения относительной частоты колебаний. Наличие подрессоренной верхней массы расширяет зону одноударных колебаний с периодом, равным периоду возмущающей силы.

Моделирование процесса взаимодействия вибрационного вальца катка с материалом, обладающим упруговязкими свойствами, показало, что наличие вязких свойств у уплотняемого материала способствует расширению области одноударных периодических колебаний. В результате воздействия рабочих органов машины изменяется модуль деформации материала, что способствует изменению свойств материала сопротивляться внешней нагрузке. Изменение сопротивляемости материала внешней нагрузке, при постоянных параметрах вибрации, влияет на характер движения системы. По результатам моделирования установлена область существования и устойчивости одноударных колебаний с периодом, равным периоду возмущающей силы при постоянной частоте колебаний. Результаты представлены на рис. 5.26 и 5.27.

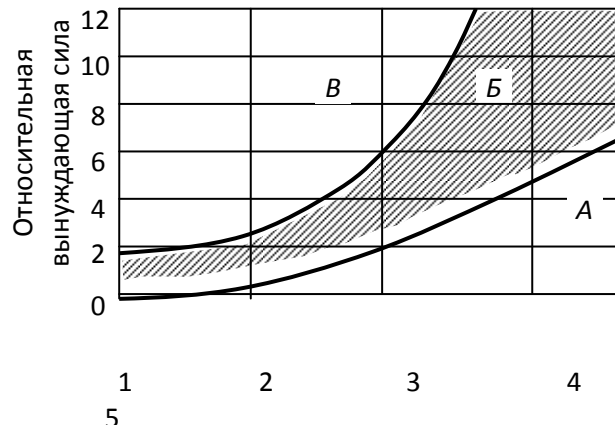


Рис. 5.26. Область существования и устойчивости одноударных периодических колебаний с периодом вынуждающей силы

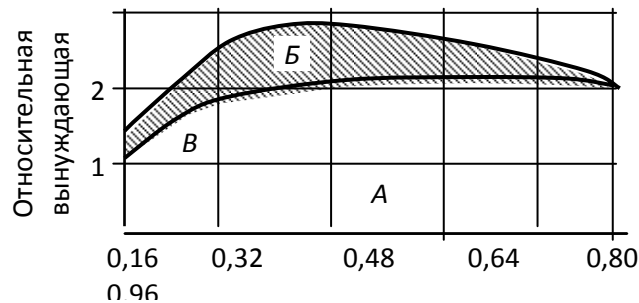


Рис. 5.27. Область существования и устойчивости одноударных периодических колебаний с периодом вынуждающей силы при постоянной частоте колебаний

Таким образом, на основании анализа данной расчетной схемы можно отметить, что наличие диссипативных сопротивлений не влияет существенно на область устойчивых одноударных периодических колебаний вибрационного вальца катка. Различие наблюдается лишь в области низких частот, т.е. при $\omega/\omega_0 < 2$. При введении вязкого сопротивления и при низких частотах расширяется область одноударных колебаний с периодом, равным периоду вынуждающей силы. Кроме того, наличие вязкого сопротивления расширяет область одноударных колебаний с периодом, равным периоду вынуждающей силы. Это имеет место при постоянной частоте колебаний, а также и при изменяющейся деформативной способности уплотняемого материала.

5.6. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ВАЛЬЦОМ ВИБРАЦИОННОГО КАТКА

Анализ конструкций выпускаемых вибрационных катков может быть представлен схемами, изображенными на рис. 5.28. Выпуск моделей катков показывает, что наибольший процент приходится на традиционную схему, когда вибрационный валец является ведущим (42 %), а управляемый валец – статического действия. За последние 10 – 15 лет широкое распространение получили катки с обеими вибрационными и ведущими вальцами, когда они одновременно являются и управляемыми (3 %). Параметры вибрации оказывают влияние на сцепные качества ведущего вальца и приводят к потере управляемости ведомого вальца, когда он является вибрационным. Поэтому на практике ограничивают величину относительной возму-

щающей силы катка, что приводит к снижению эффективности воздействия катка на уплотняемый материал. Установлено, что наилучший эффект воздействия вальца достигается в том случае, когда валец работает в виброударном режиме и за одно колебание происходит один удар вальца о поверхность уплотняемого материала. Схема взаимодействия вибрационного вальца с уплотняемым материалом аналогична схеме взаимодействия вальца катка статического действия. Различие заключается в действии силовых факторов, которые для вибрационного вальца имеют вид:

$$R = \frac{Q - (P - M A \omega^2) \cos \omega t}{Br}; \quad F = \frac{T - (P - M A \omega^2) \sin \omega t}{Br}, \quad (5.42)$$

где R и F – величины, характеризующие силовое воздействие вибрационного вальца на уплотняемый материал от вертикальных и горизонтальных сил; P – величина вынуждающей силы; ω – частота колебаний вынуждающей силы, рад/с; t – время, с; M – масса вальца и приходящейся на него нагрузки от рамы катка; A – амплитуда колебаний вальца, м.

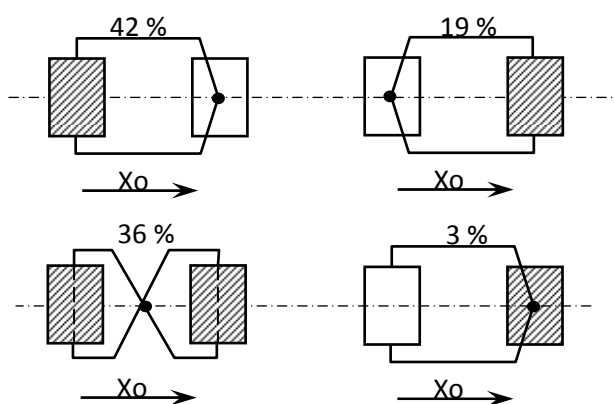


Рис. 5.28. Основные конструктивные схемы вибрационных катков

В процессе динамического действия возмущающей силы величина коэффициента $\varphi_{\text{ст}}$ в отличие от вальца статического действия не является величиной постоянной и зависит от параметров вибрации, так же как и коэффициент сопротивления движению, что усложняет определение напряжений в контактируемой зоне вибрационного вальца.

Используя те же приемы, что и для определения контактных напряжений под вальцом катка статического действия, получены аналитические зависимости для расчета контактных напряжений под вальцом катка вибрационного действия, которые имеют вид:

– для ведомого вальца

$$\sigma_y = (A_1 \varphi + A_2 \varphi^2 + A_3 \varphi^3 + A_4 \varphi^4) / \Delta,$$

$$\tau_{yF} = (D_1 \varphi + D_2 \varphi^2 + D_3 \varphi^3 + D_4 \varphi^4) / \Delta,$$

$$\sigma_x = (B_1 \varphi + B_2 \varphi^2 + B_3 \varphi^3 + B_4 \varphi^4) / \Delta,$$

$$\tau_{xF} = (\Phi_1 \varphi + \Phi_2 \varphi^2 + \Phi_3 \varphi^3 + \Phi_4 \varphi^4) / \Delta; \quad (5.43)$$

– для ведущего вальца

$$\sigma_y = (A_1 \varphi + A_2 \varphi^2 + A_3 \varphi^3 + A_4 \varphi^4) / \Delta,$$

$$\tau_{xF} = (\Phi_1 \varphi + \Phi_2 \varphi^2 + \Phi_3 \varphi^3 + \Phi_4 \varphi^4) / \Delta,$$

$$\sigma_x = (B_1\varphi + B_2\varphi^2 + B_3\varphi^3 + B_4\varphi^4)/\Delta,$$

$$\sigma_{xS} = (z_1\varphi + z_2\varphi^2 + z_3\varphi^3 + z_4\varphi^4)/\Delta,$$

$$\tau_y = (D_1\varphi + D_2\varphi^2 + D_3\varphi^3 + D_4\varphi^4)/\Delta,$$

$$\sigma_{yS} = (O_1\varphi + O_2\varphi^2 + O_3\varphi^3 + O_4\varphi^4)/\Delta, \quad (5.44)$$

где $A_i, B_i, D_i, \Phi_i, S_i, O_i, Z_i$ – коэффициенты, зависящие от свойств материала и силовых параметров катка, численное значение которых определяется по установленным ранее зависимостям.

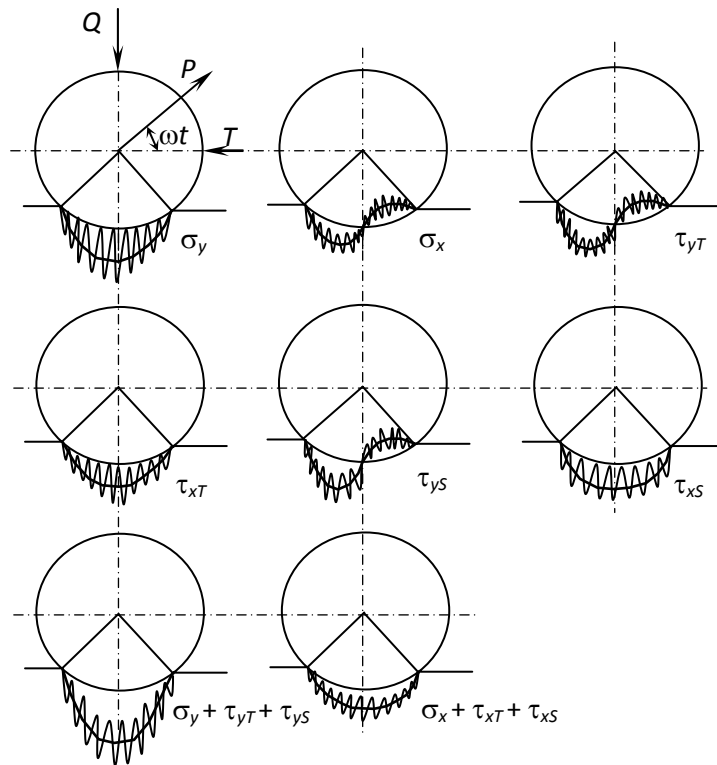


Рис. 5.29. Распределение контактных напряжений под вибрационным вальцом катка при относительной вынуждающей силе, равной единице

Из уравнений (5.43, 5.44) видно, что величина напряженного состояния материала зависит от параметров уплотняющих машин (R, F) и свойств уплотняемого материала, что подтверждается экспериментальными исследованиями. Для решения полученных уравнений использована программа на ЭВМ для расчета контактных напряжений под вальцом катка [36]. Результаты расчетов контактных напряжений под вибрационным вальцом катка при относительной возмущающей силе (P/Q), равной единице, представлены на рис. 5.29. Из представленных результатов видно, что величина контактных напряжений под вибрационным вальцом катка зависит от статических параметров катка и параметров вибрации. Составляющая контактных напряжений от параметров вибрации зависит от относительной вынуждающей силы и ее частоты, что соответствует данным экспериментальных исследований.

5.7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ВАЛЬЦОМ КАТКА ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Практика применения вибрационных катков при устройстве дорожных одежд показала, что они более эффективны по отношению к каткам статического действия, что и послужило основанием для широкого их применения в дорожном строительстве. В отличие от катков статического действия, уплотняющая способность которых определяется массой и геометрическими параметрами вальца, эффективность вибрационных катков зависит также от параметров вибрации, что позволяет расширить область их применения.

Установлено, что уплотняющая способность вибрационного катка растет с увеличением произведения $Qa\omega$, где Q – сила тяжести вибрационного вальца и передаваемой на него части рамы катка; ω – частота вынуждающей силы; a – амплитуда колебаний вальца. Так как максимальная амплитуда колебаний вальца по величине ограничена, а увеличение частоты колебаний вынуждающей силы свыше 50 Гц существенного влияния на качество уплотнения не оказывает, то повышение уплотняющей способности катка можно обеспечить за счет увеличения силы тяжести виброуплотнителя.

Эффективность работы катка определяется достигаемой плотностью уплотняемого материала, которая зависит от соответствия контактных напряжений прочностным характеристикам материала. На основании проведенных экспериментальных исследований Г.Н. Поповым предложена зависимость для определения максимальных контактных напряжений под вальцом прицепного вибрационного катка, которая имеет вид:

$$\sigma_k = \frac{k\dot{x}\sqrt{q}}{\tau_y\sqrt{R}}, \quad \text{кН/м}^2, \quad (5.45)$$

где q – линейное давление вальца, кН/м; \dot{x} – скорость вальца при ударе в момент соприкосновения с уплотняемой поверхностью, м/с; R – радиус вальца, м; k – коэффициент, определяемый по данным эксперимента; τ_y – время удара, с.

В данном виде применение предложенной зависимости для определения контактных напряжений представляет определенные сложности, поскольку входящие в выражение параметры (скорость, время контакта и коэффициент) зависят от частоты колебаний и относительной вынуждающей силы вальца. К тому же зависимость не учитывает свойств уплотняемого материала, которые влияют на характер колебаний вальца, а, следовательно, и на величину контактных напряжений.

Влияние относительной вынуждающей силы на величину контактных напряжений и достигаемую плотность материала под вальцом катка при уплотнении дорожных одежд представлено на рис. 5.30 [15, 66].

Из представленных данных видно, что с увеличением относительной вынуждающей силы от 1 до 2 наблюдается интенсивный рост контактных напряжений под вальцом катка, за счет которых происходит рост относительной плотности материала. Такая закономерность характерна для уплотнения дорожных одежд и асфальтобетонных покрытий. С увеличением относительной вынуждающей силы от двух до трех при уплотнении дорожных одежд с толщиной слоя 0,2...0,3 м наблюдается нарушение режима колебаний вальца, что способствует снижению достигаемой плотности материала. Такой эффект объясняется тем, что с ростом вынуждающей силы увеличивается амплитуда колебаний вальца. Валец катка работает в гармоническом режиме без отрыва от уплотняемой поверхности, что способствует росту плотности материала. При увеличении относительной вынуждающей силы от двух до трех меняется характер колебаний вальца, он становится неустойчивым и наблюдается некоторое снижение величины контактных напряжений. Отмечается нарушение контакта вальца и уменьшение времени действия вальца с уплотняемой поверхностью, что приводит к сниже-

нию достигаемой плотности материала [66].

При увеличении относительной вынуждающей силы выше четырех на величину напряжений влияет ударный импульс вальца, способствующий их росту. При таких параметрах значительно уменьшается время контакта вальца, что приводит к снижению достигаемой плотности материала. Следует отметить, что такая закономерность получена при уплотнении дорожных одежд со сравнительно большой толщиной слоя. При уплотнении дорожных покрытий толщина слоя значительно меньше, что влияет на характер колебаний вальца, а следовательно, и на величину контактных напряжений. Экспериментально установлено, что при уплотнении асфальтобетонных покрытий с небольшой толщиной слоя вибрационный валец при относительной вынуждающей силе, равной единице и выше, работает в виброударном режиме. С ростом относительной силы увеличивается импульс удара, что приводит к росту контактных напряжений и плотности материала. Исследованиями выявлено, что максимальная плотность при уплотнении асфальтобетонных смесей достигается при относительной вынуждающей силе, равной шести [15].



Рис. 5.30. Зависимость контактных напряжений и плотности от относительной вынуждающей силы:
1 – грунт; 2 – асфальтобетон

Для установления зависимости величины контактных напряжений от параметров вибрационного катка были проведены экспериментальные исследования. Исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с применением серийных уплотняющих машин. Толщина уплотняемого слоя составляла 0,05...0,10 м. На предварительно уплотнен-

ное основание укладывалась асфальтобетонная смесь. Толщина слоя в процессе экспериментов оставалась постоянной и равнялась 0,05...0,08 м. Температура смеси находилась в пределах 80...90 °С и контролировалась датчиками температуры. Датчики напряжений с гидропреобразователем закладывались в смесь на глубину 0,3...0,5 см от поверхности уплотняемого слоя. Тарировка датчиков напряжений проводилась в специальном устройстве с регулируемой температурой.

Установлено, что характер колебаний зависит от относительной вынуждающей силы и свойств материала. При уплотнении слоя покрытия, толщина которого превышает длину контакта вальца с материалом, нарушение контакта между вальцом и поверхностью материала происходит при относительной вынуждающей силе выше двух. При уплотнении асфальтобетонных смесей, когда толщина слоя соизмерима с длиной контакта вальца, вибрационный валец работает без нарушения контакта с уплотняемой поверхностью при относительной силе меньше единицы. С ростом вынуждающей силы амплитуда колебаний увеличивается. С увеличением относительной вынуждающей силы до 3–4 между амплитудой колебаний штампа и вынуждающей силой существует линейная зависимость. При дальнейшем увеличении относительной силы зависимость становится нелинейной. Такое положение можно считать действительным для увеличения относительной силы до 5. Аналогичный результат получен и при моделировании взаимодействия вибрационного вальца катка с уплотняемым материалом.

Зависимость характера колебаний вальца от относительной вынуждающей силы подтверждается результатами многих исследователей. С ростом относительной силы меняется характер колебаний вальца. Гармоническое движение переходит в беспорядочное. Время контакта вальца с поверхностью материала уменьшается, а время нахождения в воздухе увеличивается (рис. 5.31). Из представленных данных видно, что с ростом вынуждающей силы время нахождения вальца в воздухе увеличивается и начинает превышать полупериод колебания и при дальнейшем увеличении достигает одного, двух и более периодов.

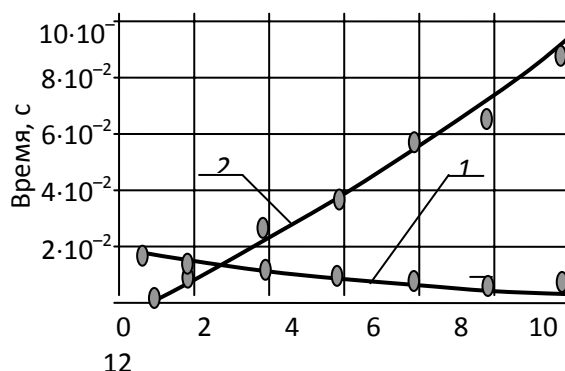


Рис. 5.31. Зависимость времени контакта и отрыва вальца от относительной возмущающей силы:

1 – время контакта; 2 – время отрыва вальца от поверхности

Это объясняется тем, что под действием силы амплитуда колебаний увеличивается и наступает момент, когда вибратор за время полупериода уже не успевает достигнуть поверхности слоя. Подвергаясь действию вынуждающей силы, он вновь перемещается вверх, увеличивая тем самым время нахождения вальца в отрыве от поверхности материала. Установлено, что при ударном взаимодействии рабочего органа с уплотняемым материалом большое значение имеет скорость в момент начала контакта с поверхностью слоя, так как она влияет на величину импульса удара, а следовательно, и напряжения, которые развиваются в уплотняемом слое. Поэтому одновременно с амплитудой колебаний вальца измерялась скорость перемещения. В результате обработки полученных данных установлена зависимость скорости вальца в момент

начала контакта с поверхностью материала от относительной вынуждающей силы. Результаты представлены на рис. 5.32. Из графика видно, что с увеличением относительной вынуждающей силы скорость в момент контакта (V_k) увеличивается и может быть определена по формуле

$$V_k = 10,85 \ln(P/Q) - 4,3, \text{ см/с.} \quad (5.46)$$

Коэффициент корреляции 0,98.

С увеличением вынуждающей силы увеличивается импульс удара, а следовательно, и напряжения в слое асфальтобетонной смеси. Установлена зависимость контактных напряжений от относительной силы, которая представлена на рис. 5.33. Значение контактного напряжения от относительной вынуждающей силы определяется выражением:

$$\sigma_k = 3 \ln(P/Q) + 2,03, \text{ МПа,} \quad (5.47)$$

где P/Q – относительная вынуждающая сила. Коэффициент корреляции равен 0,99.

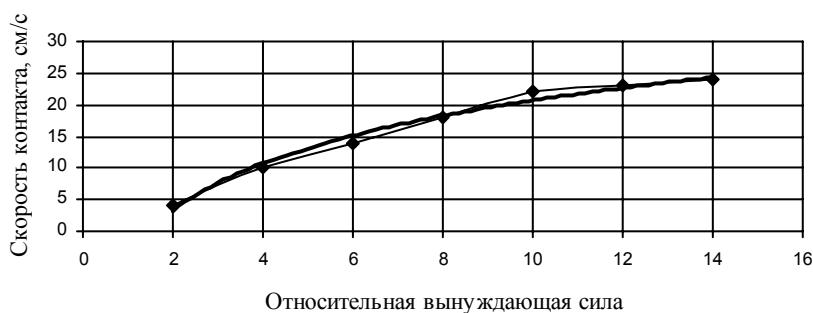


Рис. 5.32. Зависимость скорости контакта вальца от относительной вынуждающей силы



Рис. 5.33. Зависимость контактных напряжений от относительной вынуждающей силы:
 1 – линейное давление 3 кг/см; 2 – 6 кг/см

Из представленных данных видно, что контактные напряжения зависят не только от параметров вибрации, но и статического давления вальца. При малых линейных давлениях и высокой относительной силе можно получить значительные контактные напряжения. Однако уплотняющая способность катка в этом случае будет незначительная, поскольку характер распределения напряжений по толщине слоя подчиняется экспоненциальной зависимости. Поэтому статические параметры должны иметь достаточную массу, обеспечивающую уплотняющую способность катка. Установлено, что с увеличением линейного давления вальца уплотняющая способность катка возрастает. Результаты уплотнения грунта вибрационным катком в зависимости от линейного давления вальца представлены на рис. 5.34.

Из представленного рисунка видно, что обеспечение требуемого уплотнения возможно при достаточном линейном давлении вальца катка. С увеличением относительной вынуждающей силы время роста контактного давления уменьшается (рис. 5.35).

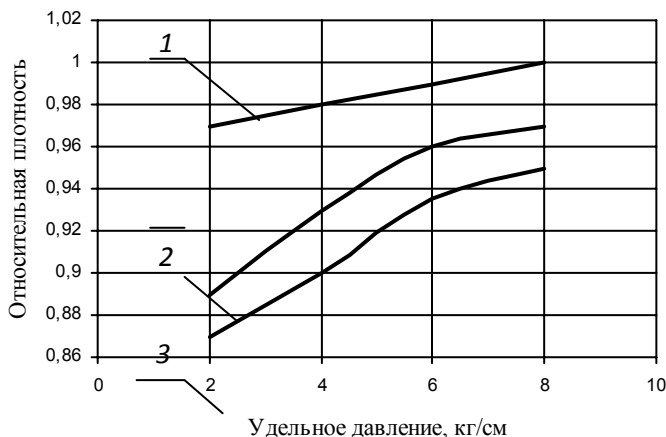


Рис. 5.34. Влияние удельного давления вальца на относительную плотность (при относительной вынуждающей силе, равной единице, частоте колебаний 50 Гц):
 1 — на глубине 0,05 м; 2 — 0,15 м; 3 — 0,25 м



Рис. 5.35. Зависимость времени увеличения напряженного состояния материала от относительной вынуждающей силы

Под временем увеличения напряженного состояния принято время изменения напряжения от момента контакта до его максимального значения. Из представленных данных видно, что время увеличения контактного давления уменьшается с увеличением относительной вынуждающей силы. Численное значение определяется зависимостью:

$$\tau_{ув} = -0,0026 \ln(P/Q) + 0,01, \text{ с}, \quad (5.48)$$

где $\tau_{ув}$ — время увеличения напряжения при одном цикле нагружения, с; P/Q — относительная вынуждающая сила. Коэффициент корреляции 0,95.



Рис. 5.36. Зависимость контактных давлений от скорости вальца в момент начала контакта с поверхностью уплотняемого материала

Из представленных данных видно, что скорость вальца в момент контакта и максимальное значение контактных напряжений зависят от величины относительной вынуждающей силы. На рисунке 5.36 представлена зависимость напряжений под вальцом катка от скорости в момент контакта с поверхностью материала. Из представленных данных видно, что между напряжениями и скоростью вальца в момент контакта существует линейная зависимость:

$$\sigma_{\max} = 0,042V_k + 0,039, \text{ МПа}, \quad (5.49)$$

V_k – скорость вальца в момент контакта с материалом, см/с; σ_{\max} – контактные напряжения, МПа. Коэффициент корреляции 0,99.

Известно, что при ударном уплотнении величина контактных напряжений под рабочим органом машины определяется зависимостью [67]:

$$\sigma_k = ai / \tau_y, \quad (5.50)$$

где a – определяемый на основании экспериментов безразмерный коэффициент; τ_y – время удара; i – удельный импульс, величина которого определяется:

$$i = V_k M / F, \quad (5.51)$$

где V_k – скорость в момент начала контакта вальца с материалом; M – масса вальца; F – площадь контакта.

Выражая массу штампа через силу тяжести и учитывая, что отношение силы тяжести штампа к площади контакта определяет величину контактных напряжений для вальца статического действия, значение удельного импульса для криволинейного штампа определяется:

$$i = \frac{\dot{x}}{g} \sqrt{\frac{qE}{R}}. \quad (5.52)$$

Подставляя значение удельного импульса, получаем зависимость для определения контактных напряжений под криволинейным штампом при действии ударной нагрузки:

$$\sigma_k = \frac{\dot{x}a}{g\tau_y} \sqrt{\frac{qE}{R}}, \quad (5.53)$$

где q – линейное давление криволинейного штампа; R – радиус кривизны; E – модуль де-

формации уплотняемого материала.

На основании экспериментальных данных определен безразмерный коэффициент a , значение которого зависит от относительной вынуждающей силы (рис. 5.37).

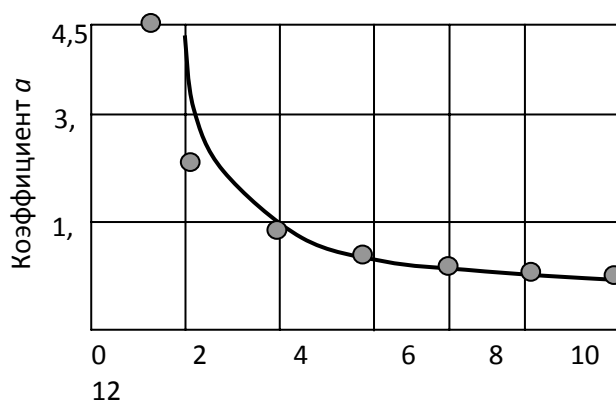


Рис. 5.37. Зависимость коэффициента a от относительной вынуждающей силы



Рис. 5.38. Влияние относительной вынуждающей силы на обобщающий коэффициент K_1

Анализ параметров, входящих в зависимость, показал, что часть параметров зависит от относительной вынуждающей силы. В результате обработки экспериментальных данных выявлен обобщающий коэффициент K_1 , зависящий от параметров вибрации. Зависимость K_1 от относительной вынуждающей силы представлена на рис. 5.38.

Из представленных данных видно, что значение коэффициента интенсивно растет с увеличением относительной силы до 6, а затем рост замедляется. Для расчета коэффициента K_1 от относительной вынуждающей силы предложена зависимость

$$K_1 = 1,66 + 1,31 \ln(P/Q). \quad (5.54)$$

Тогда в конечном виде зависимость для расчета контактных напряжений под вальцом вибрационного катка, работающим в виброударном режиме, имеет вид:

$$\sigma_k = K_1 \sqrt{\frac{qE}{R}}. \quad (5.55)$$

Анализ данного выражения показал, что предложенная зависимость применима при работе вибрационного катка в виброударном режиме и учитывает как статические параметры вальца, так и параметры вибрации. Анализ технических характеристик современных вибрационных катков показал, что их относительная вынуждающая сила выше единицы. Поэтому данная зависимость может быть предложена для расчета контактных напряжений при уплотнении горячих асфальтобетонных смесей с частотой колебаний вынуждающей силы 45...50 Гц и толщине уплотняемого слоя 5...7 см.

С целью уточнения распределения напряжений по ширине вальца были проведены опыты при строительстве покрытий в производственных условиях. Толщина уплотняемого слоя равнялась 6...7 см. Температура смеси, соответствующая измерению напряжений, равнялась 80...85 °С. Уплотнение песчаной смеси, уложенной на нижний слой покрытия из среднезернистой смеси, производилось вибрационным катком ДУ-10А. Измерение напряжений осуществлялось датчиками напряжений, которые закладывались на глубину 0,3...0,5 см от поверхности уплотняемого слоя. Установлено, что контактные напряжения по ширине вальца распределяются равномерно, что способствует получению одинаковой по ширине вальца плотности материала.

Для уточнения влияния жесткости основания на напряженное состояние уплотняемого материала были проведены экспериментальные исследования, которые проводились с глинистыми грунтами и песчаной асфальтобетонной смесью. Толщина уплотняемого слоя грунта составила 14 см и асфальтобетона 6 см в уплотненном состоянии. Датчики напряжений закладывались в рыхлый материал на разной глубине слоя. Конструкция стенда позволяла менять линейное давление вальца в интервалах от 2,5 до 8,2 кН/п. м, вынуждающую силу от 0 до 6 кН, подрессоренную массу до 120 кг. Частота колебаний составляла 48 Гц, диаметр вальца 0,5 м. После распределения материала производилось предварительное его уплотнение катком статического действия, после которого осуществлялось уплотнение вибрационным вальцом.

Распределение напряжений по глубине слоя при линейном давлении, равном 3 кН/п. м, и отношениях возмущающей силы к силе тяжести вальца, равных 0,86; 1,86; 3,26, представлено на рис. 5.39. Из представленных данных видно, что с увеличением вынуждающей силы напряжения возрастают и их характер распределения аналогичен распределению напряжений при статической нагрузке. В то же время с увеличением относительной силы перепад напряжений по толщине уплотняемого слоя увеличивается. Следовательно, повышение контактных давлений под вальцом катка за счет увеличения относительной вынуждающей силы в незначительной степени способствует повышению их эффективности. Из двух параметров катка: линейное давление и относительная вынуждающая сила, – определяющим является линейное давление. С увеличением линейного давления распределение плотности по толщине слоя становится более равномерным.

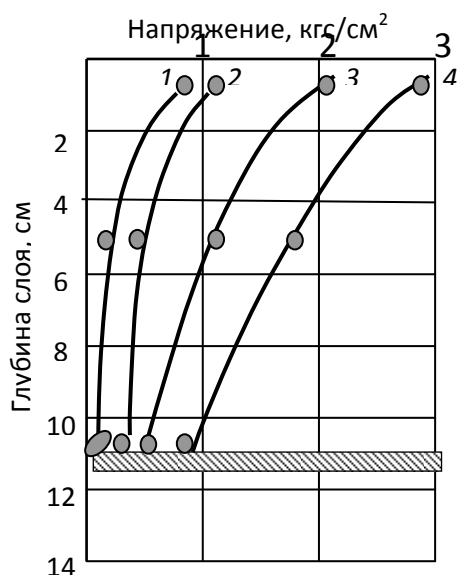


Рис. 5.39. Распределение напряжений по толщине слоя:

1 – статика, $q = 3$ кгс/см; 2 – при $P/Q = 0,86$;
3 – при $P/Q = 1,86$; 4 – при $P/Q = 3,26$

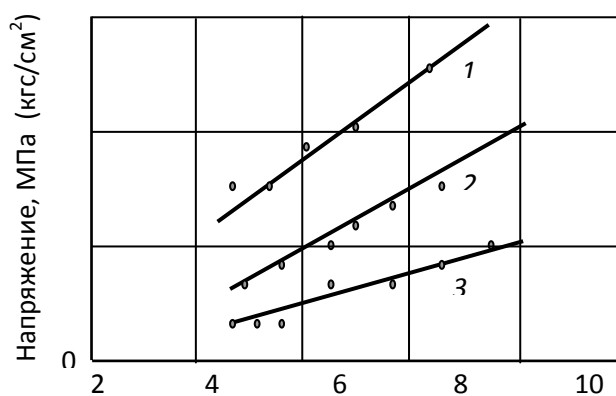


Рис. 5.40. Зависимость напряженного состояния слоя от линейного давления:

1 – контактное напряжение; 2 – напряжения на глубине слоя 5 см;
3 – напряжения на глубине слоя 11 см

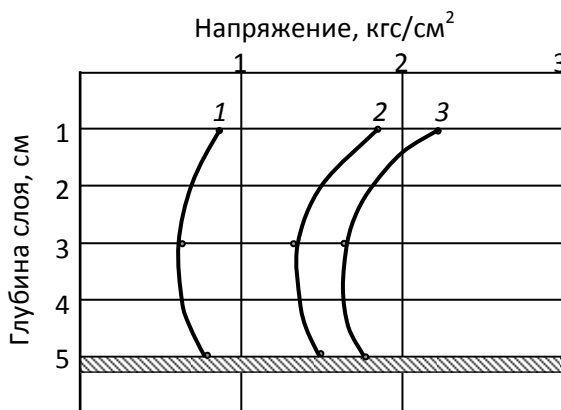


Рис. 5.41. Влияние жесткого основания на напряженное состояние слоя:

1 – статика, $q = 2,15$ кгс/см; 2 – $P/Q = 1,00$; 3 – $P/Q = 2,15$

С увеличением нагрузки на валец напряжения по толщине слоя возрастают и между ними существует линейная зависимость (рис. 5.40).

При уплотнении тонких слоев жесткое основание влияет на распределение напряжений по толщине слоя. На рисунке 5.41 представлено распределение напряжений по толщине верхнего слоя покрытия из смеси типа Г (битум марки БНД 90/130), температура смеси 80...85 °С, толщина уплотняемого слоя 0,04...0,08 м при уплотнении вибрационным катком с линейным давлением $q = 2,5$ кН/м и относительной вынуждающей силе 1,0 и 2,15. На основании этих данных можно сделать вывод, что при укладке тонких слоев наличие жесткого основания приводит к меньшему перепаду напряжений по глубине слоя, т.е. происходит выравнивание напряжений. Следует заметить, что представленные зависимости получены при незначительном линейном давлении.

С увеличением линейного давления вальца напряжения распределяются равномерно по всей глубине уплотняемого слоя. Установлено, что в случае уплотнения грунтового полупространства нормальные напряжения сжатия затухают с глубиной согласно закономерности Буссинеска. При уплотнении тонких слоев характер распределения напряжений меняется и наблюдается повышение напряжений на границе слой–основание. Такое явление может быть объяснено различием деформативных свойств уплотняемого слоя и нижележащего слоя. Следовательно, увеличение напряжений у основания наблюдается всегда при уплотнении тонких слоев. С увеличением толщины укладываемого слоя влияние основания уменьшается.

5.8. ВЫБОР ЗВЕНА УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ УПЛОТНЕНИЯ

Анализ применяемых технологий для устройства покрытий показал, что в звено уплотняющих машин назначают катки, отличающиеся как по массе, так и 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 [7, 48, 67].

Площадь контакта вальца при одной и той же массе катка и ширине вальца зависит от диаметра. С увеличением диаметра поверхность контакта вальца возрастает, что уменьшает силовое воздействие на уплотняемый материал, а следовательно, на достигаемую плотность асфальтобетона. По величине контактных напряжений, в первом приближении, сравнивают параметры катков. Такой сравнительный анализ параметров катков можно применять при одинаковом методе уплотнения. При назначении катков с разными методами уплотнения сравнение параметров необходимо проводить по необратимой деформации материала, величина которой характеризует не только силовое воздействие вальца, но и время действия нагрузки.

Вибрационный каток по уплотняющему эффекту заменяет более тяжелый каток статического действия. Известно, что характер колебаний вальца не влияет на качество уплотнения. С увеличением вынуждающей силы ходовые качества катка снижаются. Поэтому величина относительной вынуждающей силы в самоходных вибрационных катках ограничена.

Эффективность работы катка зависит от скорости передвижения. Увеличение рабочей скорости приводит к снижению достигаемой плотности покрытия и требует увеличения проходов по одному следу. Время действия нагрузки на частицу материала за один проход катка в статическом режиме при разных скоростях укатки составляет 0,2...0,4 с. Время действия нагрузки при работе вибрационного катка зависит также от относительной вынуждающей силы

и частоты колебаний. Объективным показателем, позволяющим сравнивать параметры катков между собою 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

$$t_k^B = t_k e^{-0,084(P/Q)}, \quad (5.56)$$

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 5.42 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 в зависимости от параметров вибрации катка и температуры смеси определяется из выражения:

$$\varepsilon_{отн} = 0,67e^{0,0007t + 0,0026\omega - 0,0756(P/Q)}, \quad (5.57)$$

где t – температура смеси, °С; ω – частота колебаний вальца, Гц; P/Q – относительная вынуждающая сила.

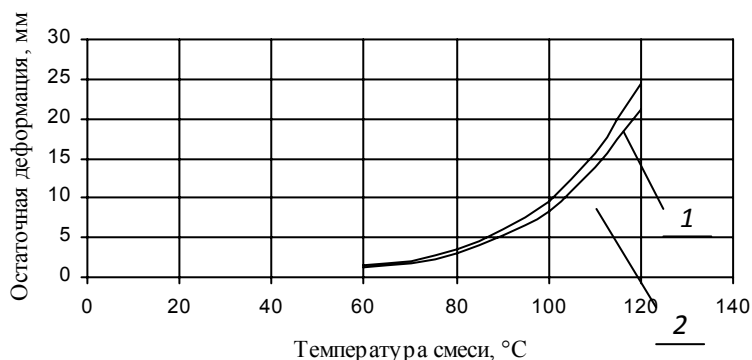


Рис. 5.42. Влияние температуры смеси на остаточную деформацию материала:

1 – каток статического действия; 2 – каток вибрационного действия (при относительной вынуждающей силе, равной 2, и частоте колебаний вальца 50 Гц)

При одинаковых контактных напряжениях под вальцами катков статического и вибрационного действия, соотношение между параметрами катков имеет вид:

$$\sqrt{q_1 E_1 / R_1} = \varepsilon_{отн} K_1 \sqrt{q_2 E_2 / R_2}, \quad \text{МПа}, \quad (5.58)$$

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 вы-

ражения:

$$K_1 = \varepsilon_{\text{отн}} (1,67 + 1,31 \ln (P/Q)), \quad (5.59)$$

$\varepsilon_{\text{отн}}$ – относительная деформация материала.

При работе на захватках с одинаковым модулем деформации уплотняемого материала и равных диаметрах вальцов соотношение имеет вид:

$$q_1 = K_2 q_2, \quad (5.60)$$

где K_2 – безразмерная величина, зависящая от параметров вибрации, определяется из выражения:

$$K_2 = \varepsilon_{\text{отн}}^2 (1,67 + 1,31 \ln(P/Q))^2. \quad (5.61)$$

Для определения соотношений по массе катков вибрационного и статического действия при равном модуле деформации зависимость имеет вид:

$$Q_1 = Q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 B_1 R_1 / B_2 R_2, \quad (5.62)$$

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:

$$q_1 = q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 R_1 / R_2. \quad (5.63)$$

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:

$$q_1/R_1 = q_2 K_1^2 \varepsilon_{\text{отн}}^2 / R_2. \quad (5.64)$$

Для существующих параметров катков статического действия отношение линейного давления к радиусу вальца находится в пределах от 0,22 до 1,7. У вибрационных катков это отношение принимается в пределах от 0,29 до 0,65. На рисунке 5.43 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 вальца) и деформативной способности материала коэффициент эффективности интенсивно увеличивается до относительной силы, равной трем, затем практически стабилизируется на величине коэффициента, равной 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.

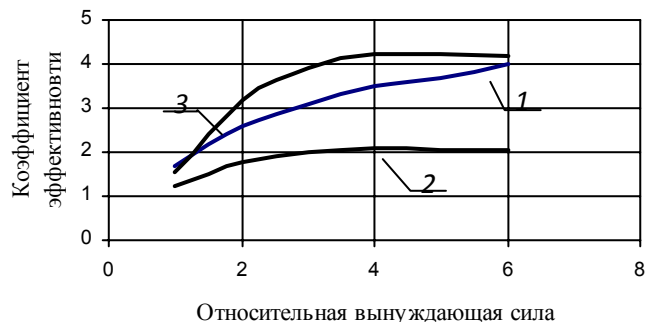


Рис. 5.43. Зависимость коэффициента эффективности вибрационного катка от относительной вынуждающей силы:

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 ($K_1^2 \epsilon_{отн}^2$)

Установлено, что эффективность вибрационного катка по отношению к катку статического действия зависит также от температуры уплотняемой смеси. На рисунке 5.44 представлена зависимость коэффициента эффективности от температуры смеси.

Таким образом, зная относительную вынуждающую силу и параметры вибрационного вальца катка, можно определить эквивалентный каток статического действия.

Установлено, что эквивалент вибрационного катка зависит от относительной возмущающей силы и при постоянной частоте колебаний находится в интервале от 1,6 до 4.

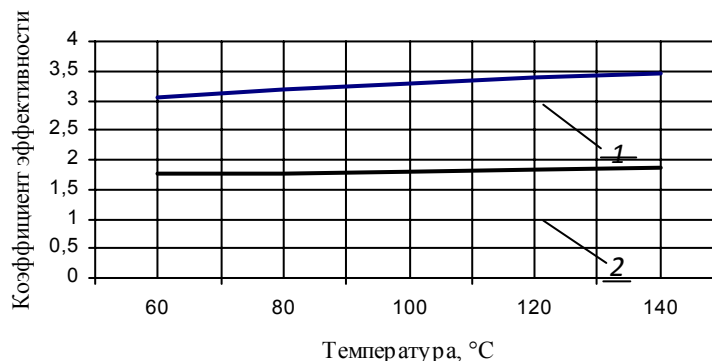


Рис. 5.44. Зависимость коэффициента эффективности вибрационного катка от температуры смеси:

1 – по напряжениям; 2 – по деформациям

Глава 6

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ УСТРОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

6.1. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ЗВЕНА МАШИН

Завершающей стадией строительства автомобильных дорог является распределение и уплотнение горячей асфальтобетонной смеси, уложенной в дорожное покрытие. Изменение свойств уплотняемого материала в зависимости от температурных режимов при устройстве покрытия, а также ограниченная толщина слоя предъявляют повышенные требования к процессам, связанным с укладкой и уплотнением горячих асфальтобетонных смесей. Установлено, что параметры машин для распределения горячей асфальтобетонной смеси и температурные режимы горячей смеси влияют на дальнейший выбор параметров уплотняющих машин. Анализ параметров асфальтоукладчиков показал, что за последние годы в конструкции машин внесены существенные изменения. Применение уплотняющих рабочих органов, действующих в динамическом режиме на горячую смесь при высоких ее температурах обеспечивает получение сравнительно высокого коэффициента предварительного уплотнения смеси. Это позволяет достигать высоких эксплуатационных показателей дорожных покрытий нежесткого типа с учетом применения разных технологий. Замеры модуля деформации слоя покрытия в процессе его устройства показали, что величина модуля деформации после укладки асфальтоукладчиком с пассивным рабочим органом в три раза ниже, чем при укладке смеси асфальтоукладчиком с работающей вибрационной плитой. Такое различие в модулях деформации слоя покрытия объясняется разными методами воздействия на укладываемую смесь. Асфальтоукладчик при работе трамбуемого бруса и с пассивной выглаживающей плитой обеспечивает предварительное уплотнение уложенного слоя со сравнительно низким коэффициентом уплотнения, величина которого не превышает значений 0,80...0,85. Применение уплотняющих вибрационных рабочих органов обеспечивает получение более высокого коэффициента предварительного уплотнения смеси. Установлено, что при работе таких асфальтоукладчиков с малой скоростью укладки смеси и высоким содержанием щебня в смеси коэффициент предварительного уплотнения может достигать требуемой величины коэффициента уплотнения [2]. Увеличение ширины укладываемой полосы покрытия, возможность бесступенчатого регулирования рабочей скорости укладки и наличие автоматизированных систем в конструкции машин позволяют современным асфальтоукладчикам обеспечивать высокое качество укладываемого слоя.

Установлено, что коэффициент предварительного уплотнения зависит от скорости укладки [27, 49]. Практика строительства дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей и результаты исследований показали, что при увеличении темпа строительства рабочие скорости укладки смеси не позволяют обеспечивать высокий коэффициент предварительного уплотнения, даже для смесей типа А [27]. При укладке других типов смесей после прохода асфальтоукладчика с малой скоростью распределения коэффициент предварительного уплотнения достигает максимальной величины 0,92...0,95. Следовательно, потенциальные возможности повышения уплотняющей эффективности асфальтоукладчиками есть, но в настоящий момент они не настолько велики, чтобы отказаться от уплотняющих машин.

Традиционным методом уплотнения дорожных покрытий является применение гладковальцовых катков статического действия. Эти машины при соответствующем выборе их параметров обеспечивают достижение требуемой плотности материала, но характеризуются сравнительно малой производительностью и высокой металлоемкостью. Анализ выпуска машин этой группы показывает, что в течение длительного времени серьезных конструктивных изменений не произошло. Наблюдается тенденция создания катков повышенной массы, оснащения их приборами для оперативного контроля качества работ, что дает возможность повысить эффективность их применения.

Увеличение грузоподъемности транспортных средств и рост нагрузок на дорожные одежды являются одними из причин образования на поверхности покрытия колеи вследствие дополнительного уплотнения слоев покрытия или проявления пластических деформаций уложенного материала под воздействием транспортных нагрузок. Открытые поры, макро- и микротрещины на поверхности покрытия снижают их долговечность в результате разрушительного действия погодных факторов (влаги, мороз). В связи с повышенными требованиями

к долговечности дорожных одежд к уплотняющему оборудованию стали предъявлять новые, более высокие требования:

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

- поверхность покрытия не должна иметь открытых пор и трещин, чтобы не было доступа воды в дорожные одежды, в результате повышается его долговечность.

Этим требованиям отвечают самоходные катки на пневматических шинах, что и определяет широкое их распространение. Наличие регулируемой системы давления в шинах дает возможность использовать эти машины в наиболее выгодном температурном интервале, обеспечивая при этом диапазон давлений в шинах 0,2...0,8 МПа [63]. Они имеют высокую производительность, прорабатывают слои сравнительно большой толщины, обеспечивают равномерное распределение плотности по высоте слоя. При уплотнении этими катками на поверхности покрытия не образуются продольные и поперечные волосяные трещины, не происходит дробление каменных составляющих асфальтобетона, что значительно улучшает водонепроницаемость поверхности покрытия.

К недостаткам технологии применения одних катков на пневматических шинах следует отнести неудовлетворительную поперечную и продольную ровность покрытия, а также невозможность обеспечить требуемую плотность асфальтобетона. Этот недостаток заложен в конструкции машин и объясняется колебаниями катка в вертикальной плоскости на упругих пневматических шинах в процессе его движения и наличием зазоров между шинами [11, 43]. Для обеспечения предъявляемых требований к ровности покрытия эти катки должны работать совместно с гладковальцовыми, которые завершают процесс строительства асфальтобетонных покрытий [73]. В последнее время в практике строительства асфальтобетонных покрытий все большее распространение получили вибрационные катки. Опыт применения в разных странах мира вибрационных катков для уплотнения дорожных одежд и покрытий из асфальтобетонных смесей и проведенные исследования показали, что при уплотнении этими катками расслоения смеси не наблюдается. Вибрационные катки имеют высокую производительность. Для обеспечения движения требуется более низкое тяговое усилие. Они имеют меньшую массу и способны при выключенном вибраторе работать как обычные гладковальцовые катки статического действия. Все это привело к тому, что практически во всех странах мира значительно увеличен выпуск вибрационных катков. Этому способствовала и высокая эффективность уплотнения конструктивных слоев дорожных одежд из других минеральных материалов, а также некоторых видов грунтов. В связи с увеличением грузоподъемности транспортных средств и интенсивности движения в практике строительства асфальтобетонных покрытий используют смеси с содержанием щебня до 80 %. Такие смеси обладают большей жесткостью и обеспечить требуемую плотность статическими катками практически невозможно. Наибольший эффект при уплотнении таких смесей достигается при работе вибрационных катков или звена катков, состоящих из вибрационных и катков на пневматических шинах.

Выбор параметров технологического процесса устройства покрытия из горячих асфальтобетонных смесей зависит от его конструктивных параметров и требуемого темпа строительства, с учетом которого выбираются параметры машин для укладки смесей и назначаются режимы работы. Существующими нормативными материалами в зависимости от конструктивных параметров дороги предусматривается укладка дорожных покрытий в один или два слоя. В настоящее время используются три технологии укладки асфальтобетонных смесей [16]:

- 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 тем-

пом 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.

В зависимости от ширины укладываемой полосы отличаются методы организации работ по укладке покрытий:

– 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.

При одновременной работе нескольких асфальтоукладчиков они располагаются уступом относительно друг друга при соблюдении дистанции между ними 10...15 м и не более 30 м.

При малых темпах строительства (до 0,4 км/смену) укладку полос производят последовательно. Для обеспечения плотного продольного соединения полос длину первой полосы ограничивают в зависимости от температуры воздуха [16, 22, 27].

При укладке слоев покрытия с разными по составу смесями применяется немецкая технология "компактасфальт" – т.е. "горячее по горячему". Применение такой технологии укладки смесей позволяет производить уплотнение покрытия как одного слоя с повышенной толщиной.

Измерение температуры асфальтобетонной смеси, уложенной в дорожное покрытие асфальтоукладчиками, показало, что в зависимости от дальности транспортировки и применяемого способа доставки горячей смеси встречаются участки с пониженной температурой смеси. Это свидетельствует о неравномерности распределения температуры смеси в дорожном покрытии, что способствует достижению разных коэффициентов уплотнения асфальтобетона при работе уплотняющих машин. Разница в температуре на таких участках может достигать 35...45 °С, что приводит к получению разных эксплуатационных показателей асфальтобетона покрытия и является причиной образования дефектов в процессе эксплуатации покрытия в виде разрушения отдельных участков покрытия. Для устранения таких явлений зарубежные фирмы при строительстве дорог с асфальтобетонными покрытиями применяют перегрузчики горячей асфальтобетонной смеси, которые обеспечивают равномерное распределение температуры по всему объему горячей смеси. Кроме того, эти машины обеспечивают равномерную загрузку бункера асфальтоукладчика, что предотвращает удары и толчки асфальтоукладчика при их загрузке автосамосвалами. Применение такой технологии в устройстве асфальтобетонных покрытий способствует повышению качества работ и работоспособности покрытия.

Из проведенного анализа технологических схем уплотнения покрытий из горячих асфальтобетонных смесей следует, что в зависимости от конкретных условий строительства выбор механизированного звена машин может быть разным. Для каждого типа катка установлены определенные границы деформативного состояния слоя асфальтобетона, зависящие от температурных границ типа смеси с учетом марки битума, в которых достигается наибольший эффект уплотнения. При укладке крупнозернистых смесей типа А, Б и работе асфальтоукладчика с активными уплотняющими рабочими органами звено уплотняющих машин может назначаться из среднего и тяжелого катков, а также катков на пневматических шинах при совместной работе вибрационных катков (при соответствующих их параметрах). При строительстве покрытий из смесей типа В, Г и Д в звено уплотняющих машин необходимо вводить легкий каток. Применение в технологических звеньях укатки вибрационных катков, в зависимости от их параметров, позволяет осуществлять замену легких и средних катков.

6.2. АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Устройство дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей ведется механизированным звеном машин, состоящим из асфальтоукладчика и уплотняющих машин, параметры которых зависят от заданной производительности, условий производства работ и применяемого материала. С учетом непрерывности строительства дорожных покрытий из горячих смесей эффективность работы комплекта машин зависит от результатов совместной работы, при которой каждая машина (асфальтоукладчик – каток) выполняет свои функции в заданных температурных интервалах и создает условия для работы других машин.

Продолжительность выполнения отдельных операций (укладка и уплотнение слоя смеси определенным типом катка) зависит от конкретных условий строительства и применяемого материала. Асфальтобетонная смесь относится к дорожно-строительному материалу, свойства которого зависят от его температуры. Установлено, что достичь требуемых эксплуатационных показателей покрытия при его устройстве можно при условии, что температура поставляемой горячей смеси и работа механизированного звена машин осуществляется в температурных границах, зависящих от смесей.

Качество работ по устройству покрытий из горячих асфальтобетонных смесей зависит от температурных и технологических режимов укладки и уплотнения смеси, к которым относятся рабочие скорости машин, число проходов катка по одному следу и соответствие параметров машин свойствам применяемого материала. Для обеспечения заданного числа проходов катков по одной полосе укатки с соответствующими скоростями необходимо время, в течение которого асфальтобетонная смесь находится в определенном температурном интервале. Поэтому параметры машин должны быть взаимосвязаны между собой как по продолжительности выполнения операций, так и температурным режимам укладки и уплотнения горячих смесей.

Анализ рекомендаций по выбору уплотняющих машин при строительстве асфальтобетонных покрытий показал, что существует несколько методов разработки технологических схем уплотнения. Согласно существующим рекомендациям в основу выбора параметров катков положены температурные интервалы смеси с учетом типа смеси [4, 8, 26, 27, 48, 56]. Рекомендуемый температурный интервал укладки смесей составляет 20 °С независимо от типа смеси. Для начальной стадии уплотнения при работе легкого катка температурный интервал начала и окончания процесса уплотнения составляет 20 °С, за исключением смеси типа В (25 °С). Промежуточный этап или основной, на котором происходит формирование микроструктурных связей асфальтобетона, в зависимости от типа смеси составляет 15...25 °С. Для смесей типа А и смесей с содержанием щебня свыше 60 % за счет повышенной жесткости температурный интервал составляет 25...30 °С. На заключительной стадии уплотнения покрытия температурный интервал работы катка составляет 15...20 °С.

Выбор параметров уплотняющих машин по температурному интервалу не учитывает полностью прочностные характеристики асфальтобетонных смесей, зависящие не только от температуры смеси, но и технологических факторов. Существующие методики выбора параметров уплотняющих машин не учитывают неравномерности времени уплотнения на захватке катков разного типа (легкий, средний, тяжелый). Обеспечение непрерывности производства работ возможно при одинаковой длине захватки укладки и уплотнения смеси, одном и том же времени работы на них машин с одинаковыми скоростными режимами или использовании разных скоростных режимов при разном времени работы уплотняющих машин в заданных температурных интервалах смеси. Поэтому для координирования режимов работы механизированного звена машин по устройству покрытий при заданных температурных интервалах необходимо знать допустимое время работы каждой машины с учетом свойств смеси, условий строительства и применяемых машин.

В зависимости от параметров асфальтоукладчика и режимов его работы, а также температуры укладываемой смеси коэффициент предварительного уплотнения ($K_{пв}$), достигаемый в процессе укладки и уплотнения смеси рабочими органами машины, колеблется в широких пределах, что влияет на выбор типа и параметры применяемых катков, а следовательно, и на технологию производства работ по устройству покрытия. На основании экспериментальных

исследований В.Б. Пермяковым получены численные значения коэффициента уплотнения для разных этапов уплотнения с учетом температуры и типа смеси, а также соответствующие им контактные напряжения под вальцом катка, что позволяет осуществлять выбор параметров уплотняющих машин по силовому фактору при соответствующих температурах смеси [55]. Согласно рекомендуемым температурам и соответствующим им коэффициентам уплотнения разница в температурных интервалах работы катков в зависимости от типа смеси (А, В) составляет на начальном этапе (легкий каток) 20...15 °С, на промежуточном этапе 30...35 °С и заключительном 35...15 °С.

Следует заметить, что рекомендуемые температурные интервалы для типов смесей А, В не учитывают марки вяжущего, которые имеют разные температурные границы эффективного уплотнения для одного и того же типа смеси. Для обеспечения непрерывности работы механизированного звена машин необходимо согласовывать скоростные режимы асфальтоукладчика и катков, что возможно только с учетом времени их работы в рекомендуемых температурных интервалах смеси.

Производительность комплекта машин при строительстве покрытий из горячих асфальтобетонных смесей определяется производительностью асфальтоукладчика и для обеспечения непрерывности производства работ принимается равенство длины захваток при распределении смеси и уплотнении катком определенного типа при условии обеспечения заданного числа проходов катка по одному следу в ограниченных рамках времени, определяемых температурными режимами смеси [68]. Такой подход к разработке технологических схем строительства покрытий позволяет обеспечить непрерывность устройства покрытия при условии определения времени работы асфальтоукладчика и катка в заданных температурных интервалах. В настоящий момент рекомендуемое время работы асфальтоукладчика (1/6 от времени остывания слоя смеси при работе за укладчиком легкого, среднего и тяжелого катков и 1/4 при работе среднего и тяжелого катков) требует уточнения, поскольку интенсивность охлаждения слоя смеси при укладке и уплотнении протекают по законам нестационарных теплопередач и зависят от различных факторов. Представленными ранее исследованиями показано, что продолжительность укладки смесей и их уплотнения зависит от свойств смеси, применяемого оборудования, производственных и погодных условий и может значительно отличаться между собой, что необходимо учитывать при разработке технологии устройства покрытия.

Уплотняющая способность катка оценивается конструктивными параметрами машины и зависит от силового воздействия вальцов на уплотняемый материал. Однако рекомендуемый динамический показатель силового воздействия вальца (при вибрации) требует уточнения. Установлено, что при относительной возмущающей силе, равной единице (P/G , где P – вынуждающая сила вибратора вальца, кН; G – весовая нагрузка вальца, кН), уплотняющая способность вибрационного катка выше, чем статического. Из принимаемого соотношения следует, что при $P/G = 1$ уплотняющая способность статического и вибрационного катков одинакова, что не подтверждается исследованиями и практикой применения вибрационных катков [4].

Поэтому можно сделать следующие выводы:

- существующие методики разработки технологических схем для устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей не учитывают полностью факторы, влияющие на достижение эксплуатационных параметров покрытия и эффективность применяемых машин;

- с учетом непрерывности устройства покрытия из горячих асфальтобетонных смесей каждая машина механизированного звена должна обеспечивать требуемые показатели работы на захватке за определенное время в соответствующих температурных интервалах, зависящих от производственных, метеорологических условий и параметров применяемых машин;

- применяемые методы разработки технологических процессов строительства дорожных покрытий требуют уточнения.

6.3. 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 из горячих смесей 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 будут осуществляться в определенных температурных интервалах, зависящих от свойств материала при соответствующих параметрах машин.

Установлено, что процесс строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей подчиняется общим законам нестационарных теплопередач. Согласно этим законам, интенсивность охлаждения слоя горячей смеси зависит от рассматриваемого этапа устройства покрытия и конкретных производственных условий, что влияет на время нахождения слоя в заданном температурном интервале. 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, входящих 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, температуры воздуха и использования защитных устройств от охлаждения смеси при транспортировке смеси. Температура смеси влияет как на величину коэффициента уплотнения, так и прочность асфальтобетона.

Установлено, что температура смеси на момент доставки к месту производства работ может быть определена по формуле [25]:

$$t_p = t_{\text{вых}} - t_b / e^{m\tau} + t_b, \quad (6.1)$$

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

$$m = 2\alpha / \gamma ch, \quad (6.2)$$

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

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 % [55].

Температура смеси при отгрузке потребителю зависит от марки битума и регламентирована ГОСТ 9128–97. Температура укладки смеси регламентируется СНиП 3.06.03–85, но указания носят общий характер. Согласно рекомендациям, температура укладки смеси зависит от марки битума (табл. 6.1) [16]. 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 загрузку автотранспорта смесью необходимо производить в несколько приемов. При заполнении емкости кузова транспортной машины с одной стоянки крупный заполнитель скатывается по боковой поверхности образующей конуса, что способствует расслоению смеси. При загрузке такой смесью бункера асфальтоукладчика образуются участки с неоднородной структурой, снижающие качество устройства покрытия.

6.1. Температура смеси при распределении, °С

Смеси	Температура смеси на месте укладки, °С, на битумах марок					
	БНД и БН					СГ, МГ, МГО
	200/30 0	130/2 00	90/13 0	60/90	40/60	130/2 00
Горячая смесь	120... 130	130... 140	140... 150	145... 155	150... 160	110... 120
Горячая смесь с использованием ПАВ	100... 110	110... 120	120... 130	125... 135	130... 140	90... 100
Горячая смесь на ПБВ	140... 150	150... 160	160... 170	165... 175	170... 180	130... 140

При ограниченных объемах поставляемой смеси длина сменной захватки определяется по формуле:

$$L = G / bc, \text{ м}, \quad (6.3)$$

где G – количество асфальтобетонной смеси, выделяемой на объект, кг; b – ширина полосы укладки, м; c – расход смеси, кг/м².

При заданном темпе устройства покрытия и работе одного асфальтоукладчика для сопряжения двух параллельных полос длина полосы укладки зависит от температуры окружающего воздуха и условий производства работ и принимается согласно данным табл. 6.2 [16, 22, 27].

6.2. Влияние температуры воздуха на длину полосы укладки смеси

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

Рекомендуемые значения длины полосы укладки смеси в зависимости от температуры воздуха могут быть рассчитаны по формулам:

– на открытых участках

$$L = 18,92e^{0,0583t_b};$$

– на закрытых участках

$$L = 21,95e^{0,063t_b};$$

– на двух полосах

$$L = 42,67e^{0,0049t_b}, \quad (6.4)$$

где L – длина участка, м; t_b – температура окружающего воздуха, °С. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,96...0,99.

Минимальная длина полосы укладки принимается в пределах 10...15 м из условия разгона и торможения уплотняющих машин [16, 27]. При одновременной работе нескольких асфальтоукладчиков они располагаются уступом в плане один относительно другого в пределах 10...15 м. 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, 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 требуемым качеством покрытия. Длина полосы укладки будет определяться:

$$L_{ук} = V_a \tau_{ук}, \text{ м}, \quad (6.5)$$

где V_a – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин; $\tau_{ук}$ – время укладки, мин.

Согласно принятым рекомендациям и руководствам продолжительность укладки принимается равной $0,16\tau_{стр}$ при работе легкого, среднего и тяжелого катков и $0,25\tau_{стр}$ при работе среднего и тяжелого катков, где $\tau_{стр}$ – общее время охлаждения смеси от момента укладки до окончания уплотнения. Также предлагаются фиксированные численные значения продолжительности процессов с учетом толщины укладываемого слоя и скорости ветра [4, 26, 27]. 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 2–3 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 длины захваток укладки и уплотнения катком в заданных температурных интервалах, должны быть равны между собой.

Отмечалось, что температура смеси отгрузки потребителю и температура смеси при укладке зависят от марки битума и регламентирована нормативными документами [73, 77]. 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 в начале уплотнения с учетом типа смеси и марки битума [77]. Для приготовления смеси любого типа могут быть использованы разные марки битумов БН и 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 которым определяются рациональные температурные режимы уплотнения смесей катками разных типов.

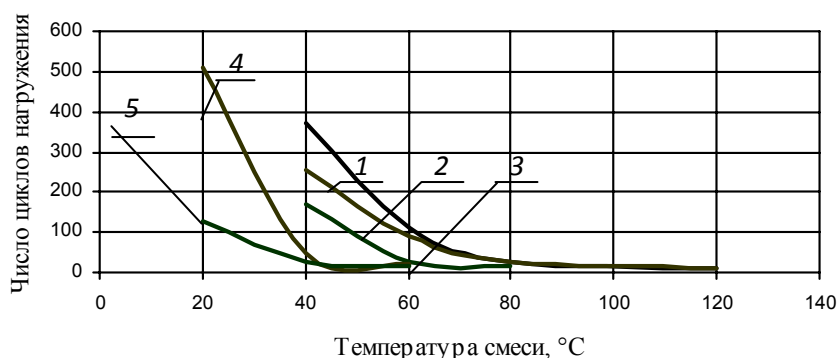


Рис. 6.1. Зависимость числа циклов приложения нагрузки от температуры смеси:

- 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

Температурные интервалы уплотнения 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 6.1 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 работах [19, 20].

На основании представленных данных получены выражения, позволяющие определять 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. 6.3.

6.3. 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

6.4. Рекомендуемая температура окончания уплотнения горячих асфальтобетонных смесей

Марка битума	Температура укладки, °С	Тип смеси				
		А	Б	В	Г	Д
БНД 40/60	150...60	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
СГ 130/200	110...120	55...60	55...50	50...45	55...50	50...45

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. 6.5.

6.5. 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
<i>Асфальтобетон типа А</i>						
БНД 40/60	160...150	140...135	140...135	115...110	115...110	105...100
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	110...105	110...105	100...95
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	105...100	105...100	95...90
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	95...90	95...90	85...80
БНД 200/300	130...120	110...105	110...105	90...80	90...80	75...70
СГ 130/200	120...110	100...90	100...90	75...65	75...65	60...55
<i>Асфальтобетон типа Б</i>						
БНД 40/60	160...150	140...130	140...130	110...105	110...105	100...95
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	115...105	115...105	95...90
БНД 90/130	150...140	130...125	130...125	105...100	105...100	90...85
БНД 130/200	140...130	115...110	115...110	95...90	95...90	80...75
БНД 200/300	130...120	110...100	110...100	80...75	80...75	70...65
СГ 130/200	120...110	95...90	95...90	70...65	70...65	55...50

Марка битума	Рекомендуемые интервалы температуры уплотнения дорожных покрытий на этапах, °С							
	укладки		предварительный		промежуточный		окончательный	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
<i>Асфальтобетон типа В</i>								
БНД 40/60	160...150	140...135	140...135	125...120	125...120	110...105	110...105	95...90
БНД 60/90	155...145	135...130	135...130	120...115	120...115	105...100	105...100	90...85
БНД90/130	150...140	130...125	130...125	115...110	115...110	100...95	100...95	85...80
БНД130/200	140...130	115...110	115...110	105...110	105...110	90...85	90...85	75...70
БНД200/300	130...120	110...100	110...100	90...95	90...95	75...80	75...80	65...60
СГ 130/200	120...110	95...90	95...90	80...75	80...75	65...60	65...60	55...50
<i>Асфальтобетон типа Г</i>								
БНД 40/60	160...15 0	140...13 5	140...13 5	125...12 0	125...12 0	110...10 5	110...10 5	95...90
БНД 60/90	155...14 5	135...13 0	135...13 0	120...11 5	120...11 5	105...10 0	105...10 0	90...85
БНД 90/130	150...14 0	130...12 5	130...12 5	115...11 0	115...11 0	100...95	100...95	85...80
БНД130/20 0	140...13 0	115...11 0	115...11 0	105...11 0	105...11 0	90...85	90...85	75...70
БНД200/30 0	130...12 0	110...10 0	110...10 0	90...95	90...95	75...80	75...80	65...60
СГ 130/200	120...11 0	95...90	95...90	80...75	80...75	65...60	65...60	55...50
<i>Асфальтобетон типа Д</i>								
БНД 40/60	160...15 0	140...13 5	140...13 5	125...12 0	125...12 0	110...10 5	110...10 5	95...90
БНД 60/90	155...14 5	135...13 0	135...13 0	120...11 5	120...11 5	105...10 0	105...10 0	90...85
БНД 90/130	150...14 0	130...12 5	130...12 5	115...11 0	115...11 0	100...95	100...95	85...80

БНД	140...13	115...11	115...11	105...11	105...11	90...85	90...85	75...70
130/200	0	0	0	0	0	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 (b) и числа проходов по одному следу (n) определяется следующим образом:

$$L_{\text{уп}} = V_{\text{к}} \tau_{\text{уп}} / bn, \text{ м}, \quad (6.6)$$

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:

$$L_{\text{ук}} = L_{1\text{уп}} = L_{2\text{уп}} = L_{3\text{уп}}, \quad (6.7)$$

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 катка в заданных температурных интервалах имеют вид:

$$V_{\text{а}} = V_{\text{к}} \tau_{\text{уп}} / \tau_{\text{ук}} bn, \text{ м/мин}. \quad (6.8)$$

Из выражения (6.8) 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 из 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 [27].

2. Время уплотнения определенным типом катка превышает время укладки смеси, т.е. $\tau_{\text{уп}} / \tau_{\text{ук}} > 1$. 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 снизит 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 уменьшить 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 [73].

Из представленной зависимости (6.8) 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:

$$\tau = K_c K_{тс} K_V K_{ос} K_M K_h e^{at_B}, \text{ мин}, \quad (6.9)$$

где K_c , $K_{тс}$, K_V , $K_{ос}$, K_M , 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.

Численные значения коэффициентов определяются по зависимостям, представленным в табл. 6.6.

6.6. 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	$-2,092 \ln t_0 + 10,62$	при $h = 0,05$ м и более $-2,62A^3 + 9,096A^2 - 11,293A + 5,061$; при $h = 0,03 \dots 0,04$ м $-4,788A^3 + 15,85A^2 - 17,979A + 7,09$
K_h	$3586,9 h^{1,8876}$	$7072h^{1,7723}$
α	$20h^3 - 5,11h^2 + 0,38h - 0,0004$	$-76,19h^3 + 16,25h^2 - 1,1572h + 0,05$

Примечания. $t_{см}$ – 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 $(t_{оп} / 100)$; $t_{оп}$ – температура окончания уплотнения покрытия, °С.

При расчете возможной продолжительности работы катков в заданных температурных интервалах величина коэффициента K_M будет определяться как

$$K_M = K_{M2} - K_{M1}, \quad (6.10)$$

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 формуле (6.9).

Известно, что выбор уплотняющих машин для устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей зависит от параметров асфальтоукладчика, который определяет не только темп строительства, но и 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 ($K_{пу}$). 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 трамбуемого бруса и вибрационной плиты, полученные при частоте вибрации вибрационной плиты 50 Гц и трамбуемого бруса 12 Гц. Значения получены на основе данных, представленных в работе [27].

Из таблицы видно, что независимо от типа смеси с увеличением рабочей скорости асфальтоукладчика коэффициент предварительного уплотнения смеси снижается. Для обеспечения требуемого коэффициента уплотнения асфальтобетонного покрытия необходимо применение уплотняющих машин. Типы катков и их количество зависят от скорости укладки смеси и качества работы уплотняющих рабочих органов асфальтоукладчика, что влияет на

технологии производства работ по устройству дорожных покрытий. В результате обработки представленных данных установлены зависимости коэффициента предварительного уплотнения смеси при ее укладке от рабочей скорости асфальтоукладчика, которые имеют вид:

– для смеси типа А

$$K_{\text{пу}} = -0,0046V_a^3 + 0,0475V_a^2 - 0,1604V_a + 1,1075;$$

– для смеси типа Б

$$K_{\text{пу}} = -0,02V_a^2 + 0,06V_a + 0,83;$$

– для смеси типа В

$$K_{\text{пу}} = -0,0023V_a^2 + 0,0038V_a + 0,878;$$

6.7. Зависимости коэффициента предварительного уплотнения от скорости укладки смеси в дорожное покрытие

Тип смеси	$K_{\text{пу}}$ в зависимости 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

– для смеси типа Г

$$K_{\text{пу}} = 0,0013V_a^2 - 0,01V_a + 0,8388, \quad (6.11)$$

где V_a – рабочая скорость асфальтоукладчика, м/мин. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,99...1,0.

Исследованиями В.Б. Пермякова установлено, что каждому значению коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси соответствует определенный тип катка, что влияет на технологию производства работ (табл. 6.8) [55].

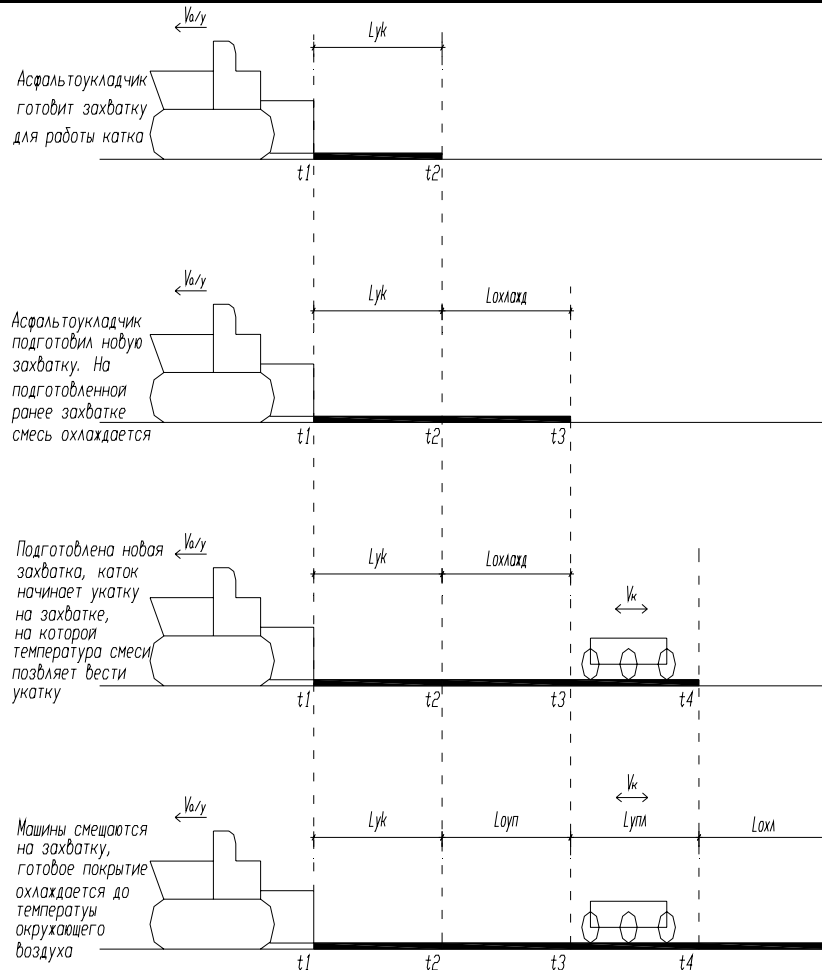
Следовательно, зная заданный темп устройства покрытия и параметры укладываемого слоя смеси, на основании данных зависимостей (6.11) можно определить степень предварительного уплотнения смеси асфальтоукладчиком с учетом ее типа и произвести выбор типов катков для обеспечения заданного качества строительства 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.

С учетом достигаемого коэффициента предварительного уплотнения ($K_{\text{пу}}$) асфальтобетонных смесей при укладке асфальтоукладчиком разработаны технологические схемы устройства покрытий из горячих смесей, которые представлены на рис. 6.2 – 6.4. В таблицах 6.9 – 6.11 представлено время работы машин механизированного звена с учетом технологического перерыва ($t_{\text{ок}}$).

6.8. Влияние коэффициента уплотнения на выбор уплотняющих машин

Коэффициент уплотнения	Период уплотнения	Тип катка
0,7 0,85	Начало Конец	Легкий
0,85 0,92	Начало Конец	Средний
0,92 1,0	Начало Конец	Тяжелый

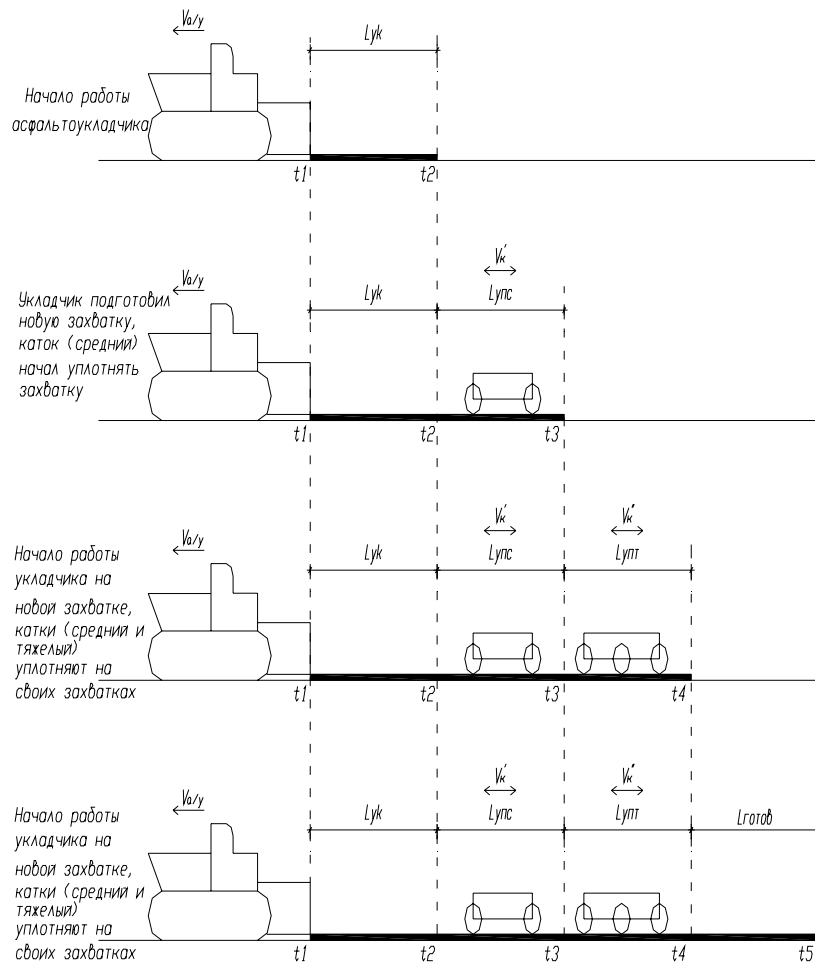


Примечания:

Численные значения со уплотнения 60°С. можно вносить поправки

1. Значения температурных интервалов (t2, t3, t4) представлены в таблице 6.9. Численные значения времени соответствуют температуре начала укладки 160°С и

Рис. 6.2. Технологическая схема устройства покрытия асфальтоукладчиком со степенью предварительного уплотнения ($K_{п.у}$) 0,92 и более и одним уплотняющим катком

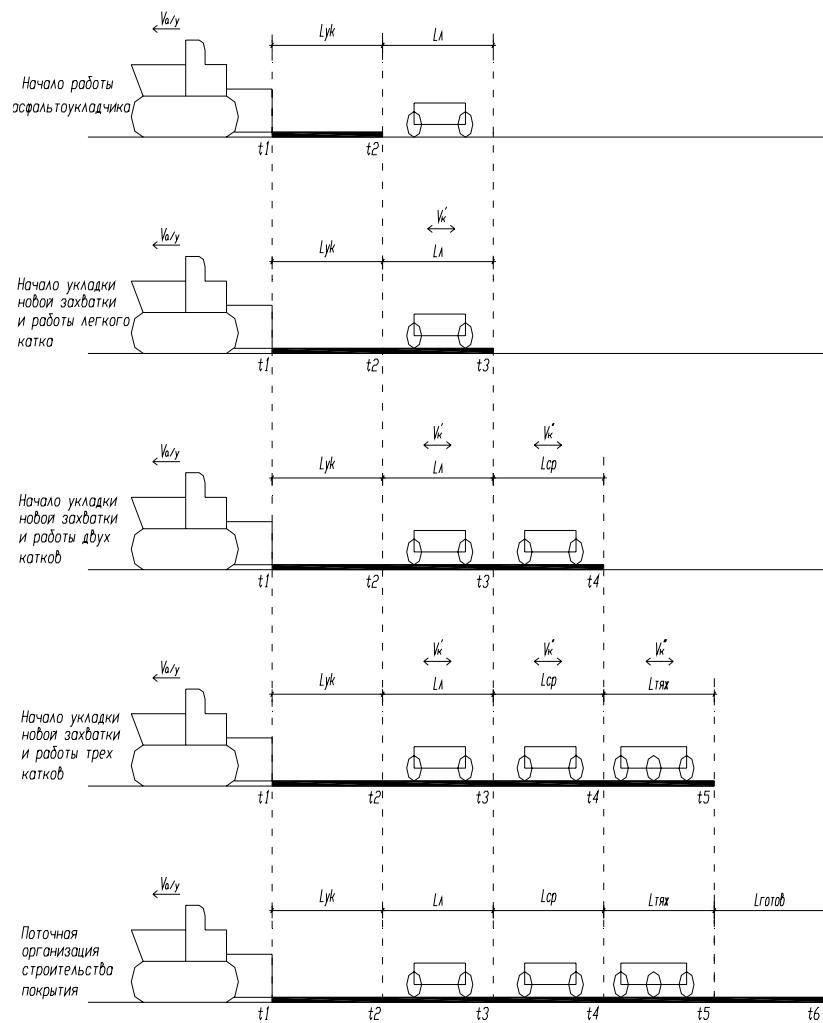


Примечания:

Численные значения
за уплотнения 60°С.
димо вносить поправки

1. Значения температурных интервалов (t_2 , t_3 , t_4) представлены в таблице 6.10.
Численные значения времени соответствуют температуре начала укладки 160°С и

Рис. 6.3. Технологическая схема устройства покрытия асфальтоукладчиком со степенью предварительного уплотнения ($K_{п.у}$) 0,85...0,92 и звеном из двух катком



Примечания:

значения
 t_2, t_3, t_4
 и 60°C
 поправки

1. Значения температурных интервалов (t_2, t_3, t_4) представлены в таблице 6.11.
 Численные значения времени соответствуют температуре начала укладки 160°C и

Рис. 6.4. Технологическая схема устройства покрытия асфальтоукладчиком со степенью предварительного уплотнения ($K_{п.у}$) 0,7...0,85 и звеном из трех катков

6.9. Продолжительность выполнения операций по укладке и уплотнению дорожного покрытия с учетом технологического перерыва

Марка битума	Температура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Время работы, мин		
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{охл}$	$\tau_{к}$
<i>Тип А</i>									
БНД 40/60	160...150	25,5	160	140	115	100	8,5	8,5	8,5
БНД 60/90	155...145	28,0	155	135	110	95	9	9	9
БНД 90/130	150...140	30,0	150	130	105	90	10	10	10
БНД 130/200	140...130	23,0	140	115	95	80	8	8	8
БНД 200/300	130...120	29,0	130	105	85	70	10	10	10
СГ 130/200	120...110	40,0	120	90	70	55	13	12	15
Марка битума	Температура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Среднее время работы, мин		
			$\tau_{ук}$	$\tau_{уп1}$	$\tau_{уп2}$				
<i>Тип Б</i>									
БНД 40/60	160...150	28	160	135	105	95	10	11	7
БНД 60/90	155...145	30	155	130	105	90	9	12	9
БНД 90/130	150...140	33	150	125	100	85	10	13	10
БНД 130/200	140...130	26,0	140	110	90	75	8	10	8
БНД 200/300	130...120	33,0	130	100	75	65	11	13	9
СГ 130/200	120...110	37	120	90	75	55	13	14	10

6.10. Продолжительность выполнения операций по укладке и уплотнению дорожного покрытия из горячих смесей звеном из трех машин

Марка битума	Температура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Среднее время работы, мин		
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{уп1}$	$\tau_{уп2}$
<i>Тип А</i>									
БНД 40/60	160...150	25,5	160	140	115	100	8,5	12	5
БНД 60/90	155...145	28,0	155	135	110	95	9	12	7

БНД 90/130	150...140	30,0	150	135	100	90	9	13	7
БНД 130/200	140...130	27,0	140	115	90	80	10	10	7
БНД 200/300	130...120	28,0	130	105	80	70	10	11	7
СГ 130/200	120...110	36,0	120	90	65	55	12	14	10

Tun B

БНД 40/60	160...150	28	160	135	105	95	10	11	7
БНД 60/90	155...145	30	155	130	105	90	9	12	9
БНД 90/130	150...140	33	150	125	100	85	10	13	10
БНД 130/200	140...130	26,0	140	110	90	75	8	10	8
БНД 200/300	130...120	33,0	130	100	75	65	11	13	9
СГ 130/200	120...110	37	120	90	75	55	13	14	10

Tun B

БНД 40/60	160...150	32	160	135	105	90	10	12	10
БНД 60/90	155...145	33	155	130	100	85	9	13	11
БНД 90/130	150...140	34	150	125	95	80	8	14	12
БНД 130/200	140...130	31,0	140	110	85	70	9	11	10
БНД 200/300	130...120	43,0	130	100	70	60	11	17	15
СГ 130/200	120...110	44,0	120	80	60	45	14	20	10

6.11. Продолжительность выполнения операций по укладке и уплотнению дорожного покрытия из горячих смесей звеном из четырех машин

Марка битума	Температура смеси при укладке, °С	Время охлаждения смеси, мин	Температурные интервалы, °С				Среднее время работы, мин			
			t_1	t_2	t_3	t_4	$\tau_{ук}$	$\tau_{уп1}$	$\tau_{уп2}$	$\tau_{уп3}$
<i>Tun A</i>										
БНД 40/60	160...150	25	145	130	110	100	6	5	8	6
БНД 60/90	155...145	26,0	140	125	105	95	6	5	8	7
БНД 90/130	150...140	30,0	130	120	100	80	6	4	9	7
БНД 130/200	140...130	22,0	120	105	90	80	6	4	7	5
БНД 200/300	130...120	29,0	115	100	80	70	7	4	10	8
СГ 130/200	120...110	40,0	90	80	65	60	9	5	11	9
<i>Tun Б</i>										
БНД 40/60	160...150	32	140	120	105	90	9	6	7	10
БНД 60/90	155...145	34,0	135	115	100	85	10	6	7	11
БНД 90/130	150...140	37,0	125	110	95	80	10	6	9	12
БНД 130/200	140...130	31,0	120	100	85	70	5	6	10	10
БНД 200/300	130...120	43,0	110	95	80	60	7	8	10	18
СГ 130/200	120...110	42,0	90	75	60	45	7	7	10	18
<i>Tun B</i>										
БНД 40/60	160...150	28	145	30	110	95	7	4	8	9
БНД 60/90	155...145	30,0	140	125	105	90	6	6	8	10
БНД 90/130	150...140	32,0	135	120	100	85	5,5	5,5	8	10

БНД 130/200	140...130	26,0	120	100	85	75	6	6	8	6
БНД 200/300	130...120	33,0	110	90	75	65	8	7,5	8	9,5
СГ 130/200	120...110	41,0	90	70	60	50	9	11	13	8

Приведенные в табл. 6.9 – 6.11 данные соответствуют температуре окружающего воздуха и основания 20 °С, скорости ветра 0 м/с, толщине слоя в плотном состоянии 0,05 м, при температурах смеси с битумом марок БНД 40/60, 60/90, 90/130 укладки 160 °С и окончания укатки 60 °С; смесей с битумом марок БНД 130/200, 200/300 и СГ 130/200 при температурах укладки и окончания работ 140 и 50 °С соответственно. Влияние скорости ветра на продолжительность устройства покрытий представлено в табл. 6.12.

6.12. Влияние скорости ветра на продолжительность строительства дорожных покрытий при разной толщине укладываемого слоя

Толщина слоя, м	Температура воздуха, °С	Время (мин) на распределение и уплотнение горячих асфальтобетонных смесей при скорости ветра, м/с					
		0	2	4	6	8	10
0,03	5	16...29	15...26	14...25	13,5...23	13...22	12,5...20,5
	10	17,5...31	16,5...29	15,5...25,5	15...25	14...23	13,5...22
	15	19...34	18...31	17...29	16...27	15...25	14,5...24
	20	21,5...38	20...34	19...32	18...29	17...28	16...26
0,05	25	24...43	22...38	21...35	20...33	19...31	18...29
	30	28...48	26...44	24...41	23...38	22...35	20,5...33
	35	33...56	33...55	31...50	29...46	27...43	25...41
0,08	5	43...57	38...51	35...46	33...43	31...39	29...37
	10	46...62	42...55	38...50	35...46	33...43	31...40
	15	51...68	45...60	42...55	38...50	36...47	34...44
	20	56...75	50...66	45...60	42...55	39...51	36...47
	25	63...84	56...74	50...67	47...61	44...57	41...53
	30	71...94	64...84	58...76	54...70	50...65	47...61
	35	82...108	78...102	71...92	65...84	60...77	56...72
	5	87...117	77...101	68...90	62...80	57...73	53...67
	10	94...126	83...110	74...98	67...88	62...80	57...73
	15	103...139	91...121	81...107	74...96	68...88	63...81
	20	114...153	99...132	89...118	81...105	74...97	68...88
	25	126...172	111...148	99...131	90...119	83...109	77...100
	30	143...191	125...166	112...149	102...135	94...124	88...115
	35	163...220	150...199	134...177	122...160	112...146	104...136

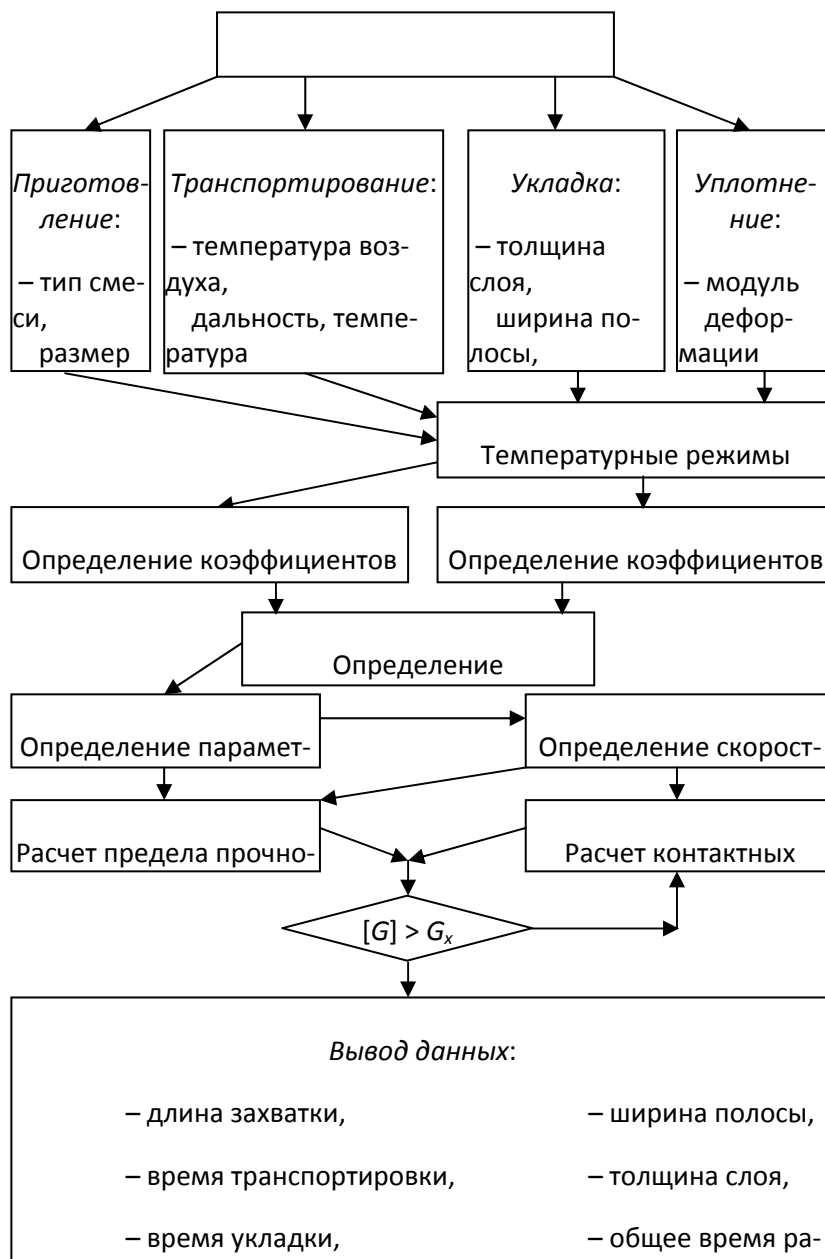


Рис. 6.5. Алгоритм расчета технологического процесса устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей

Из представленных данных видно, что условия производства работ значительно влияют на продолжительность операций, а следовательно, и на выбор технологических схем укладки и уплотнения смесей. При изменении условий производства работ и свойств применяемых смесей внесение поправок в продолжительность выполнения операций укладки и уплотнения за счет коэффициентов K_M , K_{TC} , K_O , K_C , K_h , K_V и α позволяет конкретизировать параметры технологических процессов и применяемых машин, устанавливать скоростные режимы катков с учетом потребного числа проходов по одному следу и количества полос укатки по ширине покрытия в заданных температурных интервалах.

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 [35, 37]. Алгоритм программы пред-

ставлен на рис. 6.5. Результаты расчетов технологических параметров процесса укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей представлены в табл. 6.13.

6.13. Результаты расчетов технологии укладки и уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей

Исходные данные	Величина	Расчетные значения	Величина
Темп строительства, п. м/см	1000	Скорость укладки, м/мин	2,08
Ширина укладывания полосы, м	7,5	Производительность укладчика, т/ч	129,4
Толщина слоя, м	0,06	Марка укладчика	Super 1203
Тип смеси	В, мелкозернистый	Время транспортировки, мин	15,0
Марка битума	БНД 90/130	Длина захватки, м	9,35
Температура смеси на выходе, °С	155	Общее время работы, мин	45,8
Модуль деформации, МПа	5,3	Время укладки, мин	4,45
Температура основания, °С	26	Время работы легкого катка, мин	5,5
Расстояние до места укладки, км	10	Количество проходов легкого катка	2
Скорость транспортировки, км/ч	40	Минимальная скорость перемещения, км/ч	0,6
Температура наружного воздуха, °С	21	Коэффициент уплотнения	0,95
Температура основания, °С	26	Время работы среднего катка, мин	18,9
Скорость ветра, м/с	3	Количество проходов среднего катка	8
Объемная масса, кг/м ³	2300	Минимальная скорость катка, км/ч	0,7
Удельная теплоемкость	1680	Коэффициент уплотнения	0,97
Каток легкий, с балластом	ДУ 25	Время работы тяжелого катка, мин	16,9
Каток средний, с балластом	ДУ 50	Количество проходов тяжелого катка	5
Каток тяжелый, с балластом	ДУ 8	Коэффициент уплотнения	0,99

6.4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПЛЕКТА МАШИН ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Из рассмотренных технологических схем устройства асфальтобетонных покрытий из горячих смесей видно, что процесс укладки и уплотнения дорожных покрытий осуществляется комплектом машин с учетом заданного темпа строительства, условий производства работ и

свойств применяемых смесей. В зависимости от этих факторов механизированное звено машин состоит из разных типов уплотняющих машин. Ведущей машиной, определяющей производительность звена машин, а также количество и типы уплотняющих машин, является асфальтоукладчик. В зависимости от его конструктивных параметров, скорости укладки и свойств смеси достигаемая величина коэффициента предварительного уплотнения смеси при ее распределении будет разной, что влияет на выбор метода уплотнения, количество и параметры звена уплотняющих катков. С учетом влияния значительного числа факторов на процесс строительства дорожного покрытия оценку и сравнение затрат можно производить по себестоимости производства работ, отнесенной к единице готового покрытия. Себестоимость принятой единицы продукции будет определяться:

$$C = \sum \text{Э}_p / V, \text{ р./м}^2, \quad (6.12)$$

где Э_p – эксплуатационные расходы, связанные с выполнением заданного объема работ, р.; V – объем работ, м².

Эксплуатационные расходы определяются по формуле

$$\text{Э}_p = n C_{\text{маш. см}} + \text{З}_p + \text{Н}_p,$$

где $C_{\text{маш. см}}$ – стоимость машино-смены, р.; n – число смен работы; З_p – заработная плата рабочих, занятых на выполнении ручных работ, обеспечивающих выполнение условий технологического процесса; Н_p – накладные расходы, р.

Учитывая, что при сравнении разных вариантов применения технологий устройства дорожных покрытий часть затрат производится независимо от принятой технологии производства работ, можно считать, что они являются составной частью любой технологии и не зависят от варианта. К таким затратам относятся накладные расходы, заработная плата рабочих на вспомогательных процессах, эксплуатационные затраты на содержание асфальтоукладчика, стоимость материала и в расчет их можно не принимать.

Стоимость машино-смены определяется по формуле

$$C_{\text{маш. см}} = 8 [M / 820 D m + C_{\text{тр}} / D_0 + P + C_c + \text{З}], \quad (6.13)$$

где M – инвентарно-расчетная стоимость машин, которая определяется как $M = \text{Ц} K_{\text{тр}}$, р.; Ц – стоимость машины при покупке, р.; $K_{\text{тр}}$ – коэффициент, учитывающий транспортные расходы при доставке машины на базу предприятия; A – амортизационные отчисления, %; D – количество дней работы машин в году; m – количество смен работы машины в сутки; $C_{\text{тр}}$ – транспортные расходы, связанные с доставкой машины к месту производства работ, р.; D_0 – количество часов работы машины на объекте; P – затраты, связанные с техническим обслуживанием и текущим ремонтом, р.; C_c – затраты на горючесмазочные материалы, р.; З – заработная плата машиниста, р.

Таким образом, на основании полученных результатов исследований и используя предложенный метод выбора параметров технологического процесса строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, с учетом конкретных условий производства работ и применяемого механизированного звена машин можно обосновать выбор технологических режимов и параметров машин с минимальными затратами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение качества 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 соответствующие им параметры уплотняющих машин. Возможность определения продолжительности строительства покрытий и длительности операций по укладке и уплотнению смесей с учетом влияния разных факторов позволяет организовать во времени производственный процесс.

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. Асфальтобетон в условиях жаркого климата / А.М. Алиев. – Баку, 1980. – 112 с.
2. Андреев, Г.С. Экспериментальные исследования комбинированного катка // Труды ВНИИСтройдормаш / Г.С. Андреев, В.Я. Балакирев. – М., 1985. – № 102.
3. Рациональная технология уплотнения асфальтобетонных покрытий // Труды СоюздорНИИ / Ю.Я. Андрейченко, В.В. Бадалов, С.С. Процуто, В.Н. Владимиров, И.Я. Хархута. – М., 1972. – Вып. 61. – С. 19 – 38.
4. Апарцев, А.З. Технологические схемы и правила укладки и уплотнения горячих многощелебнистых асфальтобетонных смесей при устройстве покрытий автомобильных дорог / А.З. Апарцев и др. – СПб. ; Павловск, 1996. – 51 с.
5. Артемьев, К.А. Дорожные машины. Машины для устройства дорожных покрытий / К.А. Артемьев. – М. : Машиностроение, 1982. – 349 с.
6. Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безруков. – М. : Высшая школа, 1986.
7. Бадалов, В.В. Исследование катков при уплотнении асфальтобетонных дорожных покрытий : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Бадалов. – Л., 1974.
8. Бадалов, В.В. Рациональная технология уплотнения асфальтобетонных смесей / В.В. Бадалов, А.А. Шестопапов // Автомобильные дороги. – 1972. – № 6. – С. 19.
9. Бадалов, В.В. Изменение температуры асфальтобетона в процессе уплотнения / В.В. Бадалов, А.Ф. Зубков // Автомобильные дороги. – 1973. – № 9.
10. Бируля, А.К. К теории уплотнения грунтов / А.К. Бируля // Труды ХАДИ. – Харьков, 1959. – Вып. 20.
11. Белоусов, Л.И. Выбор способа уплотнения на ровность асфальтобетонных покрытий / Л.И. Белоусов, Н.Я. Хархута // Автомобильные дороги. – 1974. – № 6.
12. Блехман, И.И. Об эффективных коэффициентах трения при вибрации / И.И. Блехман // Изв. АН СССР, ОТН. – 1958. – № 7.
13. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1970. – 197 с.
14. Богуславский, А.М. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А.М. Богуславский. – М. : Высшая школа, 1965. – 115 с.
15. Варганов, С.А. Теоретические и экспериментальные исследования динамики вибрационных катков / С.А. Варганов // Труды ВНИИСтрой-дормаш. – М., 1962. – № 28.
16. Васильев, А.П. Строительство и реконструкция автомобильных дорог. СЭД / А.П. Васильев и др. ; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.П. Васильева. – М. : Информавтодор, 2005. – Т. 1. – 207 с.
17. Владимиров, В.Н. Опыт устройства покрытий из битумоминеральных смесей толщиной до 25 см за один рабочий проход укладчика / В.Н. Владимиров, Ю.Я. Андрейченко, И.П. Шульгинский // Труды СоюздорНИИ. – Вып. 84. – С. 133 – 142.
18. Гаркави, Н.Г. Машины для земляных работ / Н.Г. Гаркави и др. – М. : Высшая школа, 1982.
19. Гезенцевей, Л.Б. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцевей. – М. : Транспорт, 1976. – 32 с.
20. Горельшев, Н.В. Технология и организация строительства автомобильных дорог / Н.В. Горельшев и др. – М. : Транспорт, 1991. – 551 с.
21. Горельшев, Н.В. Устройство битумоминеральных оснований / Н.В. Горельшев и др. // Автомобильные дороги. – 1972. – № 4.

22. Горячев, М.Г. Технология и организация строительства городских путей сообщения. Ч. 2 : Строительство дорожных одежд / М.Г. Горячев. – М., 2003. – 259 с.
23. Гоберман, Л.А. Основы теории, расчета и проектирования строительных и дорожных машин / Л.А. Гоберман. – М. : Машиностроение, 1988. – 464 с.
24. Дульнев, Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М. : Высшая школа, 1990.
25. Иноземцев, А.А. Битумоминеральные материалы / А.А. Иноземцев. – Л. : Изд-во литературы по строительству, 1972. – 94 с.
26. Истомин, В.С. Практическое руководство по текущему ремонту асфальтобетонных покрытий городской дорожной сети / В.С. Истомин. – М. : Прима-Пресс-М, 2001. – 58 с.
27. Ищенко, И.С. Технология устройства и ремонта асфальтобетонных покрытий / И.С. Ищенко, Т.Н. Калашникова, Д.А. Семенов. – М. : Аир-Арт, 2001.
28. Зубков, А.Ф. Влияние вибрации на движение вальца катка по уплотняемой поверхности / А.Ф. Зубков // Научный вестник ВГСУ. Серия Дорожно-транспортное строительство. – Воронеж, 2004. – Вып. 2.
29. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2006613129. Моделирование и расчет температурных режимов дорожных одежд нежесткого типа в нестационарных условиях / А.Ф. Зубков. – 05.09.2006.
30. Зубков, А.Ф. Технология устройства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей с учетом температурных режимов / А.Ф. Зубков. – Тамбов, 2006. – 152 с.
31. Зубков, А.Ф. Методика разработки технологических процессов строительства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей / А.Ф. Зубков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Т. 13, № 1. – Рубрика 04. Препринт № 18. Россия. – 61 с.
32. Зубков, А.Ф. Выбор технологических режимов работы машин для укладки и уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей / А.Ф. Зубков, Вл. П. Подольский // Мосты и дороги. – 2006. – № 2.
33. Зубков, А.Ф. Уплотняй, но проверяй / А.Ф. Зубков, Вл.П. Подольский // Автомобильные дороги. – 2007. – № 1. – С. 85–86.
34. Зубков, А.Ф. Влияние условий производства работ на выбор технологических режимов работы машин при строительстве дорожных покрытий из горячих смесей / А.Ф. Зубков // Информационная среда вуза : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново, 2006. – С. 225 – 235.
35. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610256. Моделирование и расчет технологических параметров машин при строительстве покрытий / А.Ф. Зубков, В.П. Берестов. – М., 2007.
36. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610827. Моделирование взаимодействия жесткого вальца с уплотняемым материалом и расчет напряжений в зоне контакта / А.Ф. Зубков. – М., 2007.
37. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610903. Моделирование процесса строительства покрытий и выбор параметров машин для укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей / А.Ф. Зубков, Вл.П. Подольский, В.П. Берестов. – М., 2007.
38. Зубков, А.Ф. Устройство для контроля работы самоходных катков / А.Ф. Зубков, Ю.Д. Суродин, С.В. Дегай // Информационный листок № 89(4406). – 1989.
39. Зубков, А.Ф. Вибровозбудитель с изменяющимися параметрами / А.Ф. Зубков, Ю.Д. Суродин, С.В. Дегай // Информационный лист № 88(4405). Сер. 67.17.23 / КиргизИНТИ. – Фрунзе, 1989.
40. Зубков, А.Ф. Обоснование параметров контакта металлического вальца катка с уплотняемым материалом / А.Ф. Зубков // Научный вестник ВГСУ. Серия транспортное строительство. – 2004. – № 3. – С. 77 – 80.

41. Зубков, А.Ф. Сопоставление параметров вибрационных и статических катков для уплотнения асфальтобетонных смесей / А.Ф. Зубков, Н.Я. Хархута // Труды СоюздорНИИ. – М., 1975. – Вып. 84. – С. 179 – 182.
42. Калужский, Я.А. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд / Я.А. Калужский, О.Т. Батраков. – М. : Транспорт, 1971.
43. Капустин, М.И. Улучшение ровности покрытий при их уплотнении катками на пневматических шинах / М.И. Капустин, Н.Я. Хархута, Е.К. Чабуткин // Автомобильные дороги. – 1977. – № 5.
44. Костельов, М.П. Основные направления развития методов и совершенствования машин для уплотнения грунтов и асфальтобетона / М.П. Костельов, Э.И. Деникин // Сборник научных трудов СоюздорНИИ. – М., 1975. – Вып. 84.
45. Костельов, М.П. Технологические особенности и параметры уплотнения горячего асфальтобетона гладковальцовыми катками / М.П. Костельов, Я.М. Посадский // Труды СоюздорНИИ "Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд". – М., 1980. – С. 72 – 91.
46. Прочность и долговечность асфальтобетона / под ред. Б.И. Ладыгина. – Минск : Наука и техника, 1972. – 187 с.
47. Локшин, Е.С. Выбор рациональных режимов работы и областей применения комплекса самоходных катков при строительстве асфальтобетонных покрытий / Е.С. Локшин. – М. : МАДИ, 1984.
48. Уплотняющие машины / В.П. Ложечко, А.А. Шестопалов, В.П. Окунев, Р.Д. Окулов. – Рыбинск : Рыбинский дом печати, 2004. – 78 с.
49. Маслов, А.Г. Исследование параметров вибрационного оборудования для уплотнения асфальтобетонных смесей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Г. Маслов. – Харьков, 1973.
50. Михеев, М.А. Основы теплопередач / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1979.
51. Мучник, Г.Ф. Методы теории теплообмена. Ч. 1. Теплопроводность / Г.Ф. Мучник, И.Б. Рубашов. – М. : Изд-во "Высшая школа", 1987.
52. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Программа ELGUT. – СПб. : Кооператив "Тор", 2003.
53. Носков, С.К. Влияние вибрирования на структурно-механические свойства асфальтобетона как тиксотропной коллоидной системы / С.К. Носков, Н.В. Михайлов // Коллоидный журнал. – 1956. – Т. 18, № 4. – С. 173 – 177.
54. Партнов, С.Б. Определение параметров вальцов многоцелевого назначения для моторных катков статического действия : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Б. Партнов. – Киев, 1987.
55. Пермяков, В.Б. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей / В.Б. Пермяков, А.В. Захаренко // Строительные и дорожные машины. – 1989. – № 5. – 12–13 с.
56. Пермяков, В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях / В.Б. Пермяков // Строительные материалы. – 2005. – № 10. – С. 8–9.
57. Подольский, Вл. П. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Т. 1. Земляное полотно / Вл. П. Подольский, А.В. Глагольев, П.И. Поспелов. – М. : ВГАСУ. – 2005. – 522 с.
58. Протодьяконов, М.М. Методика рационального планирования экспериментов / М.М. Протодьяконов, Р.И. Тедер. – М. : Изд-во "Наука", 1970.
59. Путк, А.И. Эффективность некоторых катков / А.И. Путк // Автомобильные дороги. – 1978. – № 6. – С. 12 – 16.
60. Руденская, И.М. Реологические свойства битумоминеральных материалов / И.М. Руденская, А.В. Руденский. – М. : Высшая школа, 1971. – 131 с.
61. Руденский, А.В. Способы повышения эксплуатационной надежности дорожных

- битумов и асфальтобетонов / А.В. Руденский // Обзорная информация. – М. : Госхимиздат, 1981. – Вып. 4. – 48 с.
62. Семенов, В.П. О коэффициенте трения между уплотняющей вибромашиной и грунтом / В.П. Семенов, А.Я. Башкарев // Труды ЛПИ. – Л. : Изд-во "Машиностроение", 1969. – № 309.
63. Сергеева, Т.Н. Выбор параметров катков при уплотнении асфальтобетонных покрытий : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.Н. Сергеева. – Л. : ЛИСИ, 1981.
64. Сурудин, Ю.Д. Вибровозбудитель с изменяющимися параметрами / Ю.Д. Сурудин, А.Ф. Зубков, С.В. Дегай // Информационный листок № 88(4405). Сер. 67.17.23. – Фрунзе : КиргизНИИНТИ, 1989.
65. Сурудин, Ю.Д. Устройство для контроля работы самоходных катков / Ю.Д. Сурудин, А.Ф. Зубков, С.В. Дегай // Информационный листок № 89(4406). Сер. 67.17.23. – Фрунзе : КиргизНИИНТИ, 1989.
66. Хархута, Н.Я. Машины для уплотнения грунтов / Н.Я. Хархута. – Л. : Машгиз, 1953.
67. Дорожные машины / Н.Я. Хархута, М.И. Капустин, В.П. Семенов, И.Э. Эвентов ; под ред. Н.Я. Хархута. – Л. : Машиностроение, 1976.
68. Филиппов, Б.И. Дифференциальные уравнения движения рабочего органа трамбующих машин и решение с помощью моделирования на математической машине / Б.И. Филиппов // Строительные и дорожные машины. – 1966. – № 9.
69. Шапоров, О.М. Техника работы на электронных моделирующих установках / О.М. Шапоров. – Л. : Энергия, 1968.
70. Шестопалов, А.А. Уплотнение слоя асфальтобетонной смеси на жестком основании укаткой / А.А. Шестопалов, И.П. Петров // Исследование конструктивных параметров и динамики вибрационных машин : межвуз. сб. науч. тр. – Ярославль : ЯПИ, 1985. – 111 с.
71. Якунин, О.А. Исследование процесса охлаждения слоев асфальтобетонных смеси / О.А. Якунин, Н.В. Горельшев // Сборник научных трудов СоюздорНИИ. – М., 1972. – 132 с.
72. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Цытович Н.А. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1983. – 288 с.
73. СНиП 3.06.03–85. Автомобильные дороги. – М. : Госстрой, 1986.
74. СНиП 2.05.02–85*. Автомобильные дороги. – М. : ФГУП ЦПП, 2005.
75. ГОСТ 120801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – Введ. 01.01.1999. – М. : МНТКС, 1999.
76. ТР 103–00. Технические рекомендации по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона. – М. : ГУП НИИ Мосстрой, 2000. – 43 с.
77. ГОСТ 9128–97. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромы и асфальтобетон. Технические условия. – М. : МНТКС, 1998.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ НА ВЫБОР СВОЙСТВ ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ	4
1.1. Выбор материала для дорожного покрытия с учетом нормативных требований к эксплуатационным показателям автомобильной дороги	4
1.2. Влияние свойств материала на выбор параметров машин для устройства покрытий нежесткого типа	11
1.3. Влияние параметров уплотняющих машин на качество строительства дорожных покрытий	15
1.4. Анализ требований нормативных документов и принятых рекомендаций к технологии строительства дорожных покрытий с применением горячих асфальтобетонных смесей	22
Глава 2. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКОГО ТИПА	26
2.1. Влияние уплотняющей нагрузки на эксплуатационные параметры асфальтобетонного покрытия	27
2.2. Анализ параметров катков с металлическим вальцом для уплотнения дорожных покрытий нежесткого типа	30
2.3. Влияние параметров вибрации на ходовые качества уплотняющих машин	38
Глава 3. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СВОЙСТВА ГОРЯЧИХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	50
3.1. Влияние температуры на деформационно-прочностные характеристики горячего асфальтобетона	50
3.2. Влияние температуры на процессы устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	57
3.3. Моделирование тепловых процессов при строительстве дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	61
3.4. Влияние температуры на теплофизические параметры асфальтобетонных смесей	69
3.5. Обоснование применения законов нестационарных теплопередач к строительству покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	73
3.6. Влияние температуры на деформационно-прочностные характеристики горячих асфальтобетонных смесей	75
Глава 4. ВЛИЯНИЕ ТЕМПА ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ НА ТЕХНОЛОГИЮ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ	81
4.1. Определение продолжительности строительства покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	81
4.2. Определение продолжительности устройства покрытия из горячих асфальтобетонных смесей с учетом температурных режимов	83

4.3. Влияние условий производства работ и свойств горячих смесей на продолжительность работ по распределению слоя покрытия	94
4.4. Влияние условий производства работ на продолжительность эффективного уплотнения горячих асфальтобетонных смесей	105
4.5. Устройство дорожных покрытий нежесткого типа из горячих асфальтобетонных смесей при пониженных температурах воздуха	114
Глава 5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЖЕСТКОГО ВАЛЬЦА КАТКА С УПЛОТНЯЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ	125
5.1. Тенденции в развитии самоходных катков для строительства дорожных покрытий автомобильных дорог	125
5.2. Влияние свойств материала на параметры контакта вальца катка с уплотняемым материалом	131
5.3. Расчет контактных напряжений под жестким вальцом дорожного катка статического действия	137
5.4. Анализ распределения контактных напряжений под вальцом катка	144
5.5. Влияние параметров катка на характер колебаний вибрационного вальца катка	152
5.6. Расчет напряжений под вальцом вибрационного катка	162
5.7. Экспериментальное определение контактных напряжений под вальцом катка при действии динамической нагрузки	165
5.8. Выбор звена уплотняющих машин при разных методах уплотнения	177
Глава 6. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ УСТРОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ	182
6.1. Влияние технологии устройства асфальтобетонного покрытия на выбор параметров механизированного звена машин	182
6.2. Анализ методов разработки технологических процессов уплотнения дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	186
6.3. Методика разработки технологических процессов устройства дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	189
6.4. Техничко-экономическое обоснование выбора технологических параметров комплекта машин при строительстве дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей	213
Заключение	215
Список литературы	216