

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

На правах рукописи

Бойцев

БОЙЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВАЛЬЦОВ ДОРОЖНОГО
КАТКА С ИЗОТРОПНЫМ СИЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА
АСФАЛЬТОБЕТОННУЮ СМЕСЬ**

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъёмно-транспортные машины

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

Шестопапов А.А.

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И МЕТОДОВ БОРЬБЫ С ОБРАЗОВАНИЕМ КОЛЕИ В СЛОЯХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	10
1.1 Влияние различных факторов на образование колеи.....	10
1.1.1. Шипы и абразивный износ	14
1.1.2. Влияние годографа точки приложения нагрузки	17
1.1.3. Эксплуатационные требования к дорожным одеждам	20
1.2 Уплотнение как метод снижения величины колееобразования на дороге	25
Выводы по первой главе	31
ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ С УПЛОТНЯЕМЫМ ДОРОЖНЫМ СЛОЕМ	32
2.1 Дорожные катки и существующая технология уплотнения – источник анизотропной поверхности покрытия.....	32
2.2 Напряжённо-деформированное состояние уплотняемого слоя при укатке ..	34
2.2.1. Учёт деформационной анизотропии (упругие деформации)	45
2.2.2. Учёт прочностной анизотропии (пластические деформации)	48
2.2.3. Определяющие связи для пластических деформаций	51
2.2.4. Проверка теоретических исследований методом конечных элементов	52
2.3 Условия создания изотропного дорожного покрытия при уплотнении дорожными катками.....	56
2.4 Рабочие органы дорожных катков, обеспечивающие изотропию свойств дорожного покрытия.....	61
Выводы по второй главе	64
ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	66

3.1	Обоснование новой методики оценки степени анизотропии деформационных свойств асфальтобетонной смеси.....	66
3.2	Проведение экспериментальных исследований.....	70
	Выводы по третьей главе.....	88
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ К ДОРОЖНЫМ КАТКАМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ИЗОТРОПНОЕ СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА УПЛОТНЯЕМЫЙ МАТЕРИАЛ.....		
		89
4.1	Разработка новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием..	89
4.1.1.	Рекомендации по применению пневмоколесного дорожного катка для получения изотропного дорожного покрытия.....	96
4.1.2.	Рекомендации по применению гладковальцового дорожного катка для получения изотропного дорожного покрытия.....	101
4.2	Испытания вальцов дорожных катков с изотропным силовым воздействием на уплотняемую асфальтобетонную смесь.....	105
4.3	Рекомендации по созданию изотропного дорожного покрытия существующими дорожными катками с гладкими вальцами.....	108
	Выводы по четверной главе.....	114
	Заключение	115
	Список литературы	116
	Приложения	134

Введение

Актуальность темы исследования. В последнее время мировая практика эксплуатации автомобильных дорог с асфальтобетонным покрытием столкнулась с проблемой образования колеи, которая снижает срок их службы. Одной из многочисленных причин, вызывающих её образование и развитие в процессе эксплуатации дороги, является анизотропия свойств уплотнённого асфальтобетонного слоя. Так, существующая технология уплотнения слоёв асфальтобетонных смесей дорожными катками предусматривает их движение по схеме вперёд-назад вдоль продольной оси дороги. Используемые в процессе строительства дорожные катки не могут выполнять уплотнение асфальтобетонной смеси так, чтобы в результате получалось дорожное покрытие с одинаковыми физико-механическими свойствами по всем направлениям (изотропное). Рабочие органы уплотняющих машин оказывают направленное силовое воздействие на формирование структуры асфальтобетона в процессе уплотнения, так как силовое воздействие со стороны рабочих органов дорожных катков находится в плоскости, параллельной продольной оси дороги.

Это приводит к формированию структуры уплотняемого материала с направленной ориентацией зёрен наполнителя, что обуславливает анизотропию физико-механических свойств дорожного покрытия. В результате чего сопротивление асфальтобетона на сдвиг в продольном и поперечном направлениях дорожного полотна различные. Это стимулирует процесс образования продольной колеи и приводит к снижению срока службы дорожного покрытия. Отсюда вытекает потребность в создании новых рабочих органов дорожных катков с силовым воздействием, способных обеспечивать, в результате уплотнения, изотропное дорожное покрытие.

Степень разработанности. Поиску возможностей модернизации конструкций дорожных уплотняющих машин и теории уплотнения дорожных строительных материалов, посвящены работы Артемьева К.А., Бадалова В.В., Богомолова В.А., Варганова С.А., Захаренко А.В., Зубкова А.Ф., Иванченко С.Н.,

Карасева А.Н, Костельова М.П., Носова С.В., Островцева Н.А., Пермьякова В.Б., Попова Г.Н., Путка А.И., Репина С.В., Сергеевой Т.Н., Тюремнова И.С., Угая С.М., Чабуткина Е.К., Шестопалова А.А., Хархуты Н.Я. и многих других.

Среди иностранных ученых данный вопрос рассматривался в работах Aslam A., Chetan V., Darabi M.K., Dongre R., Grootenboer H.J, Huan Q., Konrad M., Masad E., Ryan S., Pellinen T.K., Scherocman J.A., Schwartz C.W, Samer W., West R.C..

Обзор и анализ известных исследований в области уплотнения асфальтобетонов показал, что анизотропия свойств асфальтобетона, и как следствие образование колеи на дорогах, не рассматривалась ранее.

Недостатком известных дорожных машин для уплотнения асфальтобетона выступает отсутствие конструктивной возможности управления силовым полем, которое оказывают рабочие органы на слой смеси в процессе её уплотнения. Это приводит к формированию анизотропной структуры асфальтобетона. В то время как в процессе эксплуатации, такое покрытие в продольном и поперечном направлениях дороги деформируется различным образом под действием транспортных нагрузок, что в свою очередь способствует образованию колеи.

Существующие методики определения параметров рабочих органов дорожных катков не учитывают характера формируемой структуры уплотняемого материала, изотропности его прочностных и деформационных свойств. Получаемое в результате укатки асфальтобетонное покрытие является анизотропным, что не позволяет обеспечивать получение качественного покрытия, стойкого к образованию колеи в процессе его эксплуатации. Таким образом, с помощью предлагаемой научной методики имеется возможность снизить процесс колееобразования и повысить срок службы дорожного покрытия.

Целью диссертационной работы является разработка и обоснование методики создания новых рабочих органов дорожных катков с силовым воздействием на уплотняемый материал, обеспечивающих в результате уплотнения изотропное асфальтобетонное дорожное покрытие.

Задачи диссертационного исследования:

- Разработать математическую модель взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью с целью установления критерия оценки степени изотропности силового воздействия на неё.

- Разработать методику экспериментальной оценки степени анизотропии прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей.

- Обосновать рекомендации по определению параметров новых рабочих органов дорожных катков с силовым воздействием на уплотняемый материал, обеспечивающих получение изотропного дорожного покрытия.

- Разработать алгоритм расчёта и программу ЭВМ, обеспечивающие построение траектории движения с получением изотропного силового воздействия на уплотняемый материал при укатке традиционными дорожными катками.

- Разработать методику обоснования параметров вальцов дорожных катков с изотропным силовым воздействием на уплотняемый материал.

Объект диссертационного исследования - процесс взаимодействия рабочих органов дорожных катков с изотропным силовым воздействием на уплотняемый слой асфальтобетонного дорожного покрытия.

Предмет диссертационного исследования - методика обоснования конструктивных и технологических параметров рабочих органов с изотропным силовым воздействием на асфальтобетонное дорожное покрытие.

Научная новизна диссертационного исследования.

1. Разработана математическая модель взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью, позволяющая установить критерия оценки степени изотропности силового воздействия на неё.

2. Разработана методика оценки величины анизотропии прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей, обеспечивающая подбор асфальтобетонных смесей с минимальной анизотропией свойств.

3. Обоснованы рекомендации по определению параметров рабочих органов к дорожным каткам, обеспечивающих получение изотропного дорожного покрытия

в процессе уплотнения. Разработаны конструкции новых рабочих органов, обеспечивающих получение изотропного дорожного покрытия.

4. Разработан алгоритм расчёта и программа ЭВМ, обеспечивающие построение оптимальной траектории движения с получением изотропного силового воздействия на уплотняемый материал при укатке традиционными дорожными катками.

5. Разработана методика обоснования характеристик взаимодействия рабочих органов дорожных катков с изотропным силовым воздействием на асфальтобетонную смесь.

Теоретическая значимость работы. Разработано методологическое обеспечение математической моделью взаимодействия рабочих органов дорожных катков с асфальтобетонной смесью, позволяющей анализировать влияние силового поля на получающуюся структуру уплотняемого материала.

Практическая значимость работы. Заключается в разработке новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием на уплотняемый материал и методики оценки степени анизотропии свойств дорожного покрытия.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологической основой диссертации являются методические материалы и нормативные акты в области уплотнения асфальтобетонных смесей дорожными катками. Математическая модель базируется на основных положениях теории уплотнения дорожно-строительных материалов, методах математического моделирования, планирования эксперимента и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью, позволяющая установить критерия оценки степени изотропности силового воздействия на неё.

2. Методика экспериментальной оценки степени анизотропии прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе

уплотнения, обеспечивающая подбор асфальтобетонных смесей с минимальной анизотропией свойств.

3. Рекомендации по разработке новых рабочих органов дорожных катков с силовым воздействием, позволяющие снизить анизотропию дорожных покрытий из асфальтобетона и колееобразование на дорогах.

4. Алгоритм расчёта и программа ЭВМ, обеспечивающие построение оптимальной траектории движения с получением изотропного силового воздействия на уплотняемый материал при укатке традиционными дорожными катками.

5. Методика обоснования характеристик взаимодействия рабочих органов дорожных катков с изотропным силовым воздействием на асфальтобетонную смесь.

Область диссертационного исследования соответствует паспорту научной специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъёмно-транспортные машины, а именно пункту 2 «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчёта технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения» и пункту 3 «Совершенствование технологических процессов на основе новых технических решений конструкций машин».

Степень достоверности результатов диссертационного исследования. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием известных положений теории уплотнения дорожно-строительных материалов, использованием математического аппарата в качестве инструмента исследования, многократном проведении замеров и наблюдений, а также сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные теоретические положения и выводы диссертационного исследования докладывались на международных научно-практических конференциях: V-й международной научно-практической конференции «Современное машиностроение: наука и образование» (г. Санкт-

Петербург, 2014), на ХLI-й научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ», (г. Санкт-Петербург, 2015), на ХLII-й научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (г. Санкт-Петербург, 2016), «Лучшие доклады недели науки СПбГПУ», (г. Санкт-Петербург, 2016), а также на семинарах кафедры «Транспортные и технологические системы» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Новая методика определения степени анизотропии прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей внедрена на предприятии ОАО «Асфальтобетонный завод № 1» при назначении режимов работы дорожных катков и подборе составом смесей.

Результаты исследования внедрены в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» при подготовке магистров по программе «Строительные и дорожные машины» направления «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Публикации. По тематике исследования опубликовано 7 печатных работ общим объемом 2,4 п.л., в том числе 3 статьи опубликованы в научных журналах из перечня ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 142 страницы печатного текста, включает в себя введения, четыре главы, заключение, список литературы, включающий 175 источников и приложений на 9 страницах. В работе представлено 64 формулы, 15 таблиц и 62 рисунка.

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И МЕТОДОВ БОРЬБЫ С ОБРАЗОВАНИЕМ КОЛЕИ В СЛОЯХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

1.1 Влияние различных факторов на образование колеи

Дорожные сооружения сегодня подвергаются крайне высоким нагрузкам со стороны автомобильного транспорта. Транспортные потоки, осевые нагрузки и скорости движения будут продолжать расти в течение следующих десятилетий. По этой причине повышение нагрузочной способности дорожных одежд становится все более и более актуальной темой исследований с целью предотвращения их повреждения и впоследствии минимизирования затрат на строительство дорог и их эксплуатацию. Разрушение дорог происходит не только под действием дорожных нагрузок, но и зависит от многих других факторов, таких как климатические воздействия и не рациональное выполнение строительных работ. Эти факторы могут значительно увеличить воздействие нагрузок на дорогу и сократить срок её эксплуатации.

Разрушение происходит, когда пороговые значения удельных нагрузок или сочетаний нагрузок достигли предела прочности асфальтобетона или превысили его. Одним из основных видов отказов для нежестких дорожных покрытий является образование колеи. Образование колеи может происходить как из-за недостаточной устойчивости верхнего слоя, так и всех слоев дорожных одежд в целом[32,69].

Структурная схема диссертационного исследования приведена на рисунке 1. В работе рассматривается проблема колееобразования.

Теоретическое исследование подтверждает гипотезу анизотропии свойств асфальтобетона, и позволяет определить, как необходимо управлять силовым

полам со стороны рабочих органов уплотняющих машин для получения изотропного дорожного покрытия.

Экспериментальное исследование рассматривает функцию $y=f(x)$, где y - величина колеи, x - степень анизотропия свойств уплотняемого материала.

Предлагается новая методика оценки анизотропии свойств асфальтобетона. На основании полученных результатов обоснованы рекомендации по созданию новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием.

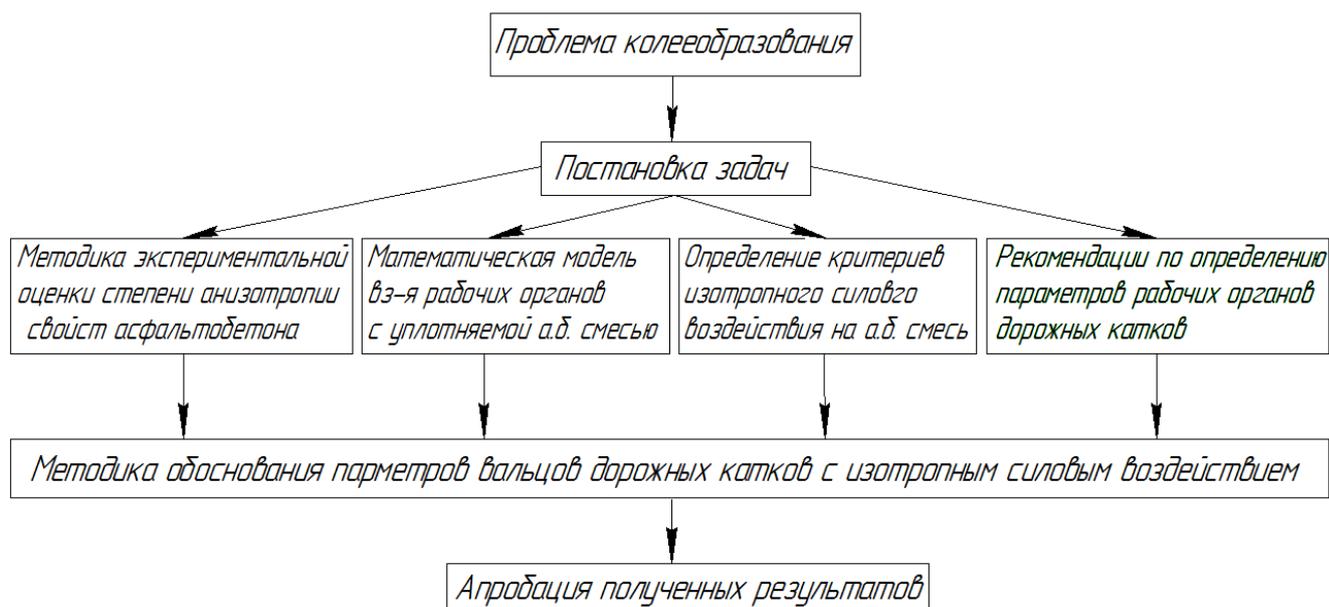


Рисунок 1 – Структурная схема диссертационного исследования.

При анализе явления образования колеи нельзя рассматривать асфальтобетон как отдельный слой, т.к. часть деформаций происходит в слоях основания под действием растягивающих напряжений и просадки грунта. Колея образуется от остаточной деформации в любом из слоёв дорожной одежды или земляного полотна и, как правило, обусловлена консолидацией или боковым движением слоёв дорожной одежды под действием нагрузок. Она может быть вызвана пластической деформацией движения асфальтовой смеси в жаркую погоду или недостаточным уплотнением в процессе строительства.

С увеличением нагрузок большая часть остаточной деформации происходит в верхних слоях, а не в грунтовом основании (рисунок 2).

Таким образом, явление колеи в асфальтовом покрытии обусловлено комплексным результатом деформаций в слоях асфальтобетона.

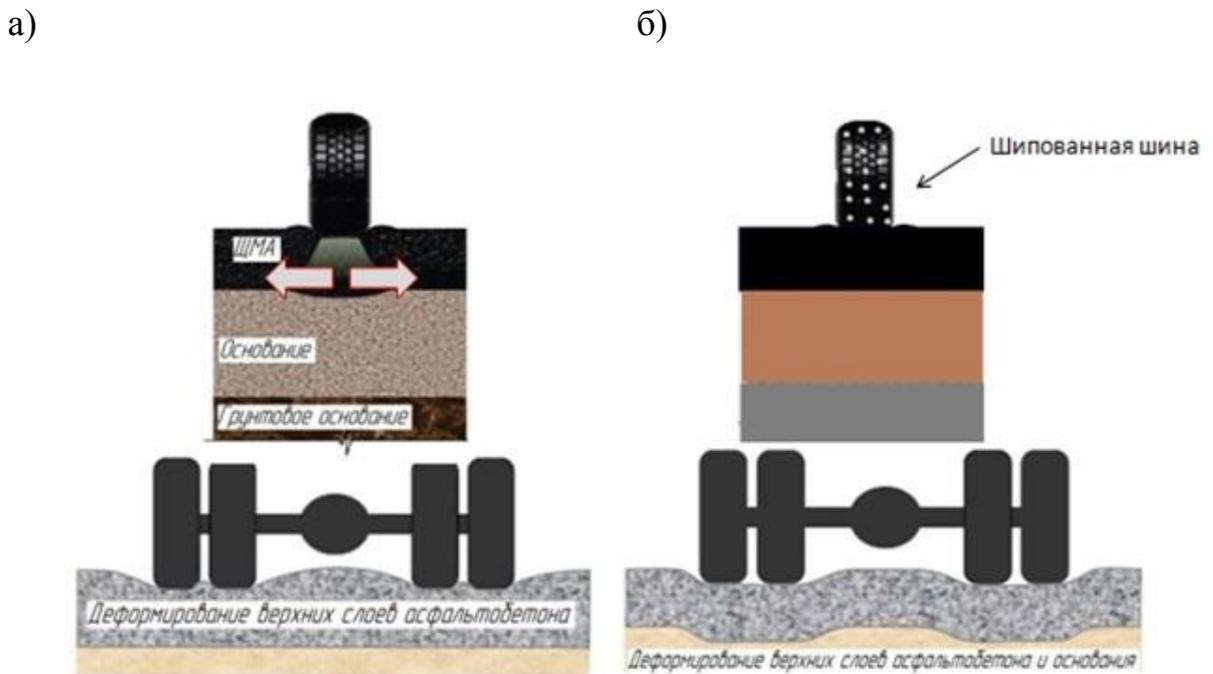


Рисунок 2– Варианты образования колеи в дорожных одеждах: не устойчивая структура верхних слоёв -а) и совместные деформации во всех слоях дорожных одежд - б).

Прогнозирование и предотвращение образования колеи является одной из основных целей дорожных исследований в наши дни, т.к. данная проблема на данный момент не решена по всему миру. По этой причине исследование этого явления представляет наибольший интерес поиска возможностей повышения надёжности и срока службы дорожного покрытия.

В последнее время проблеме образования колеи в дорожных покрытиях посвящено множество исследований как отечественных учёных [17,18,30,37, 63,80, 81,102,134] так и зарубежных. [143, 146,147,151,164,168]. Выборочный обзор ключевых исследований представлен в данной работе. Процесс образования колеи сложный и на него влияет множество факторов, и при определённых условиях степень влияния каждого из факторов может изменяться. Для оценки глубины колеи в слоях асфальтобетона по истечении периода времени,

необходимо определение нагрузки и климатических условий, а также свойств материала для каждого слоя. На рисунке 3 приведена схема, классифицирующая факторы, которые могут приводить к образованию колеи в нежёстких дорожных одеждах.

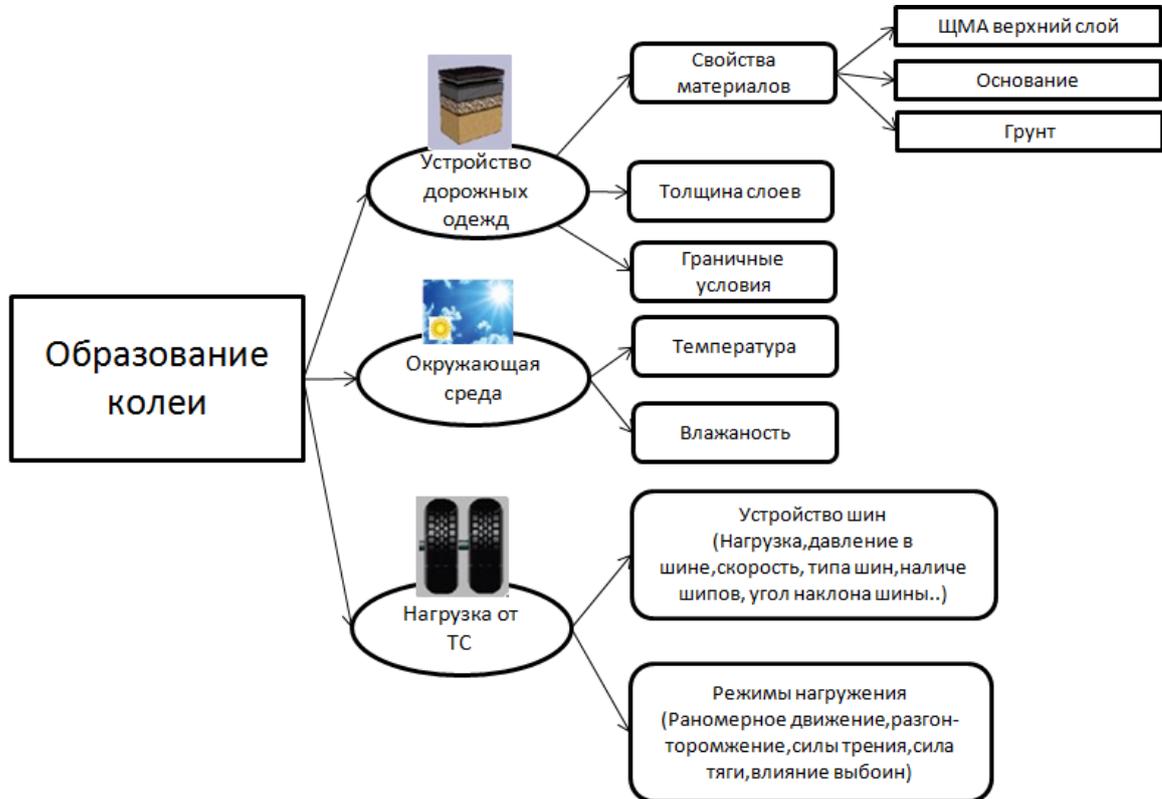


Рисунок 3– Факторы, влияющие на образование колеи в дорожных одеждах.

Одним из основных источников появления колеи служит несоответствие их несущей способности все возрастающим осевым нагрузкам автомобилей и интенсивностям их движения (по полосам перемещения тяжёлого грузового транспорта). Все слои и материалы дорожной конструкции, как правило, проявляют в процессе эксплуатации упругопластические или упруго-вязко-пластические свойства. С течением времени накапливаются пластические деформация, которые приводят к образованию неровностей в покрытии, а затем и к образованию колеи.

Данный вопрос исследовался в работах современных учёных: Б.С. Радовского [112], Б.Б. Телтаева [123] В.А. Золотарева [37], С.А. Мирончука

[79,80], А.П. Васильева [16-19], Н.Н. Иванова [42], В.Д. Казарновского [59], В.В. Мозгового [81], А.М. Богуславского [11] и др.

Зарубежными исследователями [164,173] были проведены испытания, направленные на оценку величины возникающих напряжений при разгоне, торможении и равномерном движении транспортного средства. Данные записывались с помощью датчиков, установленных в дорожном полотне. В результате было экспериментально выяснено, что наибольшие напряжения возникают при торможении. На рисунке 4 приведена схема сил, действующих на колесо при его торможении. Известно, что раньше в нашей стране перед светофорами широко были распространены волнообразные «наплывы» асфальтобетона. Их появление объяснялось превышением величины нагрузки при торможении в сравнении с расчётной. Решить данную проблему смогли, повысив качество уплотнения дорожного полотна и применением новых составов асфальтобетонных смесей.

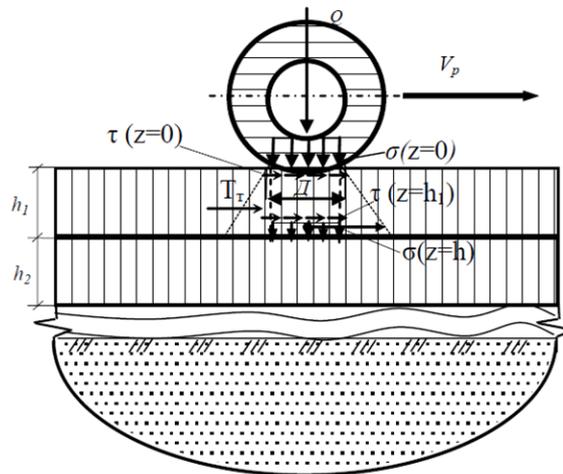


Рисунок 4—Схема действия усилий от колеса при его торможении: Q —вертикальное усилие, создаваемое транспортным средством, T_{τ} —касательное усилие на контакте слоёв от действия транспортных средств[32].

1.1.1. Шипы и абразивный износ

Динамическое разрушение покрытия шипами транспортных средств является широко известной причиной образования колеи. Истирание поверхности

асфальтобетона шипами автомобильных шин, особенно под влиянием воды и мороза при многократном переходе температуры воздуха через 0°C, значительно усиливает своё воздействие при наличии антигололёдных реагентов.

Оценить степень абразивного износа в СССР инженеры могли с помощью эмпирической формулы [63]:

$$\Delta h = a + b \frac{N_{\text{сут}}}{1000}, \text{ мм/год}; \quad (1)$$

где Δh - величина износа (уменьшения толщины) поверхностного слоя покрытия; a, b - эмпирические коэффициенты со средними значениями $a \sim 0,50$; $b = 0,25 \div 0,55$; $N_{\text{сут}}$ - интенсивность движения автотранспорта в сутки.

Но сейчас интенсивности движения выросли многократно и данная формула уже не может быть применима в расчетах. Результаты замеров величины абразивного износа дорожных одежд автомобильными шипами за 2007-2008 год сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Величина износа дорожных одежд под действием шипованных колес [63]

Тип асфальтобетонной смеси в покрытии	Ср. прирост колеи за зиму 2007 (осень) - 2008 (весна), мм	Ориентировочное кол-во проездов авто с шипами за зиму, млн	Удельный износ асфальтобетона покрытия за 1 млн проездов автомобилей с шипами за зиму 2007-2008 гг	
			мм /г	%
ЩМА	2.7	1.79	1.5	100
Тип А	6.7	2.88	2.3	153
тип Б — рецепт 1	8.3	1.95	4,3	287
тип Б — рецепт 2	18.3	2.32	7,9	523

Многие научные статьи указывают на то, что значительная доля колеиности образуется под действием истирания резины с шипами [89,113]. Повышенный абразивный износ шипованной резиной можно объяснить не только

взаимодействием с опорной поверхностью на больших скоростях, что приводит к ударному воздействию на слой дорожных одежд. Одновременно в пятне контакта происходит сдвиг материала, его сжатие, а также скалывание материала. Вследствие реологических свойств резины последняя при входе в контакт с поверхностью (точка 1, рисунок 5) подвергается сжатию, а на выходе из контакта (точка 2, рисунок 5) - она растягивается. Вследствие этого по всей длине контактной поверхности 1-2 помимо вертикальной силы сжатия возникает дополнительная горизонтальная сила. С помощью такой силы металлический шип помимо разрушения покрытия изнашивается сам, что приводит к появлению на его поверхности острых кромок.

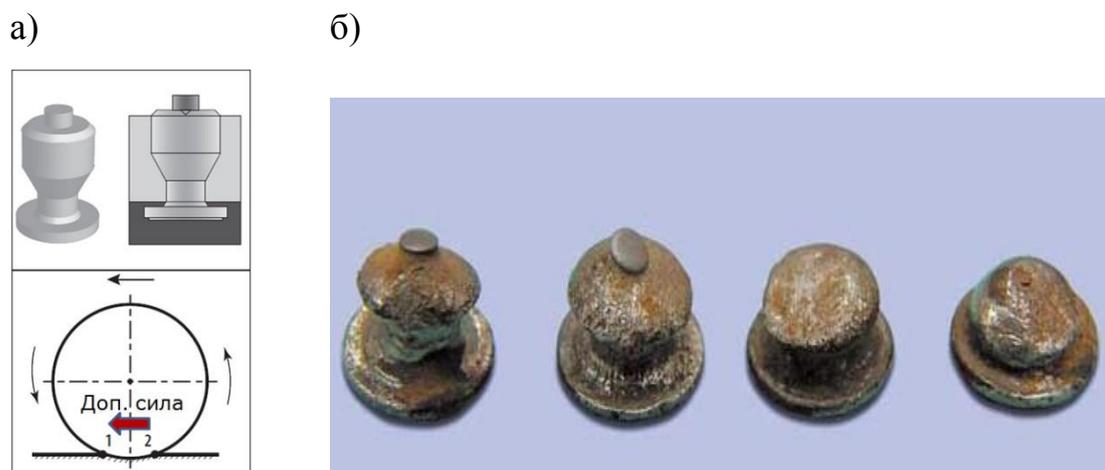


Рисунок 5—Схема взаимодействия шипа автомобильного колеса с поверхностью качения а) и Фото шипа после эксплуатации б).

Абразивное воздействие шипов пневматических шин в европейских странах регулируется специальными стандартами, например, EN 12697-16 [142]. В них описываются требования к проведению испытаний образцов асфальтобетона на устойчивость к износу шипованными шинами в лабораторных условиях. Существует два подхода к проведению испытаний. Стойкость к износу покрытия оценивается величиной изменения объёма образца в ходе проведения испытаний. Измеренная величина появления колеи износа и служит критерием стойкости покрытия к разрушению под действием шипованных шин. Для обоих методов используются образцы диаметром 10 см, но в первом методе высота испытываемого

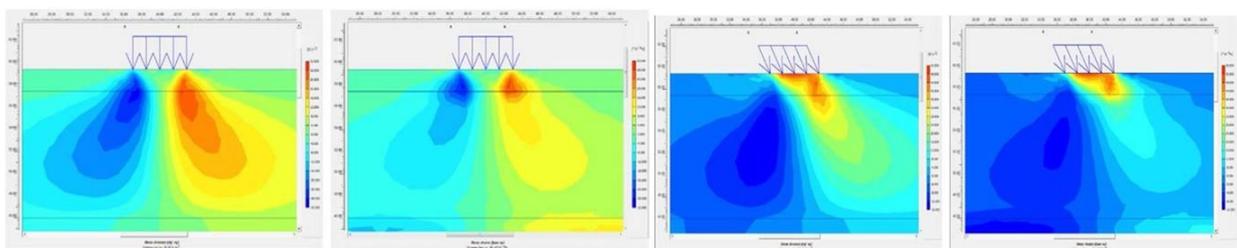
образца 30 мм, а во втором 40мм. В первом методе используются цилиндрический образец асфальтобетона, который фиксируется в специальной камере и затем производится его абразивный износ стальными шариками с подачей воды при температуре 10°C в течение 15 мин.

Во втором методе образец исследуют на испытательном стенде. Резиновые ролики с закреплёнными на них шипами (30 металлических шипов с выступом 1,5 мм) два часа изнашивают торцы образца асфальтобетона при вращении со скоростью 8,6 об/с при температуре 5°C .

В нашей стране на данный момент нет стандартов, определяющих требования к износу асфальтобетона под действием шипов.

1.1.2. Влияние годографа точки приложения нагрузки от транспортного средства

Качение эластичного колеса, нагруженного поперечной боковой силой, имеет свои особенности, так как шина обладает эластичностью не только в продольном, но и поперечном направлении. Под действием боковой силы автомобиль может переместиться в боковом направлении. Это смещение тесно связано с уводом эластичной шины. На рисунке 6 распределение напряжений и деформаций при изменении угла приложения нагрузки, такое нагружение будет соответствовать случаю, когда автомобиль будет снижать скорость при повороте.



а.) напряжения при 0° б.) деформации при 0° в.) напряжения при 30° г.) деформации при 30°

Рисунок 6 – Распределение деформаций и напряжений в сечении слоя асфальтобетона при прямолинейном движении (а, б) и повороте (в, г) [165].

Нагрузка от транспортных средств на дорожные одежды передаётся через пневматические колеса. Результирующий силовой вектор нагрузки, передаваемой от пневматического колеса на дорожное покрытие, находится в разных плоскостях. Проведены экспериментальные исследования, изучающих влияние угла наклона шины на величину возникающих деформаций и напряжений в поперечном сечении дорожных одежд [12,16,149]. Данные на рисунке 7, полученные в результате эксперимента показывают, что изменение годографа приложения нагрузки в пятне контакта на 30° может увеличить возникающие напряжения в 4 раза, а деформации в 8 раз.

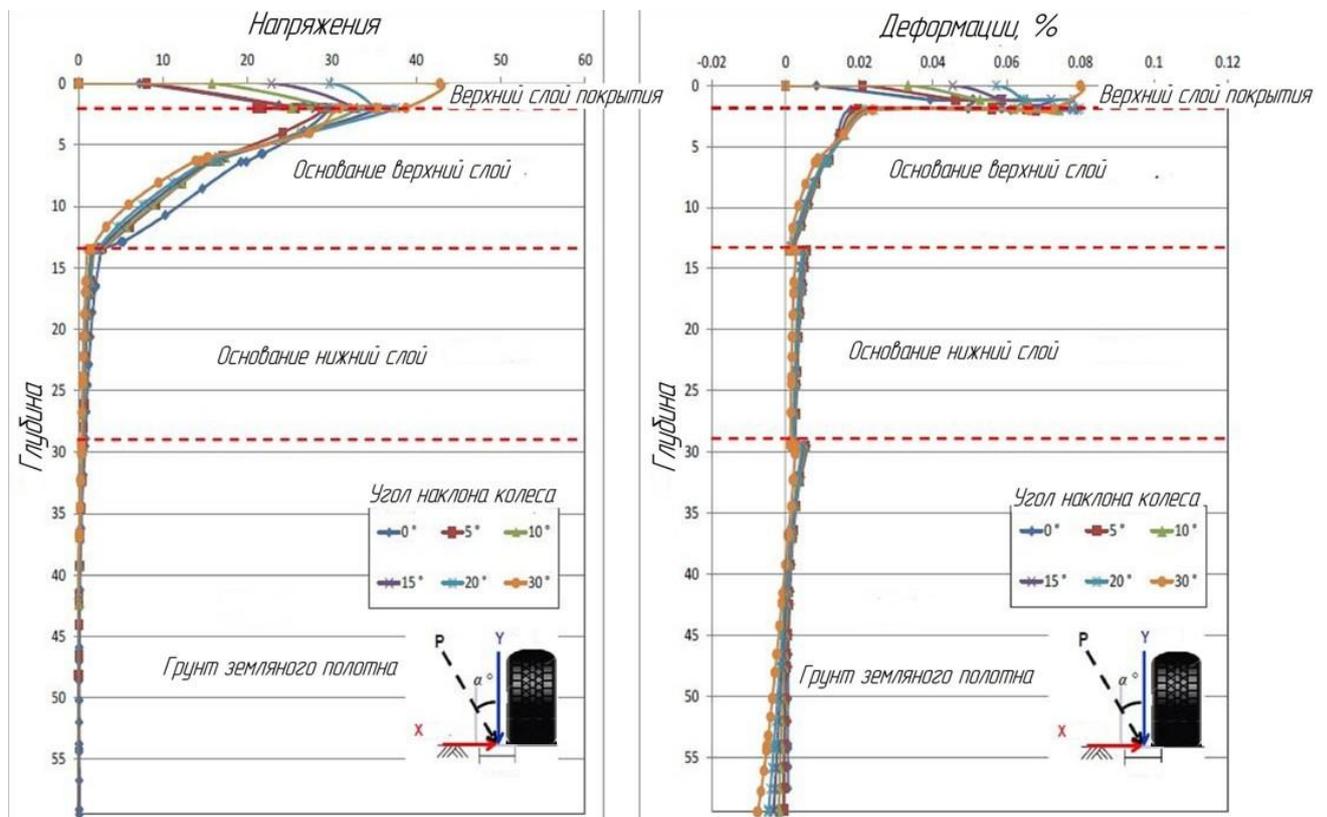


Рисунок 7– Зависимости напряжений и деформаций в поперечном сечении дорожных одежд от угла наклона колеса[149].

Причина возникновения бокового увода, действующего на эластичную шину-боковая реакция дороги. Если поверхность дороги обладает достаточной шероховатостью, не допускающей боковое скольжение шины, перемещение колеса в поперечном направлении происходит за счёт её эластичности. Продольная плоскость сечения шины искривляется, а шина получает деформацию

в пятне контакта. Средняя линия рисунка протектора перестаёт совпадать с продольной плоскостью вращения колеса. На рисунке 8 видно, что в результате деформации точка O_1 , которая соответствует центру пятна контакта колеса в статическом состоянии, отклонилась на расстояние $b_{ш}$ и заняла новое положение, отмеченное точкой O . Это происходит из-за того, что каждая точка средней линии протектора при вращении колеса ложится на опорную поверхность с некоторым смещением. Линия, соединяющая эти смещённые точки, отклонена от продольной оси колеса на угол α , который считается углом увода колеса.

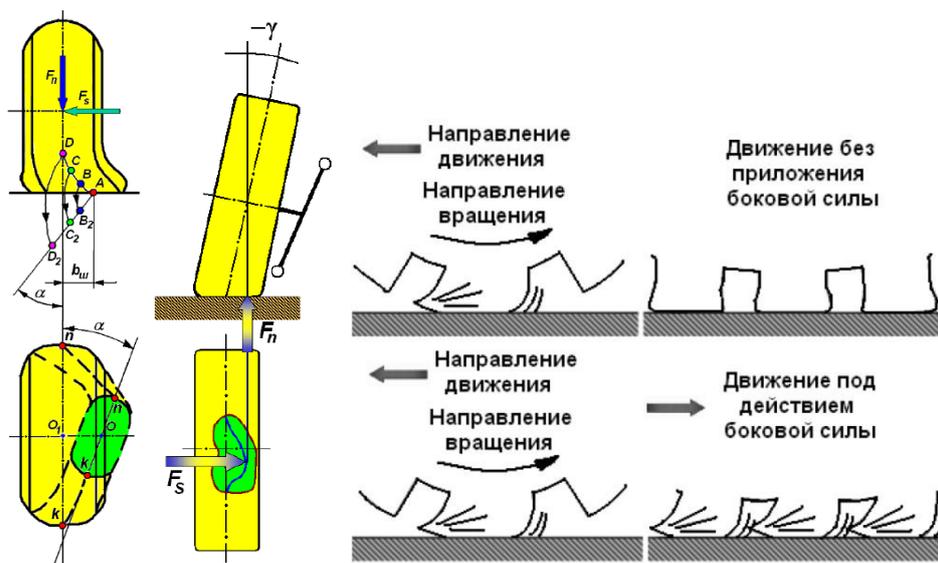


Рисунок 8 – Деформация протектора пневматической шины под воздействием боковой силы и передача поперечных сил относительно продольной оси дороги, в плоскости контакта [2].

Средняя линия пятна контакта, приблизительно совпадающая с направлением движения, также будет расположена под углом к продольной плоскости вращения колеса. Каждый последующий грунтозацеп касается поверхности в не деформированном состоянии, но действие боковой силы вызывает его изгиб. Катящаяся шина только тогда в состоянии передавать боковые силы, если она движется по опорной поверхности под некоторым углом к направлению своего перемещения. Передача боковых сил зависит не только от угла установки колеса, но и от конструкции шины, так более эластичная шина способна обеспечить большую передачу боковых сил. Увод колеса связан не

столько с боковым скольжением шины, сколько с её упругой деформацией. Отдельный выступ протектора представляет собой эластичный элемент, который при движении без возмущающей боковой силы может деформироваться только в продольном направлении. Действие боковой силы приводит к его деформации и в поперечном направлении. Боковая сила F_s , приложенная к середине пятна контакта наружного колеса с отрицательным развалом – γ (рисунок 8), деформирует его так, что продольная ось пятна искривляется и смещается внутрь к продольной оси автомобиля. Точка приложения вертикальной силы в статическом состоянии находится в середине пятна контакта. При повороте, в результате упругой деформации шины, точка приложения вертикальной силы смещается так же внутрь в сторону продольной оси автомобиля. [1,2,8,]

Сдвоенные шины снижают напряжения в верхних слоях асфальтобетона на 60% по сравнению с обычными шинами, таким образом, их использование позволят уменьшить разрушающее воздействие на дорожные одежды [169]. Влияние конструктивных особенностей шин (радиальная, диагональная), давления в шине, рисунка протектора, радиуса колеса и площади пятна контакта и других параметров представлено в работах [54,55,91]. Авторы отмечают значительно влияние этих параметров на величину и характер распределения напряжений в пятне контакта пневматического колеса с опорной поверхностью.

1.1.3. Эксплуатационные требования к дорожным одеждам

К эксплуатационным требованиям относят: интенсивность движения; долю тяжёлых машин в общем составе движения; количество полос для движения и распределение нагрузки на них; продолжительность воздействия подвижных нагрузок (кратковременные, многократные, продолжительное однократное и продолжительные); расчётные температуры верхней и нижней границ диапазона пластичности битумных композиций; тип дорожного покрытия; устройство слоёв дорожных конструкций; состояние и вид грунта земляного полотна и другие параметры.

Проектировщик, зная основные эксплуатационные требования, предъявляемые к участку строящейся дороги и её покрытию, сможет спрогнозировать состояние асфальтобетонного покрытия во времени за период его срока службы (глубина колеи, усталостная долговечность). Интенсивность воздействия транспортных средств на дорожные одежды оценивается с помощью суммарного расчётного числа приведённой расчётной нагрузки или же приведённой интенсивностью воздействия прогнозируемой на рассматриваемом участке покрытия за срок его службы.

Согласно действующим нормам СНиП 2.05.02-85 на автомобильных дорогах с расчётной скоростью движения автомобиля 120 км/ч (дороги I технической категории) допустимой является колея глубиной до 7 мм. При большей глубине колеи следует ограничить скорость движения. А предельно допустимая глубина колеи, при которой уже требуется ремонт дорожного покрытия, составляет для таких дорог 20 мм. Однако в ряде случаев имеющаяся нормативно-техническая база не учитывает ряд изменившихся в последнее время условий эксплуатации. Особенно наглядно это проявилось в период с 2006 по 2008 год на вновь построенных эстакадных участках кольцевой автомобильной дороги, где за период немногим больше 2,5 лет максимальная глубина колеи на значительном протяжении достигла 40 мм и более. Наибольшая глубина была именно на левых полосах движения, где преобладали легковые автомобили. При этом все уложенные в покрытие кольцевой автодороги асфальтобетоны полностью одинаковые [16,19,32,57].

На участках федеральных автомобильных дорог РФ были созданы экспериментальные наблюдательные участки с закладкой разработанных устройств (зондов) патент № 121585 МПК G01N 3/302, позволяющих проводить замеры остаточных деформаций каждого конструктивного слоя дорожной одежды и грунта земляного полотна в реальных условиях эксплуатации в течение длительного срока. [80]

Аналогичные исследования проводились и в ЕС. Установка датчиков измерения напряжений и деформаций была осуществлена в продольном и

поперечном направлении. Проведённый эксперимент позволил получить разницу в силовых нагрузках дорожных одежд в продольном и поперечном направлениях [151]. Результаты измерения напряжений и деформаций установленными датчиками при проезде транспортного средства приведены на рисунке 9. Из приведённого графика видно, что поперечная деформация превышает продольную и является только растягивающей, таким образом зоны сжимающей деформации для поперечного направления отсутствуют.

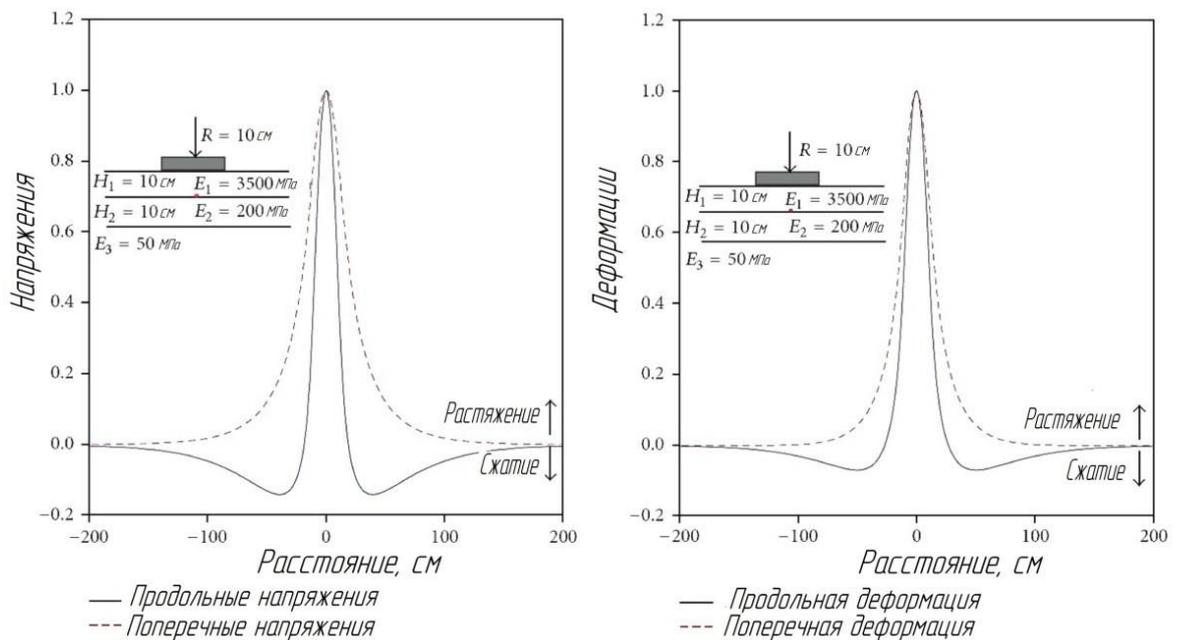


Рисунок 9— Распределение напряжений и деформации в сечении слоя асфальтобетона [151].

Представлены результаты исследования продольной и поперечной деформации на нижней поверхности асфальтобетонного покрытия толщиной 15,24 см. Один цикл деформирования можно условно назвать пульсом. Отмечается одинаковый характер пульсов во всех случаях изменения горизонтальных деформаций для различных испытательных секций. Характер пульса является не симметричным. Пульс продольной деформации состоит из двух зон сжимающих и одной зоны растягивающей деформаций. Первая зона сжимающей деформации имеет место до прохода колеса с максимальными значениями ε_{cb} , а вторая после прохода с максимальными значениями ε_{ca} , причем

$\varepsilon_{cb} > \varepsilon_{ca}$. Между зонами сжатия находится зона растягивающей деформации с максимальным значением ε_t . Порядка 79% общей деформации является растягивающей, а 21% сжимающей.

Установлено[122], что после проезда колеса поперечная деформация восстанавливается медленно. Следует отметить, что в отличие от продольной деформации, поперечная деформация является только растягивающей, т.е. зоны сжимающей деформации в ней отсутствуют. Такая картина поперечного деформирования на нижней поверхности асфальтобетона имеет место во всех измерениях. Длительность и частота продольных и поперечных деформаций при проезде автомобиля, замеренные датчиками в асфальтобетонном покрытии, приведены в таблице 2.

Таблица 2– Длительность и частота продольных и поперечных деформаций асфальтобетонного покрытия при средней скорости движения 50 км/ч [122]

Толщина асфальтобетонного покрытия, см	Температура, °С	Частота растягивающей деформации, рад/с	
		продольной	поперечной
15	7,4	13,5	6,1
	25,0	17,7	8,5
8	7,8	20,8	8,6
	29,0	22,1	10,2

Из приведённых выше исследований можно сделать вывод, о том, что величина поперечных напряжений и деформаций, а также их длительность оказывают значительное влияние на деформирование асфальтобетона. Поэтому необходимо внести корректировки в существующую методику тестирования, с целью учёта касательных напряжений, которые оказывают влияние на процесс образования колеи.

Асфальтобетонные смеси являются сложными материалами с физико-механическими свойствами, зависящими от широкого диапазона параметров. С повышением температуры у асфальтобетона начинают в большей степени

проявляться вязко-пластичные свойства, а с понижением упругие свойства материала. Повышение температуры нагрева асфальтобетона в дорожном покрытии приводит к снижению его деформационных свойств, которыми в основном и определяется его способность сопротивляться нагрузкам со стороны транспортных средств. Образованиям локальных (по полосам наката) остаточных деформаций в виде колеи подвержены дорожные одежды в летнее время года. Это явление обусловлено в основном пластическими сдвигами и выпорами самого асфальтобетона. В условиях экстремально жаркого лета 2010 г. причины массового и резкого образования колеи в Европе связаны как раз с поведением асфальтобетона, размякшего от избыточного нагрева. Прочностные свойства асфальтобетона понижаются с повышением температуры. [60,139]. В период эксплуатации дорожный асфальтобетон это упруго-вязко-пластичным материал. При изменении условий его нагружения при его деформировании могут в большей степени проявляться упругие свойства или пластические в сочетании с вязкими. Температурно-временные параметры деформирования асфальтобетонных смесей, как правило, определяются климатом региона и интенсивностью движения на дороге.

В период 2006–2008 годов летние температуры воздуха в районе Санкт-Петербурга были в среднем на 2° С выше средне многолетних. Это усилило образование пластической колеи. Однако данный фактор составил только 10–15% от общей глубины образовавшейся колеи [63].

Глубокие волнообразные неровности и вмятины на асфальтобетонных покрытиях городских конечных остановок общественного транспорта (автобусы, троллейбусы). Это классическое проявление процесса ползучести (медленное, пластическое деформирование материала с накоплением остаточной деформации) после природного избыточного нагрева асфальтобетона, даже под колёсами незначительно нагруженного микроавтобуса.

1.2 Уплотнение как метод снижения величины колееобразования на дороге

Нагрузка от транспортных средств на дорожное покрытие передаётся через пневматические колеса. В процессе эксплуатации, результирующий силовой вектор нагрузки, передаваемой от пневматического колеса на дорожное покрытие, как показано выше, находится в разных плоскостях относительно продольной оси дороги. Такое силовое воздействие на покрытие соответствует случаю движения автомобиля на поворотах, при маневрировании, при перестроении с полосы на полосу и т.п. [80,122]. Составляющая общей нагрузки от транспортных средств, направленная поперёк продольной оси дороги вызывает большие деформации, чем в продольном направлении, что обусловлено анизотропными свойствами покрытия. В процессе эксплуатации дорожное покрытие воспринимает нагрузку от транспорта, годограф суммарного силового вектора которого перемещается в разных плоскостях. При этом горизонтальная проекция этого вектора сил, действующих в плоскостях перпендикулярных продольной оси дороги, не получает соответствующего сопротивления со стороны дороги в этом направлении [138]. Это объясняется анизотропией свойств асфальтобетонного покрытия. В результате чего происходит течение материала в стороны полосы наката и постепенное накопление остаточных деформаций - образование колеи.

Дорожные катки осуществляют уплотнение асфальтобетонной смеси за счёт возвратно-поступательных проходов в плоскости параллельной продольной оси дороги. Благодаря силовому воздействию со стороны рабочих органов уплотняющих машин уплотняемый материал формирует свою структуру. Схематично такое воздействие изображено на рисунке 10.

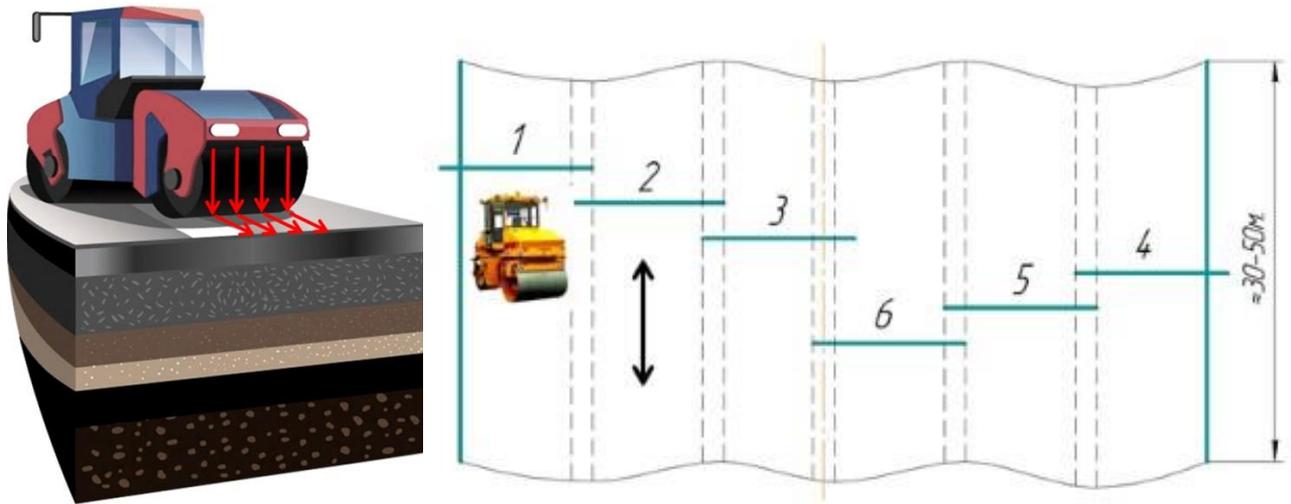


Рисунок 10—Направления и последовательность проходов катка при уплотнении слоёв дорожных одежд.

В результате такой схемы уплотнения, формируется структура материала дорожного покрытия, у которой наблюдается направленная ориентация зерен наполнителя. При этом асфальтобетонная смесь образует структуру повышенной устойчивости в направлении движения катка – параллельно продольной оси дороги. При этом силовое воздействие формирующее эту структуру состоит из вертикальных и горизонтальных сил. Последние направлены ходу движения катка или параллельно продольной оси дороги. Асфальтобетон - это материал, который обладает реологическими свойствами, одним из которых является «память» - свойство учитывающее предысторию его нагружения. Благодаря этому самая устойчивая на сдвиг структура дорожных одежд будет формироваться в направлении параллельном продольной оси дороги [12].

При изучении вопроса колеобразования, было установлено, что величина прогиба асфальтобетонного покрытия зависит не только от показателей амплитудно-частотного колебания, но и от поведения минерального скелета в совокупности с вяжущим[101,113,121]. При анализе внутренних процессов, происходящих в асфальтобетонном покрытии, необходимо учитывать все внешние воздействующие факторы, а также тип и качество уплотнения асфальтобетонных смесей.

Согласно современным представлениям структура асфальтобетона определяется пространственным расположением зёрен минеральной составляющей и степенью их взаимодействия с вяжущим — битумом. Однако, с учётом рассматриваемых факторов, на первый план выходят требования к когезионным свойствам вяжущего, имеющего наибольшую площадь контакта с мелко дисперсионной минеральной составляющей.

В работе Зубкова А.Ф. [40] отмечается, что для достижения требуемых параметров асфальтобетонного покрытия необходимо обеспечить не только качество применяемых компонентов смеси и обоснованного подбора состава смеси, но также и необходимо учитывать особенности используемых технологий приготовления и укатки смеси. Автор выделяет три основных этапа при устройстве дорожного покрытия, которые способны повлиять на формирование структуры асфальтобетона:

- этап перемешивания битума с минеральным заполнителем при приготовлении асфальтобетонной смеси;
- **этап укладки и уплотнения приготовленной смеси в слои дорожных одежд;**
- этап стабилизации структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации покрытия.

Рассмотрим второй технологический этап, потому что именно здесь формируется структура асфальтобетона, что в свою очередь определяет основные параметры дорожного покрытия из асфальтобетона. К ним относятся деформационные характеристики, плотность, пористость, водонепроницаемость и другие. Именно процесс уплотнения формирует структуру дорожных одежд, он задает направленно-устойчивую структуру материала, которая должна сопротивляться внешним силовым воздействиям от транспортных средств в процессе эксплуатации дороги. Уплотнение не дорогой и очень эффективный метод повышения долговечности дорожных одежд. Анализ получающейся в результате процесса уплотнения структуры асфальтобетонного композитного материала показывает нам, что в результате уплотнения существующими

техническими средствами мы получаем ярко выраженную анизотропную структуру материала [138,157,161]. Это выражается в том, что материал под действием нагрузок в различных направлениях по-разному способен им сопротивляться.

Лабораторные испытания структуры асфальтобетонного материала [161,163,175] подтверждают, что в результате уплотнения по стандарту EN 12697-33 существующими техническими средствами мы получаем ярко выраженную анизотропную структуру материала. На рисунке 11 приведены результаты лабораторных испытаний двух типов битумов: не модифицированный добавками (PG 58-28) и модифицированный (PG 76-22) 5% SBS (стирол-бутадиен-стирол) многократно нагружались на колёсном тестовом стенде под углами 0° , 45° , 90° относительно направления уплотнения. Как видно из результатов испытаний, на накопление остаточной деформации при повторных нагрузках модификация вяжущих не приводит к устранению анизотропных свойств в структуре асфальтобетона, а лишь повышает прочностные характеристики материала.

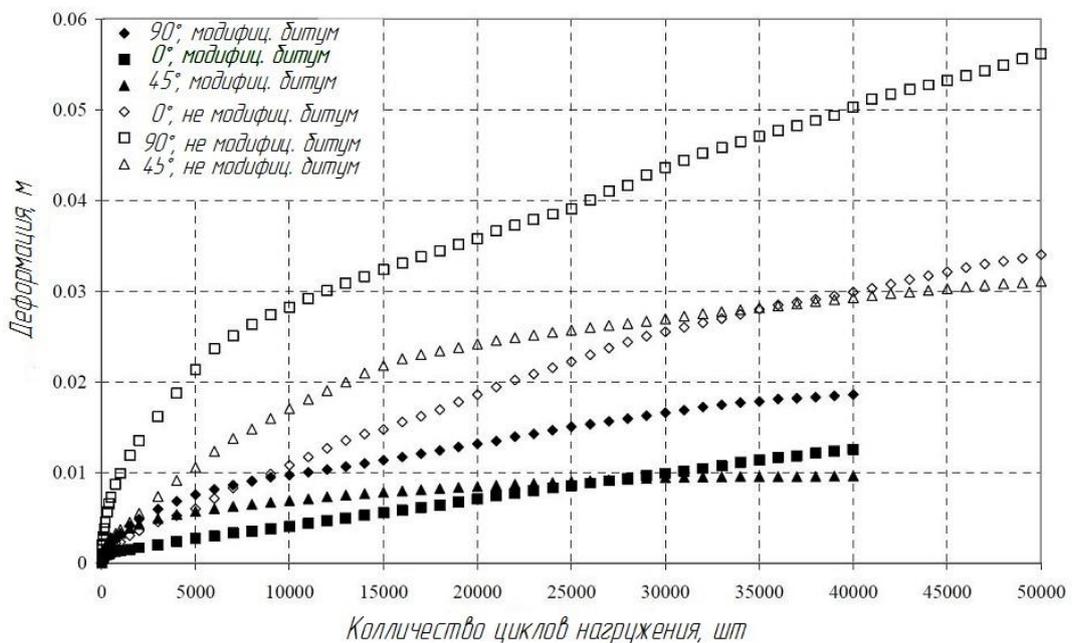


Рисунок 11— Деформирование образцов кернов на колёсной тестовой установке[161].

Для асфальтобетона как реологического тела характерны свойства: анизотропия, ползучесть, релаксация. Среди свойств асфальтобетона можно выделить анизотропию двух видов.

Конструкционная анизотропия "закладывается" в материал при его создании и обусловлена совокупным распределением частиц щебня, их ориентацией, формой и угловатостью, характером чередования слоёв и так далее.

Технологическая анизотропия свойств возникает при деформировании материалов под действием нагрузки и связана с формированием структуры, определённым образом ориентированной по отношению к нагрузке.

Уплотнение дорожных одежд осуществляется дорожными катками, вальцы которых имеют цилиндрическую форму с образующей в плоскости, перпендикулярной оси дорожного полотна. За счёт перемещения вальца вдоль дорожного полотна происходит уплотнение. Катки совершают челночное движение по укатываемой полосе от краёв к оси дороги, а затем в обратном направлении, с перекрытием следа на 20-30 см. Схема укатки должна обеспечивать равномерное уплотнение смеси на всей ширине укладываемого слоя, что должно обеспечиваться равным количеством проходов по укатываемой дорожной поверхности [40].

Благодаря силовому воздействию со стороны вальца дорожного катка начинается перестроение ориентации составляющих минеральных частиц смеси, из неё вытесняется воздух, происходит перераспределение битума в зонах контакта между частицами материала и активно создаются новые связи между частицами. Течение материала под действием направленной ориентированной нагрузки есть сумма молекулярных и агрегатных направленных перемещений. Происходит диффузия молекул из более напряжённого состояния к менее напряжённому, и этот процесс будет проявляться как некая релаксация напряжений. После снятия внешней нагрузки начинает действовать обратная диффузия в обратном направлении. В результате уплотнения возникают дополнительные структурные связи, которые временно повышают модуль упругости и прочность уплотняемого материала.

Совместное течение этих процессов может быть охарактеризовано как непрерывная подстройка деформаций в соответствии с изменением напряжений на заданном уровне нагрузки. Эти процессы происходят до окончания стабилизации прочностных свойств материала. Наблюдается упрочнение как жидкой фазы (вяжущего), так и структуры минерального заполнителя.

Но эти процессы проходили под действием различных силовых воздействий действующих в плоскостях по ходу движения катка и поперек. В первом случае на уплотняемый слой действуют вертикальные и горизонтальные силы, а в другой (взаимно перпендикулярной плоскости) только вертикальные силы. В итоге мы получаем анизотропное дорожное покрытие с различной устойчивостью в продольном и поперечном направлении.

Ряд исследований подтверждает, что если асфальтобетон нагружать растяжением при температуре выше температуры стеклования, то его молекулы растягиваются и ориентируются в направлении действия нагрузки, и эта конфигурация сохраняется после снятия действия нагрузки и охлаждения материала. При этом прочность на растяжение в перпендикулярном направлении к приложенной нагрузке уменьшается, при этом разница в устойчивости в продольном и поперечно направлении достигает пятикратного значения[36].

Для минерального заполнителя так же был проведён ряд исследований. При деформировании его под действием вальца происходит перестройка его структуры, суть которой сводиться к перекомпоновке частиц заполнителя и смены их ориентации в пространстве. Причём направление ориентации совпадает с направлением действия внешних сил, а положение соответствует минимуму свободной энергии. Следует отметить, что все приведённые ранее методы борьбы с колеобразованием не исключают полностью явления анизотропии материала, которое является основной причиной образования колеи. Для исключения явления анизотропии необходимо изменять напряжённно-деформированное состояние асфальтобетона при его уплотнении.

Выводы по первой главе

Выполненный анализ методов борьбы с колееобразованием, а также влияние различных технологических этапов создания дорожных покрытий из асфальтобетонов, позволяет сделать следующие выводы:

1. Обоснована актуальность проблемы колееобразования, а также необходимость исследований, проведения новых методов борьбы с ней.

2. Доказано что одной из причин образования колеи в слоях дорожных одежд служит анизотропия их свойств, величину которой необходимо снижать путём создания новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием на уплотняемый материал.

3. Для создания изотропного дорожного покрытия с помощью существующей технологии уплотнения требуется разработка новых рабочих органов вальцов дорожных катков, позволяющих изменять направление силового поля относительно направления движения катка.

4. Разработку параметров новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием необходимо осуществлять на основе математической модели, описывающей протекание процессов взаимодействия вальцов дорожных катков с укатываемой смесью.

ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ С УПЛОТНЯЕМЫМ ДОРОЖНЫМ СЛОЕМ

2.1 Дорожные катки и существующая технология уплотнения – источник анизотропной поверхности покрытия

Рассмотрим этап уплотнения слоя горячих асфальтобетонных смесей в дорожном покрытии. Именно в результате этого технологического процесса происходит формирование структуры асфальтобетона. За счёт направленного силового воздействия со стороны вальца дорожного катка на уплотняемую смесь обеспечивается требуемый коэффициент уплотнения покрытия и его эксплуатационные показатели. По данным А.В. Шапошникова, асфальтобетон при одинаковых коэффициентах уплотнения может иметь различную прочность [133]. Это можно объяснить формированием различных связей в структуре материала, обусловленное различиями в технологии и способах уплотнения.

Эффективность уплотнения можно оценивать по величине необратимой деформации, возникающей в уплотняемом материале. В свою очередь эти деформации определяются напряжениями, возникающими в пятне контакта рабочего органа уплотняющей машины с асфальтобетонной смесью. Так же значительное влияние оказывают длительность нагружения и скорость изменения напряжённо-деформированного состояния материала, что напрямую зависит от режима работы уплотняющих машин. Доказано что добиться требуемых эксплуатационных показателей асфальтобетона возможно только при обеспечении рекомендуемых температур нагрева смеси при уплотнении необходимого уплотняющего воздействия [4,6,26].

Катки статического действия являются самыми распространёнными машинами для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей. На эффективность уплотнения слоев асфальтобетона этими машинами влияет тип смеси, конструктивные параметры вальцов, а также технологические параметры. К

основным технологическим параметрам можно отнести схему и скорость укатки, толщину слоёв смеси, температуры при которых осуществляется уплотнение.

Большую часть объёма асфальтобетонной смеси занимают твёрдые частицы песка или щебня(гравия), формирующие каркасную структуру. Между этими частицами есть промежутки, которые обуславливают пористость. Поры заполняются воздухом и вяжущим в асфальтобетонах. Давления, возникающие в зоне контакта рабочего органа машины с материалом, передаются через точки контакта твёрдых частиц. Возникающие в этих точка силы условно заменяют на силы распределённые по всему объёму. Взаимодействие рабочих органов дорожных катков с укатываемой смесью, а также приближенные методы расчётов напряжений под вальцом дорожного катка рассматривались в ряде работ [5,40,44,95,107]. Но задача определения касательных напряжений в зоне пятна контакта рабочего органа с асфальтобетонной смесью и его влияние на получающуюся структуру асфальтобетонной смеси остался не исследованным.

При проектировании дорожных одежд рассматривают только продольное сечение дорожного полотна, при этом, не принимается во внимание касательные напряжения, которые возникают в поперечном сечении дороги в процессе ее эксплуатации. На частицы уплотняемого материала под рабочим органом, действуют в основном силы в горизонтальной плоскости.

Анизотропные свойства материала зависят от направления приложения нагрузки, формирующей его структуру.

Анизотропную зависимость можно объяснить несколькими аспектами деформационных особенностей геоматериалов, чего не могут сделать обычные теории пластичности. Последние не рассматривают внутреннюю структуру анизотропных материалов. Ода и Накаяма [157,158,159] обобщили три источника анизотропии в гранулированных материалах: анизотропное распределение контактных нормалей, что связано с взаимодействием частиц; упорядоченная ориентация пустот в пространстве; упорядоченная ориентации несферических частиц. Авторы отмечают, что первые два источника могут оказывать существенное влияние на начальных стадиях деформирования материала, в то

время как последний источник доминирует на последующих стадиях деформирования.

2.2 Напряжённо-деформированное состояние уплотняемого слоя при укатке

Из общей теории уплотнения дорожно-строительных материалов [125, 126] известно, что уплотнение материала происходит под действием тех контактных давлений, которые развиваются под рабочими органами уплотняющих машин. При этом необходимо учитывать влияние горизонтальных сил, действующих на поверхности контакта вальца с уплотняемым слоем. Под действием этих сил в уплотняемом слое асфальтобетонной смеси развиваются различные виды деформаций, которые определяются температурой смеси, её составом и др.

Решение смешанной упругопластической задачи связано с определением напряжений и деформаций в асфальтобетонных слоях при одновременном существовании в них областей допредельного и предельного напряжённого состояния. Решение этой задачи для анизотропных асфальтобетонов базируется на разработках, выполненных А. К. Бугровым [14] в рамках смешанной задачи теории упругости и пластического течения для изотропных грунтов. Как показано в целом ряде работ [72,76,77,128,129,132] и др., смешанная упругопластическая задача хорошо отражает характерные особенности деформирования асфальтобетонов. Теория анизотропных сред развивалась в трудах Христича Д.В., Черных К.Ф., Маркина А.А. и др.

В работах Шестопалова А.А. [136,137] решается упругопластическая задача. В асфальтобетонных смесях при уплотнении происходит в основном пластическое деформирование в начале уплотнения, а в конце укатки начинают преобладать упругие деформации. Для описания упругого состояния приводятся положения теории упругости, а при достижении предельного состояния, описываемого функцией текучести, используется теория пластического течения. Приращение деформаций уплотняемого материала складывается из приращений

упругих и пластических деформаций, но анизотропия свойств асфальтобетонной смеси и изменение направленного силового воздействия на неё при укатке не рассматривались.

В настоящей главе решение смешанной задачи рассматривается применительно к случаю деформации дорожных одежд с учётом их прочностной и деформационной анизотропии. Для решения поставленной задачи необходимо создать математическую модель взаимодействия вальца дорожного катка с уплотняемым слоем. Как показано в исследованиях [147,156,159], реалистичным и исключительно часто встречающимся вариантом анизотропии дорожных одежд, и особенно асфальтобетонов, является трансверсальная изотропия. Если через любую точку среды проходит плоскость, в которой свойства материала одинаковы во всех направлениях, то такая среда называется трансверсально-изотропной. Этот вариант далее принят в качестве расчётного при анализе напряжённо-деформированного состояния. В то же время основные принципы упругопластической модели трансверсально-изотропного участка дорожного полотна полностью применимы и к другим видам анизотропии.

Рассмотрим соотношения и зависимости механики деформируемой анизотропной среды для бесконечно малого элемента в форме параллелепипеда в рассматриваемой точке М (рисунок 12), ребра которого сонаправлены с координатными осями.

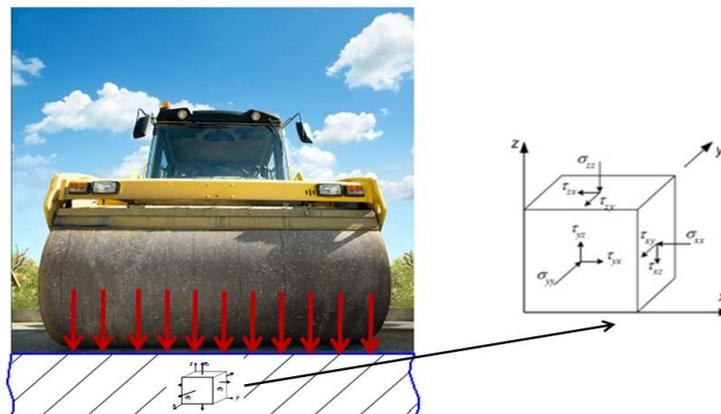


Рисунок 12 – Схема действия напряжений в точке элемента М под действием нагрузки от вальца дорожного катка.

Если ориентировать элементарный куб объёма уплотняемой среды так, чтобы его боковые грани были со направлены с главными площадками, то тогда на них будут действовать нормальные напряжения. Таким образом, будет осуществляться трёхосное сжатие уплотняемого материала. Тензор напряжений образуют нормальные и касательные напряжения. Согласно принципу независимости действия сил, являющемуся одним из основных в линейной теории упругости, связь между компонентами тензора деформаций и напряжений в линейно деформируемых однородных анизотропных средах определяется (применительно к декартовым координатам) уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z + a_{14}\tau_{yz} + a_{15}\tau_{xz} + a_{16}\tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z + a_{24}\tau_{yz} + a_{25}\tau_{xz} + a_{26}\tau_{xy} \\ \varepsilon_z &= a_{13}\sigma_x + a_{13}\sigma_y + a_{33}\sigma_z + a_{34}\tau_{yz} + a_{35}\tau_{xz} + a_{36}\tau_{xy} \\ \gamma_{zy} &= a_{41}\sigma_x + a_{42}\sigma_y + a_{43}\sigma_z + a_{44}\tau_{yz} + a_{45}\tau_{xz} + a_{46}\tau_{xy} \\ \gamma_{xz} &= a_{51}\sigma_x + a_{52}\sigma_y + a_{53}\sigma_z + a_{54}\tau_{yz} + a_{55}\tau_{xz} + a_{56}\tau_{xy} \\ \gamma_{xy} &= a_{61}\sigma_x + a_{62}\sigma_y + a_{63}\sigma_z + a_{64}\tau_{yz} + a_{65}\tau_{xz} + a_{66}\tau_{xy} \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

При наличии трёх взаимно перпендикулярных плоскостей упругой симметрии в любой точке однородной среды, называемой в этом случае ортогонально-анизотропной или ортотропной, число деформационных постоянных равно 9. Свойства асфальтобетона при расчёте необходимо схематизировать. Рассмотрим его как однородную сплошную среду, напряжения, возникающие в ней, зададим как средние усилия, действующие на элементарной площади сечения.

Физические уравнения для такой среды имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z \\ \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z \\ \varepsilon_z &= a_{13}\sigma_x + a_{13}\sigma_y + a_{33}\sigma_z \\ \gamma_{zy} &= a_{44}\tau_{yz} \\ \gamma_{xz} &= a_{55}\tau_{xz} \\ \gamma_{xy} &= a_{66}\tau_{xy} \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

Определяющие связи трансверсально-изотропной среды между напряжениями и деформациями в ней устанавливаются уравнениями (плоскость изотропии соответствует плоскости xOy , z — ось изотропии) с 5 упругими постоянными:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z \\ \varepsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z \\ \varepsilon_z &= a_{13}\sigma_x + a_{13}\sigma_y + a_{33}\sigma_z \\ \gamma_{zy} &= a_{44}\tau_{yz} \\ \gamma_{xz} &= a_{55}\tau_{xz} \\ \gamma_{xy} &= 2(a_{11} - a_{12})\tau_{xy} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

Уравнения обобщённого закона Гука, решённые относительно составляющих напряжения, в общем случае анизотропной среды имеют вид $\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\}$, где матрица $[D]$ размером 6×6 в условиях существования упругого потенциала является симметричной ($d_{ij} = d_{ji}, i, j = 1 \div 6$).

В случае трансверсально-изотропной среды (хоу - плоскость, z - ось изотропии $d_{14} = d_{15} = d_{16} = d_{24} = d_{25} = d_{26} = d_{34} = d_{35} = d_{36} = d_{45} = d_{46} = d_{56} = 0$ и физические уравнения $\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}$ принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= d_{11}\varepsilon_x + d_{12}\varepsilon_y + d_{13}\varepsilon_z \\ \varepsilon_y &= d_{12}\varepsilon_x + d_{22}\varepsilon_y + d_{13}\varepsilon_z \\ \varepsilon_z &= d_{13}\varepsilon_x + d_{13}\varepsilon_y + d_{33}\varepsilon_z \\ \tau_{yz} &= d_{44}\gamma_{yz} \\ \tau_{zx} &= d_{55}\gamma_{zx} \\ \tau_{xy} &= d_{66}\gamma_{xy} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

При этом $d_{12} = d_{11} - 2d_{66}$, $d_{22} = d_{11}$, $d_{23} = d_{13}$, $d_{55} = d_{44}$, т. е. общее число независимых коэффициентов d_{ij} равно 5 ($d_{11}, d_{13}, d_{33}, d_{44}, d_{66}$) - В форме (4) физические уравнения используются в решении задачи численным методом конечных элементов.

Для замены упругих постоянных a_{ij} в системе уравнений (5) через деформационные (технические) характеристики (модули деформации, коэффициенты Пуассона, модули сдвига) необходимо рассмотреть схемы одноосного нагружения элементарного параллелепипеда, грани которого направлены вдоль осей x, y, z. При одноосном сжатии вдоль оси z ($\sigma_x = \sigma_y = 0$) уравнения системы (4) преобразуются к виду

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_z \\ \varepsilon_y &= a_{13}\sigma_z \\ \varepsilon_z &= a_{33}\sigma_z \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

Из последнего уравнения системы (6) находится $a_{33} = \frac{1}{E_{zz}}$, а исключив σ_z из других двух уравнений и, исходя из понятия коэффициента поперечной деформации, получили

$$a_{11} = -\frac{v_{xz}}{E_{zz}} = -\frac{v_{yz}}{E_{zz}}, \quad (7)$$

Аналогично, рассматривая схемы одноосного сжатия последовательно вдоль осей x и y , находим:

$$a_{11} = \frac{1}{E_{xx}} = \frac{1}{E_{yy}}, \quad a_{12} = -\frac{v_{yx}}{E_{xx}} = -\frac{v_{xy}}{E_{yy}}, \quad a_{13} = -\frac{v_{zx}}{E_{xx}} = -\frac{v_{zy}}{E_{yy}}, \quad (8)$$

Используя полученные выражения для коэффициентов a_{11} , a_{12} , a_{13} , а также выражение для a_{44} как величины обратной модулю сдвига, систему уравнений (5) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_{xx}} (\sigma_x - v_{yx}\sigma_y + v_{zx}\sigma_z) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E_{yy}} (-v_{xy}\sigma_x + \sigma_y - v_{zy}\sigma_z) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_{zz}} (-v_{xz}\sigma_x - v_{yz}\sigma_y + \sigma_z) \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz} \\ \gamma_{xz} &= \frac{1}{E_{xz}} \tau_{xz} \\ \gamma_{xy} &= [2(1 + v_{xy})/E_{xx}] \tau_{xy} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

Из приведённых выше соотношений для деформационных характеристик трансверсально-изотропной среды следует, что общее число независимых характеристик для этой среды равно 5. Пространственное напряжённое состояние в сплошной среде полностью характеризуется (в декартовых координатах) нормальными и касательными напряжениями, совокупность которых определяет тензор напряжений:

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yx} & \sigma_z \end{vmatrix}; \quad (10)$$

или главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ с тензором:

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}; \quad (11)$$

При исследованиях напряжённно-деформированного состояния, решении упругопластических (физически нелинейных) задач и в других случаях принято тензор напряжений представлять суммой шарового тензора и девиатора (рисунок 13):

$$T_H = T_H^0 + D_H = \begin{vmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yx} & \sigma_z - \sigma_m \end{vmatrix}; \quad (12)$$

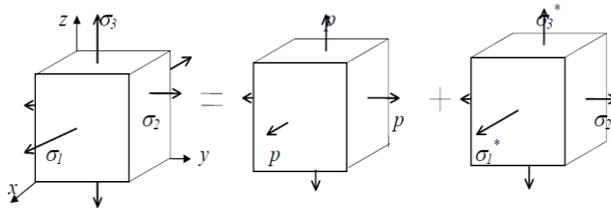


Рисунок 13– Разложение тензора напряжений на шаровой тензор и девиатор.

Представление тензора T_H соответствует разложению рассматриваемого напряженного состояния на два, из которых первое является равномерным всесторонним сжатием (давлением) интенсивностью

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}; \quad (13)$$

а второе отвечает случаю, когда сумма нормальных напряжений равна нулю. Для характеристики степени отклонения тензора напряжений от гидростатического напряжённно-состояния (всестороннего сжатия, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) применяют инварианты, графическая интерпретация НДС приведена на рисунке 14.

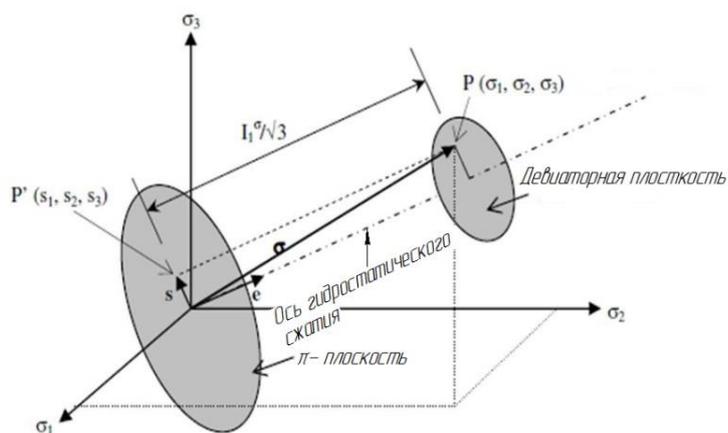


Рисунок 14– Описание НДС в трёхмерном пространстве напряжений.

В то же время описание поведения упругопластических анизотропных сложными моделями с большим числом параметров требует применения большего, чем для изотропных материалов, количества инвариантов тензора напряжений (в случае ортотропной среды — до 7) [43]. При решении задачи определения напряжений и деформаций при уплотнении зададим математическое описание элемента среды в упруго-пластическом состоянии, а также условия перехода в предельное состояние.

Наибольшая длительность силового воздействия вальца дорожного катка на уплотняемый слой достигает 0,35 - 0,5с. За такое короткое время в материале могут успеть развиваться только упругие и пластические деформации. Вязкие же деформации как правило не проявляются или имеют значения в разы меньше, чем пластические и упругие деформации. Так же направленное силовое воздействие со стороны рабочих органов на минеральный скелет, влияние которого на развитие вязких свойств смеси мало. Вязкие составляющие свойств очень важны при восстановлении деформаций после снятия нагрузки, их развитие растянуто во времени. Поэтому, при определении НДС составляющими вязких деформаций можно пренебречь. Для учёта вязкой составляющей при описании процесса разгрузки материала, может быть введена функция релаксации материала. В данной работе используется модель упругопластического тела Прандтля. Для случая одноосного растяжения-сжатия диаграмма Прандтля представляет собой билинейный график зависимости напряжение-деформация [15, 24]. На первом участке диаграммы Прандтля (наклонная прямая, выходящая из начала координат) для укатываемой смеси принимается модель «упругого» (линейно деформируемого) тела. На втором участке (горизонтальная прямая, параллельная оси деформаций) асфальтобетон, перейдя в предельное состояние согласно выбранному условию пластичности (текучести, прочности), деформируется пластически. Учёт физической нелинейности в допредельном состоянии и упрочнения битумных материалов в процессе их пластического деформирования принципиально возможен, но существенно усложняет решение смешанной задачи. К тому же значительно возрастает количество исходных

параметров, особенно для анизотропных асфальтобетонов, определение которых требует проведения весьма трудоёмких экспериментов, предшествующих расчёту. Имеющиеся опытные данные свидетельствуют о том, что в ряде случаев, особенно для уплотнённых материалов, являющихся, как правило, анизотропными, криволинейность диаграммы на участке допредельного деформирования не существенна, а пластическое течение происходит при постоянном или близком к постоянному уровню нагрузки. Эти положения позволяют считать данную математическую модель приемлемой для практики инженерных расчётов анизотропных массивов из асфальтобетона.

Отличие дополненной математической модели от известных аналогов приведено на рисунке 15. Данная модель учитывает касательные напряжения в поперечном сечении слоя дорожных одежд, создаваемые рабочими органами уплотняющих машин.

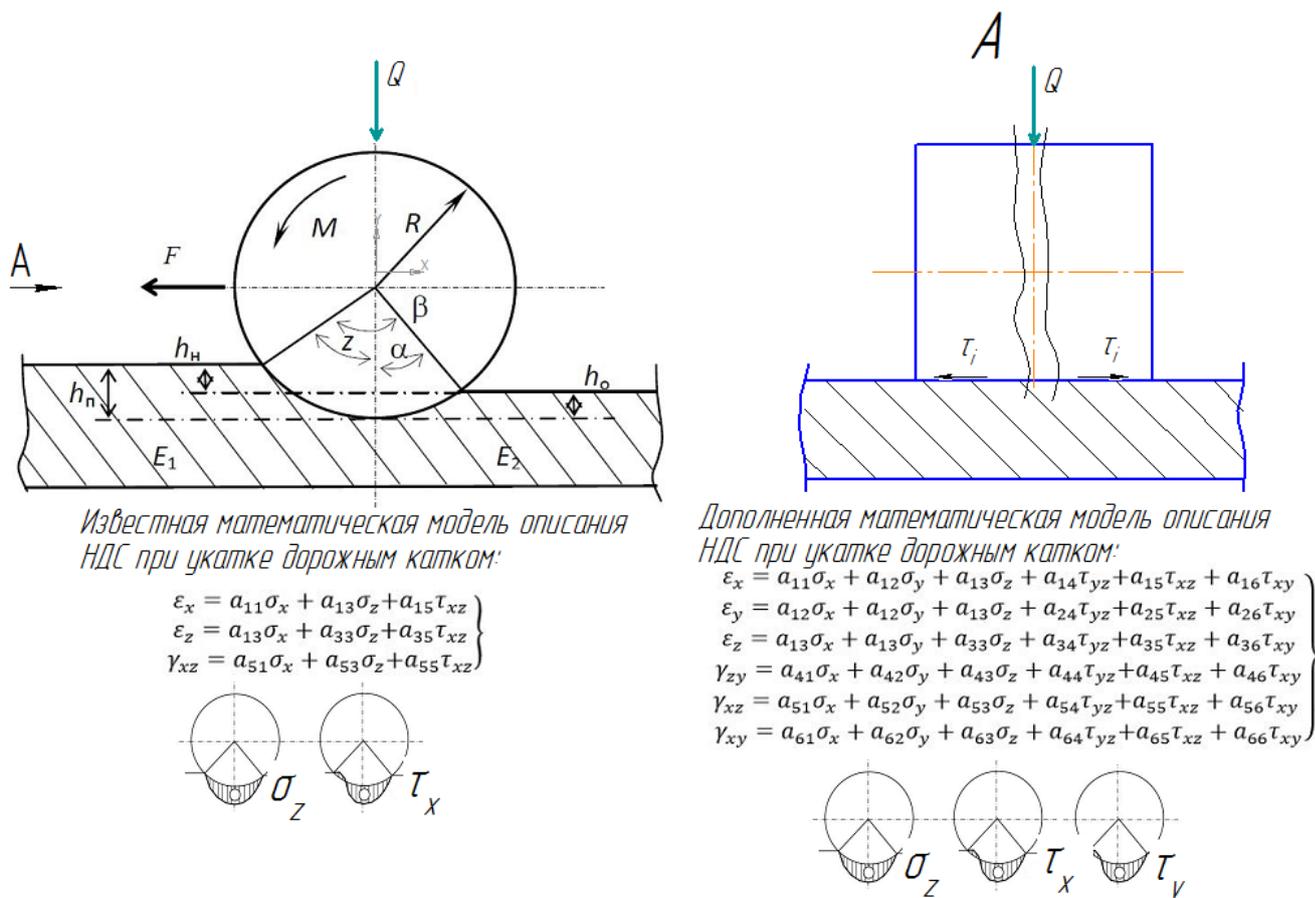


Рисунок 15—Дополненная математическая модель, позволяющая учитывать напряжения, создаваемые вальцом дорожного катка в поперечном направлении.

При достижении предельного напряжённого состояния (предела текучести в случае одноосного растяжения-сжатия) в асфальтобетоне начинают развиваться пластические деформации. Полная деформация в областях предельного напряжённого состояния принимается состоящей из упругой и пластической:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p; \quad d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p; \quad (14)$$

Компоненты тензора «упругой» деформации ε_{ij}^e , $d\varepsilon_{ij}^e$ определяются всегда однозначно через компоненты тензора напряжений σ_{ij} , $d\sigma_{ij}$:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e \varepsilon_{kl}^e; \quad d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl}^e, \quad (15)$$

где D_{ijkl}^e — тензор упругости; для асфальтобетона как линейно деформируемой среды D_{ijkl}^e определяется через характеристики квазиупругого (квазилинейного) деформирования (модули деформации, коэффициенты Пуассона).

Для трансверсально-изотропной среды связь между напряжениями и деформациями в выражениях (15) принимается в виде обобщённого закона Гука с использованием пяти независимых деформационных характеристик. Этот же закон принимается для «упругой» составляющей полной деформации в пластических областях.

Для пластической деформации ε_{ij}^p однозначную связь с напряжениями можно установить только для определённых фиксированных простых траекторий нагружения. В противном случае законы пластического деформирования должны быть заданы в виде дифференциальных неинтегрируемых соотношений теории пластического течения.

Для пластических деформаций приняты определяющие связи ассоциированного закона пластического течения

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{df}{d\sigma_{ij}}; \quad (16)$$

где f — функция текучести; $d\lambda$ — малая положительная скалярная величина.

Характеризуя напряжённое состояние в точке среды симметричным тензором напряжений T_σ , каждую из его компонент σ_{ij} можно трактовать как координату в

шестимерном пространстве напряжений. Тогда в этом пространстве можно выделить такую область Q , любая внутренняя точка которой соответствует упругому состоянию элемента (частицы) среды. Граница этой области определяет условие перехода элемента в пластическое (предельное) состояние и называется для идеальнопластических материалов поверхностью текучести или поверхностью пластичности.

Общее уравнение поверхности текучести в приложении к асфальтобетонам, обладающим прочностной анизотропией (трансверсальной изотропией), можно представить в виде

$$f(\sigma_{ij}, S_{ij}) = 0, \quad (17)$$

где σ_{ij} и S_{ij} — компоненты тензора напряжений и вектора предельного сопротивления сдвигу.

В плоской задаче для трансверсально-изотропной среды, когда расчётное сечение ортогонально плоскости изотропии, сдвиговая прочность S_{ij} определяется как функция угла наклона μ площадки предельного равновесия относительно направления одного из главных напряжений, действующих в расчётной плоскости (в качестве плоскости отсчёта угла μ принята площадка действия наибольшего главного напряжения). В этом случае уравнение (17) приводится к виду

$$f(\sigma_{ij}, \mu) = 0; \quad (18)$$

Если при последующем нагружении пластический элемент среды продолжает оставаться в предельном состоянии, то выполняется условие

$$df = \frac{df}{d\sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{df}{d\mu} d\mu; \quad (19)$$

Поскольку при условии предельного равновесия функция текучести достигает своего экстремального (наибольшего) значения, то второе слагаемое в выражении (19) обращается в нуль, а само выражение приобретает, как и для случая изотропной среды, вид

$$df = \frac{df}{d\sigma_{ij}} d\sigma_{ij}; \quad (20)$$

Как отмечалось выше, модель упругопластической среды должна включать помимо законов деформирования условие пластичности (текучести, прочности) конкретного вида. В качестве такового принимаем широко используемое в практике расчётов грунтовых массивов условие Кулона-Мора, распространяя его на анизотропные по прочности материалы дорожных одежд.

Форма поверхности текучести в трёхмерном пространстве напряжений с использованием различных критериев перехода в пластическое состояние приведена на рисунке 16.

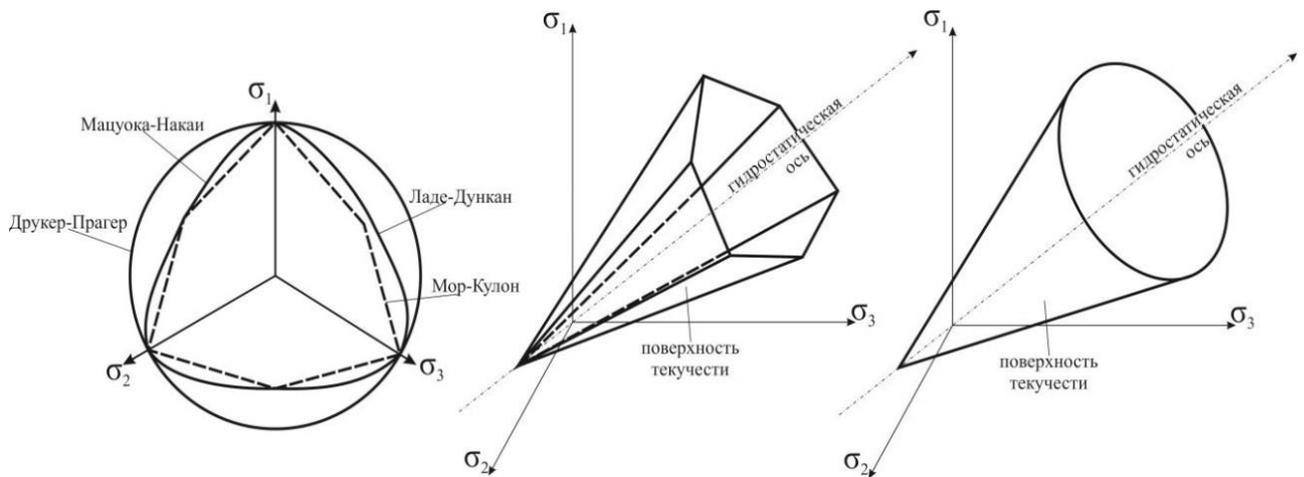


Рисунок 16– Форма поверхности текучести в трёхмерном пространстве напряжений.

Согласно теории пластического течения, процесс пластического деформирования должен рассматриваться как последовательность малых приращений деформации в процессе нагружения с момента возникновения пластического состояния в некоторой точке среды. Реализация такого процесса достигается методом последовательного нагружения (шаговый метод), предполагающим линейную зависимость между приращениями напряжений и полной деформации на каждом этапе деформирования:

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl}^e; \quad (21)$$

Полное решение смешанной задачи, состоящее в определении напряжений, деформаций, смещений в областях допредельного и предельного напряжённого состояния и границы между этими областями, может быть получено только

численными методами. Перепишем уравнения (11) —(13), (20), (21) из тензорной формы в матричную:

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\varepsilon\} &= \{\Delta\varepsilon^e\} + \{\Delta\varepsilon^p\} \\ \{\Delta\sigma\} &= \{\Delta D^e\}\{\Delta\varepsilon^e\} \\ \{\Delta\varepsilon^p\} &= \Delta\lambda\{df/d\sigma\} \\ \{df/d\sigma\}^T\{\Delta\sigma\} &= 0 \\ \{\Delta\sigma\} &= \{\Delta D^{ep}\}\{\Delta\varepsilon\} \end{aligned} \right\}; \quad (22)$$

Система уравнений (22) для трансверсально-изотропной модели асфальтобетона тождественна по форме системе для изотропного, приводящей к определению матрицы связи приращений напряжений $\{\Delta\sigma\}$ и полных деформаций $\{\Delta\varepsilon\}$ в пластических областях. Таким образом, общие выражения упругопластических матриц $[D^{ep}]$ для изотропного и анизотропного вариантов асфальтобетонной среды идентичны:

$$[D^{ep}] = [D^e] - [D^e] \frac{\{df/d\sigma\}\{df/d\sigma\}^T|D^e|}{\{df/d\sigma\}^T|D^e|\{df/d\sigma\}}; \quad (23)$$

Компоненты же матриц $[D^{ep}]$ в случаях изотропного и анизотропного материалов различаются, поскольку различными являются компоненты матриц упругости $[D^e]$ и векторов $\{df/d\sigma\}$ для этих материалов.

2.2.1. Учёт деформационной анизотропии (упругие деформации)

Положенный в основу обобщённого закона Гука для однородных изотропных материалов принцип независимости действия сил распространяется и на анизотропные среды. Связь между деформациями и напряжениями может быть представлена в следующем виде:

$$\varepsilon_{ij} = A_{ijkl}\sigma_{kl}; \quad (24)$$

Каждый элемент тензора A_{ijkl} определяет относительную деформацию соответственно индексам ij , возникающую вследствие единичного напряжения с индексами kl . Деформационная анизотропия как свойство различного сопротивления деформированию материала по отношению к координатным осям приводит к

тому, что элементы тензора A_{ijkl} изменяются при преобразовании системы координат.

В связи с этим установим для рассматриваемой трансверсально-изотропной среды такую систему координат, в которой ось z ортогональна к плоскости изотропии. В расчётах анизотропных сред вместо упругих постоянных a_{ij} в уравнениях (12) использованы деформационные характеристики среды.

Введены следующие обозначения деформационных постоянных: E_{xx}, E_{yy}, E_{zz} - модули деформации в направлении осей x, y, z ; $\nu_{xz}, \nu_{xy}, \nu_{yx}$ - коэффициенты поперечной деформации (коэффициенты Пуассона); G_{xy}, G_{zy}, G_{xz} — модули сдвига в плоскостях xOy, zOy, xOz .

Для получения соотношений между упругими постоянными a_{ij} и деформационными характеристиками рассматривают схемы одноосного нагружения элементарного параллелепипеда, грани которого направлены вдоль осей x, y, z . Проводя такие операции для случаев сжатия отдельно по каждой оси x, y, z получаем

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_{xx}} (\sigma_x - \nu_{yx}\sigma_y - \nu_{zx}\sigma_z) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E_{yy}} (-\nu_{xy}\sigma_x + \sigma_y - \nu_{zy}\sigma_z) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_{zz}} (-\nu_{xz}\sigma_x - \nu_{yz}\sigma_y + \sigma_z) \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz} \\ \gamma_{xz} &= \frac{1}{G_{xz}} \tau_{xz} \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu_{xy})}{E_{xx}} \tau_{xy} \end{aligned} \right\}; \quad (25)$$

Общее число независимых деформационных параметров, характеризующих трансверсально-изотропную среду, равно пяти. Это вытекает из приведённых выше соотношений для деформационных характеристик.

Для задачи плоской деформации ($\varepsilon_y = 0$), когда расчётное сечение перпендикулярно к плоскости изотропии, система физических уравнений (25) сводится к трём уравнениям связи компонент векторов напряжений и деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = [D^e] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix}; \quad (26)$$

$$[D^e] = \frac{E_{xx}}{(1+v_{zx})(1-v_{xy}-2\frac{E_{xx}v_{xz}^2}{E_{zz}})} \times \begin{vmatrix} 1 - 2\frac{E_{xx}v_{xz}^2}{E_{zz}} & v_{xz}(1+v_{xy}) & 0 \\ v_{xz}(1+v_{xy}) & (1-v_{xy}^2)\frac{E_{zz}}{E_{xx}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+v_{zx})(1-v_{xy}-2\frac{E_{xx}v_{xz}^2}{E_{zz}})G_{zx}}{E_{xx}} \end{vmatrix}; \quad (27)$$

Для решения задачи объёмной упругой деформации при решении задачи с трансверсальной изотропией свойств материала:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_p & -v_p/E_p & -v_{tp}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -v_p/E_t & 1/E_t & -v_{tp}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -v_{pt}/E_p & -v_{tp}/E_p & 1/E_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_t \end{bmatrix}, \quad (28)$$

где t и p оси в плоскости изотропии и перпендикулярно ей соответственно.

Работы, выполненные в области уплотнения асфальтобетонных смесей [100, 309], подтверждают, что поведение материала может быть описано диаграммой пластического деформирования с упрочнением. Слабым местом данной теории уплотнения является отсутствие учёта истории приложения уплотняющих нагрузок. Поэтому она может быть применена только для неупрочняющихся материалов в таком виде. Упрочнение материала может быть смоделировано с помощью введения функциональной зависимости от температуры, режима нагружения, времени воздействия и т.д. Данное уточнение требует большого количества трудоёмких лабораторных экспериментов для получения эмпирических зависимостей. Данные зависимости можно опустить при оценке деформационных характеристик асфальтобетона при рассматриваемом нагружении и постоянстве параметров среды.

2.2.2. Учёт прочностной анизотропии (пластические деформации)

Лабораторные эксперименты и натурные наблюдения свидетельствуют о том, что разрушение в асфальтобетоне происходит путём сдвига по определённым поверхностям. Именно на таком механизме разрушения основана теория прочности Кулона-Мора, наиболее широко применяемая в настоящее время для дорожных материалов. Согласно этой теории, состояние предельного равновесия возникает при определённом соотношении касательного и нормального напряжений, действующих на данной площадке [12]. При использовании теории Кулона-Мора применительно к анизотропным асфальтобетонам в условиях плоской деформации будем исходить из перечисленных ниже положений и допущений, продиктованных характером анизотропии, проявляющейся в виде трансверсальной изотропии. Принимаем, что:

- расчётное сечение (плоскость деформирования) с ориентированными в нем главными экстремальными нормальными напряжениями σ_1 и σ_3 перпендикулярно к плоскости изотропии;
- направления вдоль и поперёк плоскости изотропии определяют экстремальные значения показателей сдвиговой прочности;
- характеристики сдвиговой прочности c_μ и $tg\varphi$ являются непрерывными функциями положения площадки сдвига μ и определяют характер прочностной анизотропии, заданный неизменным в процессе развития напряжённо-деформированного состояния.

Рассмотрим элемент однородного трансверсально-изотропного по прочности образца из асфальтобетона, образованный площадками действия главных напряжений σ_1 и σ_3 (рисунок 17).

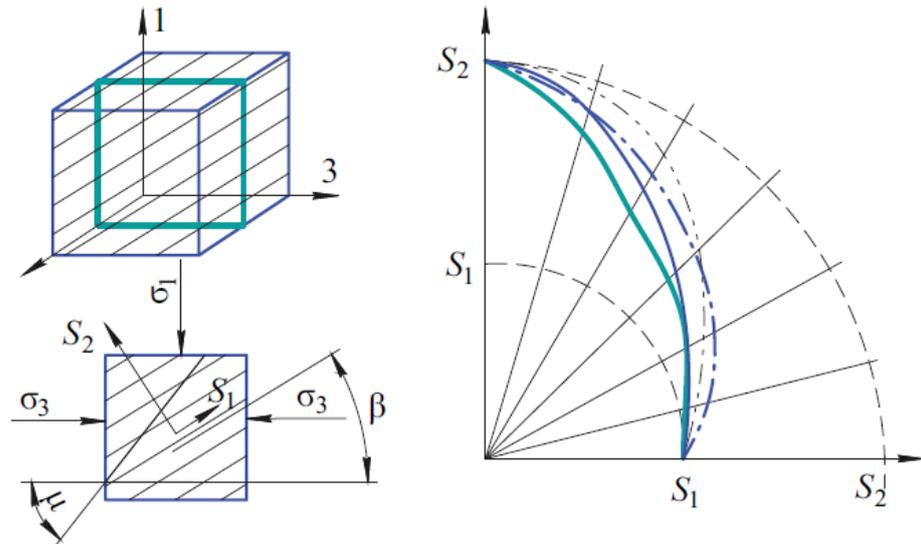


Рисунок 17 – Элемент трансверсально-изотропного ЦМА с плоскостью изотропии, параллельной σ_2 .

Следуя вышеизложенному, определяем функцию текучести как функцию напряжений σ_{ij} и положения потенциальной площадки сдвига μ относительно площадки действия наибольшего главного напряжения σ_1 в виде

$$f(\sigma_{ij}, \mu) = |\tau_\mu| - (\sigma_\mu \operatorname{tg} \varphi + c_\mu), \quad (29)$$

где τ_μ и σ_μ — соответственно касательное и нормальное напряжения на площадке μ ; $\operatorname{tg} \varphi$ и c_μ — характеристики сдвиговой прочности на той же площадке, являющиеся функциями угла μ , вид которых устанавливается из опыта.

При достижении касательным напряжением τ_μ значения сопротивления сдвигу, элемент переходит в предельное напряжённое состояние. При этом, как и в изотропном варианте, на площадке предельного равновесия функция текучести достигает своего экстремального (наибольшего) значения, равного нулю. На остальных площадках $f < 0$. Таким образом, удовлетворяя одновременно условиям $f = 0$ и $\frac{df}{d\mu} = 0$, можем определить угол наклона площадки сдвига. Для этого воспользуемся известными соотношениями между главными напряжениями σ_1, σ_3 и напряжениями на наклонной площадке σ_μ, τ_μ

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\mu} &= \sigma_1 \cos^2 \mu + \sigma_3 \sin^2 \mu \\ \tau_{\mu} &= (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \mu \sin \mu \end{aligned} \right\}; \quad (30)$$

Подставим в функцию (20) соотношения (21) и, продифференцировав полученное выражение по μ , приравняем результат нулю. В результате этих операций получим

$$(\sigma_1 - \sigma_3) [\cos 2\mu \sin(\pi - 2\mu) + \sin 2\mu \operatorname{tg} \varphi - \cos^2 \mu \frac{d \operatorname{tg} \varphi}{d \mu}] - \sigma_3 \frac{d \operatorname{tg} \varphi}{d \mu} - \frac{d c_{\mu}}{d \mu} = 0; \quad (31)$$

Из условия предельного равновесия $f = 0$ следует зависимость между σ_1 и σ_3

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3 [\sin 2\mu + (1 - \cos 2\mu) \operatorname{tg} \varphi \sin(\pi - 2\mu)] + 2c_{\mu} \sin(\pi - 2\mu)}{\sin 2\mu - (1 + \cos 2\mu) \operatorname{tg} \varphi \sin(\pi - 2\mu)}, \quad (32)$$

которую подставляем в выражение (31). Окончательно разрешающее уравнение для μ имеет вид

$$\left[2 \cos 2\mu \operatorname{tg} \varphi + 2 |\sin 2\mu| \operatorname{tg}^2 \varphi - \sin 2\mu \frac{d \operatorname{tg} \varphi}{d \mu} \right] \sigma_3 - [\sin 2\mu - (1 + \cos 2\mu) \operatorname{tg} \varphi \sin(\pi - 2\mu)] \frac{d c_{\mu}}{d \mu} + \left[2 \cos 2\mu + 2 |\sin 2\mu| \operatorname{tg} \mu - (1 + \cos 2\mu) \operatorname{sign}(\pi - 2\mu) \frac{d \operatorname{tg} \varphi}{d \mu} \right] c_{\mu} = 0; \quad (33)$$

и его решение определяет угол наклона площадки предельного равновесия при заданном боковом давлении σ_3 .

Уравнение (33) можно также получить, используя и иной подход к решению задачи. В частности, поскольку зависимость (31) позволяет определить при заданном σ_3 значение σ_1 , приводящее к разрушению по фиксированной площадке μ , то истинной площадке разрушения должно соответствовать наименьшее из ряда значений σ_1 . Исследование функции $\sigma_1(\mu)$ на экстремум показало, что минимум напряжения σ_1 достигается внутри интервала $(\varphi, \pi/2)$. Для его установления необходимо удовлетворить условие $\frac{d \sigma_1}{d \mu} = 0$, что и приводит к уравнению (31).

В результате решения уравнения (31) для изотропного варианта получаем хорошо известную зависимость $2\mu = \pm(\frac{\pi}{2} + \varphi)$.

2.2.3. Определяющие связи для пластических деформаций

Определяющие связи между напряжениями и приращениями пластических деформаций предложены в виде дифференциальных соотношений $d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{d\lambda df}{d\sigma_{ij}}$, которые совместно с условиями $f = 0$, $df = 0$ получили название ассоциированного закона пластического течения. Такое название закон имеет в связи с тем, что пластическое течение, оцениваемое вектором $d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p$ связывается (ассоциируется) с условием текучести. Этот закон, по существу, устанавливает лишь направление вектора приращения пластической деформации $d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p$, принимая его по нормали к поверхности текучести $f = 0$ в пространстве напряжений $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$. Для определения величины $d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p$ необходимо, задать функцию текучести f конкретного вида и найти $d\lambda$ — малый положительный скалярный множитель.

Так как разные условия прочности приводят к разным расчётным результатам, то выбор условия прочности должен основываться на анализе экспериментальных данных о поведении асфальтобетона под нагрузкой. Используя уравнение предельного равновесия можно выразить функцию текучести в следующем виде (здесь сжимающие напряжения считаются отрицательными):

$$f(\sigma_{\text{ср пл}}, T_{\text{пл}}, \mu) = T_{\text{пл}} + \frac{\text{tg}\varphi_{\mu}}{|\sin 2\mu| - \text{tg}\varphi_{\mu} \cos 2\mu} \sigma_{\text{ср пл}} - \frac{c_{\mu}}{|\sin 2\mu| - \text{tg}\varphi_{\mu} \cos 2\mu}; \quad (34)$$

Определяющие соотношения ассоциированного закона для исследуемого материала в матричной форме представлены в системе (9).

Функция $\{df/d\boldsymbol{\sigma}\}$ определяется дифференцированием функции текучести f как сложной функции аргументов $\sigma_{\text{ср пл}}, T_{\text{пл}}, \mu$:

$$\{df/d\boldsymbol{\sigma}\} = \frac{df}{d\sigma_{\text{ср пл}}} \left\{ \frac{d\sigma_{\text{ср пл}}}{d\boldsymbol{\sigma}} \right\} + \frac{df}{dT_{\text{пл}}} \left\{ \frac{dT_{\text{пл}}}{d\boldsymbol{\sigma}} \right\} + \frac{df}{d\mu} \left\{ \frac{d\mu}{d\boldsymbol{\sigma}} \right\}; \quad (35)$$

Третье слагаемое в этом выражении обращается в нуль, так как в пластическом состоянии $\frac{df}{d\mu} = 0$. Учитывая это и выражая главные напряжения σ_1, σ_3 через $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$, получим компоненты вектора $\{df/d\boldsymbol{\sigma}\}$:

$$\{df/d\sigma\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sin\varphi_\mu}{2\sin A_\mu} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{zx}^2}} \\ \frac{\sin\varphi_\mu}{2\sin A_\mu} - \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{zx}^2}} \\ \frac{2\tau_{xz}}{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{zx}^2}} \end{array} \right\}, \quad (36)$$

где $A_\mu = \sin[2\mu \operatorname{sign}(\pi - 2) - \varphi_\mu]$.

Используя равенства (25) и (28), получаем выражения для компонент приращения пластической деформации в условиях плоского деформированного состояния: $\Delta\varepsilon_x^p, \Delta\varepsilon_z^p, \Delta\gamma_x^p$.

2.2.4. Проверка теоретических исследований методом конечных элементов

Были исследованы критерии силового воздействия на уплотняемый слой материала, влияющие на изотропию свойств. В начале уплотнения преобладают пластические деформации, в то время как на заключительных этапах уплотнения упругие деформации составляют большую часть. Определение параметров модели осуществлялось сертифицированном прессе в лаборатории (см. рисунок 18) в соответствии с ГОСТ 12801-98.



Рисунок 18– Определение физико-механических параметров исследуемых образцов в лаборатории.

На рисунке 19 показаны граничные условия и образец поля суммарных перемещений для модели расчётного образца.

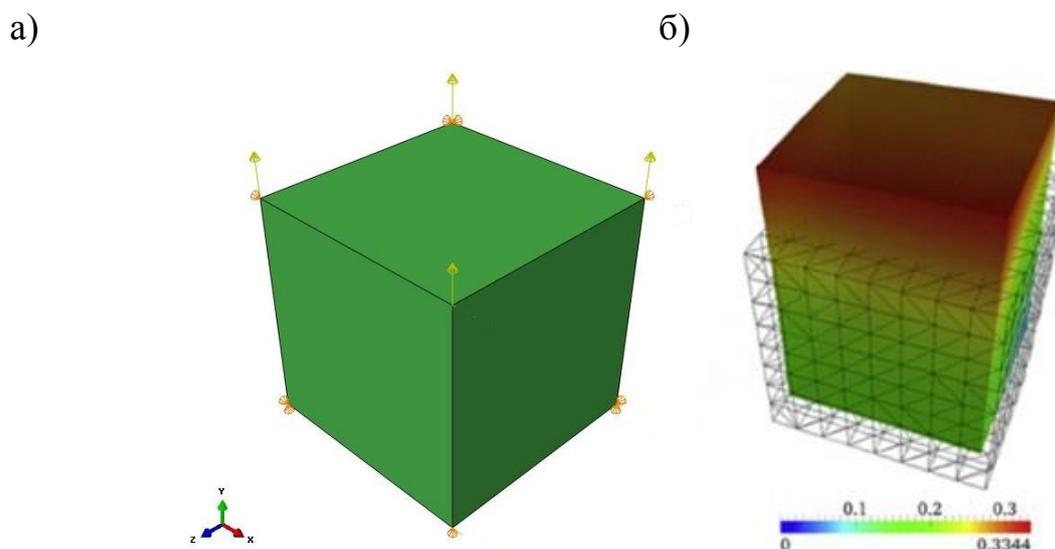


Рисунок 19 а) Граничные условия МКЭ модели б) Пример поля суммарных перемещений по результатам расчёта.

Результаты сравнения расчёта методом конечных элементов (МКЭ) кубического образца на сжатие и экспериментальных исследований эквивалентного образца на лабораторном прессе сведены в таблицу 3.

Таблица 3–Сравнение результатов вычислений полученные в МКЭ модели и на экспериментальном стенде

Перемещение	Экспериментальные данные, м	Расчёт в МКЭ, м	Δ , %
dx , м	0,00286	0,00409	1,43
dy , м	0,00334	0,01299	3,89
dz , м	0,00286	0,00675	2,36

Полученные результаты подтверждают, что данную модель можно использовать для исследования процесса взаимодействия рабочих органов уплотняющих машин с асфальтобетонной смесью.

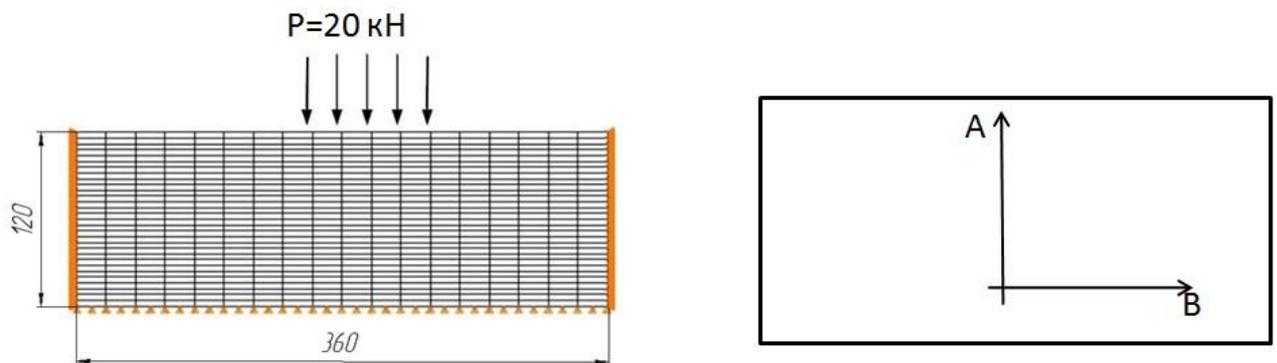
Влияние анизотропии можно рассмотреть на примере качения автомобильного колеса по поверхности дорожного покрытия. Рассмотрим два варианта – две модели. Первый вариант, когда прочностные и деформативные

свойства материала покрытия одинаковые как в продольном, так и в поперечном направлении дороги. Второй вариант – когда покрытие в продольном направлении имеет прочностные и деформативные свойства такие же, как и в первом случае, а в поперечном – меньшие. Другими словами имеем два варианта: взаимодействие колеса с изотропным и анизотропным покрытием.

Параметры исследуемой модели для изотропного и анизотропного материала сведены в таблицу 4, а расчётная схема показана на рисунке 20, где А и В показывают продольное и поперечное направление дороги.

Таблица 4–Параметры МКЭ модели для изотропного и анизотропного материалов

Материал	Толщина слоя h, м	Модуль упругости E1, Мпа	к-т Пуассона ν_1	Модуль упругости E2, Мпа	к-т Пуассона ν_2	к-т внутреннего трения $\text{tg}\phi_1$	к-т внутреннего трения $\text{tg}\phi_2$	к-т сцепления при сдвиге c1, Мпа	к-т сцепления при сдвиге c2, Мпа
анизотропный	0.12	2760	0.35	1930	0.245	0,96	0,93	0,22	0,18
изотропный	0.12	2760	0.35	-	-	0,96	-	0,22	-



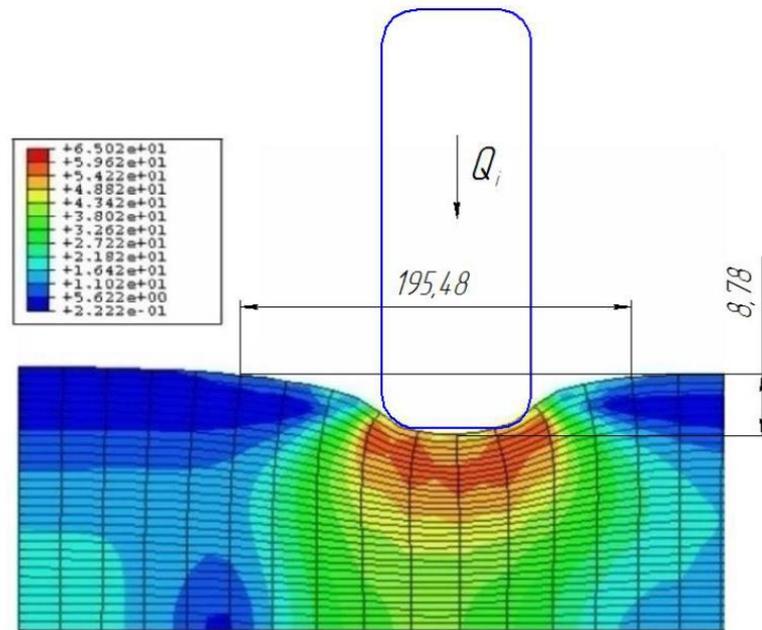
Изотропный материал $E_1, \nu_1, \text{tg}\phi_1, c_1$

Анизотропный материал $E_1 \neq E_2, \nu_1 \neq \nu_2, \text{tg}\phi_1 \neq \text{tg}\phi_2, c_1 \neq c_2$

Рисунок 20–Расчётная схема в программе ABAQUS.

На рисунке 21 приведены изо поля касательных напряжений, возникающих в асфальтобетонах с различной степенью изотропии при проезде пневматического катка. Данные полученные расчётом в программе ABAQUS с использованием упругопластической модели для уплотнения асфальтобетона.

а)



б)

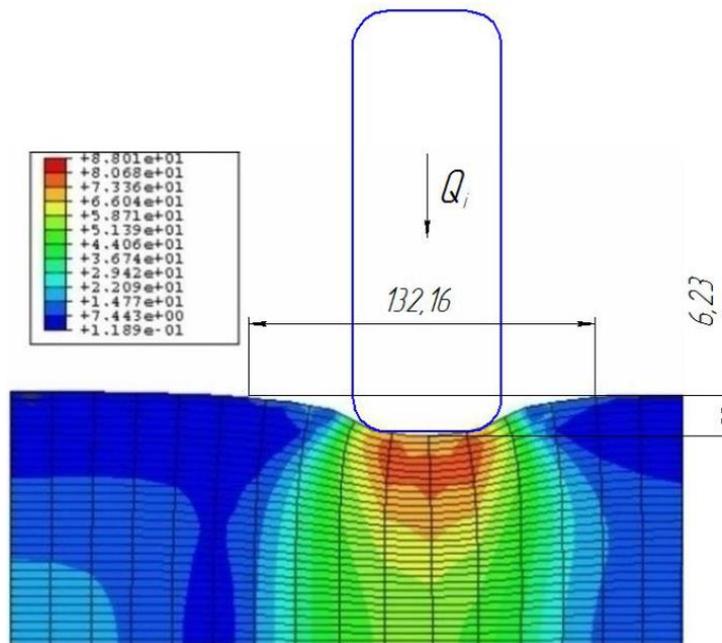


Рисунок 21– Касательные напряжения в поперечном сечении слоя асфальтобетонного покрытия для: а) анизотропного и б) изотропного материала.

С её помощью мы можем с достаточно высокой точностью описать поведение материала под нагрузкой. Разница в величине деформаций между

изотропным и анизотропным материалом составляет порядка 30%. Преимуществом данной модели является простота и возможность измерения и контроля параметров в упругом и в пластическом состоянии.

Таким образом теоретическое исследование показало в каком направлении необходимо управлять силовым полем уплотняющих машин что бы получить изотропное покрытие. Модель напряжённо-деформированного состояния дорожных покрытий в процессе уплотнения позволяет оценить анизотропные свойства асфальтобетонных смесей и их влияние на деформирование дорожных покрытий в процессе эксплуатации.

2.3 Условия создания изотропного дорожного покрытия при уплотнении дорожными катками

Технологическая анизотропия свойств возникает при деформировании материалов под действием нагрузки и связана с возникновением структуры, определённым образом ориентированной по отношению к ней. Схема такого силового воздействия показана на рисунке 22. Это означает, что для создания рекомендаций по созданию новых рабочих органов, снижающих степень анизотропии свойств уплотняемого покрытия необходимо провести структурно-силовой анализ механизма взаимодействия дорожных катков с укатываемым слоем. Что сводится к определению напряжённо-деформированного состояния уплотняемого материала при определённых траекториях нагружения.

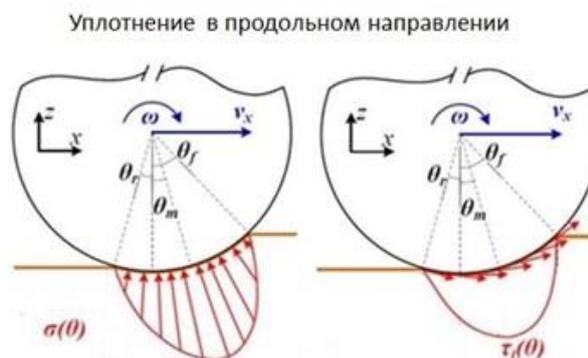


Рисунок 22– Формирование анизотропной структуры гладковальцовым катком.

Воздействие катка, создающего в процессе уплотнения изотропное покрытие должно отличаться от воздействия существующих дорожных катков. Проведённое теоретическое исследование напряжённо-деформированного состояния асфальтобетонной смеси подтверждает, что необходимо создать сложное девиаторное нагружение в поперечной плоскости дороги. Изотропное силовое воздействие заключается в создании дополнительных касательных напряжений в зоне контакта вальца с укатываемым слоем дорожных одежд. Под действием этих напряжений произойдёт изменение структуры асфальтобетонной смеси в поперечной плоскости, что приведёт к снижению уровня анизотропных свойств.

Иванченко С.Н.[45,46] предлагает конструкции рабочих органов уплотняющих машин классифицировать согласно виду схем силового воздействия на уплотняемый материал. Простой схемой автор предлагает считать такое силовое воздействие, при котором возрастание нагрузки со стороны уплотняющей машины происходит пропорционально единственной переменной, определяющей напряжённо-деформированное состояние. Если же для описания НДС требуется несколько переменных, тогда нагружение можно рассматривать как сложное. Для большинства существующих уплотняющих машин нагружение уплотняемой среды является простым.

При рассмотрении асфальтобетона как нелинейно деформируемой (упругопластической) среды, большую роль в описании напряжённо-деформированного состояния и закономерностей его изменения играют инварианты тензора напряжений и деформаций. Их используют для описания НДС в исследованиях образцов строительных материалов с помощью стабилометров, гирационных приборов, что позволяет осуществить многоосное деформирование образцов в условиях сложного напряжённого состояния [47,96,108].

Многие работы в области уплотнения асфальтобетонных смесей посвящены исследованию НДС уплотняемого материала под неподвижными пневматическим

колесом или вальцом дорожного катка [90,91,100]. Как правило, в них рассматривается простой режим нагружения.

Важно заметить, что дополнительные касательные напряжения не должны разрушать силы адгезии и когезии, которые связывают частицы между собой в уплотняемом слое (рисунок 23).

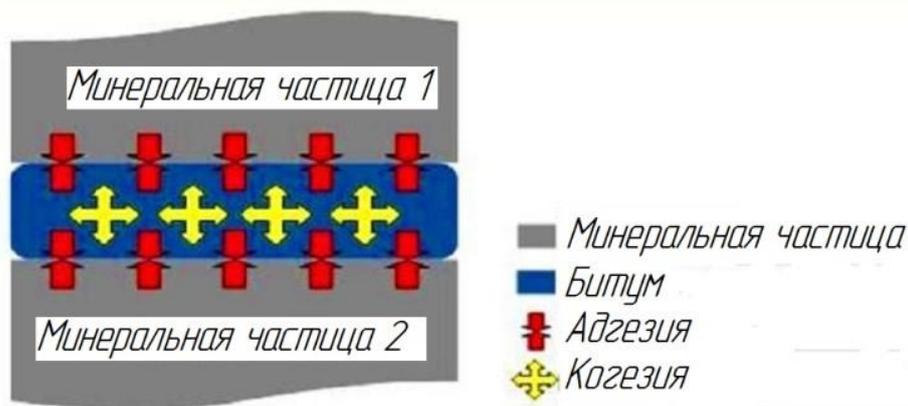


Рисунок 23 – Микроструктурные связи в асфальтобетоне.

Поэтому необходим контроль над их величиной, а также ограничение максимальных касательных напряжений. В противном случае верхний уплотняемый слой асфальтобетонной смеси может быть повреждён из-за разрыва связей при уплотнении (рисунок 24).

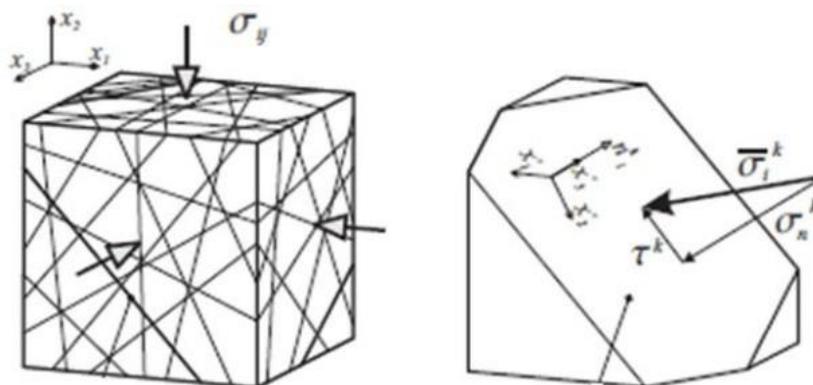


Рисунок 24 – Разрушение частицы асфальтобетона путём сдвига по площадке скольжения[12].

Таким образом, достаточно создать незначительные деформации с помощью уплотняющего воздействия в поперечном направлении, чтобы получить

значительное повышение качества уплотнения. Это будет достигаться за счёт большего времени действия и величины деформаций в поперечном направлении.

Необходимо создавать при каждом проходе катка сложный режим в тензорном пространстве. Такой режим схематично изображён на рисунке 25.

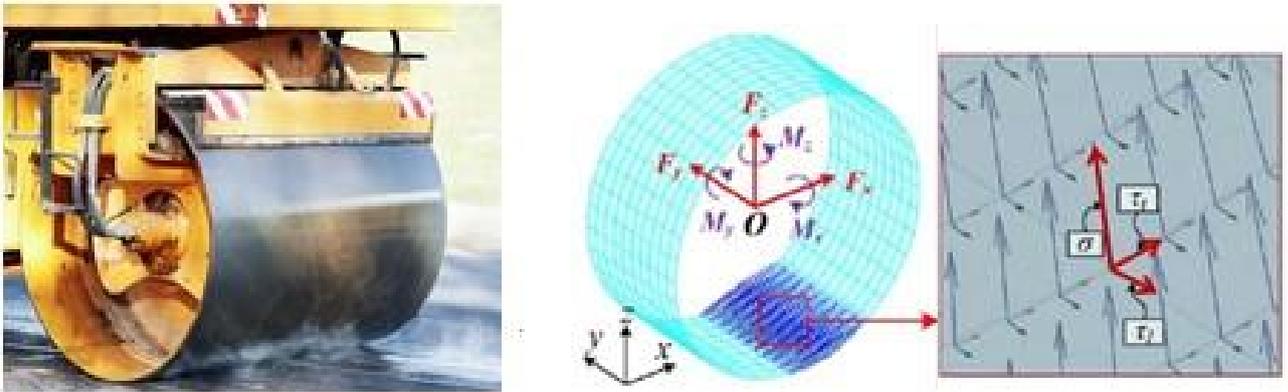


Рисунок 25 – Создание девиаторного режима нагружения рабочим органом катка (ось x со направлена с продольной осью дороги).

В этом состоянии материал должен обладать формой поверхности текучести в девиаторной плоскости максимально приближенной к окружности. Девиаторный режим нагружения определяется разностью между вертикальным напряжением от статического давления под рабочим органом и боковым давлением материала в уплотняемом слое (в зоне вальца) [12].

Когда материал находится в упругом состоянии необходимо, что бы компоненты матриц упругости (12) стали одинаковыми для поперечного и продольного направления $E_{xx} = E_{yy} = E_{zz}$ - модули деформации; $\nu_{xz} = \nu_{xy} = \nu_{yx}$ - коэффициенты Пуассона; $G_{xy} = G_{zy} = G_{xz}$ - модули сдвига.

Известна экспериментальная зависимость [147], которая с достаточно высокой точностью описывает уравнение формы поверхности текучести для асфальтобетонов (рисунок 26).

При нахождении исследуемого материала в пластическом состоянии необходимо изменить форму поверхности текучести, создав дополнительное уплотняющее воздействие. Таким образом, изменяя компоненты девиаторов тензоров напряжений и деформаций с помощью операторного уравнения сдвига

можно снизить уровень анизотропных свойств, что повысит прочностные характеристика асфальтобетонов и их колеестойкость.

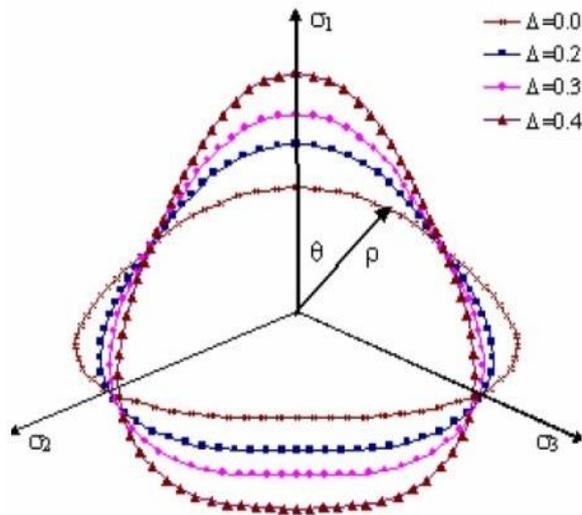


Рисунок 26– Форма поверхности текучести в девиаторной плоскости в зависимости от степени анизотропии Δ [147].

Используя условие Кулона-Мора можно показать, что из закона изменения предельного сопротивления, следуют аналогичные по форме законы изменения прочностных характеристик $tg\varphi$ и c_μ :

$$\left. \begin{aligned} tg\varphi &= tg\varphi_1 + (tg\varphi_2 - tg\varphi_1)\sin^2(\mu - \beta) \\ c_\mu &= c_1 + (c_2 - c_1)\sin^2(\mu - \beta) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Упругопластическая модель, использующая в работе, характеризует поведение материала следующим набором величин для продольного и поперечного сечения (относительно направления уплотнения): c - удельное сцепление [Па], φ - угол внутреннего трения [°], E - модуль деформации [Па], ν - коэффициент Пуассона. За счёт воздействия дополнительных напряжений, создаваемых уплотняющим рабочим органом, может быть изменена структура материала и как следствие получено изотропное покрытие в результате процесса уплотнения. Таким образом, установлены критерии силового поля, обуславливающие получение изотропного дорожного покрытия.

2.4 Рабочие органы дорожных катков, обеспечивающие изотропию свойств дорожного покрытия

Развитие конструкций рабочих органов уплотняющих машин в основном заключается в повышении уплотняющей способности, снижении времени цикла и комбинировании известных рабочих органов в новые машины. Сложное НДС может быть создано с помощью придания новой формы рабочему органу или выполнение процесса уплотнения по другой траектории. Создание новых рабочих органов для дорожных катков с изотропным силовым воздействием должно стать одним из приоритетных направлений исследований, так как позволит бороться с образованием колеи в дорожных одеждах.

Для получения изотропной структуры в результате уплотнения необходимо изменять напряжённо-деформированное состояние асфальтобетона в процессе уплотнения. На практике это может быть достигнуто с помощью пневмокотков, решетчатых и перфорированных вальцов. НДС, полученные в результате действия пневматического и гладко вальцового катка, различные.

В случае воздействия пневматического катка, уплотняемый материал подвергается силовому воздействию не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости. Но т.к. для дорожных покрытий применяется жёсткие смеси с большим содержанием щебня (ЩМА), эти смеси требуют повышенных нагрузок при уплотнении, в результате чего основным средством уплотнения становятся вибрационные катки или тяжёлые катки статического действия, т.к. они способны создать требуемые условия НДС за счёт вибрации или собственной массы. Пневматические катки же используют на отдельных этапах уплотнения, но на этих стадиях влияния на формирование изотропного покрытия практически нет. Для получения больших усилий масса существующих катков должна быть увеличена в 2-3 раза. Но таких машин не существует [65,66,130,140].

Технологическая анизотропия свойств возникает при деформировании материалов под действием нагрузки и связана с возникновением структуры, определённым образом ориентированной по отношению к нагрузке. Это означает,

что для обоснования предложений по формированию рабочих органов, снижающих уровень анизотропных свойств необходимо провести исследование и анализ:

- изменений деформационных характеристик уплотняемы смесей;
- направленности силового воздействия со стороны рабочих органов;
- схем производства работ по уплотнению.

Гладкий перфорированный каток или решетчатый каток (показан на рисунке 27) могут создать необходимое для формирования изотропной структуры НДС. Успешный опыт применения металлического перфорированного вальца при уплотнении горячей асфальтобетонной смеси при строительстве в городе Владивосток выполнен Ю. Коваленко и С. Угай [124,171,172]. При этом были достигнуты более высокие значения плотностей для катков данной массы.

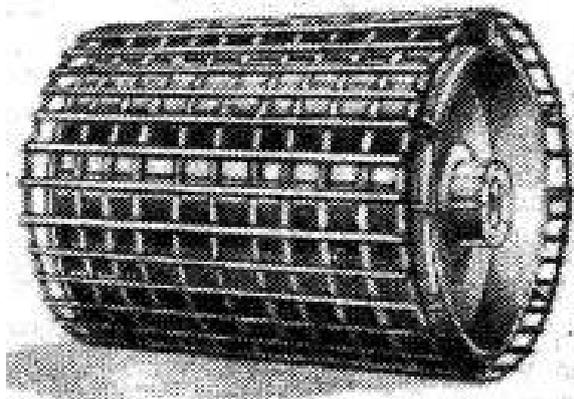


Рисунок 27 – Решетчатый валец дорожного катка.

Так на рисунке 28 представлен график зависимости плотности от изменения степени перфорации вальца. Схема распределения давлений под одной секцией решетчатого или перфорированного катка представлена на том же рисунке. Из неё видно влияние девиаторного нагружения на уплотняемый материал.

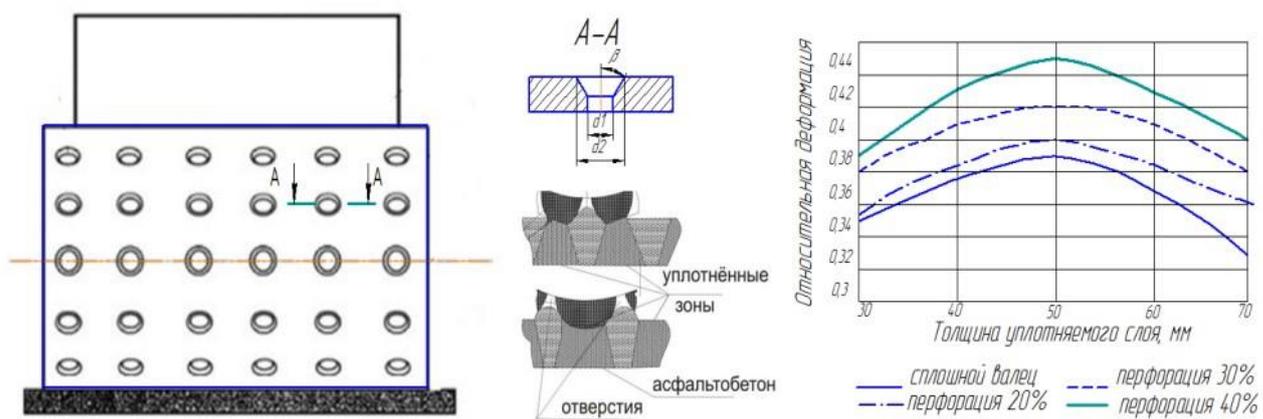


Рисунок 28–Перфорированный валец дорожного катка[53].

Уплотнение виброкатками сочетает в себе достоинства многоциклового воздействия на уплотняемый материал при укатке. При этом наиболее полно реализуется девиаторное нагружение в направлении продольной оси дороги [93,103,131]. Здесь переход уплотняемого материала в предельное состояние наступает при значительно более высоких значениях средних напряжений, что повышает эффективность уплотнения жестких смесей. Но длительность предельного состояния, вызываемого в материале от вибрационного катка гораздо меньше по сравнению со статическим катком. Это приводит к тому, что величина развиваемых вязкопластических деформаций так же уступает величине деформаций соответствующих воздействию статического катка.

Дорожные катки осцилляторного типа осуществляют дополнительное нагружение материала в горизонтальной плоскости. Такие катки способны создавать при одном проходе разнонаправленные усилия сжатия и сдвига в уплотняемом материале. Однако, эти усилия приложены к покрытию вдоль продольной оси дороги, по ходу движения катка. В результате их применения мы также получаем анизотропный по структуре материал покрытия

Рассмотренные дорожные катки создают простое нагружение в уплотняемом слое, и разработка их конструктивных параметров базировалась на обоснованных теориях уплотнения асфальтобетонных смесей, которые создавались применительно к расчёту систем из изотропных слоёв. Данные теории

рассматривают взаимодействие вальца дорожного катка материала только в продольной плоскости. Рассмотренный анализ схем структурно-силового взаимодействия рабочих органов уплотняющих машин с укатываемым слоем показывает, что рабочие органы должны создавать равные вертикальные и горизонтальные силы как в продольном, так и поперечном направлениях по ходу движения катков. При уплотнении известными дорожными катками не осуществляется необходимого силового воздействия в поперечном направлении, и повышение физико-механических характеристик получаемого покрытия.

Существующие рабочие органы осуществляют воздействие на уплотняемый материал в плоскости параллельной продольной оси дороги и не обеспечивают получение структуры материала с изотропными свойствами. Однако, разработка и применение новых типов дорожных катков, обеспечивающих получение изотропного покрытия в результате уплотнения до настоящего времени, не рассматривалась. Необходимо создание новых рабочих органов, создающих НДС уплотняемого слоя способствующего формированию изотропной структуры дорожных покрытий в процессе их уплотнения.

Выводы по второй главе

По результатам проведённого математического моделирования и исследования взаимодействия вальца дорожного катка с уплотняемым слоем можно сделать следующие выводы:

1. Проведён патентный поиск известных конструкций рабочих органов дорожных катков и проведён анализ и оценка влияния их конструктивных параметров на формирование изотропного дорожного покрытия.

2. Используемые в настоящее время рабочие органы уплотняющих машин не обладают универсальностью с точки зрения изменения направленности силового поля на укатываемый слой дорожного покрытия, вследствие чего не позволяют получить изотропное дорожное покрытие.

3. Разработанные ранее математические модели для описания процесса воздействия вальцов дорожных катков на асфальтобетонную смесь не учитывают анизотропию деформационных свойств материала.

4. Разработана уточнённая математическая модель, позволяющая описать процесс взаимодействия рабочих органов катков с дорожным покрытием. Она позволила установить критерий силового воздействия рабочего органа дорожного катка на уплотняемый материал, на основании которого можно определять рациональные параметры новых средств уплотнения и режимов их работы для создания изотропного при укатке соответствующей асфальтобетонной смеси дорожного покрытия.

ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

3.1 Обоснование новой методики оценки степени анизотропии деформационных свойств асфальтобетонной смеси

Характеристики и моделирование анизотропных свойств были широко исследованы в геомеханике и геотехнике. Тем не менее, очень немногие научные исследования были сосредоточены на параметрах моделирования анизотропных свойств асфальтобетонных смесей. Поведение материала в эксплуатации «задаётся» направленным силовым воздействием на материал при уплотнении.

Выбор машин для уплотнения асфальтобетонных покрытий требует исследования направленности силового воздействия на уплотняемый слой и её влияния на анизотропию свойств. Такая проверка теоретических исследований по измерению разницы деформаций в продольном и поперечном направлении, а также условий получения изотропного покрытия необходима для подтверждения гипотезы о том, что воздействие со стороны рабочих органов уплотняющих машин может влиять на структуру получающегося материала. В качестве критерия оценки этого влияния может выступать величина необратимой деформации асфальтобетонного покрытия, накапливающаяся под воздействием на него транспортных средств. Поэтому определение деформационных характеристик для различных составов асфальтобетонных смесей в зависимости от способа уплотнения должно являться одним из приоритетных параметров дорожных катков для получения изотропного дорожного покрытия.

Асфальтобетон как материал представляет собой смесь агрегатов и битумных вяжущих. В результате сжатия его прочность создаётся от сопротивления агрегатных частиц к приложенной нагрузке, обеспечивается совокупное сцепление частиц между собой, и жёсткость асфальтового вяжущего. Поскольку совокупная ориентация может быть создана только лишь под влиянием

уплотнения, устойчивость к прикладываемым нагрузкам в разных направлениях может быть различной. Так, например, профессор Ван [174] рассматривает перекрёстную анизотропию. Им выполнялись трёхосные лабораторные испытания на кубических асфальтобетонных образцах (4 дюйма в длину), используя многоступенчатую процедуру загрузки. Многоступенчатая процедура загрузки включает в себя изотропное сжатие с последующим трёхосным сжатием, затем трёхосное расширение, простой сдвиг, после чего испытание при обычном трёхосном сжатии. Результаты испытаний были использованы для вычислений величины модуля упругости в вертикальном направлении и в горизонтальном направлении. Было обнаружено, что упругость в вертикальном направлении, как правило, в два раза больше, чем в горизонтальном направлении. Авторы пришли к выводу, что больше напряжение сдвига может развиваться в анизотропных материалах за счёт нагрузки от транспорта в процессе эксплуатации, тем самым вызывая ярко выраженный поток сдвига асфальтобетона (явление колейности). Как правило, для оценки степени анизотропии используют трёхосные лабораторные испытания на асфальтобетонных образцах используя различные режимы нагружения. Это трудоёмкая работа, требующая специального оборудования, не имеющего широкого распространения в нашей стране.

Второй способ оценки анизотропных свойств асфальтобетона заключается в измерении характеристик сдвиговой прочности в различных направлениях. Для нахождения угла наклона μ , площадки предельного равновесия и величины разрушающего напряжения σ_1 в элементе анизотропного по прочности необходимо знать закон распределения прочности $S(\mu)$. Зависимость сдвиговой прочности от положения площадки сдвига при произвольном угле наклона β плоскости изотропии к горизонту была принята в виде

$$S_{\mu} = S_1 + (S_2 - S_1)\sin^2(\mu - \beta), \quad (38)$$

где S_1 и S_2 — предельные сопротивления сдвигу соответственно вдоль и поперёк плоскости изотропии (слоистости).

Можно указать ряд функций $S_{\mu}(\mu, \beta)$ графики которых достаточно хорошо укладываются на опытные точки. Используя условие Кулона-Мора можно

показать, что из закона изменения предельного сопротивления следуют аналогичные по форме законы изменения прочностных характеристик $tg\varphi$ и c_μ

$$\left. \begin{aligned} tg\varphi &= tg\varphi_1 + (tg\varphi_2 - tg\varphi_1)\sin^2(\mu - \beta) \\ c_\mu &= c_1 + (c_2 - c_1)\sin^2(\mu - \beta) \end{aligned} \right\}; \quad (39)$$

Поскольку значения характеристик прочности вдоль и поперёк слоистости экстремальны, в дальнейшем для оценки степени анизотропии будем привлекать отношения $n_c = tg\varphi_2/tg\varphi_1$ и $n_c = c_2/c_1$. Графики зависимостей (38) и (39) в полярных координатах $S_\mu(tg\varphi, c_\mu), (\mu - \beta)$ представляют собой кривые, близкие по своему очертанию к эллипсам. Эти зависимости часто называют эллипсами прочности, трения и сцепления. Эллипс прочности (трения, сцепления) ориентирован в асфальтобетоне так, что его оси совпадают с направлениями вдоль и поперёк плоскости изотропии (слоистости), а значения полуосей равны $S_1, S_2(tg\varphi_1, tg\varphi_2, c_1, c_2)$.

Недостатком данного способа оценки анизотропных свойств является так же необходимость проведения большого количества лабораторных исследований, которые не смогут выявить влияние рабочего органа уплотняющей машины на структуру материала. Необходимо разработать методику, которая бы сочетала в себе возможность оценки влияния силового воздействия вальца дорожного катка, а также не требовала большого количества экспериментов.

Существующие методы испытания на колееобразование не соответствуют действительным условиям эксплуатации и не учитывают реальную структуру асфальтобетона в дорожном покрытии. Оценка и прогнозирование колееобразования по критериям деформативной устойчивости по Маршаллу, по испытаниям в гирационном приборе лабораторного уплотнения асфальтобетона или показателям сдвигоустойчивости по российскому ГОСТ 12801 – 97 (коэффициент внутреннего трения и сцепление при сдвиговом разрушении асфальтобетонного образца) не даёт ожидаемого совпадения с результатами натурных наблюдений на дороге или специальных тестов на колееобразование по другим методикам и приборам.

При уплотнении образцов, как в лаборатории, так и на местах необходимо получить достоверную корреляцию между лабораторными показателями и реальным дорожным покрытием. Различные лабораторные методы уплотнения могут привести к получению идентичных образцов, но с широко изменяющимися механическими характеристиками. В работах [13,156,157] доказано, что уплотнение роликовым сектором, которое используется для производства горячей смеси асфальта в лаборатории, обеспечивают наилучшую корреляцию с образцами поля с точки зрения внутренней совокупной структуры и механических свойств.

Структурную анизотропию можно определить с помощью изменения методики испытаний асфальтобетонов на таких установках. Необходимо дополнительно испытывать образцы в поперечном направлении относительно направления уплотнения и исследовать сходимость кривых деформирования (см. рисунок 29).

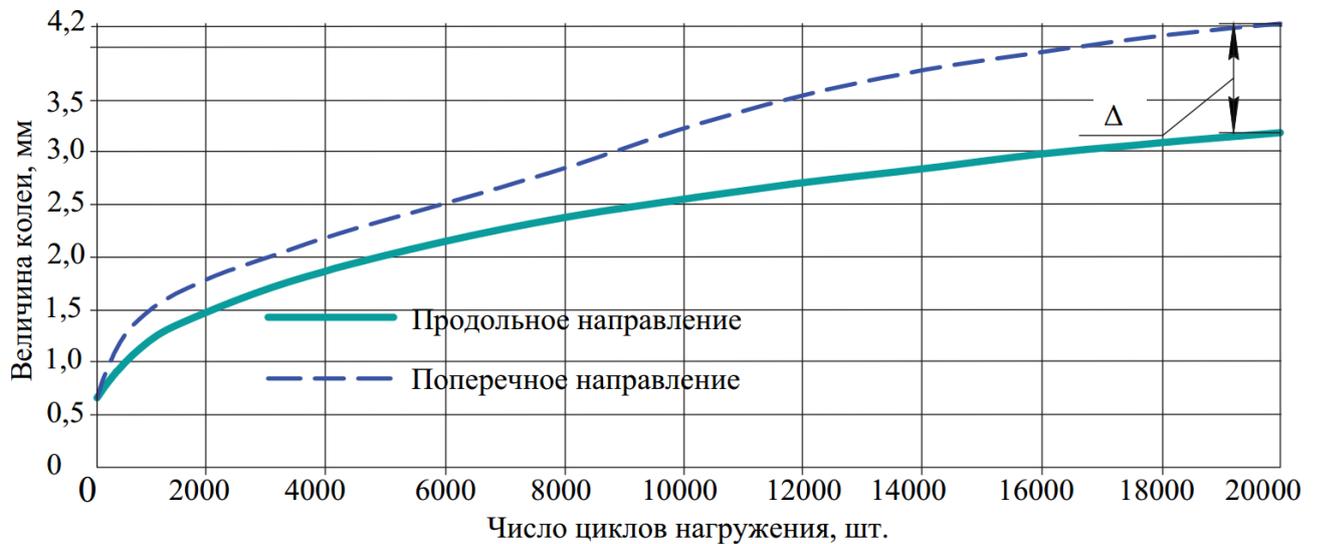


Рисунок 29 – Оценка анизотропии свойств по сходимости кривых колееобразования в продольном и поперечном направлении.

При этом величина Δ в этих испытания должна стремиться, по своей величине, к минимуму.

Данная методика позволяет оценить деформативные свойства асфальтобетона и позволит снизить величину колееобразования на дороге.

Например, если при испытании колееобразования в поперечном направлении размер возникающей колеи после 20000 циклов в продольном направлении 6,61 мм, а в поперечном 6,72 мм для одного состава смеси, а для другого состава 6,3 мм и 8 мм соответственно, то необходимо использовать первую смесь. При выборе асфальтобетонных смесей, необходимо выбрать ту, у которой разница в величине колеи между продольным и поперечным направлениями минимальная. Этот метод оценки анизотропных свойств является недорогим и пригодным для использования и анализа в лаборатории, а также не требует трудоёмких вычислений.

3.2 Проведение экспериментальных исследований

Целью проводимого эксперимента является исследование процесса образования колеи на образцах уплотненных по традиционной технологии. Это выполняется с помощью фиксации величины развития деформаций в зависимости от числа циклов проездов колеса на тестовом стенде в продольном и поперечном направлении. Результаты испытаний могут служить эффективным критерием оценки деформационных свойств асфальтобетона, учитывающим анизотропию его свойств.

Для решения рассматриваемой в экспериментальном исследовании задачи были поставлены следующие цели:

- изучить развитие колеи в испытываемых образцах в зависимости от способа уплотнения смеси.
- разработать новую методику оценки степени анизотропии асфальтобетонных смесей в результате уплотнения;
- произвести сбор экспериментальных данных величины образования колеи для различных асфальтобетонных смесей в зависимости от способа уплотнения;

Важно отметить удобство анализа экспериментальных данных в логарифмических координатах. График кривой образования колеи в таком

представлении удобен для анализа, а также позволит сократить количество циклов испытания. Логарифмический тренд – это функция вида:

$$y(x) = a * \ln(x) + b, \quad (40)$$

где значение x – это количество циклов нагружения, шт; y – глубина получающейся колеи, мм; значение b – точка пересечения с осью y на графике; значение a – величина увеличения следующего значения временного ряда.

Рассматриваемый в работе метод подходит для исследования образцов дорожного покрытия из любых типов смесей с использованием различных вариантов нагружения. С целью установления влияния направленности силового воздействия, в процессе уплотнения, на формирование структуры асфальтобетона испытываемых образцов, их уплотнение выполнялось по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Испытания материалов применимы для дорог с нагрузкой на ось до 13 тонн.

В качестве испытываемого материала предусматривается щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси (ЩМАС) ввиду широкого распространения в устройстве дорожных одежд в нашей стране. Научные исследования и нормативные акты [27, 28, 29, 57,58], направленные на изучение физико-механических свойств асфальтобетонов, не рассматривают их на предмет анизотропии при испытании образцов асфальтобетона на колееобразование.

Новый метод оценки анизотропии свойств необходим для уточнённой оценки стойкости покрытия к колееобразованию. Сопротивление на сдвиг в продольном и поперечном направлении является ключевым параметром асфальтобетона в процессе его эксплуатации. Как отмечалось ранее, это зависит от структуры материала сформировавшейся в процессе уплотнения. Максимальные касательные напряжения здесь приняты в качестве критерия перехода уплотняемого материала в предельное состояние. Пластические деформации начнут своё действие при условии достижения предельного значения максимальных касательных напряжений в материале. Для обоснования предлагаемой методики необходимо:

- изучить зависимость получающейся структуры асфальтобетона от силового поля со стороны дорожных катков;

- определить совокупное влияние направления уплотнения, типа смеси и рабочих органов на деформационные свойства материала.

В исследовании рассмотрены три состава асфальтобетонных смесей. Первая смесь типа А и две другие из ЩМА 15 и ЩМА 20. Были выбраны эти смеси так как:

- колея возникает именно в верхнем слое дорожных одежд, а для верхнего слоя дорожных одежд используют только плотные асфальтобетонные смеси

-как правило, именно эти смеси используются для строительства дорог с интенсивным движением [24,27,30,58,81].

Рецепты исследуемых смесей разработаны согласно ГОСТ 31015-2002 и ГОСТ 9128-2013 для смесей типа ЩМАС и типа А соответственно.

Смесь ЩМА15 приготовлена на полимерно-битумном вяжущем БНД60/90а ЩМА20 на битуме ПБВ60, асфальтобетонная смесь типа А-I приготовлена на битуме БНД60/90. В состав входил щебень и песок габбро-диабаз из карьера «Голодай гора» в соответствии с ГОСТ 8267-93 и ГОСТ 31424-2010соответственно. В состав смесей входил минеральный порошок МП-1 из карьерав г. Сланцы по ГОСТ 52129-2003.Свойства полимерно-битумного вяжущего полностью соответствовали ГОСТ 52056-2003 и ГОСТ 22245-90. График зерновых составов исследуемых смесей показан в приложении Г.

Формование образцов

Проверку устойчивости к образованию колеи различных смесей асфальтобетонов осуществляют на специальных испытательных установках. Как правило, в этих приборах или установках по специально приготовленной асфальтобетонной плите, цилиндрическому или прямоугольному образцу многократно проезжает колесо, имитирующее колесо автомобиля с заданной вертикальной нагрузкой. Критерием оценки колееустойчивости может служить либо количество нагрузочных циклов, при котором появляется, колея с заранее

заданной (нормативной) глубиной 10, 15 или 20 мм, либо глубина колеи, соответствующая 5000, 10000 или 20000 циклам нагружения[79,141,142].

В установке испытываются плиты длиной 320 мм, шириной 320 мм и толщиной 40мм. Толщина плиты должна превышать максимальный номинальный размер зёрен минерального материала в три раза. Плиты закрепляют в стальных контейнерах многократного использования, изображённых на рисунке 30.

Плита, используемая в качестве образца, может быть изготовлена в лаборатории либо из смеси на асфальтобетонном заводе. В среднем на одну плиту необходимо около 12 кг смеси. При изготовлении плиты в лаборатории смесь перемещают из смесителя в форму.

Плиту для испытаний можно так же выпилить из готового покрытия, тогда её необходимо закрепить в форме цементным раствором. Образцы вырезают из дорожного покрытия для дальнейшего тестирования, так как соотношение между направлением уплотнения и испытаний в лабораторных условиях, не всегда такое же, как и между направлением уплотнения и фактической нагрузкой в полевых условиях.



Рисунок 30– Формы для испытаний.

Уплотнительный сектор для получения образцов

Смеси предварительно выдерживают в термостате 12 часов при температуре 155°С, а затем засыпают в предварительно подогретую до 100 °С металлическую форму. Для формования образцов плиту закрепляют при помощи винтов на экспериментальной машине, моделирующей силовое воздействие вальца дорожного катка на асфальтобетонную смесь. Принцип работы уплотнительной

установки заключается в сжатии образцов в стальных контейнерах с одновременным контролем степени их уплотнения.

Максимальная нагрузка уплотнения составляет 30 кН на 305мм ширину уплотняющего сектора (эквивалент линейного давления для тяжёлых статических катков). Встроенный регулятор температуры позволяет осуществлять регулирование температуры испытания в диапазоне от 40 ° С до 62 ° С. Производится контроль скорости нагружения, числа циклов (проходов) и уровней уплотнения. Общий вид пневматического роликового прессы модели CRT-RC2S производства фирмы Соорег, который применялся в ходе лабораторных исследований, показан на рисунке 31.

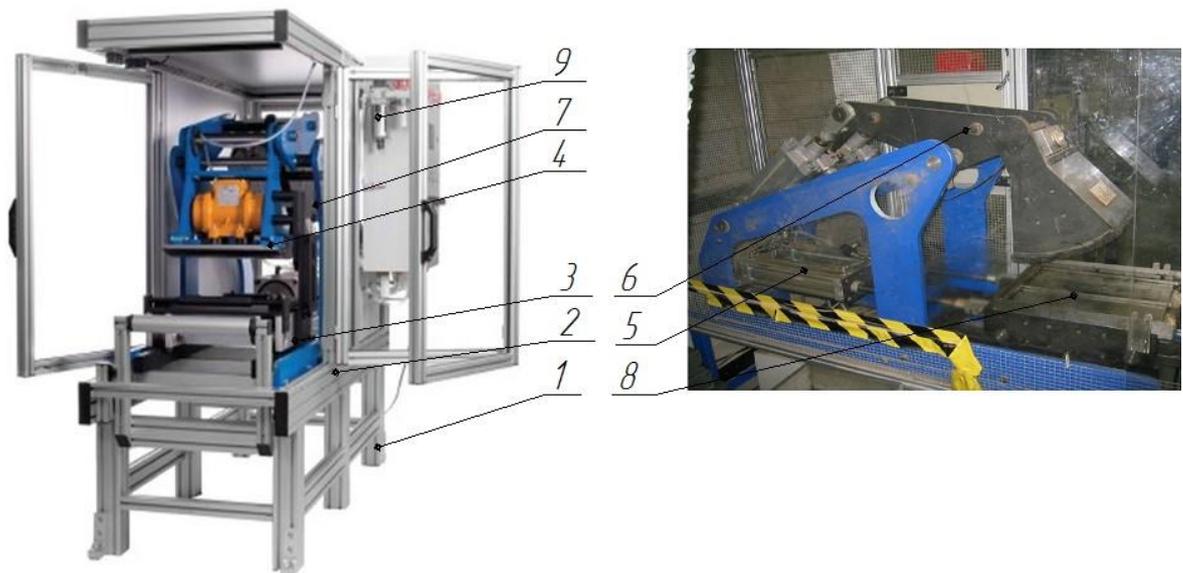


Рисунок 31 – Роликовый уплотнитель.

Роликовый уплотнитель содержится в защитном корпусе с поликарбонатными панелями и дверями. Предохранительные выключатели используются для того, чтобы роликовый уплотнитель не мог управляться, пока двери не закрыты. Испытательная установка включает в себя основание 1, на котором установлен стол 2, а также тележка 3 свободно перемещающихся в вертикальной плоскости. Уплотнительный сектор 4 связанный с пневмоцилиндрами 5 с помощью кривошипно-шатунного механизма 6. Ограничители хода 7 позволяют изменять величину рабочего хода. Уплотнение

асфальтобетонного образца в стальной плите 8, установленной на рабочий стол 2, осуществляется сектором 4, при этом величина действующей нагрузки определяется датчиками давления 9. Настройка режимов уплотнения задаётся кнопками управления 10 на рабочем окне операторы, там же приводится информация о рабочих давлениях установки в ходе проведения испытаний.

Максимальное уплотняющее усилие, которое может создать установка составляет 30000 Н, а погрешность определения нагрузки находится в пределах $\pm 3\%$ от измеряемого значения. Таблица 5 показывает какая нагрузка эквивалента оказываемому давлению.

Таблица 5 – Рабочие давления установки для уплотнения образцов

Давление, бар	1	2	3	4	5	6	7
Усилие сегмента ролика, направленное вниз, кН	6,154	12,309	18,463	24,618	30,772	36,926	43,081

Технические характеристики роликового уплотнителя приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики роликового уплотнителя

Максимальная нагрузка ролика	30 кН
Перемещение тележки, мм	± 150 мм
Скорость ($\pm 0,5$ с)	3.5 с / на проход
Перекрытие толщина, мм	40-100 (1.6-4)
Электропитание	220 В, 50 Гц, 16 А
Сжатый воздух	7 Бар, 700 л / м
Размеры (Ш x Г) мм	2150 x 650 x 1650
Рабочее требуемое пространство (ШxГxВ) мм	3650 x 1950 x 1850
Вес, кг	275
Стандарт	EN 12697-33[142]

Для уплотнения образцов были использованы сектора в соответствии с EN 12697-33. Сектор уплотняет образец равномерно с помощью специально разработанной уплотнительной программы при заданном давлении. Шкалы давления (рисунок 32-а) 2, 3 и 4 имеют диапазон давления 0-10 бар.

Плотность смеси определялась по величине её массы в форме и объёму уплотнённого образца. Регулировка высоты выполняется с помощью двух гаек с накаткой и направляющей между двумя верхними цилиндрами. Ограничитель рабочего хода пневмоцилиндров приведён на рисунке 32-б.

Роликовый уплотнитель двигается назад и вперёд столько раз, сколько установлено пользователем в программируемом логическом контроллере (PLC – Programmable Logic Controller).

Прилагаемая нагрузка может быть постоянной для всех проходов или может быть увеличенной для заданного количества циклов.

Количество проходов и давление отображается во время уплотнения на дисплее PLC.

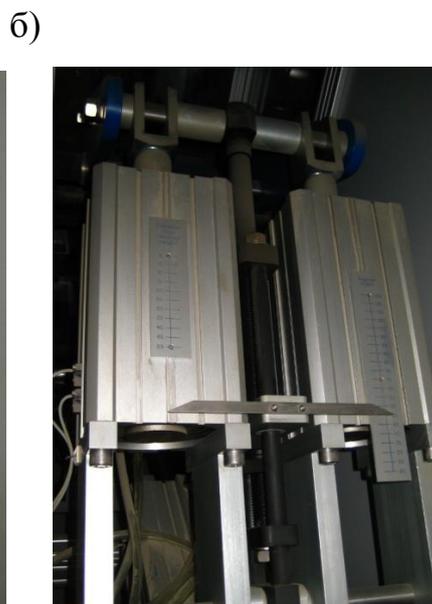


Рисунок 32– а) Шкала давлений и б) Ограничитель рабочего хода ролика.

Режимы уплотнения

Требуемая плотность достигается за счёт определённого числа проходов уплотнительного сектора по разогретой до 155 °С асфальтобетонной смеси.

Для проведения испытаний используется образцы, уплотнённые под углами 0 и 90 градусов (рисунок 33) относительно продольной оси нагружения, на колёсном стенде. Количество образцов для каждого режима уплотнения приведено в таблице 10. Вес каждого образца 12.50 кг.

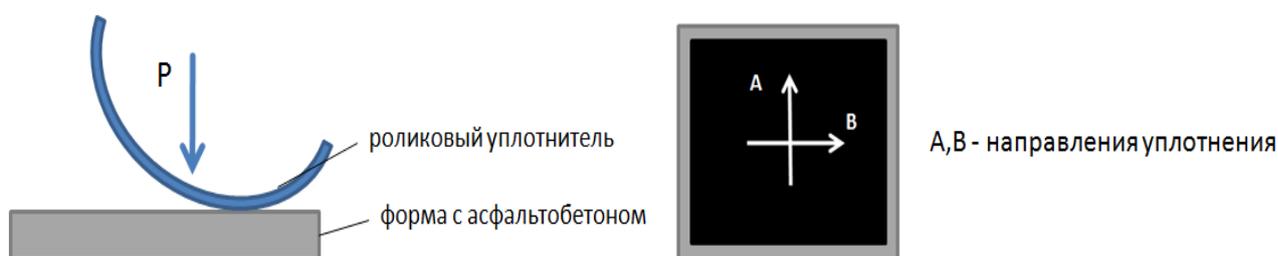


Рисунок 33–Схема укатки образцов в продольном и поперечном направлениях

Было проведено уплотнение образцов плит на роликовом уплотнителе в четыре этапа. Давление на каждом этапе и число проходов, соответствующих каждому давлению, приведены в таблице 7.

Таблица 7– Давления при уплотнении

Параметры уплотнения	Нагрузка эквивалентная проходу дорожного катка			
	Лёгкий	Средний	Тяжёлый	Тяжёлый
Давление, Бар	2	5	4	3
Количество проходов сектора	10	10	5	5

Плотность при уплотнении

Используемые приборы и оборудование для контроля плотности образцов: керноотборник, термошкаф, шпатель, гидравлический пресс, форма и два вкладыша, выжимное приспособление, штангенциркуль, сосуд с водой, весы

лабораторные 4-го класса точности с приспособлением для гидростатического взвешивания (для вырубок).

Качество уплотнения асфальтобетонного слоя определяется по показателям кернов (вырубок) асфальтобетонов через 1 сутки после их уплотнения. Коэффициент уплотнения конструктивных слоёв дорожной одежды на строящемся участке (фактический) должен быть не ниже значений требуемого коэффициента уплотнения 0,99.

Точная толщина образца может быть установлена заранее, что позволяет пользователю выполнять уплотнение до желаемой плотности. Роликовый уплотнитель не сможет достигать нереальных значений плотности, то есть слишком высоких или низких. Контроль размеров врубков осуществлялся штангенциркулем.

Коэффициент уплотнения $K_{упл}$ вычисляют с точностью до второго десятичного знака методом округления по формуле

$$K_{упл} = \frac{p_m}{p_m}, \quad (41)$$

где p_m – средняя плотность образца из конструктивного слоя (фактическая плотность), г/см³;

p_m – средняя плотность переформованного образца (стандартная плотность), г/см³.

Колёсный тестовый стенд

Испытания образцов асфальтобетона на склонность к образованию колеи (максимально приближенных по структуре и плотности к материалу, получаемому в условиях реального уплотнения катками на дороге) проводят на тестовой установке «колесо», например, гамбургское устройство образования колеи. Испытание образцов асфальтобетонов было осуществлено на приборе, установленном в климатической камере, модели CRT-SA4PT-BB компании Соорег в соответствии с стандартом EN 12697-26 [12].

Колёсный испытательный стенд обычно измеряет колею, созданную путём многократного прохождения колеса по заранее приготовленным образцам

асфальтобетона. На образец воздействуют путём многократного проезда колеса с постоянной вертикальной нагрузкой.

Таким образом, имитируется процесс образования колеи в реальных условиях эксплуатации на дороге. При этом фиксируется процесс развития деформации в зависимости от числа циклов проездов колеса.

Технические характеристики колёсного стенда показаны в таблице 8.

Таблица 8 – Технические характеристики колёсного стенда

Нагрузки от колеса	700 .. 520Н
Размеры пресс-формы	305 x 305 мм 1
Скорость колеса	26,5 циклов в минуту
Перекрытие Толщина	От 40 до 100 мм
Электропитание	220-240 В, 60 Гц, 13А
Габаритные размеры, мм	1579 x 840 x 1740
Вес, кг	448
Нормативные акты	EN 12697-22; АСТ 01: 2004; BS 598-110: 1998

Стенд испытания под колесом (рисунок 34) состоит из каркаса 1 и гидравлически управляемого и нагружаемого колеса 2, а также измерительных приборов (три измерителя расстояния на лазерных диодах, установка, на которой стоят измерители, и двигатель, который передвигает установку), которые находятся в теплоизолированном шкафу 3.

Установка оснащена воздушной камерой с максимальной регулируемой температурой до $65^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

Плиту устанавливают между упорами и закрепляют с помощью шурупов. Плиту оставляют на ночь для достижения желаемой температуры в пределах $+60^{\circ}\text{C}$ при помощи регулятора температуры.

Также в стенд входят регулятор температур 4 и компьютер для обработки результатов. Исследуемый образец 5 закрепляется винтами на столе 6.



Рисунок 34– Установка для проведения испытаний на колееобразование.

Автомобильное колесо, используемое в стенде, имеет гладкую поверхность и имеет диаметр 200 мм и ширину 47 мм. Колесо оснащено твёрдой резиновой обечайкой с внешним диаметром 200 мм. Нагрузка равна 685 Н и среднее напряжение в пятне контакта с исследуемым образцом 730 кПа. Что соответствует площади пятна контакта 9,70 см², при ширине колеса в 47 мм и средней длине контакта 20 мм.

Важно заметить, что площадь пятна контакта изменяется с увеличением глубины колеи, и, как следствие, напряжения в зоне контакта так же изменяют своё значение. Создаваемое испытательной установкой напряжение в пятне контакта эквивалентно проезду по образцу одной шины двухосного грузового транспортного средства.

Средняя скорость движения колеса приблизительно 0,3 м/с [10, 11,12]. Давление колеса регулируется в зависимости от нагрузки в пределах 6-10 бар, нагрузка колеса 7-25 кН (регулировка гидравлическим насосом), скорость -1-5 км/час (регулировка скорости и замедления колеса происходит с пульта управления). Длина движения (прихода) колеса от одной упоры до другой -1000 мм. При испытании выполнялось 20000 проходов колеса при температуре

образцов 60° С. Для поддержания температуры испытания используется воздушная камера.

Испытания начинают с включения программы нагружения и измерения температуры. С помощью пульта управления выбирается общее количество нагрузки и места, в которых выполняются замеры. В начале испытаний стенд проверяет нахождение колеса в пункте отправки, делая один прогон (2 превышения) в другой конец колеи. После этого колесо останавливается, измерительная установка выполняет нулевое измерение.

Одно измерение занимает 5 минут, учитывая возвращение установки назад. Продолжительность испытания - около 8 часов.

Обработка результатов

Данные, полученные в результате испытаний, обрабатываются в программе, которая переформировывает графическую схему результатов по точкам замеров колеи из реестра результатов, в которых отражены все точки испытания. По этим результатам представляются изменение глубины колеи (% или мм) во время проведения испытания или изменения поверхности (как колеи, так и возвышений) от числа циклов нагружения. По графическим схемам результатов определяют происшедшее в начале испытания начальное уплотнение, продлив часть "деформация" на прямой графике результатов (в обратном направлении оси у).

Данные обрабатывались с помощью программного обеспечения под Windows 2010 для запуска и остановки колеса, управления скоростью и передачи деформационных и температурных данных. Отображение на экране обеспечивает постоянно обновляемый график деформаций в зависимости от времени, как показано на рисунке 35. Данные испытаний хранятся в текстовом файле для последующего анализа с помощью электронных таблиц.

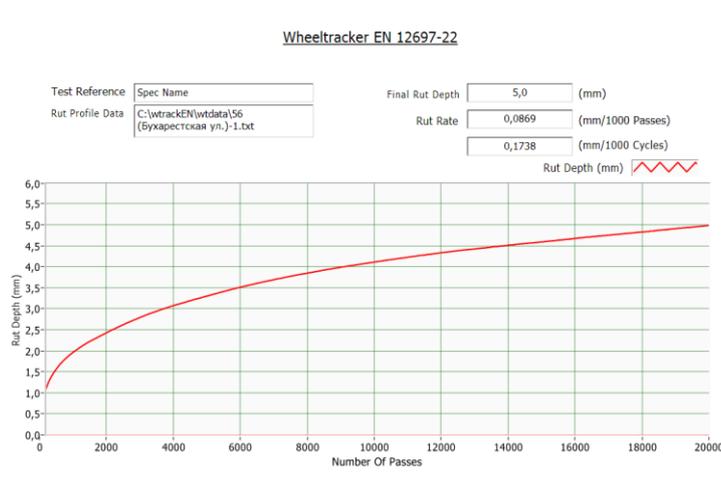


Рисунок 35– Данные дисплея программы

В таблице 9 приведены исследуемые смеси и количество испытываемых образцов, а на рисунке 36 приведены фото образцов после испытаний.

Таблица 9 – Исследуемая смесь и количество испытываемых образцов

Число образцов каждого типа смесей						
Температура (°C)	Набор 1			Набор 2		
	Тип А	ЩМА 15	ЩМА 20	Тип А	ЩМА 15	ЩМА 20
60	9	3	3	9	3	3



Рисунок 36– Образцы после испытаний

В таблицу 10 сведены результаты испытания для смеси Типа А при различных способах уплотнения.

Таблица 10– Результаты испытания для смеси Типа А

№	Направление уплотнения	Направление испытания на колемере относительно направления уплотнения	Глубина колеи, мм	Скорость образования колеи, мм/1000 проходов колеса
1	вдоль	вдоль	8,7	0,153
2	вдоль	вдоль	8,8	0,159
3	вдоль	вдоль	8,6	0,151
4	2 прохода вдоль+ 2 в поперечном направлении	вдоль	8,4	0,176
5	3 прохода вдоль+ 2 в поперечном направлении	вдоль	8,3	0,17
6	4 прохода вдоль+ 2 в поперечном направлении	вдоль	8,2	0,168
7	вдоль	поперёк	6,3	0,152
8	вдоль	поперёк	6,3	0,154
9	вдоль	поперёк	6,5	0,163

График на рисунке 37 показывает кривые образования колеи в зависимости от способа уплотнения.

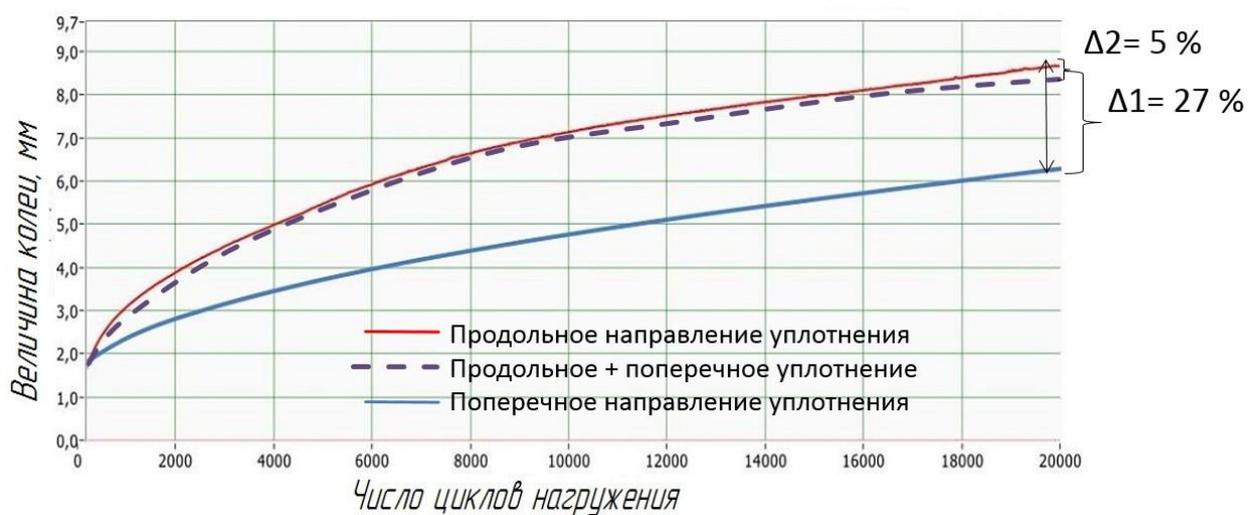


Рисунок 37– Результаты испытаний на колеобразование для образцов смеси Типа А, уплотнённых в продольном, поперечном направлении, а также продольном и поперечном направлении.

Классификация асфальтобетона по сдвигоустойчивости на основе испытаний по образованию колеи представлена в таблице 11.

Таблица 11 – Классификация асфальтобетона по сдвигоустойчивости

Класс сдвигоустойчивости	Тест по образованию колеи, PANK 4205		Предельное удлинение: циклическая ползучесть; PANK 4208
	Контрольная начальная колея (мм)	Конечная колея (мм)	(%)
I	≤ 1	≤ 4	≤ 2
II	$\leq 1,5$	≤ 8	$\leq 3,5$
III	≤ 2	≤ 12	≤ 5
IV	≤ 3	≤ 16	$\leq 6,5$

С целью установления степени влияния направления уплотнения на снижение накопления остаточных деформаций в асфальтобетонных образцах были проведены экспериментальные исследования. На рисунках 38, 39, 40 приведены результаты испытаний для смесей типа А, ЩМА15, ЩМА20. Для удобства анализа кривые деформирования образцов построены в логарифмических координатах.

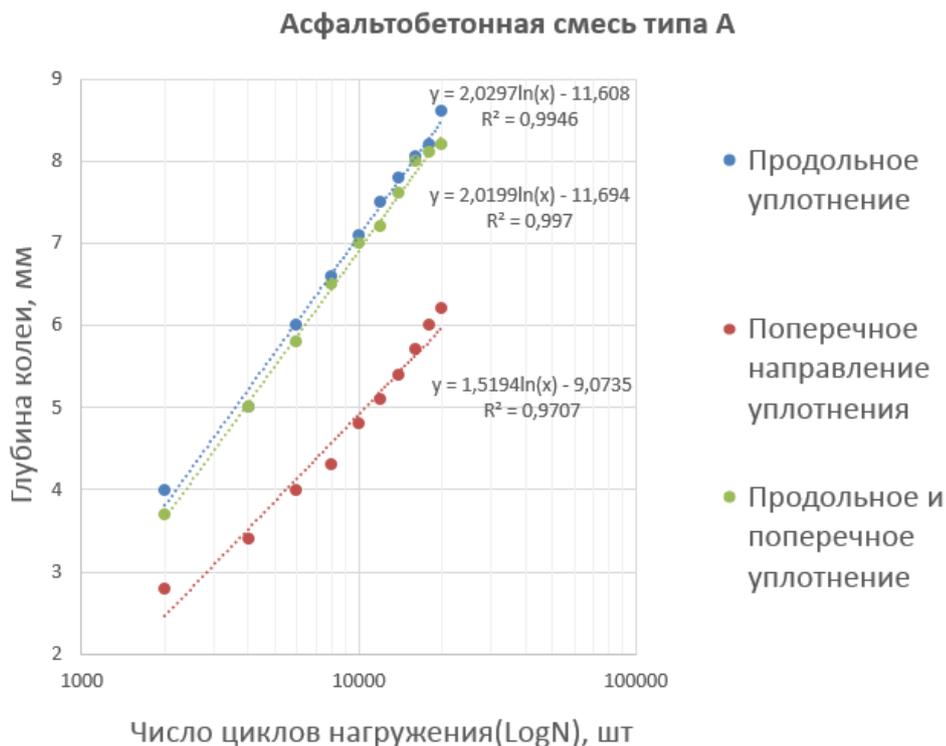


Рисунок 38 – Результаты испытаний для смеси типа А.

Асфальтобетонная смесь типа ЩМА15

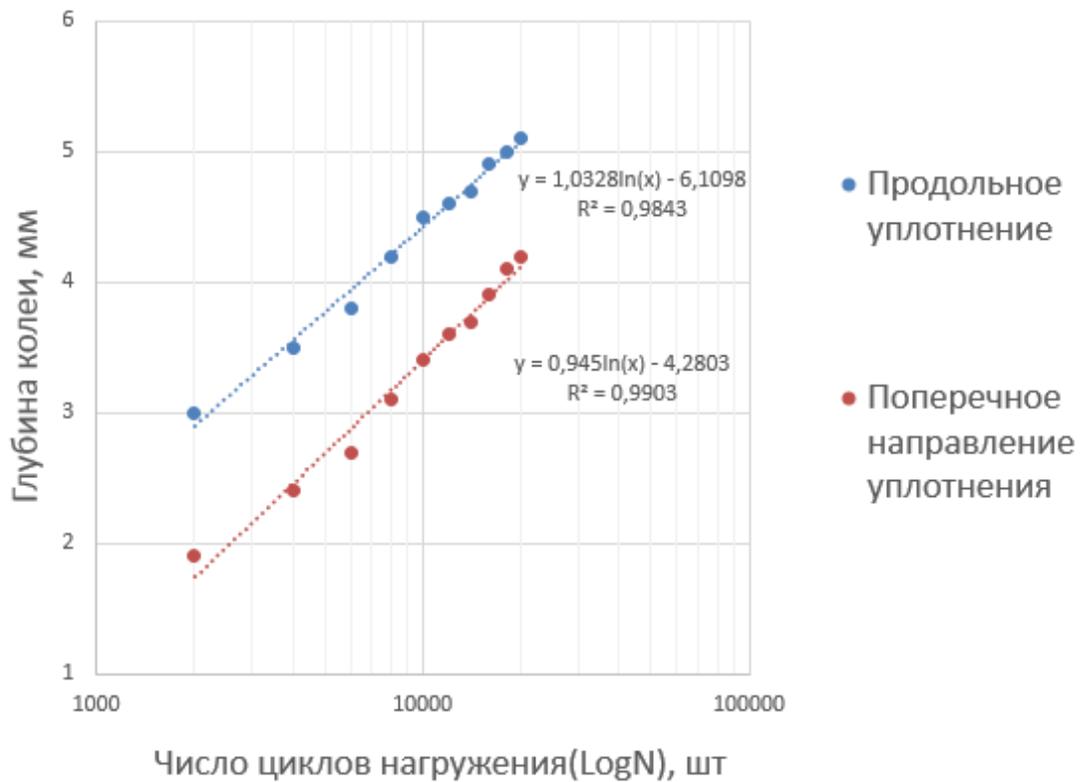


Рисунок 39 – Результаты испытаний для смеси ЩМА15.

Асфальтобетонная смесь типа ЩМА20

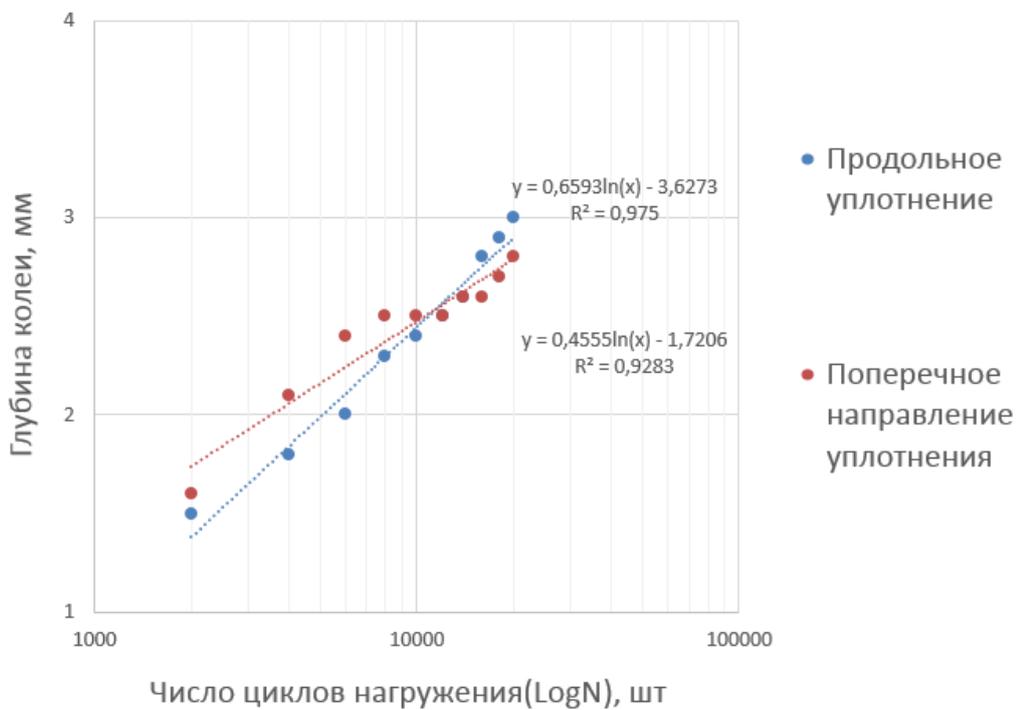


Рисунок 40 – Результаты испытаний для смеси ЩМА20.

Результаты экспериментального исследования зависимости величины колееобразования от способа уплотнения приведены в таблице 12. Достоверность полученных экспериментальных статистических данных оценивали согласно СТП 007-97 [31,105].

Таблица 12 – Результаты экспериментального исследования зависимости величины колееобразования от способа уплотнения

а.б. смесь	Коэффициент, а			Среднеквадратичное отклонение, R ²		
	уплотнение вдоль	уплотнение поперёк	уплотнение вдоль и поперёк	уплотнение вдоль	уплотнение поперёк	уплотнение вдоль и поперёк
тип А	2,029	1,1519	2,019	0,994	0,97	0,997
ЩМА15	1,033	0,945	-	0,984	0,99	-
ЩМА 20	0,659	0,455	-	0,975	0,928	-

На рисунке 41 приведено фото кернов смеси ЩМА 20, взятые с перекрёстка в г. Санкт-Петербург на улице Передовиков. Керны имели обозначение направления уплотнения дорожными катками и заливались в форме гипсовой смесью в испытательную форму. Было подготовлено два комплекта образцов с кернами, закреплёнными в продольном и в поперечном направлении.

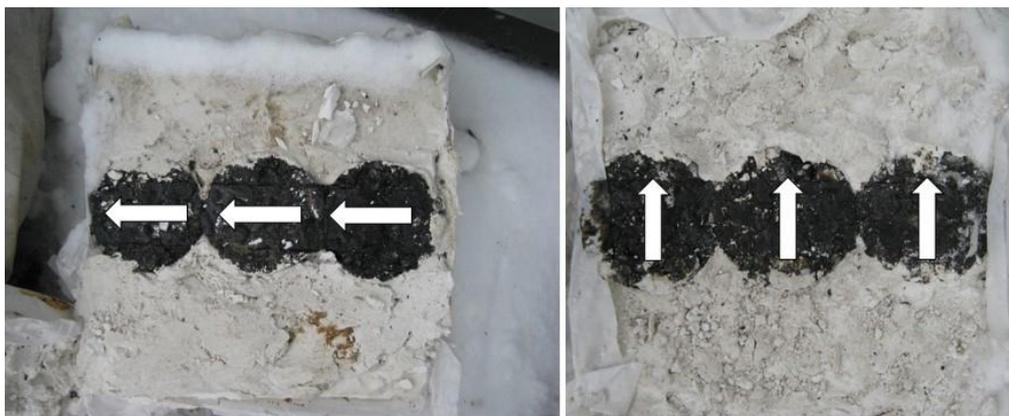


Рисунок 41– Керны, взятые с перекрёстка после испытаний на колееобразование.

На рисунке 42 представлены результаты испытаний кернов асфальтобетонов на устойчивость к накоплению пластических деформаций под действием динамических нагрузок на колёсной тестовой установке.



Рисунок 42– Результаты испытаний для смеси ЩМА20.

Исследования в области анизотропных материалов [13,72,101,151] указывают на то, что на степень анизотропии свойств значительное влияние оказывает размер исследуемых образцов. Этим объясняется высокая сходимость кривых колеобразования кернов для продольного и поперечного направления. Равномерность уплотнения с точки зрения изменения объёмной плотности образцов отражается по рассеянию результатов испытаний[31,82].

Тем не менее, для каждого конкретного метода уплотнения результаты измерений показывают анизотропию Масад и др. [154,155] утверждает, что прочность асфальтовых образцов может отличаться до 30 % в зависимости от величины анизотропии свойств асфальтобетона.

Выводы по третьей главе

1. В результате стендовых испытаний экспериментально доказано, что существующие рабочие органы дорожных катков и технология их применения обуславливают получение анизотропного асфальтобетонного покрытия склонного к колееобразованию.

2. Разработана методика экспериментальной оценки степени анизотропии прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей за счёт исследования глубины образующейся колеи в зависимости от числа циклов проездов колеса на тестовом стенде в продольном и поперечном направлении.

3. Исследовано влияние направленности силового воздействия со стороны вальца дорожного катка на формирование структуры уплотняемого слоя, влияющие на изотропию свойств дорожного покрытия. При этом установлено и экспериментально доказано влияние направленности силового воздействия рабочих органов уплотняющих машин на структуру уплотняемого материала и как следствие - на величину возникающей колеи.

ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ К ДОРОЖНЫМ КАТКАМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ИЗОТРОПНОЕ СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА УПЛОТНЯЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

4.1 Разработка новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием

Проведённый патентный поиск и анализ работ по созданию новых рабочих органов уплотняющих машин показывает, что вальцы дорожных катков, как правило, постоянно конструктивно совершенствуются [21,22,23,33,70,88,98,118,125]:

1. **Доработки конструкции рабочего органа** для усиления силового воздействия за счёт изменения направления силового воздействия со стороны рабочих органов на слой смеси, либо путём создания динамического воздействия на уплотняемый материал

2. **Разработки принципиально новых конструкций**, которые позволяют комбинировать различные силовые воздействия на уплотняемый материал. Чаще всего они сочетают в себе конструктивные элементы уже известных рабочих органов, либо осуществляют воздействие поочерёдно.

Для обоснования предложений по формированию рабочих органов, снижающих уровень анизотропных свойств, были проанализированы структурно-силовые схемы воздействия вальцов дорожных катков на укатываемую смесь. Установлено, что воздействие катка, создающего изотропное покрытие в процессе уплотнения слоя асфальтобетонной смеси, должно отличаться от схем силового воздействия традиционных средств уплотнения.

Конструкции рабочих органов в процессе уплотнения, должны создавать дополнительные касательные напряжения на поверхности контакта, обеспечивающие сдвиг материала вдоль и поперёк дорожного покрытия. Такой

сдвиг могут создавать новые конструкции рабочих органов (валцов). Величина этого сдвига должна быть ограничена по величине деформации, относительно продольной и поперечной осей дороги. Предельная величина этой деформации определяется параметрами уплотняемой смеси по критерию установленному в теоретических исследованиях. Для установления угла наклона суммарного силового вектора в горизонтальной плоскости, относительно продольной оси дороги, необходимо знать физико-механические свойства уплотняемого материала. Основными параметрами, связывающими напряжённо-деформированное состояние уплотняемой смеси с получающейся в результате структурой материала, являются угол внутреннего трения ($tg\varphi$), показатель сцепления асфальтобетона (C) и экспериментальные величины времени до разрушения, а также градиент скорости необратимого сдвига. Проверку эффективности новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием необходимо проводить по приведённым ниже критериям. Схема взаимосвязи структурных свойств асфальтобетона в зависимости от НДС при уплотнении приведена на рисунке 43.

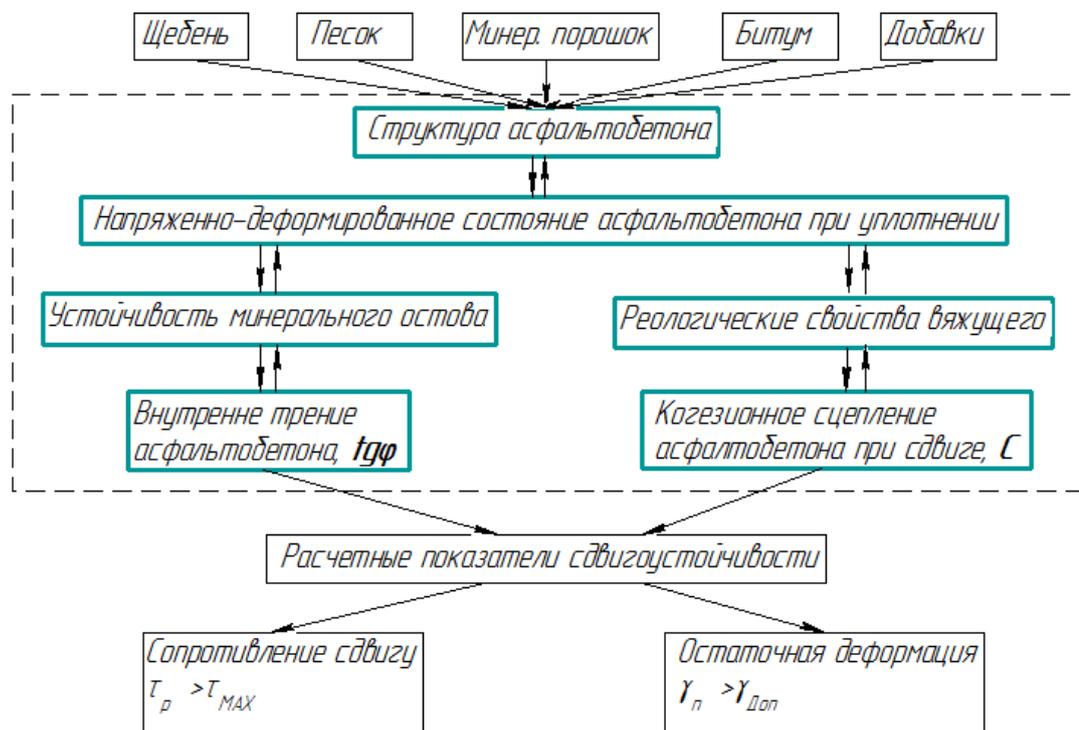


Рисунок 43– Схема взаимосвязи структурных свойств асфальтобетона в зависимости от НДС при уплотнении.

В качестве основного критерия проверки на сдвигоустойчивость получающейся в результате уплотнения структуры необходимо рассмотреть условия, при которых пластические деформации от действия нагрузки со стороны вальца дорожного катка не возникнут. Пластические деформации не возникнут, если максимальные сдвигающие напряжения в уплотняемом асфальтобетонном слое не превысят расчётное сопротивление асфальтобетона сдвигу [3,32,78,81]. На рисунке 44 приведена схема взаимодействия пневматического колеса с опорной поверхностью.

$$\tau_p \geq \tau_{max}, \quad (42)$$

где τ_p - расчётное сопротивление асфальтобетона сдвигу, МПа;

τ_{max} - максимальное касательное напряжение в покрытии, возникающие под действием рабочих органов уплотняющих машин, МПа.

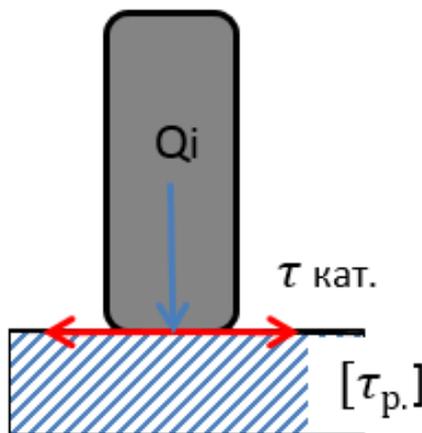


Рисунок 44– Схема взаимодействия пневматического катка с уплотняемой смесью.

$$\tau_{max} < [\tau_{a. \sigma.}]; \quad (43)$$

При этом $\tau_{p.}^{анизотр.}$ – расчётное сопротивление сдвигу для анизотропного асфальтобетона меньше чем $\tau_{p.}^{изотр.}$ - сопротивление сдвигу изотропного дорожного покрытия. Это и обуславливает повышенную стойкость изотропного материала к образованию колеи.

$$\tau_{p.}^{анизотр.} < \tau_{p.}^{изотр.}; \quad (44)$$

Касательные напряжения от действия пневматического катка τ_{max} должны быть меньше допустимого сопротивления асфальтобетона сдвигу $\tau_{p.}$. За счет

создания дополнительных касательных напряжений в поперечном направлении сдвиговая прочность асфальтобетона увеличится благодаря снижению анизотропии свойств, что в свою очередь приведёт к повышению стойкости к колееобразованию.

Сопротивление сдвигу в условиях уплотнения горячей асфальтобетонной смеси рассчитывается с использованием уравнения Кулона и математической модели Бартенева-Иванова:

$$\tau_p = p \operatorname{tg} \varphi + C_{.л} \left(\frac{t_{.л}}{t_1 t_n N} \right)^m \exp \left[\frac{mU}{R} \left(\frac{1}{T_{п+}} - \frac{1}{T_{.л}} \right) \right], \quad (45)$$

где p – удельное давление, создаваемое вальцом дорожного катка, для одной из шин пневматического катка, МПа;

$C_{.л}$ – лабораторно определяемый коэффициент сцепления асфальтобетонной смеси, МПа;

$t_{.л}$ – длительность приложения нагрузки к образцу до разрушения, с;

t_1 – длительность воздействия колёсной нагрузки при одном проходе дорожного катка, с;

t_n – наибольшая длительность укатки дорожного покрытия, примем 0,1 ч;

N – количество проходов дорожного катка по укатываемой полосе, проходов/ч;

m – коэффициент пластичности по Н.Н. Иванову;

U – необходимое количество энергии для начала вязкопластичного разрушения в асфальтобетоне согласно Г.М. Бартенева, кДж/моль;

R – газовая постоянная, 0,008314 = кДж/°К моль;

$T_{п+}$ – наибольшая температура дорожного слоя в процессе укатки, °К;

$T_{.л}$ – температура лабораторно исследуемых образцов, 323,15 °К.

Проведя испытания в лаборатории на специальных прессах можно определить коэффициент m :



(46)

где , R_{50} - показатели прочности при сжатии, при скорости деформирования 50 и 3 мм/мин, МПа;

t_3, t_{50} - длительность деформирования образцов до разрушения, при скорости нагружения 3 и 50 мм/мин, с.

Параметр U должен лабораторно определяться согласно значениям прочности при сжатии при температурах 20 и 50 °С.

$$\text{где } \text{img alt="broken image icon" data-bbox="402 247 625 286"}, \quad (47)$$

где R_{20}, R_{50} - прочности на сжатие при 20 и 50 °С соответственно, МПа.

$C, \text{tg}\phi, t_{\text{л}}, t_{\text{п}}$ параметры сдвигоустойчивости, величина которых зависит от степени изотропии свойств.

Нормальные напряжения под пневматическим катком для стационарной шины зависят от нагрузки, однако их распределение по зоне контакта выглядит, как правило, в виде, показанном на рисунке 45.

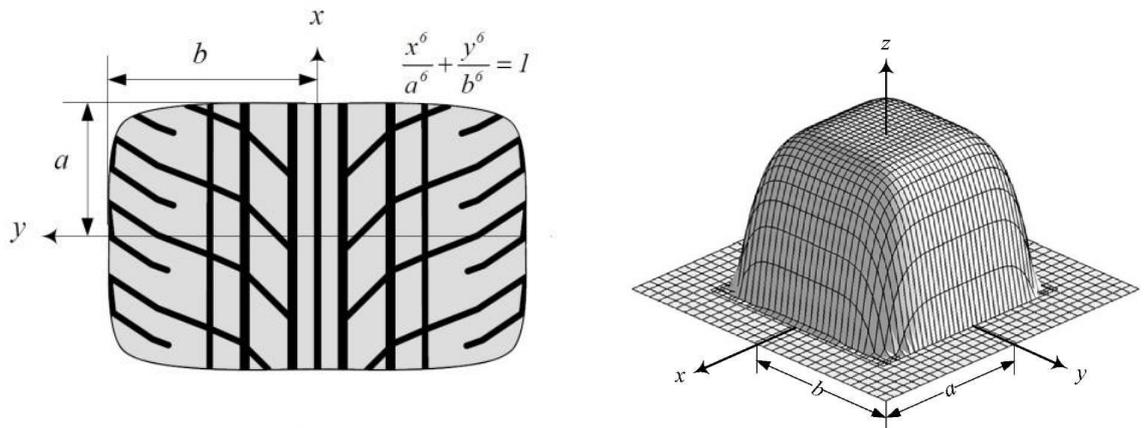


Рисунок 45 - Пятно контакта пневматических шин при уплотнении асфальтобетона и Модель нормального напряжения $\sigma_z(x, y)$ в области контакта.

Нормальное напряжение $\sigma_z(x, y)$ может быть аппроксимировано функцией

$$\sigma_z(x, y) = \sigma_{z\text{M}} \cdot \left(1 - \frac{x^6}{a^6} - \frac{y^6}{b^6}\right), \quad (48)$$

где a и b указывают размеры контактной зоны, как показано на рисунке 45. Область взаимодействия может примерно быть смоделирована с помощью математической функции:

$$\frac{x^{2n}}{a^{2n}} + \frac{y^{2n}}{b^{2n}} = 1 \quad n \in \mathbb{N}, \quad (49)$$

где $n = f(x)$.

Параметр n определяется типом шины (радиальная, не радиальная, сочетанием слоёв корда...).

Наиболее широко распространены шины с $n=2$ и $n=3$.

Определим напряжения в пятне контакта пневматической шины для пневматического катка массой 5000 кг. Если зона контакта каждой радиальной шины $A_p = 4 \times a \times b = 4 \times 5 \times 12$ см, то нормальное распределение напряжения по каждой шине σ_z должны удовлетворять уравнению равновесия.

$$F_z = \frac{1}{4} \cdot 5000 \cdot 9.81 = \int_{A_p} \sigma_z(x, y) dA = \int_{-0.05}^{0.05} \int_{-0.12}^{0.12} \sigma_{zM} \left(\frac{x^6}{0.05^6} + \frac{y^6}{0.12^6} \right) dy dx = 3.4286 \cdot 10^{-2} \sigma_{zM}, \quad (50)$$

Таким образом, максимальное нормальное напряжение

$$\sigma_{zM} = \frac{F_z}{3.4286 \cdot 10^{-2}} = 7.153 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad (51)$$

И распределение напряжений по плоскости контакта является

$$\sigma_z(x, y) = 7.153 \cdot 10^5 \left(1 - \frac{x^6}{0.05^6} - \frac{y^6}{0.12^6} \right) \text{ Па}, \quad (52)$$

Нормальное напряжение в зоне контакта при $n = 2$ может быть найдено как:

$$F_z = \frac{1}{4} \cdot 5000 \cdot 9.81 = \int_{A_p} \sigma_z(x, y) dA = \int_{-0.05}^{0.05} \int_{-0.12}^{0.12} \sigma_{zM} \left(\frac{x^4}{0.05^4} + \frac{y^4}{0.12^4} \right) dy dx = 9 \cdot 10^{-2} \sigma_{zM}, \quad (53)$$

Таким образом, максимальное нормальное напряжение:

$$\sigma_{zM} = \frac{F_z}{2.88 \cdot 10^{-2}} = 8.515 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad (54)$$

Сравнение $\sigma_{zM} = 7.153 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (для $n=3$) с $\sigma_{zM} = 8.515 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (для $n=2$) показывает то, что наибольшие напряжения при $n=2$, они превосходят на 19%.

Касательные напряжения τ на плоскости может быть разложено в направлениях X и Y . Касательное напряжение в пятне контакта направлено внутрь в направлении X и наружу в Y направлении. Таким образом, шина пытается

растянуть опорную поверхность по оси X и уплотнить асфальтобетон под осью ординат. Рисунок 46 показывает напряжения сдвига на вертикально загружаемой стационарной шине. Распределение сил на плоскости контакта не является постоянной и зависит от конструкции шины, нагрузки, давления в шинах, и условий окружающей среды.

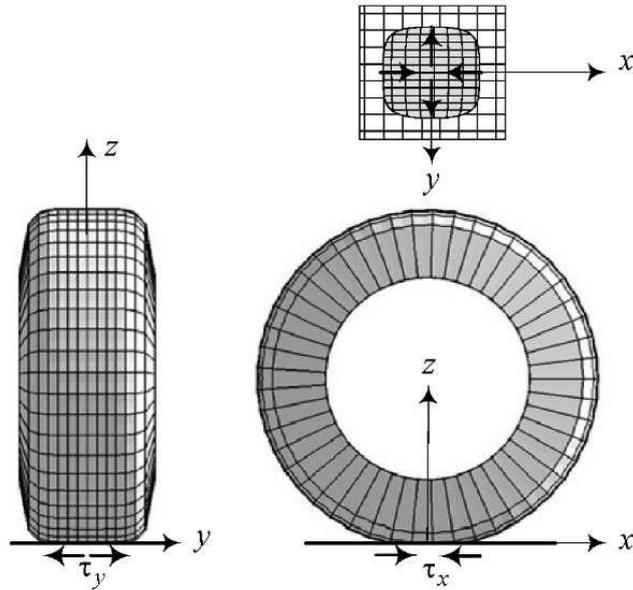


Рисунок 46– Направление касательных напряжений на плоскости контакта при стационарной вертикальной загрузке шины.

Касательное напряжение τ_x в X-направлении может быть смоделировано следующим уравнением:

$$\tau_x(x, y) = \tau_{xM} \left(\frac{x^{2n+1}}{a^{2n+1}} \right) \cdot \sin^2 \left(\frac{x}{a} \pi \right) \cdot \cos \left(\frac{y}{2b} \pi \right) \quad n \in N, \quad (55)$$

где τ_x отрицательно при $x > 0$ и является положительным для $x < 0$.

В Y-направлении касательное напряжение τ_y может быть смоделировано с помощью уравнения:

$$\tau_y(x, y) = -\tau_{yM} \left(\frac{x^{2n}}{a^{2n}} - 1 \right) \cdot \sin \left(\frac{y}{b} \pi \right) \quad n \in N, \quad (56)$$

где τ_y положительно при $Y > 0$ и является отрицательным для $Y < 0$, показывает внутреннее боковое усилие.

Рисунок 47 иллюстрирует абсолютное значение распределения τ_y при $n = 1$.

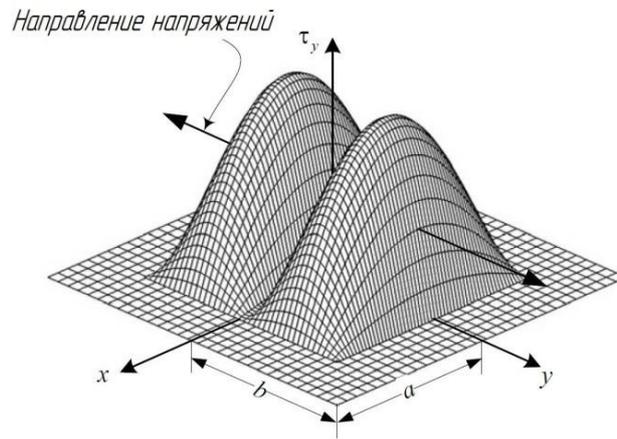


Рисунок 47– Абсолютное значение τ_y ($n = 2$)

По формулам теории упругости для слоистой среды можно рассчитать касательные напряжения в укатываемом покрытии от воздействия дорожного катка. Нагружение рекомендуется рассматривать как равномерно распределённую нагрузку через гибкий круглый штамп.

$$\tau_{\max} = (P_{c\ p} + c \cdot \operatorname{ctg} \phi) \cdot \frac{2 \cdot \sin \phi}{1 + \sin^2 \phi}; \quad (57)$$

4.1.1. Рекомендации по применению пневмоколесного дорожного катка для получения изотропного дорожного покрытия.

При проходе пневматического дорожного катка под шинами передней оси развивается сложное НДС в уплотняемом материале. Охарактеризовать его можно как одновременное действие вертикального усилия сжатия и усилием боковым давлением на материал в зоне пятна контакта. За счёт того, что колеса расположены в один ряд на оси в зоне между двумя пневматическими колёсами создаётся боковое обжатие, что влечёт за собой увеличение касательных напряжений в зоне контакта рабочего органа с уплотняемым слоем [7,8]. Данное усилие обжатия показано на рисунке 48-б. Пневматические катки используют на отдельных этапах уплотнения (в случае применения ЦМА). Как правило, на финальном этапе уплотнения для «закатки» верхней неуплотнённой части, слоя либо могут применяться в самом начале процесса уплотнения при высокой

температуре материала. Но на этих стадиях степень их силового влияния на формирование изотропного покрытия не изучена на данный момент. Анализ показывает, поскольку катки на пневматических шинах имеют в плане «шахматное» расположение колёс относительно передней и задней осей, то их силовое воздействие на материал различное. В результате чего при уплотнении пневматическими катками в укатываемом слое реализуется НДС отличное от НДС при работе гладковальцового катка (рисунок 48-а) или вибрационного катка.

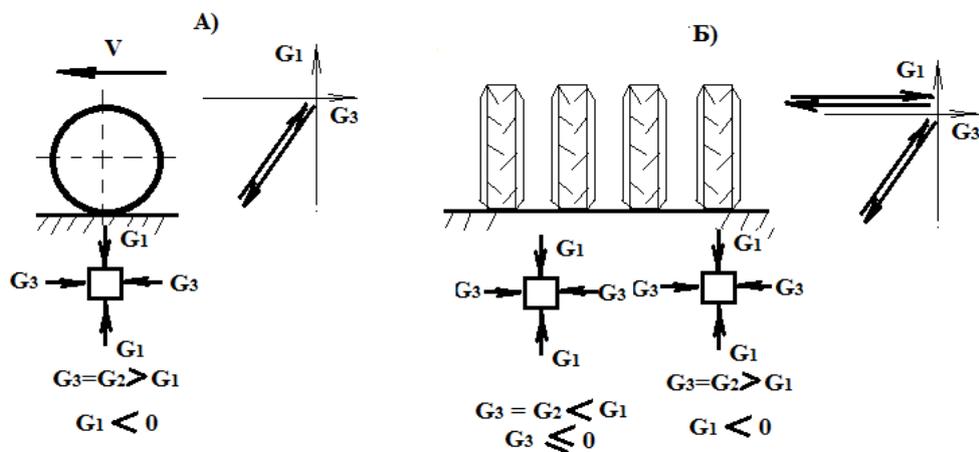


Рисунок 48– Схема нагружения уплотняемого материала а) вальцовым и б) пневматическим катками.

При использовании пневматических катков отмечается высокая производительность, возможность укатки слоёв большей толщины и равномерное распределение плотности в укатываемых слоях. Так же не происходит раздавливания минерального скелета уплотняемой смеси и улучшается водопроницаемость дорожного покрытия.

Однако, эффективность пневматических катков при уплотнении высокощебенистых жёстких смесей (типа ЦМА) низкая ввиду недостаточной их массы и большой суммарной площади контакта с уплотняемым материалом.

Поэтому для получения изотропного дорожного покрытия при уплотнении пневматическими катками необходимо выполнить ряд конструктивных изменений.

Замена стандартных шин на гладкопрофильные в пневматических катках (см. рисунок 49) значительно снизила влияние таких катков на формирование изотропной структуры покрытия. При этом, плоская ровная поверхность колеса, контактирующая с уплотняемым материалом, оказывает меньшее влияние на деформирование материала в поперечном направлении дороги, чем обычная автомобильная шина, применявшаяся ранее.

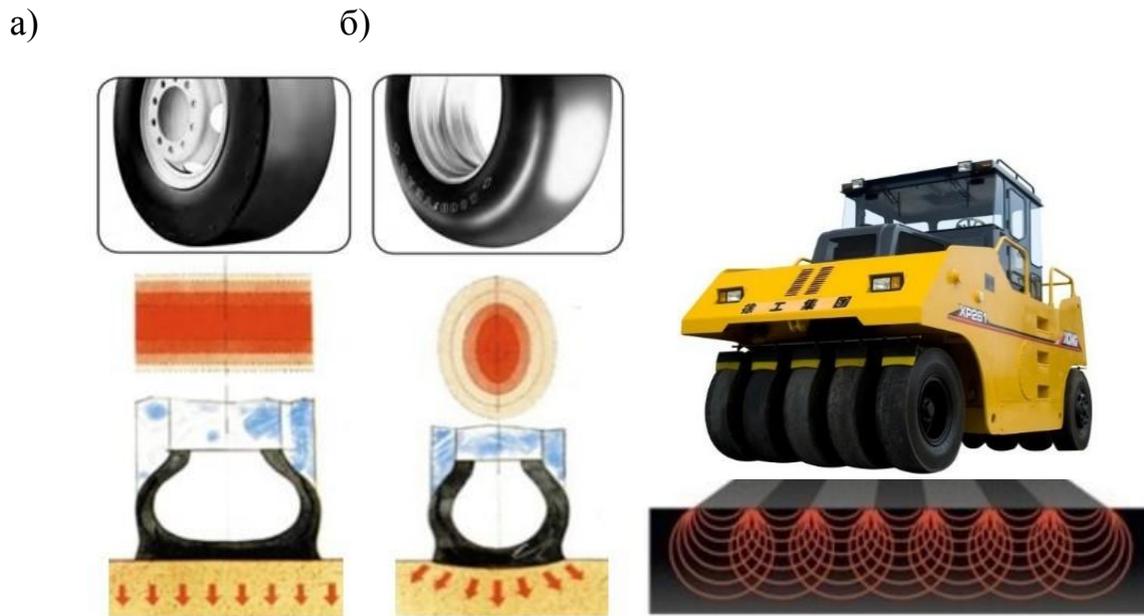


Рисунок 49 – Общий вид НДС под действием пневматического катка оснащенного а) гладкопрофильными и б) стандартными шинами

Пятно контакта при взаимодействии рабочего органа пневматического катка с асфальтобетоном представляет собой сложный объект, так как шина представляет собой двумерно искривлённую предварительно напряжённую поверхность[55]. Переход к стандартным шинам значительно повлияет на деформации уплотняемого материала под действием шины. Это взаимодействие приводит к распределению напряжений на границе области контакта на нормальный компонент Z и сдвиговые компоненты в каждой точке в направлениях X и Y . Характер этого распределения имеет сложную зависимость от условий использования.

Масса пневматических катков находится в диапазоне 16 т. При числе колёс до 9 (четыре передних и пять задних) суммарная площадь их контакта получается

большая и давление на поверхности получается не большое. Для получения больших усилий масса катков должна быть увеличена в 2-3 раза. Эффект от пневматического катка только при высоких температурах и при тонких слоях до 5 см толщиной, но температура смеси в процессе уплотнения быстро изменяется. В связи с этим для повышения контактных давления и создания силового потока, создающего изотропное силовое воздействие на уплотняемый материал предлагается модернизация рабочего органа гладковальцового дорожного катка.

На основании выполненных нами теоретических и экспериментальных исследований, а также имеющихся результатов исследований в области уплотнения асфальтобетонных смесей с помощью вибрации [15,38,39,67,70,123] рекомендуется установка вибрационного возбудителя направленного действия на пневмокоток. Так его установка в поперечном, относительно направления движения катка, направлении позволит усилить изотропный эффект со стороны уплотняющих машин. При этом, создаваемое вибрационным возбудителем усилие P_i в поперечном направлении должно ограничиваться величиной сил трения $F_{тр}$ колёс пневматического катка (рисунок 50) с дорожным покрытием. В противном случае будет происходить скольжение самой уплотняющей машины.

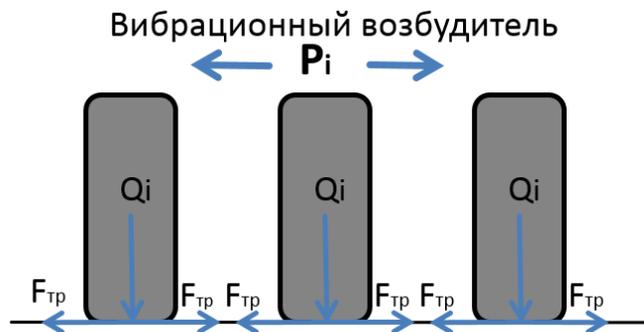


Рисунок 50 – Установка вибрационного возбудителя в поперечном направлении.

$$F_i = Q_i \cdot \varphi_{сцi} \quad (58)$$

$$P_i \leq F_{тр}; \quad (59)$$

$$P_i = P_0 \sin \omega t; \quad (60)$$

$$P_0 = m_э \cdot r_э \cdot \omega^2; \quad (62)$$

$$m_э \cdot r_э \cdot \omega^2 \sin \omega t \leq \varphi_{сц} \cdot Q_i \quad (62)$$

$$m_э \cdot r_э \leq \frac{\varphi_{сц} \cdot Q_i}{\omega^2 \sin \omega t}; \quad (63)$$

$$F_{тр} = P_{катка} \cdot \varphi_{сц}, \quad (64)$$

где $m_э$ -масса эксцентрика, $r_э$ - радиус эксцентрика, P_0 -вынуждающая сила, ω - круговая частота нагружения, $\varphi_{сц}$ - коэффициент сцепления.

Другим методом повышения эффективности пневматического катка может быть изменение конструкции шин путём добавления направленного протектора или изменения рисунка плетения слоёв каркаса шин, сможет изменить НДС со стороны пневматического катка (рисунок 51-г). Ниже на рисунке 51-а,б,в приведены результаты расчётов методом конечных элементов влияния угла развала (γ) на деформации уплотняемого материала. Расчёт в ABAQUS показывает, что укатка пневматическим катком с изменяющимися углами развала способно значительно изменять НДС. При анализе НДС необходимо учитывать главные направления напряжений [94].

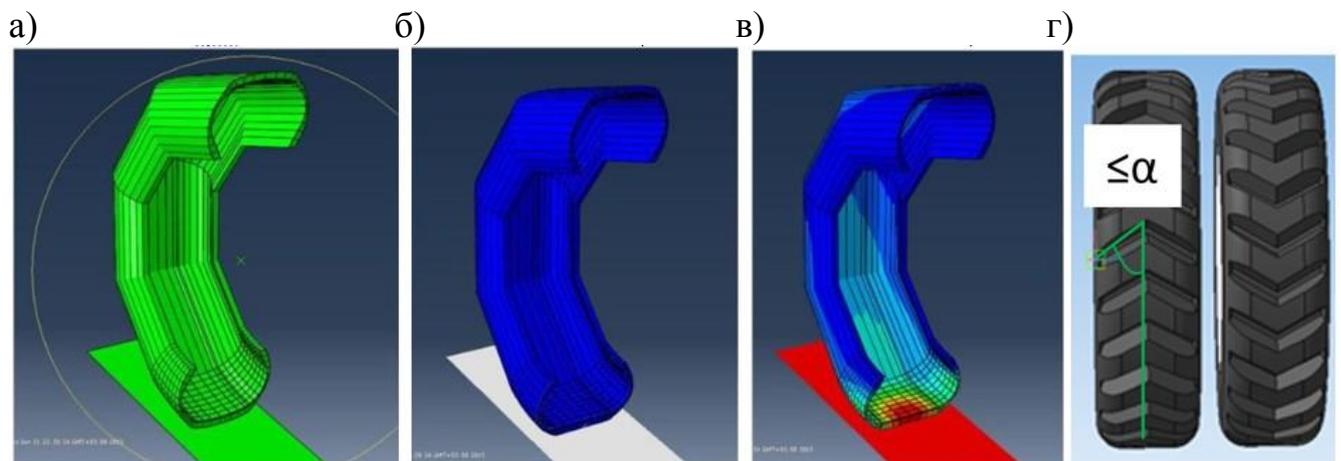


Рисунок 51 – а) Конечно-элементная модель шины: не нагруженная шина; б) шина нагруженная $F_z = 4$ кН; в) эпюра перемещений при нагружении $F_z = 4$ кН; г) пневматическая шина с протектором, направленным под углом α .

Направления главных деформаций под пятном контакта в нижней части плиты из асфальтобетона изображены на рисунке 52. Как видно из рисунка максимальные главные деформации происходят в основном в поперечном направлении.

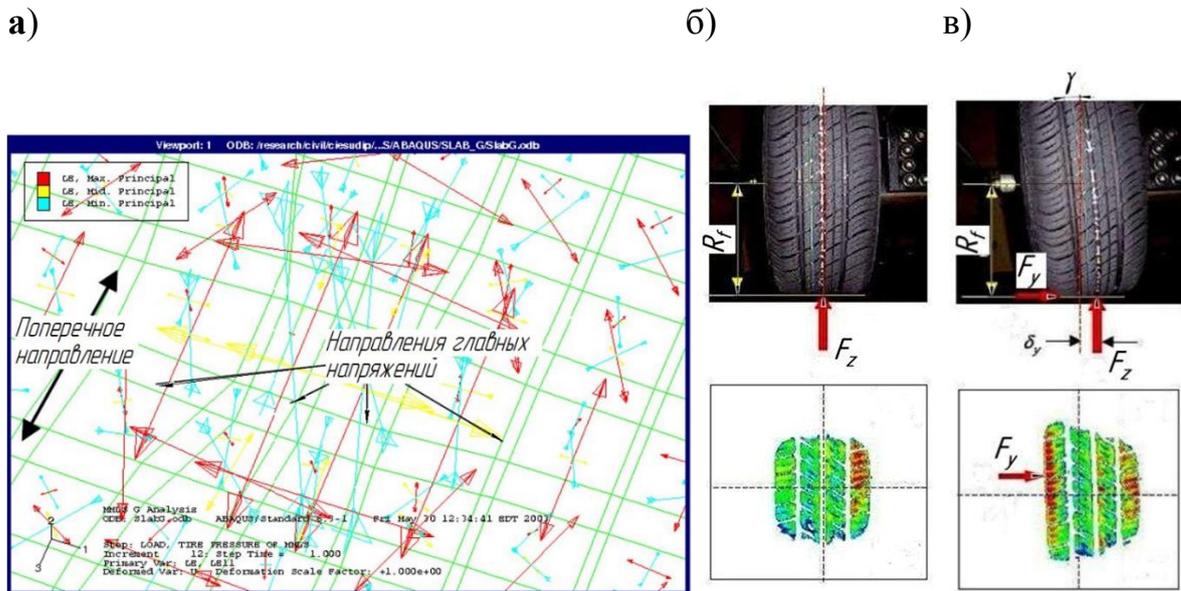


Рисунок 52– а) Главные направления напряжений, возникающие в слое уплотняемого материала при проезде пневматического колеса с протектором; б) нагружение силой F_z при нулевом угле развала; в) нагружение силой F_z при не нулевом угле развала.

4.1.2. Рекомендации по применению гладковальцового дорожного катка для получения изотропного дорожного покрытия.

Предлагается обрешиненное профильное покрытие на гладкий металлический валец что даёт возможности сдвига материала под углом в продольной оси дороги в процессе уплотнения. Использование такого эластомерного покрытия в конструкции рабочего органа дорожного катка увеличивает время действия НДС в уплотняемом слое, а также увеличивает площадь пятна контакта. Это обуславливает создание под таким вальцом значительных сдвиговых усилий под углом относительно направления движения катка. Это приводит к сдвигу минеральных частиц асфальтобетонной смеси сторону от продольной оси дороги.

Для решения поставленной задачи валец дорожного катка оснащают покрытием из эластомерного материала переменной твёрдости по толщине слоя. Форма протектора покрытия имеет вид шеврона, с целью создания касательных напряжений в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси под углом к

направлению движения катка. Величина угла наклона протектора $\alpha = f(c, \phi, T^\circ C)$ должна быть меньше угла внутреннего трения ϕ уплотняемого материала ($\alpha \leq \phi$). Где c - коэффициент сцепления, ϕ - угол внутреннего трения асфальтобетона, T° - температура уплотняемой смеси.

Согласно критерию прочности Мора-Кулона, состояние предельного равновесия возникает при определённом соотношении касательного и нормального напряжений, действующих на данной площадке, что показано на рисунке 53. Экспериментально установлено, что направление приложения нагрузки должно осуществляться под меньшим углом, чем угол внутреннего трения ϕ материала для лучшего уплотнения, т.к. в противном случае будет происходить разрушение материала.

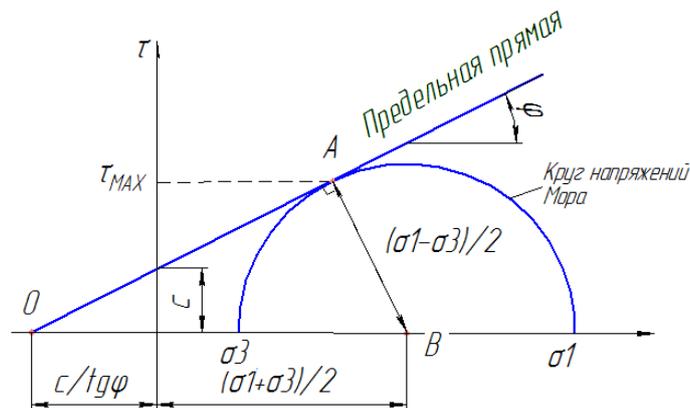


Рисунок 53 – НДС асфальтобетона при уплотнении по критерию прочности Мора-Кулона.

На рисунке 54 приведена схема устройства вальца катка с изотропным силовым воздействием 1, содержит барабан 2 с металлической цилиндрической обечайкой 3, на внешнюю поверхность которой нанесён упругий эластомерный материал. Часть 5 эластомерного материала имеет твёрдость относительно невысокую (35-40 усл. ед), эта часть эластомерного материала при такой твёрдости обладает достаточной прочностью, что позволяет надёжно воспринимать те местные нагрузки, которые на неё воздействуют. Часть 4 слоя эластомерного материала имеет повышенную твёрдость (70-80 усл. ед.) и соприкасается непосредственно с металлической обечайкой. Валец катка обладает

сегментной поверхностью, таким образом состоит из нескольких симметричных модулей b для предотвращения изменения траектории движения катка в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси.

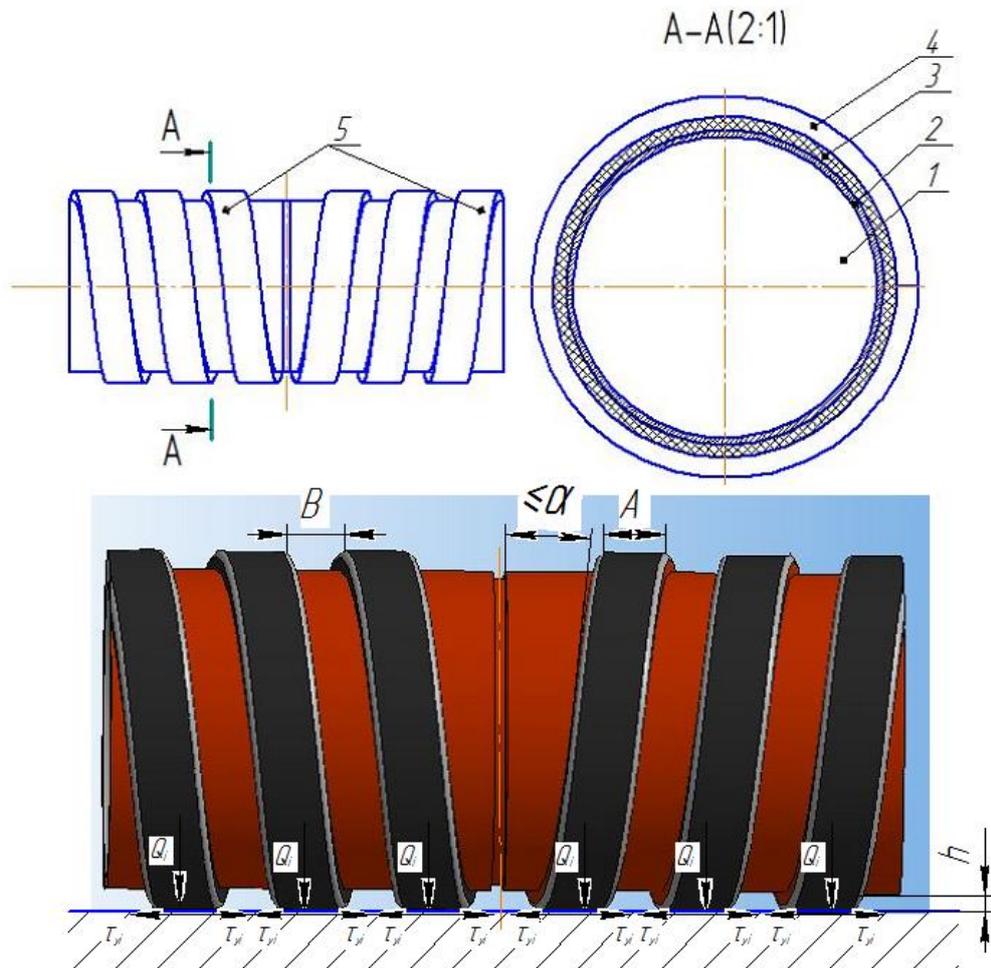


Рисунок 54–Валец дорожного катка с эластомерным слоем и протектором направленного действия, общий вид и поперечный разрез.

Нагрузка, приходящаяся на валец катка, подбирается с учётом его ширины и диаметра так, чтобы обеспечить необходимое силовое воздействие вальцов катка на уплотняемое дорожное покрытие, по традиционным расчетным схемам.

За счёт изменения толщины слоёв 4 и 5 эластомерного материала и количества витков можно изменять величину напряжений, возникающих в поперечном направлении.

У пневматических катков расстояние между шинами принято профессором Хархутой Н.Я. [126,127] как 0,4 от ширины шины катка (B), поэтому

рекомендуется установить расстояние между витками эластомерного материала равным $0,4B$ (см. рисунок 55).

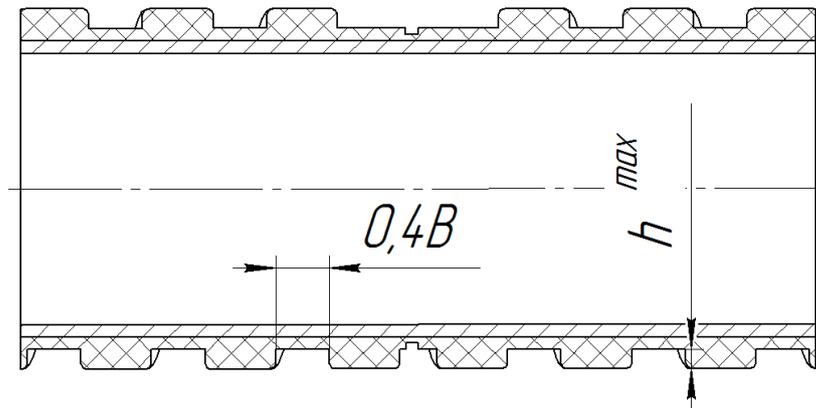


Рисунок 55– Рекомендуемая толщина и ширина между эластомерными слоями у вальца с изотропным силовым воздействием.

Толщина же этого слоя должна подбираться по двум параметрам.

Первый критерий - она не должна превышать размер наибольших минеральных частиц уплотняемой смеси (h^{max}).

Второй критерий – она, не должна быть не более половины толщины слоя уплотняемого материала (рисунок 56).

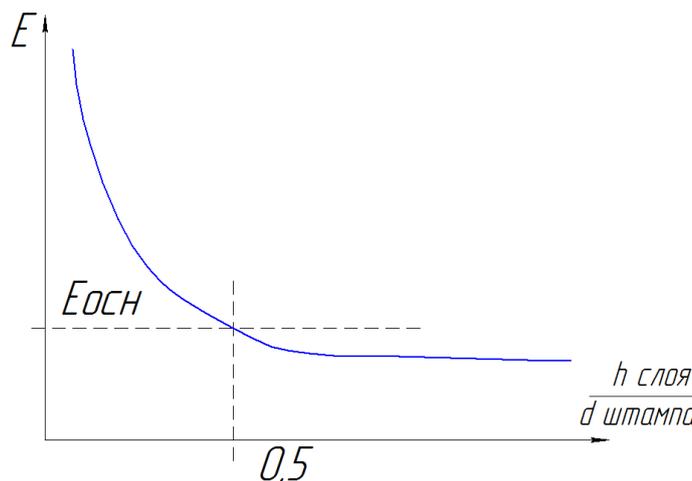


Рисунок 56– Зависимость модуля деформаций от толщины уплотняемого слоя и диаметра штампа [128].

Дорожный каток с предлагаемым вальцом работает следующим образом. При движении катка валец перекачивается, контактируя своим упругим

эластомерным слоем с уплотняемым дорожным покрытием. Мягкая часть 5 эластомерного слоя вальца эластично контактирует с асфальтобетонной смесью. Твёрдые зерна - щебёнки смеси вдавливаются в мягкий эластомерный материал вальца. Поэтому не происходит их разрушения. Однако общим давлением, создаваемым вальцом и не зависящим от внедрённых в эластомер твёрдых зёрен, уплотняется весь слой асфальтобетонной смеси на полную его толщину. Твёрдая часть 4 эластомерного слоя вальца через сжатую часть 5 воспринимает высокие нагрузки от отдельных зёрен смеси и предохраняет мягкую часть 5 эластомера от локальных разрушений, которые могли бы произойти от отдельных выступающих из общей массы зёрен, если бы мягкий эластомер соответствующей толщины был нанесён непосредственно на металлическую обечайку 3 вальца 2 катка.

Благодаря именно сочетанию переменной твёрдости эластомерного слоя вальца достигается получение необходимой шероховатости поверхности асфальтобетонного покрытия и одновременно также требуемая степень изотропии его свойств в продольном и поперечном направлении. Сохранение зёрен смеси нераздробленными и высокая степень уплотнения асфальтобетона в значительной мере повышают долговечность покрытия.

Преимущества такого катка проявляются при укатке асфальтобетонных смесей особенно подверженным образованию колеи в силу своего гранулометрического состава, либо же подвергающимся высоким нагрузкам во время эксплуатации. Применение эластомерного слоя в конструкции вальца приведёт так же к повышению шероховатости поверхности дорожных покрытий, что улучшает их сцепные свойства с шинами автомобилей.

4.2 Испытания вальцов дорожных катков с изотропным силовым воздействием на уплотняемую асфальтобетонную смесь

Для подтверждения эффективности предлагаемых рабочих органов были изготовлены специальные накладки на роликовый уплотнительный сектор. Эти накладки показаны на рисунке 57. Для моделирования воздействия

пневматического катка была изготовлена накладка из шины Continental 255/55 R18 109H. На ней был вырезан дополнительный протектор под углом 45° относительно направления уплотнения. Для испытания обрезиненного гладко вальцового катка была изготовлена накладка из термостойкой пористой резины производства завода «Красный Треугольник». Направление выступов протектора было задано под те же углом что и для пневматического.



Рисунок 57– Настройки на роликовый уплотнитель для экспериментальной проверки новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием.

Затем по методике, описанной в главе 3 испытания повторили для тех же типов смесей, используя дополнительные накладки на роликовый уплотнитель.

На рисунке 58 приведены результаты испытаний в логарифмических координатах для смеси типа А.

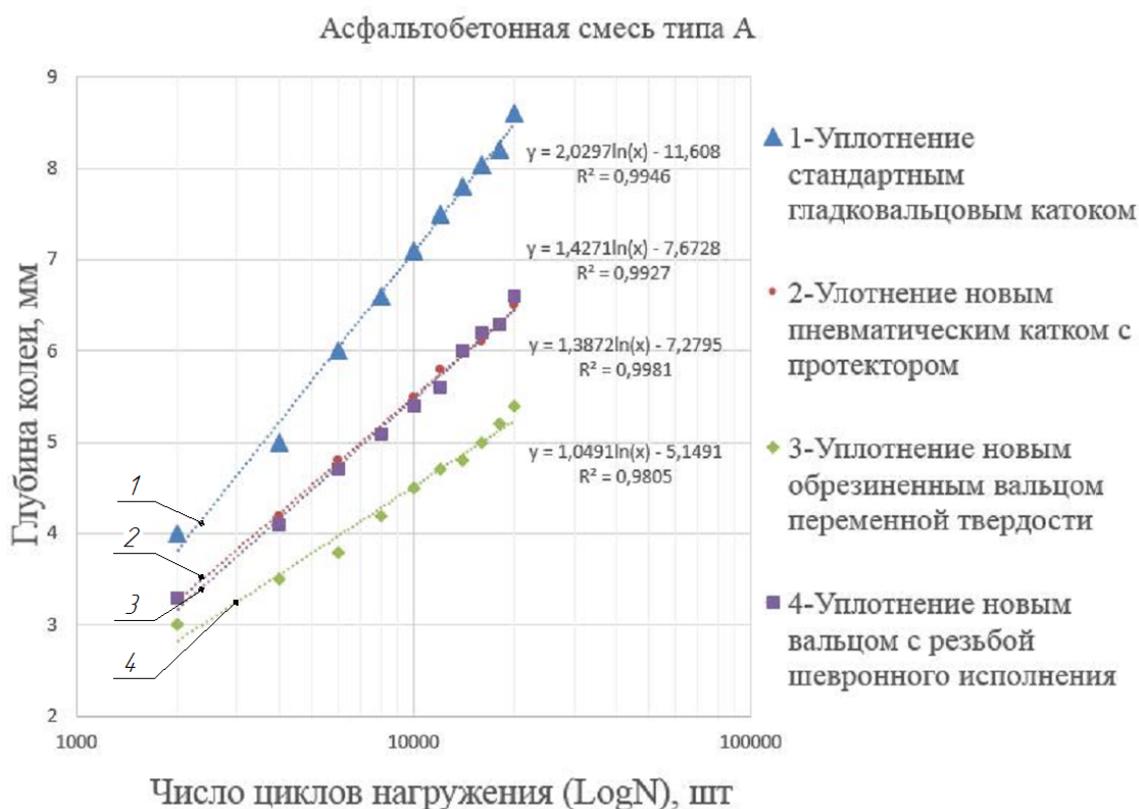


Рисунок 58—Результаты экспериментальной проверки новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием на асфальтобетонную смесь.

Результаты экспериментальной проверки предлагаемых рабочих органов и их статистическая обработка приведены в таблицах 13,14.

Таблица 13 – Статистическая обработка результатов экспериментального исследования новых рабочих органов дорожных катков с изотропным силовым воздействием

Вид вальца	Коэффициент, а	Среднеквадратичное отклонение, R ²
Уплотнение стандартным гладковальцовым катком	2,0297	0,995
Уплотнение новым пневматическим катком с протектором	1,427	0,993
Уплотнение новым обрезиненным вальцом переменной твёрдости	1,387	0,998
Уплотнение новым вальцом с резьбой шевронного исполнения	1,049	0,98

Таблица 14– Результаты испытаний рабочих органов с изотропным силовым воздействием

№	Направление уплотнения	Направление испытания на колеере относительно направления уплотнения	Глубина колеи, мм	Скорость образования колеи, мм/1000 проходов колеса	Уплотняющий рабочий орган
1	вдоль	вдоль	6,6	0,119	обрезиненный с протектором
2	вдоль	вдоль	6,9	0,134	обрезиненный с протектором
3	вдоль	вдоль	6,9	0,132	обрезиненный с протектором
4	вдоль	вдоль	5,4	0,092	обрезиненный без протектора
5	вдоль	вдоль	5,3	0,090	обрезиненный без протектора
6	вдоль	вдоль	5,8	0,109	обрезиненный без протектора
7	вдоль	вдоль	6,5	0,094	пневматический
8	вдоль	вдоль	6,7	0,094	пневматический
9	вдоль	вдоль	6,5	0,094	пневматический

Как видно из таблицы 14 предлагаемые рабочие органы уплотняющих машин позволяют снизить величину колееобразования для асфальтобетонных смесей на 30%.

4.3 Рекомендации по созданию изотропного дорожного покрытия существующими дорожными катками с гладкими вальцами

Следующим не менее важным обстоятельством, влияющим на напряжённо-деформированное состояние материала при уплотнении, является учёт условий и схем производства работ. Разработка новой технологии уплотнения для создания изотропного покрытия требует выполнять процесс уплотнения по новой схеме укатки. Одним из способов создания силового поля на уплотняемый материал, обеспечивающего получение изотропного дорожного покрытия традиционными

гладковальцовыми катками, является придание соответствующей траектории движения рабочему органу[62]. Новая технология уплотнения заключается в том, что изменение траектории движения по укатываемой полосе способно изменить соотношения между шаровым тензором и девиатором, элементов входящих в состав общего тензора напряжений и деформаций (рисунок 59). Под такой траекторией нагружения понимается движение катка, в процессе уплотнения, по синусоидальной кривой. Технологическая последовательность последующих проходов катка осуществляется как обычно с перекрытием предыдущего следа катка на 15-20 см..

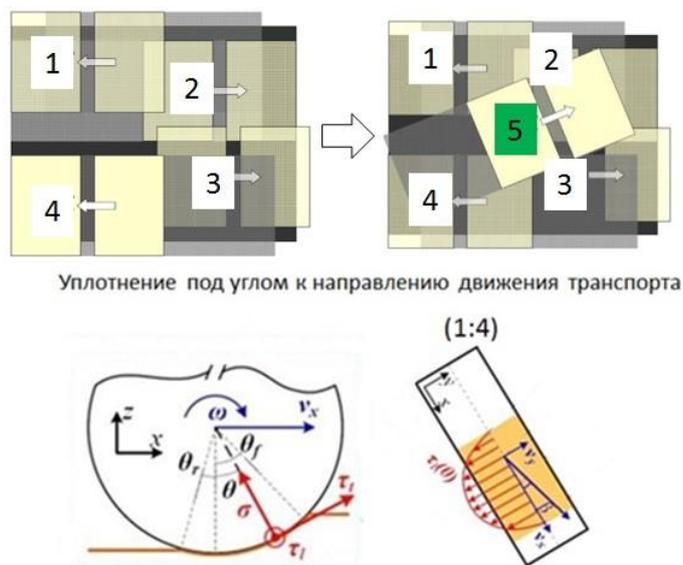


Рисунок 59 – Осуществление уплотнения по синусоидальной траектории.

Такое уплотнение гладковальцовыми катками позволяет создавать сложный режим нагружения материала. Девиаторное нагружение разовьёт в материале вертикальные и сдвигающие воздействия в продольном и поперечном направлении дороги. Уплотнение асфальтобетонной смеси по синусоидальной траектории движения не приведёт к существенному снижению производительности катка, но позволит получить изотропное дорожное покрытие.

Поворот катка относительно продольного направления уплотнения приводит к возникновению дополнительных усилий сжатия и дополнительным сдвиговым напряжениям, что можно охарактеризовать как сложное нагружение. За счёт

такого поворота увеличатся значения девиаторных напряжений, влияющих на изменение формы материала (рис.48). Это должно привести к получению уплотняемого материала одинаково устойчивого к деформациям в продольном и поперечном направлениях.

Автором разработана и выполнена регистрация патента программы для ЭВМ, SinusRoll (патент РФ №2017610912), предназначена для выполнения расчёта оптимальной траектории движения гладковальцовых дорожных катков. Программа позволяет, указав входные данные укатываемого асфальтобетонного слоя и дорожного катка, вычислить оптимальную траекторию движения при уплотнении с целью получения изотропного дорожного покрытия. Она даёт возможность моделировать различное число проходов и степень перекрытия при уплотнении асфальтобетона.

Рабочее окно программы показано на рисунке 60, а ввод исходных данных и результаты расчёта на рисунке 61. Для построения траектории уплотнения необходимо ввести информацию об уплотняемом дорожном покрытии (угол внутреннего трения материала, ширина полосы, величина перекрытия, длина участка, ширина обочины) и параметры вальца (ширина и тип дорожного катка).

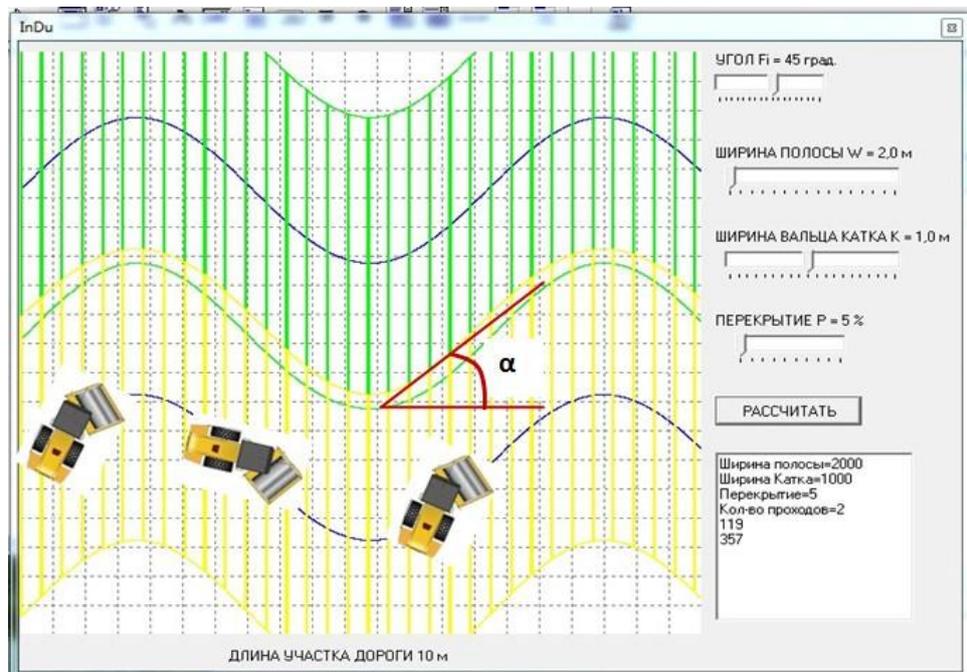


Рисунок 60 – Рабочее окно программы SinusRoll.

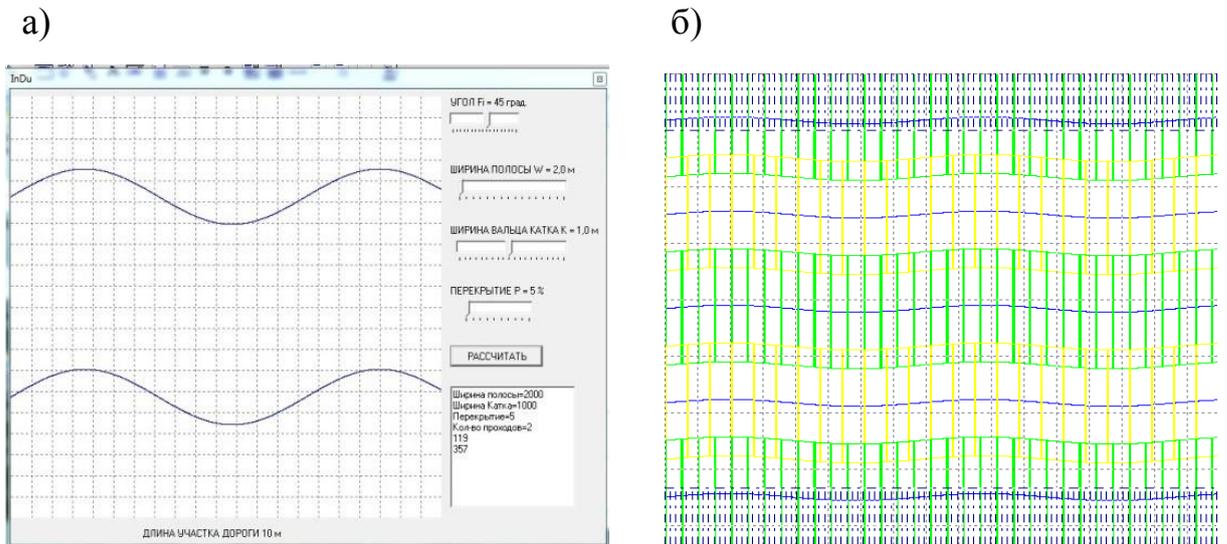


Рисунок 61 – а) Ввод исходных данных и б) результаты расчёта в программе SinusRoll.

Угол направления движения α должен меньше угла внутреннего трения ϕ уплотняемого материала $\alpha \leq \phi$, т.к. в противном случае будет происходить разрушения материала.

Следует отметить, что для внедрения этого способа уплотнения не требуется внесения изменений в конструкции рабочих органов. Исходный код программы приведён в приложении Б а алгоритм программы SinusRoll показан на рисунке 62.

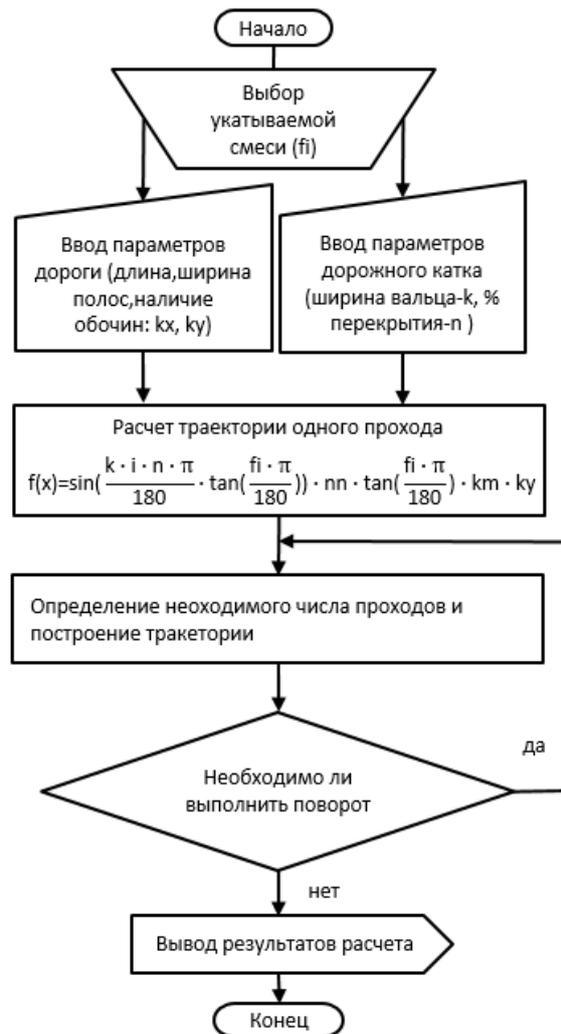


Рисунок62– Алгоритм программы SinusRoll

Конструктивные параметры катков непрерывно совершенствуются, их оснащают специальными измерительными приборами и современной аппаратурой для автоматизации уплотнения. Так же доработку уплотняющих машин осуществляют с целью повышения оперативного контроля качества выполняемых работ [119]. Предлагается использовать данную программу совместно с гидросистемой, связанной с рулевым управлением уплотняющей машины, которая будет осуществлять уплотнение по программе, а местоположение будет определяться по GPS координатам.

Основные параметры для проектирования рабочих органов с изотропным силовым воздействием сведены в таблицу 15.

Таблица 15 – Рекомендуемые основные параметры для проектирования рабочих органов с изотропным силовым воздействием

Тип дорожного катка	Способы получения изотропного покрытия	Описание изменений	Основные параметры
Существующие глаковальцовые катки	Изменение траектории движения катка в процессе уплотнения	Уплотнение необходимо осуществлять по синусоидальной траектории с целью изменения НДС асфальтобетонной смеси в поперечном направлении. Предложена программа Sinusroll	ϕ - угол внутреннего трения асфальтобетона; c - коэффициент сцепления; $ш$ - ширина уплотняемой полосы; $п$ - % перекрытия; $в$ - ширина вальца;
Пневматический каток	Воздействие с помощью вибрации	Установка вибрационного возбудителя в поперечном направлении	$m_{э}$ - масса эксцентрика; $r_{э}$ - радиус эксцентрика; R - вынуждающая сила; ω - круговая частота нагружения;
	Изменение конструкции рабочего органа	Изменение гладкопрофильного типа шин на стандартные	поперечное сечение шины; устройство слоев каркаса;
	Изменение конструкции рабочего органа	Нанесение протектора на пневматические колеса	ϕ - угол внутреннего трения асфальтобетона; c - коэффициент сцепления;
Гладковальцовый каток	Создание нового рабочего органа с изотропным силовым воздействием	Предложена конструкция вальца оснащённого эластомерной резьбой шевронного исполнения	ϕ - угол внутреннего трения асфальтобетона; c - коэффициент сцепления; $в$ - шаг навивки эластомерных выступов; h - высота выступов; T - твердость эластомера; h - толщина укатываемого слоя; h_{max} - размер наибольших минеральных частиц укатываемой смеси;

Выводы по четверной главе

1. Разработаны рекомендации для нового пневматического катка с изотропным силовым воздействием, основанные на математической модели процесса взаимодействия рабочих органов дорожных машин с уплотняемым слоем.

2. Разработана конструкция нового обрезиненного гладковальцового катка с изотропным силовым воздействием и обоснована эффективность его использования.

3. Разработан алгоритм расчёта и новая технология уплотнения, позволяющая производить уплотнение дорожных одежд с получением изотропной структуры без внесения изменений в конструктивные параметры дорожных катков.

4. Использование катков с изотропным силовым воздействием в дорожном строительстве позволит обеспечить снижение величины образования колеи и увеличит расчётный срок службы дорожного покрытия. Таким образом, внедрение рабочих органов с изотропным силовым воздействием будет целесообразным с технико-экономической точки зрения.

5. Представлена методика обоснования параметров взаимодействия рабочих органов дорожных катков с уплотняемым слоем материала покрытия, с целью получения изотропного асфальтобетонного покрытия.

Заключение

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. На основании анализа существующих расчётных моделей напряжённо деформированного состояния уплотняемой смеси и проведённого экспериментального исследования разработана математическую модель взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью с целью установления критерия оценки степени изотропности силового воздействия на неё.

2. Разработана новая методика экспериментальной оценки степени анизотропии прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения.

3. Определены критерии силового воздействия дорожных катков на уплотняемый материал, обеспечивающие получение изотропного дорожного покрытия.

4. Разработаны рекомендации по определению параметров рабочих органов к дорожным каткам, обеспечивающих получение изотропного дорожного покрытия в процессе уплотнения.

5. Разработан алгоритм расчёта и новая технология уплотнения, позволяющая производить уплотнение дорожных одежд с получением изотропной структуры без внесения изменений в конструктивные параметры дорожных катков.

6. Разработана методика обоснования параметров взаимодействия рабочих органов дорожных катков, обеспечивающих изотропное силовое воздействие на слой асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения.

Список литературы

1. Артемьев, К.А. Дорожные машины. Машины для устройства дорожных покрытий [Текст] / К.А. Артемьев. – М.: Машиностроение, 1982. – 349 с.
2. Бабков, В.Ф. Качение автомобильного колеса по грунтовой поверхности [Текст] / В.Ф. Бабков // Труды МАДИ. – 1953. – Вып. 15. – С. 50-68.
3. Бонченко, Г.А. Асфальтобетон. Сдвигоустойчивость и технология модифицирования полимером [Текст] / Г.А. Бонченко. - М.: Машиностроение, 1994. - 194 с.
4. Бадалов, В.В. Изменение температуры асфальтобетона в процессе уплотнения [Текст] / В.В. Бадалов, А.Ф. Зубков // Автомобильные дороги – 1973 – № 9 – С. 7.
5. Бадалов, В.В. Исследование катков при уплотнении асфальтобетонных дорожных покрытий [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Бадалов. – Л.: 1974. – 17 с.
6. Бадалов, В.В. Рациональный режим уплотнения асфальтобетонной смеси [Текст] / В.В. Бадалов, А.А. Шестопапов // Автомобильные дороги. – 1972. – № 6. – С. 18.
7. Бадалов, В.В. Уплотнение асфальтобетонного покрытия катками различного типа [Текст] / В.В. Бадалов, Д.С. Гуральник // Автомобильные дороги. – 1978. – № 7. – С. 17-21.
8. Батраков, О.Т. Теоретические основы уплотнения грунтов земляного полотна и слоев дорожных одежд катками на пневматических колесах [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / О.Т. Батраков. – Харьков, 1978. – 360 с.
9. Белоусов, Л.И. Влияние способов уплотнения на ровность асфальтобетонных покрытий [Текст] / Л.И. Белоусов, Н.Я. Хархута // Автомобильные дороги. – 1974. – № 6. – С. 20-21.
10. Богомолов, В.А. Простейшие звенья линейной пространственной реологической модели асфальтобетона [Текст] / В.А. Богомолов, В.К. Жданюк, С.В. Богомолов // Автомобильный транспорт. – 2010. – Вып. 27. – С. 157-162.

11. Богуславский, А.М. Основы реологии асфальтобетона [Текст] / А.М. Богуславский, А.А. Богуславский. – М.: Высшая школа, 1972. – 200 с.
12. Бойцев, А.В. Обоснование параметров вальца дорожного катка с изотропным силовым воздействием [Текст] / А.В. Бойцев // «Вестник ТОГУ». – 2016. – № 2(41)
13. Бойцев, А.В. Методы оценки анизотропных свойств дорожного покрытия [Текст] / А.В. Бойцев, А.А. Шестопалов // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 3(55)
14. Бугров, А.К. Анизотропные грунты и оснований сооружений. / Бугров А.К., Голубев А.И. СПб: «Недра», 1993. с. 123-135
15. Варганов, С.А. Теоретические и экспериментальные исследования динамики вибрационных катков [Текст] / С.А. Варганов // Тр. ВНИИСтройдормаш. – М., 1962. – № 28. – С. 55-97.
16. Васильев, А.П. Принципы прогнозирования транспортно-эксплуатационного состояния дорог [текст] / Коганзон М.С., Яковлев Ю.М. // Автомобильные дороги. -1993. - №1. - С. 8-10
17. Васильев, А. П. Причины образования колеи и пути их устранения [Текст] / А. П. Васильев // Наука и техника в дорожной отрасли. -1999. - №2. - С. 6-9
18. Васильев, А. П. Проблемы разработки методов прогнозирования глубины колеи на автомобильных дорогах [Текст] / А. П. Васильев // Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог в начале XXI века: Сб. науч. тр. -М.: МАДИ, 2000. - С. 4 - 32
19. Васильев, А. П. Развитие методов расчета дорожных одежд нежесткого типа [Текст] / А. П. Васильев, М. С. Коганзон, М. Ю. Яковлев // Проблемы строительства и эксплуатации, автомобильных дорог: Сб. науч. тр. МАДИ-ТУ, 1998. - С. 16-19
20. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов [Текст] / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
21. Головнин, А.А. Виброволновой валец дорожного катка KB-03 [Текст] / А.А. Головнин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 3. – С. 38-40.

22. Головнин, А.А. Виброволновые дорожные катки: Конструкция. Теория и расчёт. Опыт применения [Текст]. – Тверь: ТГТУ, 2002. – 76 с.
23. Головнин, А.А. Сравнение наиболее нагруженных состояний обечайки гибкого и жесткого вальцов дорожного катка [Текст] / А.А. Головнин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 1. – С
24. Горелышев, Н.В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы [Текст] / Н.В. Горелышев. – М.: Можайск–Терра, 1995. – 176 с.
25. Горелышев, Н.В. Исследование асфальтобетона каркасной структуры и его эксплуатационных свойств в дорожных одеждах [Текст]:дис. ... д-ра техн. наук / Н.В. Горелышев. – М., 1978. – 444 с.
26. ГОСТ 21994-82. Катки дорожные. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 6 с.
27. ГОСТ 31015-2002 смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные технические условия [Электронный ресурс]. – Информационно-правовая система ГАРАНТ
28. ГОСТ 31424-2010 Материалы строительные нерудные от отсевов дробления плотных горных пород при производстве щебня. Технические условия [Электронный ресурс]. – Информационно-правовая система ГАРАНТ
29. ГОСТ 8269.0-97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний [Электронный ресурс]. – Информационно-правовая система ГАРАНТ
30. Данильян, Е. А. Исследование устойчивости к расслаиванию щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и физико-механических свойств ЩМА [Текст] / Е.А. Данильян, С.А. Лисогор, Б.Г. Печеный // Вестник Северокавказского федерального университета. – 2008. – № 2. – С. 73–75.
31. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке [Текст] / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М: Мир, 1980. – 611 с.

32. Долговечность асфальтобетонных покрытий в условиях роста динамического воздействия транспортных средств [Текст] / С. К. Илиополов, Е. В. Углова // Обзорная информация. Автомобильные дороги и мосты. - 2007. Вып. 4. - 84 с.
33. Дорожные машины. Теория, конструкция и расчет [Текст] / Под общ.ред. Н.Я. Хархута. – Л.: Машиностроение, 1976. – 472 с.
34. Дудкин, М.В. Повышение эффективности процесса уплотнения на основе совершенствования конструкций дорожных катков[Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. / Дудкин М.В. - Алматы, 2010. -355 с.
35. Емельянов, Р.Т. Исследование процесса уплотнения асфальтобетонной смеси по ширине укладки [Текст] / Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, А.С. Климов // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 7. – С. 12-17.
36. Захаренко, А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей [Текст] :дис. ... д-ра техн. наук / А.В. Захаренко. – Омск, 2005. – 320 с.
37. Золотарев, В.А. Битумы, модифицированные полимерами, и асфальтополимербетоны [Текст] / В.А. Золотарев // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2009. – С. 88-95.
38. Зубанов, М.П. Применение вибрационных механизмов для уплотнения асфальтобетона [Текст] / М.П. Зубанов // Строительство дорог. – 1938. – № 3. – С. 36-42.
39. Зубков, А.Ф. Сопоставление параметров вибрационных и статических катков для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / А.Ф. Зубков, Н.Я. Хархута // Исследование современных способов и средств уплотнения грунтов и конструктивных слоев дорожных одежд: Тр. СоюздорНИИ. – М., 1975. – Вып. 84. – С. 179-182.
40. Зубков, А.Ф. Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [Текст] / А.Ф. Зубков, В.Г. Однолько. – М.: Машиностроение, 2009. – 224 с.

41. Зубков, А.Ф. Технология устройства покрытий нежесткого типа из асфальтобетонных горячих смесей [Текст]: учеб.пособие / А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, Т.И. Любимова. – Тамбов: Изд-во тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 80 с.
42. Иванов, Н.Н. Пути увеличения долговечности асфальтобетонных покрытий [Текст] / Н.Н. Иванов, Н.В. Горелышев // Автомобильные дороги. – 1964. – № 1. – С. 21-32.
43. Иванченко, С.Н. Исследование влияния вакуумирования на структуру дорожно-строительных материалов при их уплотнении [Текст] / С.Н. Иванченко, С.В. Носов // Исследование рабочих процессов и динамики рабочих машин с регулируемыми параметрами. – Ярославль, 1984. – С. 21-23.
44. Иванченко, С.Н. Напряженно-деформированное состояние материала при уплотнении катком с вакуумным устройством [Текст] / С.Н. Иванченко, А.А. Шестоपालов // Исследование и испытание строительных машин и оборудования. – Хабаровск: Изд-во Хабар.гос. ун-та, 1993. – С. 58-64.
45. Иванченко, С.Н. Научные основы формирования рабочих органов дорожных машин для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / С.Н. Иванченко. – СПб., 1997. – 482 с.
46. Иванченко, С.Н. Рабочий процесс и выбор параметров катка с вакуумным устройством [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Иванченко. – Л., 1985. – 16 с.
47. Иванченко, С.Н. Рациональные температурные диапазоны укатки асфальтобетонных дорожных покрытий самоходными катками [Текст] / С.Н. Иванченко // Исследование строительных и дорожных машин. – Ярославль, 1990. – С. 41-46.
48. Иванченко, С.Н. Релаксация напряжений в асфальтобетонных смесях при их уплотнении [Текст] / С.Н. Иванченко // Исследование и испытание строительных машин и оборудования. – Хабаровск: Изд-во Хабар.гос. ун-та, 1993. – С. 101-110.
49. Иванчура, В.И. Идентификация динамической системы процесса уплотнения асфальтобетонной смеси дорожными катками [Текст] / В.И. Иванчура, А.П.

- Прокопьев, О.Г. Клевцова // Журнал Сибирского федерального университета. – 2011.– № 4. – С. 557-566.
50. Ивлиев, М.И. Экономико-статистический анализ дорожной ситуации в Российской Федерации [Текст] / М.И. Ивлиев, Н.В. Черемисина // Социально-экономические явления и процессы. – 2014. – Т. 9. – № 7. – С. 23-31.
51. Иноземцев, А.А. Битумно-минеральные материалы [Текст] / А.А. Иноземцев. – Л.: Стройиздат, 1972. – 152 с.
52. Калужский, Я.А. Теоретические основы укатки дорожных покрытий [Текст] / Я.А. Калужский // Сборник трудов ХАДИ. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1949. – Вып. 8. – С. 55-73.
53. Калужский, Я.А. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд [Текст] / Я.А. Калужский, О.Т. Батраков. – М.: Транспорт, 1971. – 160 с.
54. Капустин, М.И. Улучшение ровности покрытий при их уплотнении катками на пневматических шинах [Текст] / М.И. Капустин, Н.Я. Хархута, Е.К. Чабуткин // Автомобильные дороги. – 1977. – № 5. – С. 8-9.
55. Карасева, А.Н. Выбор основных параметров шин катков при уплотнении асфальтобетонных дорожных покрытий [Текст]:дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Карасева. – Л., 1983. – 172 с.
56. Катки комбинированного действия [Текст] / С.А. Варганов и др. – М.: ЦНИИТЭстройдормаш, 1974. – 41 с.
57. Кирюхин, Г.Н. Опыт устройства дорожных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона в России [Текст] / Г.Н. Кирюхин // Вестник ХНАДУ. – 2006. – № 34–35. – С. 52–54.
58. Кирюхин, Г.Н. Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. – М.: Элит. – 2009. – 176 с.
59. Казарновский, В. Д. Проблема колеобразования на дорогах с асфальтобетонным покрытием [Текст] / В. Д. Казарновский // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2000. - № 2. - С. 3-4
60. Кондрашов, Н.А. Исследование закономерности изменения свойств щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения [Текст] /

- Н.А. Кондрашов, А.А. Шестопапов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 1(48). – С. 139–144.
61. Костельов, М.П. Инновации для высокого качества дорожных работ и объектов ЗАО «ВАД» [Текст] / М.П. Костельов, В.П. Перевалов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2009. – С. 20-36.
62. Костельов, М.П. Новая усовершенствованная технология устойчиво обеспечивает высокое качество уплотнения асфальтобетона [Текст] / М.П. Костельов, В.П. Перевалов // Дорожная техника: каталог-справочник. -СПб.: Славутич, 2005. – С. 120-132.
63. Костельов, М.П., Перевалов В.П., Пахаренко Д.В. Практика борьбы с колеиностью асфальтобетонных покрытий может быть успешной// «Дорожная техника 2011»- г.Санкт-Петербург: Изд. ООО «Славутич».- С. 54-70.
64. Костельов, М.П. Уплотнению асфальтобетона требуется обновленное поколение дорожных катков [Текст] / М.П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2003. – С. 12-22.
65. Костельов, М.П. Уплотняющая способность дорожных катков для устройства оснований и покрытий [Текст] / М.П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2010. – С. 14-25.
66. Костельов, М.П. Функциональные достоинства и недостатки виброкатков для уплотнения асфальтобетона [Текст] / М.П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2009. – С. 42-52.
67. Кояма, Ф. Общие описания машин для уплотнения. Текст лекций [Текст] / - М.: Техническая лаборатория СакаиХэвиИндастриз, 2009. - 40 с.
68. Кравченко, С. Е. Обоснование применения модифицирующих добавок при проектировании состава асфальтобетона [Текст]: Ч. 1 / С. Е. Кравченко, Д. Г. Егошин // Мир дорог. – 2013. - Вып. № 68. – С. 57-58 .
69. Кудяков, А.И. Трофимов И.Н., Сдвигоустойчивость асфальтобетона / А.И. Кудяков И.Н., Трофимов //Вестник ТГАСУ. 2008. - №4. - С. 131-138.

70. Кузнецова, А.В. Влияние положения центра тяжести на динамику самоходных вибрационных катков [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Кузнецова. – Тюмень, 2001. – 142 с.
71. Кустарев, Г.В. Анализ факторов, влияющих на качество процесса уплотнения / Г.В. Кустарев, С.А. Павлов, П.Е. Жарцов // Механизация строительства. – 2013. - №4. – С. 6-10.
72. Лебедев, А.А., Косарчук В.В., Ковальчук Б.И. Исследование скалярных и векторных свойств анизотропии материалов в условиях сложного напряженного состояния. Об условии текучести анизотропных материалов // Проблемы прочности. 1982. № 3. С. 25–31.
73. Лобзова, К.Я. Исследование уплотняемости горячих асфальтобетонных смесей [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.Я. Лобзова. – М.: 1972. – 27 с.
74. Ложечко, В.П. К вопросу о рациональном режиме уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / В.П. Ложечко, А.Ф. Чебунин // Рукоп. деп. в ЦНИИТЭстроймаш. – Л., 1983. – 12 с.
75. Машины для уплотнения грунтов и дорожно-строительных материалов [Текст] / С.А. Варганов и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
76. Маркин А.А., Соколова М.Ю., Христинич Д.В. Процессы упругопластического конечного деформирования. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 374 с.
77. Маркин А.А., Соколова М.Ю. Вариант определяющих соотношений нелинейной термоупругости для анизотропных тел // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44. № 1. С. 170–175.
78. Никольский, Ю. Е. Новый эффективный способ оценки сдвигоустойчивости асфальтобетона [Текст] / Ю. Е. Никольский, В. С. Гмыря // Автомобильные дороги. - 1992. - № 11-12. - С. 20 - 21
79. Мирончук, С. А. Лабораторные исследования влияния структуры минерального остова на деформативные свойства асфальтобетона [Текст] / В. П. Матуа, С. А. Мирончук // Новые технологии. - 2012. - Вып. 3.- С. 75-80
80. Мирончук, С. А. Мониторинг интенсивности, состава и скорости движения транспортных средств на участках федеральных дорог подверженных

- колееобразованию [Текст] / С. А. Мирончук, В. П. Матуа // Межд. науч.-прак. конф. «Строительство-2009». – Ростов н/Д.: РГСУ, 2009. – С. 34-35
81. Экспериментальная оценка устойчивости асфальтобетонного покрытия к образованию колеиности [Текст] / В. В. Мозговой, А. Н. Онищенко, А. В. Прудкий и др. // Дорожная техника. - 2010. - Вып. 65. – С. 114-128
82. Налимов, В.В. Теория эксперимента [Текст] / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 260 с.
83. Нгуен, Л.Х. Прогнозирование вибрации кабины виброкатков с виброизоляторами переменной жесткости [Текст] :дис. ... канд. техн. наук / Л.Х. Нгуен. – Воронеж, 2010. – 155 с.
84. Новожилов, В.В. Микронапряжения в конструкционных материалах [Текст] / В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.
85. Новожилов, В.В. Разрыхление и построение критерия прочности при сложном нагружении с учетом ползучести [Текст] / В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич, О.Г. Рыбакина // Труды ЦКТИ. – 1986. – Вып. 230. – С. 34-41.
86. Носарев, А.В. Автомобильные дороги в России [Текст] / А.В. Носарев // Межотраслевой альманах «Деловая слава России». – М.: Славика, 2011. – С. 84-
87. Носов, С.В. Разработка технологий уплотнения дорожных асфальтобетонных смесей и грунтов на основе развития их реологии [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / С.В. Носов. – Воронеж, 2014. – 366 с.
88. Островский, Э.Б. Исследование уплотняющей способности рабочих органов асфальтоукладчиков [Текст] / Э.Б. Островский, В.М. Слепая // Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд: Тр. СоюздорНИИ. – М., 1980. – С. 79-89.
89. 89. Обзорная информация о отечественных и зарубежных методах предотвращения колееобразования на асфальтобетонных покрытиях в условиях современных транспортных нагрузок [Текст] / Федеральное дорожное агентство мин. транспорта РФ. – М.: Информавтодор, 2005. - 130 с.
90. Островцев, Н.А. Самоходные катки на пневматических шинах [Текст] / Н.А. Островцев. – М.: Машиностроение, 1969. – 104 с.

91. Островцев, Н.А. Эффективность самоходных катков на пневматических шинах [Текст] / Н.А. Островцев, А.И. Путьк // Автомобильные дороги. – 1968. – № 4. – С. 10-14.
92. Пат. 1401097 СССР. Дорожный каток [Текст] / Деникин А.И., Шестопапов А.А., Афанасьева Т.А., Лекомцева Е.Е., Карпова Т.А., Самохин А.А. Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина; заявл. 13.06.1986; опубл. 07.06.1988, Бюл. № 21.
93. Пермяков, В.Б. Аналитическое описание процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком [Текст] / В.Б. Пермяков, В.В. Дубков, В.С. Серебренников // Омский научный вестник. – Омск, 2008. – № 1(64). – С. 67-71.
94. Пермяков, В.Б. Исследование релаксации напряжений в асфальтобетонных смесях в процессе их уплотнения [Текст] / В.Б. Пермяков // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – № 5. – С. 99-102.
95. 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.
96. Пермяков, В.Б. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях / В.Б. Пермяков // Строительные материалы. – 2005. – № 10. – С. 8–9.
97. Пермяков, В.Б. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / В.Б. Пермяков, А.В. Захаренко // Строительные и дорожные машины. – 1989. – № 5. – С. 12-13.
98. Пермяков, В.Б. Совершенствование теории, методов расчёта и конструкций машин для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / В.Б. Пермяков. – Омск, 1992. – 412 с.
99. Пичугин, Е.С. Проблемы формирования региональной программы развития дорожной сети [Текст] / Е.С. Пичугин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 500-506.

100. Повышение эффективности гладковальцовых катков в строительстве [Текст] / Н.Я. Хархута и др. // Повышение эффективности использования машин в строительстве: сб. науч. тр. / ЛПИ. – Л., 1985. – С. 16-27.
101. Поздняков, М. К. Зарубежный опыт оценки сдвигоустойчивости асфальтобетона [Текст] / М. К. Поздняков, Н. В. Быстров // Сб. ст. и док. ежегод. науч. сессии Ассоциации исследователей асфальтобетона. - М., 2009. - С. 7-17
102. Поздняков, М. К. Разработка метода оценки сопротивляемости асфальтобетона колееобразованию [Текст] / М. К. Поздняков, Н. В. Быстров // Сб. ст. и док. ежегод. науч. сессии Ассоциации исследователей асфальтобетона. - М., 2010. - С. 7-17
103. Попов, Г.Н. Методы расчета параметров строительных и дорожных машин виброударного и ударного действия на основе вычислительного эксперимента [Текст] :дис. ... д-ра техн. наук / Г.Н. Попов. – Ярославль, 1986. – 393 с.
104. Пособие по строительству асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов: (к СНиП 3.06.03-85 и СНиП 3.06.06-88) [Текст] / И.А. Плотникова и др. – М.: СоюздорНИИ, 1991. – 161 с.
105. Протодьяконов, М.М. Методика рационального планирования экспериментов /М.М. Протодьяконов, Р.И. Тедер. – М.: Изд-во "Наука", 1970.
106. Прусов, А.Ю. Выбор рациональных режимов работы вибрационных катков при уплотнении асфальтобетонных смесей [Текст] :дис. ... канд. техн. наук / А.Ю. Прусов. – Ярославль, 2003. – 170 с.
107. Прусов, А.Ю. Определение режимов работы дорожных катков при уплотнении асфальтобетонных покрытий [Текст] / А.Ю. Прусов, Е.К. Чабуткин// Межвузовская региональная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и докторантов: тезисы докл. – Ярославль, 1997. – 123 с.
108. Путк, А.И. Обоснование выбора некоторых параметров и режимов работы самоходных катков на пневматических шинах при уплотнении асфальтобетона [Текст] :дис. ... канд. техн. наук / А.И. Путк. – М., 1967. – 365 с.

109. Путк, А.И. Пневмоколесные катки. Основы теории и расчета основных параметров и режимов работы [Текст] / А.И. Путк. – Таллинн: Валгус, 1985. – 144 с.
110. Путк, А.И. Температурный режим асфальтобетонной смеси при ее уплотнении катками на пневматических шинах [Текст] / А.И. Путк // Автомобильные дороги. – 1975. – № 3. – С. 8-9.
111. Путк, А.И. Эффективность некоторых дорожных катков [Текст] / А.И. Путк // Автомобильные дороги. – 1978. – № 6. – С. 12-13.
112. Радовский, Б.С. Конструирование и расчет дорожных одежд в первой половине XX столетия: ч. 1 [Текст] / Б.С. Радовский // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2013. – С. 96-123.
113. Рекомендации по выявлению и устранению колея на нежестких дорожных одеждах [Текст]: ОДМД / Минтранс России: Гос. служба дор. хоз-ва (Росавтодор). - М.: ГП «Информавтодор», 2002. - 180 с.
114. Ритов, М.Н. Методика расчета стоимости машиномен дорожных машин [Текст] / М.Н. Ритов. – М.: Транспорт, 1971. – 88 с.
115. Руденский, А.В. Реологические свойства битумоминеральных материалов [Текст] / А.В. Руденский, И.М. Руденская. – М.: Высшая школа, 1971. – 127 с.
116. Рыбьев, И.А. Строительное материаловедение [Текст] / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2002. – 701 с.
117. Сергеева, Т.Н. Исследование взаимодействия вальца катка с асфальтобетонным слоем при его уплотнении [Текст] :дис. ... канд. техн. наук / Т. Н. Сергеева. – Л., 1981. – 144 с.
118. Сергеева, Т.Н. К вопросу уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / Т.Н. Сергеева, А.Я. Башкарев // Исследование современных способов и средств уплотнения грунтов и конструктивных слоев дорожных одежд: Тр. СоюздорНИИ. – М., 1975. – Вып. 84. – С. 124-132.
119. Система управления AsphaltManager фирмы Bomag [Текст] // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 1. – С. 28-30.

120. Смоленцева, В.А. Исследование влияния основных параметров рабочих органов катков (пневматических шин) на эффективность процесса уплотнения дорожно-строительных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.08 / Смоленцева Валентина Андреевна. – М.: 1974. – 27 с.
121. Сокальская, М.Б., Боев А.В. Методы оценки качества асфальтобетона //«Дорожная техника 2013 » - г.Санкт-Петербург: Изд. ООО «Славутич».- С.54-70.
122. Телтаев, Б. Б. Напряженно-деформированное состояние дорожной одежды с монолитными слоями основания [Текст] / Б. Б. Телтаев, Ш. М. Айтиалиев, Б. С. Муртазин // Наука и техника в дорожной отрасли. -2006. - № 1. - С. 18-21
123. Тюремнов И. С. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография [Текст] / Тюремнов И. С., Игнатъев А. А. - Ярославль : ЯГТУ, 2012. - 140 с.
124. Угай, С.М. Интенсификация процессов уплотнения асфальтобетонных смесей катками с перфорированными рабочими органами [Текст] :дис. ... канд. техн. наук / С.М. Угай. – Владивосток, 2008. – 117 с.
125. Хархута, Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий [Текст] / Н.Я. Хархута // Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд: Тр. СоюздорНИИ. – М., 1980. – С. 55-61.
126. Хархута, Н.Я. Выбор типа и режима работы катков при уплотнении асфальтобетонных смесей [Текст] / Н.Я. Хархута, А.А. Шестопапов // Автомобильные дороги. – 1986. – № 3. – С. 24-25.
127. Хархута, Н.Я. Оптимизация параметров силового воздействия на слой асфальтобетонной смеси при уплотнении его катками [Текст] / Н.Я. Хархута, Е.Л. Стефанюк // Строительные машины. – Ярославль, 1978. – С. 34-36.
128. Христинич, Д.В. Варианты нелинейной связи между напряжениями и деформациями в анизотропных материалах [Текст] / Д.В. Христинич // Известия ТулГУ. Естественные науки. Вып. 1. Часть 1. – Тула, 2014. – С. 216–224.
129. Христинич, Д.В. К вопросу об определении главных осей анизотропии материала [Текст] / Д.В. Христинич // Известия ТулГУ. Естественные науки. Вып. 2. – Тула, 2014. – С. 203–213.

130. Чабуткин, Е.К. Исследование динамики шин самоходных катков [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.К. Чабуткин. – Л., 1978. – 15 с.
131. Чабуткин, Е.К. Методика расчета режима работы вибрационного катка при уплотнении горячих асфальтобетонных смесей [Текст] / Е.К. Чабуткин, И.С. Тюремнов, Ю.Г. Попов // Вестник информационных технологий. – 2012. – № 5. – С. 10-13.
132. Черных, К.Ф. Введение в анизотропную упругость. [Текст] / Черных К.Ф. // М.: Наука, 1988. 192 с.
133. Шапошников, А. В. Обоснование параметров и режимов работы катков при уплотнении тонких асфальтобетонных слоев: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Шапошников А. В. – Омск, 2005. – 208 с.
134. Шестопалов, А.А., Бойцев А.В. // Моделирование условий создания изотропного покрытия в процессе его уплотнения [Текст] / А.В. Бойцев, А.А. Шестопалов // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 4(56)
135. Шестопалов, А.А. Интенсификация процесса уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Шестопалов. – М., 1988. – 440 с.
136. Шестопалов, А.А. Основные направления повышения эффективности уплотнения дорожно-строительных материалов [Текст] / А.А. Шестопалов // Тез. докл. Респ. конф. – СПб., 1992. – С. 49.
137. Шестопалов, А.А. Пути улучшения ровности асфальтобетонных покрытий в процессе строительства [Текст] / А.А. Шестопалов, С.В. Старков // Автомобильные дороги. – 1979. – № 11. – С. 12-13.
138. Шестопалов, А.А. Уплотнение асфальтобетона как действенное средство снижения колееобразования // Дорожная техника. Санкт-Петербург - 2012 С. 83–85.
139. Штромберг, А.А. Экспериментальная проверка способов повышения теплоустойчивости асфальтобетонных смесей [Текст] / А.А. Штромберг, В.Н. Гарманов // Дороги и мосты. – 2013. – Т. 1. – № 29. – С. 243–251.

140. Шубин, С.И. Исследование рабочего процесса катка на пневматических шинах при уплотнении асфальтобетонных смесей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.И. Шубин. – Л., 1981. – 16 с.
141. Экспериментальная оценка устойчивости асфальтобетонного покрытия к образованию колеиности [Текст] / В. В. Мозговой, А. Н. Онищенко, А. В. Прудкий и др. // Дорожная техника. - 2010. - Вып. 65. – С. 114-128
142. EN 12697-22. 2033 Битумные смеси. Методы испытания горячего асфальтобетона [Текст]: Ч. 22. Испытание на колееобразование прокатыванием нагруженного колеса [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.docin.com/p-74011357.html>
143. A thermo-viscoelastic–viscoplastic–viscodamage constitutive model for asphaltic materials [Text] / M.K. Darabi et al. // International Journal of Solids and Structures. – 2011. – Vol. 48. – № 1. – P. 191-207.
144. Ammann compaction expert. Intelligent compaction [Text] / Ammann America Inc. – 2006. – 16 p.
145. Basic principles of asphalt compaction [Text] / Bomag GmbH. – Hellerwald, 2009. – 59 p.
146. Button, J., Perdomo, D., and Lytton, R. (1990). “Influence of aggregate on rutting in asphaltconcrete pavements.” Transportation Research Record 1259, Transportation ResearchBoard, Washington, D.C., 19 - 31.
147. Dessouky, S., Masad, E., and Bayomy, F. (2003). “Evaluation of asphalt mix stability using compaction properties and aggregate structure analysis,” International Journal of Pavement Engineering, 4(2), 87-103.
148. Elseifi, M.A. Viscoelastic modeling of straight run and modified binders using the matching function approach [Text] / M.A. Elseifi, I. Al-Qadi, G.W. Flinch, J.F. Masson // The international journal of pavement engineering. – 2002. – Vol. 3. – P. 53–61.
149. G. Garcia, M. Thompson, Considerations for Extended-Life Hot-Mix Asphalt Pavement Design// «Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board», 2008, pp. 3–11.

150. Hot mix asphalt intelligent compaction – a case study [Text] / Q. Xu et al. // Transportation research board 89th annual meeting. – 2010. – № 10(2213). – 17 p.
151. Kandhal, Prithvi S. Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer [Текст] / Prithvi S. Kandhal, L. Allen Cooley. - NCHRP Report 508, 2003.
152. Kim, S. H., Little D. N., Masad E., “Simple Methods to Estimate Inherent and Stress-Induced Anisotropic Level of Aggregate Base,” Transportation Research Record 19 DC, 2005, pp. 24-31.
153. Kim, S.H., Little, D.N., Masad, E., Lytton, R.L., 2005. Estimation of Level of Anisotropy in Unbound Granular Layers Considering Aggregate Physical Properties. The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 217-227, Taylor & Francis.
154. Krishnan, J. M. On the mechanical behavior of asphalt [Text] / J.M. Krishnan, K.R. Rajagopal // Mechanics of materials. – 2005. – Vol. 37. – № 11. – P. 1085-1100.
155. Maupin, Jr., G.W. Preliminary field investigation of intelligent compaction of hot-mix asphalt [Text] / G.W. Maupin Jr. // Virginia Transportation Research Council. – 2007. – № VTRC 08-R7. – 18 p.
156. Masad, E., Little, D., Tashman L., Saadeh S., Al-Rousan, T., and Sukhwani, R. (2003). “Evaluation of aggregate characteristics affecting HMA concrete performance.” Research Report ICAR 203-1, Texas Transportation Institute, College Station, TX.
157. Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., and Harman, T. (1999b). “Effect of compaction procedure on the aggregate structure in asphalt concrete.” Transportation Research Record 1681, Transportation Research Board, Washington, D.C., 179-185.
158. McLeod, N.W. Developments in asphalt pavement compaction by variable tire pressure rollers [Text] / N.W. McLeod // Proceedings of the convention Canadian Good Roads Association. – 1967. – P. 146-181.
159. Oda, M., and Nakayama, H. (1989). “Yield function for soil with anisotropic fabric.” Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 15(1), 89-105
160. Oda, M. (1972). “Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular materials.” Soils Foundation, 12(1), 17–36.

161. Oda, M., Nemat-Nasser, S., and Konishi, J. (1985). "Stress-induced anisotropy in granular masses." *Soils Foundation*, 25(3), 85–97.
162. Ryan, S. Intelligent compaction overview [Text] / S. Ryan // Proceedings of Idaho asphalt conference. – 2014. – 17 p.
163. Robert Y. Liang, Bilal A. Abu Alfoul, Mohammad Khasawneh "Laboratory Investigation of Anisotropic Behavior of HMA" International Conference on Perpetual Pavement 2006
164. Rothenburg, L., Bogobowicz, A., Haas, R., Jung, F. W., and Kennepohl, G. (1992). "Micromechanical modeling of asphalt concrete in connection with pavements rutting problems." Seventh International Conference on Asphalt Pavement, Nottingham, United Kingdom.
165. Scarpas, A., Al-Khoury, R., Van Gurp, C., and Erkens, S. M. (1997a). "Finite element simulation of damage development in asphalt concrete pavements." Proc., eighth International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, Seattle, WA, 673-692.
166. Singh, D. Inclusion of aggregate angularity, texture, and form in estimating dynamic modulus of asphalt mixes [Text] / D. Singh, M. Zaman, S. Commuri // Road materials and pavement design. – 2012. – Vol. 13. – № 2. – P. 327-344.
167. Tashman, L., Masad, E., Peterson, B., and Saleh, H. (2001). "Internal structure analysis of asphalt mixes to improve the simulation of superpave gyratory compaction to field conditions." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 70, 605-655.
168. Thanh, D.V. Study on Marshall and rutting test of SMA at abnormally high temperature [Text] / D.V. Thanh, C.P. Feng // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 47. – P. 1337–1341.
169. Tutumluer, E., Thompson, M.R., 1997. Anisotropic Modeling of Granular Bases in Flexible Pavements. *Transportation Research Record* 1577, pp. 18-26, TRB, National Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
170. Tobita, Y., and Yanagisawa, E. (1988). "Contact tensor in constitutive model for granular materials." *Micromechanics of Granular Materials*, Elsevier Science

Publishers, Amsterdam, 263-270.

171. Ugay, S.M. Pavement roller with perforated operating elements [Text] / S.M. Ugay // World applied sciences journal. – 2013. – Vol. 25. – № 5. – P. 704-709.

172. Ugay, S.M. Statistical research of vibration road rollers and perforated operating devices [Text] / S.M. Ugay, U.U. Kovalenko, N.S. Pogotovkina // World applied sciences journal. – 2013. – Vol. 25. – № 7. – P. 1018-1022.

173. Viscoelastic-plastic model of asphalt-roller interaction [Text] / F. Beainy et al. // International Journal of Geomechanics. – 2013. – Vol. 13. – № 5. – P. 581-594.

174. Wang, L. B., Hoyos, L. R., Wang, J., Voyiadjis, G., and Abadie, C. “Anisotropic Properties of Asphalt Concrete: Characterization and Implementation in Pavement Design and Analysis”. The 83rd Transportation Research Board Annual Meeting. (2004)

175. Witczak, M. W., Mamlouk, M. S., Kaloush, K. E., and Ho, Y.-S. “Effect of Anisotropy on Compressive and Tensile Properties of Asphalt Mixtures”. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 30, No. 5, pp. 432-438. (2002)

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Исходный текст программы Sinusroll

```

unitInDu;
interface
private
{ Private declarations }
public
  procedure DrawT(var kx, ky, km:Real; const x0,y0,nn,fi:Integer);
  procedure DrawNET(var sx, sy:Integer);
  procedure ClearDraw;
  procedure DrawSIDE(const K:Integer; kx,ky,km:Real);
end;
const
MaxW=5000; MaxL=10000; nn=25; acc=0.1;
var
  Form1: TForm1; fi,W,K,P:Integer; kx,ky,km:Real;
implementation
  procedure TForm1.DrawSIDE(const K:Integer; kx,ky,km:Real);
  var tt:Real; i,kc:Integer;
  begin
  kc:=Round(4*km);
  with Image1.Canvas do
  begin
  pen.Color:=clNavy; pen.Style:=psDashDot;
  moveto(0,Trunc(K/2*ky));
  lineto(Image1.Width,Trunc(K/2*ky));
  moveto(0,Image1.Height-Trunc(K/2*ky));
  lineto(Image1.Width,Image1.Height-Trunc(K/2*ky));
  i:=0;
  while i<Image1.Width do
  begin
  if ((i mod kc)=0) then begin
  moveto(Trunc(i*nn*kx),0);
  lineto(Trunc(i*nn*kx),Trunc(K/2*ky));
  moveto(Trunc(i*nn*kx),Image1.Height);
  lineto(Trunc(i*nn*kx),Image1.Height-Trunc(K/2*ky));
  end;
  i:=i+kc;
  end; end; end;
  procedure TForm1.ClearDraw;
  begin
  With Image1.Canvas do
  begin
  pen.Style:=psSolid;
  pen.Color:=clWhite;
  brush.Color:=clWhite;
  Rectangle(0,0,Image1.Width,Image1.Height);
  end;
  end;
  procedure TForm1.DrawNET(var sx, sy:Integer);
  var i,x,y:Integer;
  begin
  i:=-sy;
  with Image1.Canvas do
  begin
  pen.Color:=clGray;
  pen.Style:=psDot;
  while i<Image1.Height do

```

```

begin
i:=i+sy;
moveto(0,i);
lineto(Image1.Width,i);
end;
i:=-sx;
whilei<Image1.Width do
begin
i:=i+sx;
moveto(i,0);
lineto(i,Image1.Height);
end; end;end;
procedure TForm1.DrawT(varkx, ky, km:Real; const x0,y0,nn,fi:Integer);
vary,kc:Integer;
ty,i,add:Real;
begin
ty:=0;
  With Image1.Canvas do
begin
pen.Color:=clBlue;
pen.Style:=psSolid;
i:=0;
moveto(x0,y0);
whilei<Image1.Width do
begin
i:=i+acc;
ty:=y0-sin(kx*i*nn*pi/180*tan(fi*pi/180))*nn*tan(fi*pi/180)*km*ky;
y:=Trunc(ty);
lineto(Trunc(i*nn*kx),y);
moveto(Trunc(i*nn*kx),y);
end;
i:=0;//Function above
add:=0;
if odd(Image1.Tag) then begin
pen.Color:=clLime;
kc:=12
end
else begin
pen.Color:=clYellow;
kc:=16
end;
moveto(x0,y0);
whilei<Image1.Width do
begin
i:=i+acc;
add:=K/2*ky;
ty:=y0-sin(kx*i*nn*pi/180*tan(fi*pi/180))*nn*tan(fi*pi/180)*km*ky-add;
y:=Trunc(ty);
lineto(Trunc(i*nn*kx),y);
if ((Trunc(i) mod Trunc(kc/km))=0) then
begin
moveto(Trunc(i*nn*kx),Trunc(ty+add));
lineto(Trunc(i*nn*kx),y);
end;
moveto(Trunc(i*nn*kx),y);
end;
i:=0;//Function below
add:=0;
moveto(x0,y0);
whilei<Image1.Width do
begin
i:=i+acc;
add:=K/2*ky;

```

```

ty:=y0-sin(kx*i*nn*pi/180*tan(fi*pi/180))*nn*tan(fi*pi/180)*km*ky+add;
y:=Trunc(ty);
lineto(Trunc(i*nn*kx),y);
if (Trunc(i) mod Trunc(kc/km))=0 then
begin
moveto(Trunc(i*nn*kx),Trunc(ty-add));
lineto(Trunc(i*nn*kx),y);
end;
moveto(Trunc(i*nn*kx),y);
end; end;end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
Form1.KeyPreview:=True;
Button1.Enabled:=False;
Label1.Caption:='УГОЛ Fi = '+IntToStr(TrackBar1.Position)+' град.';
Label2.Caption:='ШИРИНАПОЛЮСЫ W = 2,0м';
Label3.Caption:='ШИРИНАВАЛЬЦАКАТКА K = 0,1м';
Memo1.Clear;
end;
procedure TForm1.FormKeyDown(Sender: TObject; var Key: Word;
Shift: TShiftState);
begin
Case key of
27:Form1.Close;
end;end;
procedure TForm1.FormShow(Sender: TObject);
begin
BitBtn1.SetFocus;
TrackBar3.Position:=9;
end;

procedure TForm1.BitBtn1Click(Sender: TObject);
var x,i,y0:Integer;
y:Real;
kp,Pt,sx,sy:Integer;
km:Real;
begin
Image1.Tag:=0;
ClearDraw;
Memo1.Clear;
fi:=TrackBar1.Position;
W:=2000+TrackBar2.Position*100;//Width Lane
K:=100+TrackBar3.Position*100;//Width Katka
P:=5+TrackBar4.Position;//Overlap
kp:= Round(W/(K-K*P/100));
Memo1.Lines.Add('Ширинаполосы= '+IntToStr(W)+' мм');
Memo1.Lines.Add('ШиринаКатка= '+IntToStr(K)+' мм');
Memo1.Lines.Add('Перекрытие= '+IntToStr(P)+' %');
kx:=Image1.Width/MaxL;
ky:=Image1.Height/W;
km:=MaxW/W;
y0:=0;
if (kp=1)AND(Round(K-K*P/100)<Round(0.7*W)) then
begin
inc(kp);
end;
Memo1.Lines.Add('Кол-вопроходов='+IntToStr(kp));
For i:=0 to kp-1 do
begin
Image1.Tag:=Image1.Tag+1;
y0:=y0+Round((K-K*P/100)*ky/2);
Form1.DrawT(kx,ky,km,0,y0,nn,fi);
y0:=y0+Round((K-K*P/100)*ky/2);

```

```

end;
if CheckBox2.Checked then begin
sx:=Trunc(K*kx/2);
sy:=Trunc(K*ky/2);
DrawNET(sx,sy);
Memo1.Lines.Add('Сетка X*Y = '+ IntToStr(K div 2)+'*'+IntToStr(K div 2)+'мм^2')
end;
if CheckBox1.Checked then begin
Memo1.Lines.Add('Прокатка обочин проведена');
DrawSide(K,kx,ky,km)
end;
  Button1.Enabled:=True;
end;
procedure TForm1.TrackBar1Change(Sender: TObject);
begin
  Label1.Caption:='УГОЛ Fi = '+IntToStr(TrackBar1.Position)+' град.';
end;
procedure TForm1.TrackBar2Change(Sender: TObject);
begin
  Label2.Caption:='ШИРИНА ПОЛОСЫ W = '+IntToStr(2+TrackBar2.Position div 10)+' '+IntToStr(TrackBar2.Position
mod 10)+' м';
end;
procedure TForm1.TrackBar3Change(Sender: TObject);
begin
  Label3.Caption:='ШИРИНА ВАЛЬЦА КАТКА K = '+IntToStr((1+TrackBar3.Position*1) div 10)+' '+IntToStr(
(1+TrackBar3.Position*1) mod 10)+' м';
end;
procedure TForm1.TrackBar4Change(Sender: TObject);
begin
  Label4.Caption:='ПЕРЕКРЫТИЕ P = '+IntToStr(5+TrackBar4.Position)+' %';
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var i:Integer;
begin
i:=1;
  while FileExists('Data\' +DateToStr(Date)+'_'+IntToStr(i)+'.bmp')OR
FileExists('Data\' +DateToStr(Date)+'_'+IntToStr(i)+'.txt')do inc(i);
  Try begin
Image1.Picture.SaveToFile('Data\' +DateToStr(Date)+'_'+IntToStr(i)+'.bmp');
Memo1.Lines.SaveToFile('Data\' +DateToStr(Date)+'_'+IntToStr(i)+'.txt');
ShowMessage('Ваши данные сохранены под именем '+DateToStr(Date)+'_'+IntToStr(i)+'.bmp/txt');
  Button1.Enabled:=False
end
except end;
end;end.

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



ГРУППА
КОМПАНИЙ
АБЗ-1

195009, г. Санкт-Петербург,
ул. Арсенальная, д.66
Тел.: (812) 542-39-79
Факс: (812) 541-85-84
Email: info@abz-1.ru

Для предоставления в
диссертационный совет

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Бойцева Андрея Владимирович на тему
«Методика обоснования параметров вальцов дорожного катка с изотропным
силовым воздействием на асфальтобетонную смесь»

Лаборатория ОАО АБЗ-1 рассмотрела предложение по определению величины анизотропии свойств асфальтобетонных смесей после укатки, разработанную в ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Бойцевым Андреем Владимировичем. Проведенный анализ предоставленных результатов исследований позволил сделать вывод о том, что указанные предложения по оценке анизотропии свойств являются актуальными и должны быть учтены при подборе рациональных составов асфальтобетонных смесей с целью снижения глубины колеи, образующейся в слоях дорожных одежд.

Заместитель директора по качеству
Руководитель НИЦ ОАО «Асфальтобетонный завод № 1»
Кандидат технических наук

Майданова Н. В.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности

Е.М. Разинкина

2017 г



АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Бойцева Андрея Владимирович на тему
«Методика обоснования параметров вальцов дорожного катка с изотропным
силовым воздействием на асфальтобетонную смесь»**

Разработанная Бойцевым А.В. математическая модель процесса взаимодействия рабочих органов дорожных катков с уплотняемой асфальтобетонной смесью а так же новая методика определения величины анизотропии свойств асфальтобетонных смесей в результате укатки внедрены и используются в учебном процессе на кафедре «Транспортные и технологические системы» института Metallургии, машиностроения и транспорта ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» при подготовке магистров по программе «Строительные и дорожные машины» направления «Наземные транспортно-технологические комплексы».

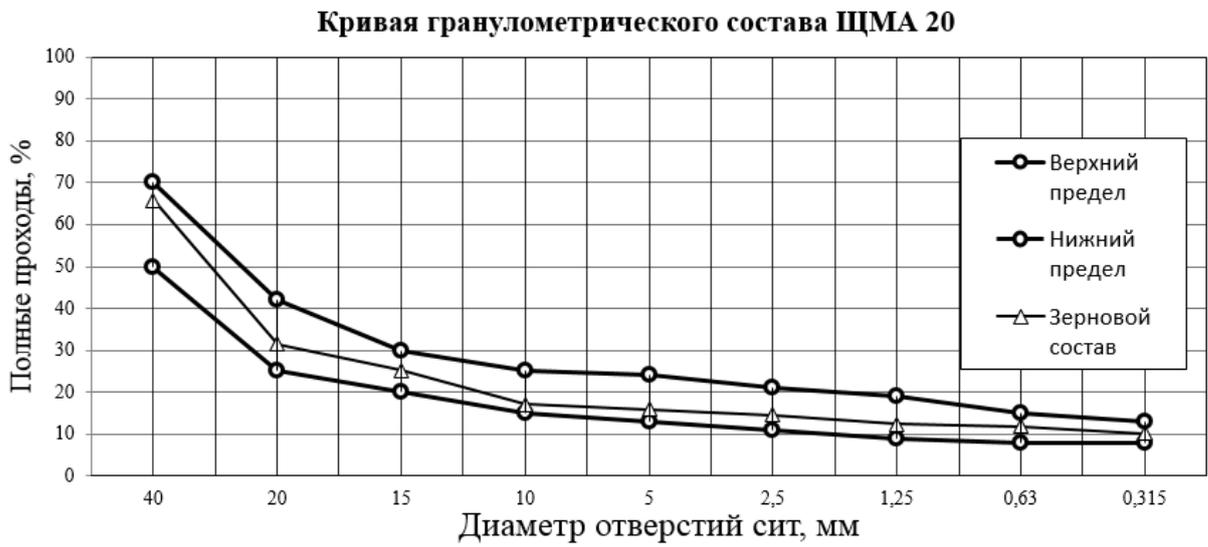
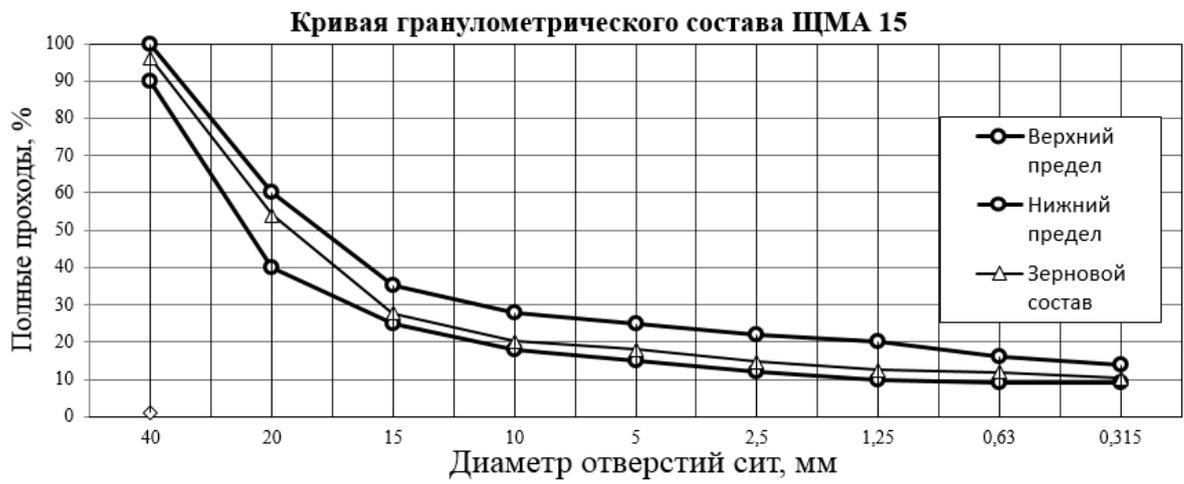
В частности, результаты диссертационной работы используются в лекционных курсах «Дорожные машины», «Строительные и дорожные машины» в разделах «Машины для уплотнения дорожно-строительных материалов» и «Теория уплотнения горячих асфальтобетонных смесей в дорожном покрытии укаткой». Кроме того, разработанный Бойцевым А.В. программный продукт «SinusRoll» применяется на практических занятиях при выполнении работ по теме «Выбор рациональных траекторий схем укатки дорожными катками».

Заведующий кафедрой ТТС
ИММиТ ФГАОУ ВО «СПбПУ»
Доктор технических наук, профессор

Подпись	К.П. Манжула
УДОСТОВЕРЯЮ	
Ведущий специалист по кадрам	<i>Климова М.А.</i>
	20.11.17

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Наименование материалов	Содержание в смеси, %	Зерновой состав, полные проходы в % через сито, мм										
		40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,075
1. ЦМА15												
Щебень фр. 5-15	42,0	48,0	45,9	40,1	20,0	9,8	0	0	0	0	0	0
Щебень фр. 10-15	33,0	33,0	31,3	37,0	15,4	0,6	0	0	0	0	0	0
Песок из отс. др. фр.0-5	12,0	10,0	10,0	10,0	9,6	8,4	11,2	9,0	6,7	4,5	4,0	4,0
Минеральный порошок	13,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	7,9	7,9	7,9	6,2
Зерновой состав исследуемой смеси	100,0	100,0	96,2	96,1	54,0	27,8	20,2	18,0	14,6	12,4	11,9	10,2
Требования ГОСТ 31015-2002				90	40	25	18	15	12	10	9	9
				100	60	35	28	25	22	20	16	14
2. ЦМА20												
Щебень фр. 5-15	22,0	22,0	22,0	20,8	9,2	7,6	0	0	0	0	0	0
Щебень фр. 10-15	12,0	12,0	12,0	11,0	1,2	0,2	0	0	0	0	0	0
Щебень фр. 15-20	42,0	47,0	45,6	15,1	2,5	0,0	0	0	0	0	0	0
Песок из отс. др. фр.0-5	11,0	10,0	10,0	10,0	9,6	8,4	8,2	7,0	6,7	4,5	4,0	4,0
Минеральный порошок	13,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	7,9	7,9	7,9	6,2
Зерновой состав исследуемой смеси	100,0	100,0	98,6	65,9	31,5	25,2	17,2	16,0	14,6	12,4	11,9	10,2
Требования ГОСТ 31015-2002			90	50	25	20	15	13	11	9	8	8
			100	70	42	30	25	24	21	19	15	13
3. А тип I												
Щебень фр 10-20	40,0	40,0	36,1	19,9	0,7	0,4	0,4	0	0	0	0	0
Щебень фр 3-10	24,0	24,0	31,0	31,0	30,6	11,9	2,9	2,0	1,4	1,1	0,9	0,6
Отсев дробления			9,0	9,0	9,0	9,0	7,1	5,8	4,2	3,0	2,1	1,2
Песок природный	10,0	10,0	15,5	15,5	15,5	15,4	15,3	15,2	13,8	6,0	1,3	0,3
Минеральный порошок	6,0	6,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,9	7,3	5,8
Зерновой состав исследуемой смеси	100,0	100,0	99,6	83,4	63,8	44,7	33,7	31,0	27,4	18,0	11,6	7,9
Требования ГОСТ 9128-97			90	75	62	40	28	20	14	10	6	4
			100	85	70	50	50	50	50	28	16	10



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017610912

SinusRoll

Правообладатель: **Бойцев Андрей Владимирович (RU)**

Автор: **Бойцев Андрей Владимирович (RU)**

Заявка № **2016662984**

Дата поступления **24 ноября 2016 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **18 января 2017 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Исмаилов**

