

БОЙЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

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

**Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шестопалов Александр Андреевич

Официальные оппоненты: **Иванченко Сергей Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тихоокеанский
государственный университет», ректор,
г. Хабаровск

Носов Сергей Владимирович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный
технический университет», профессор
кафедры «Строительного материаловедения
и дорожных технологий», г. Липецк

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Ярославский государственный технический
университет»**

Защита диссертации состоится 28 сентября 2017 г. В 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.02** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190103, г. Санкт-Петербург, ул. Курляндская, д. 2/5, аудитория 340-К.
Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте:
<http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/boycev-andrey-vladimirovich>

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

Олещенко Елена Михайловна

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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., Пермькова В.Б., Попова Г.Н., Путка А.И., Репина С.В., Сергеевой Т.Н., Тюремнова И.С., Угая С.М., Чабуткина Е.К., Шестопадова 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 рассматривалось 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 величину 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 характеристик взаимодействия рабочих органов дорожных катков с изотропным силовым воздействием на асфальтобетонную смесь.

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 с асфальтобетонной смесью.

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 XLI-й научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ», (г. Санкт-Петербург, 2015), на XLII-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 объёмом 2,4 п.л., в том числе 4 статьи опубликованы в научных журналах из перечня ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 138 страницах печатного текста, включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы, состоящий из 175 источников и приложений на 9 страницах. В работе представлено 64 формулы, 15 таблиц и 62 рисунка.

Во введении обосновывается актуальность проблемы колееобразования и научная новизна борьбы с этим явлением с помощью изменения силового воздействия со стороны рабочих органов уплотняющих машин.

В первой главе приводится анализ причин образования колеи в дорожных одеждах и методов борьбы с ней. Показаны основные этапы при устройстве дорожного покрытия, которые способны повлиять на формирование изотропной структуры асфальтобетона. Обосновывается возможность использования уплотнения как действенного средства снижения колееобразования.

Во второй главе приводится разработка математической модели взаимодействия рабочих органов дорожных катков с уплотняемой асфальтобетонной смесью с учётом анизотропии свойств. Представлены результаты моделирования, доказывающие в каком направлении необходимо направлять силовое поле уплотняющих машин, чтобы получить изотропное покрытие.

В третьей главе обосновывается методика экспериментальной оценки степени анизотропии прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей. Экспериментально исследуются различные составы смесей и оценивается их стойкость к образованию колеи в зависимости от способа уплотнения.

В четвертой главе приведена методика обоснования параметров вальцов дорожных катков с изотропным силовым воздействием. Обосновываются рекомендации по определению параметров рабочих органов дорожных катков с силовым воздействием на уплотняемый материал, обеспечивающих получение изотропного дорожного покрытия. Приведён алгоритм расчёта и программа ЭВМ, обеспечивающие построение оптимальной траектории движения с получением изотропного дорожного покрытия существующими дорожными катками.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

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

Решение смешанной упругопластической задачи связано с определением напряжений и деформаций в асфальтобетонных слоях при одновременном существовании в них областей допредельного и предельного напряжённого состояния (см. рисунок 1). Полная деформация в областях предельного напряжённого состояния принимается состоящей из упругой и пластической:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p; d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p; \quad (1)$$

Для пластических деформаций определяющие связи находятся с помощью ассоциированного закона пластического течения:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{df}{d\sigma_{ij}}, \quad (2)$$

где f — функция текучести; $d\lambda$ — малая положительная скалярная величина. Определена функция текучести как функция напряжений σ_{ij} и положения потенциальной площадки сдвига μ относительно площадки действия наибольшего главного напряжения σ_1 в виде:

$$f(\sigma_{ij}, \mu) = |\tau_\mu| - (\sigma_\mu \operatorname{tg} \varphi + c_\mu), \quad (3)$$

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.

Законы изменения прочностных характеристик $tg\varphi_{1,2}$ $c_{1,2}$ определяют предельные сопротивления сдвигу соответственно в продольном и поперечном направлении;

$$\left. \begin{aligned} tg\varphi &= tg\varphi_1 + (tg\varphi_2 - tg\varphi_1)\sin^2(\mu - \beta) \\ c_\mu &= c_1 + (c_2 - c_1)\sin^2(\mu - \beta) \end{aligned} \right\}; \quad (4)$$

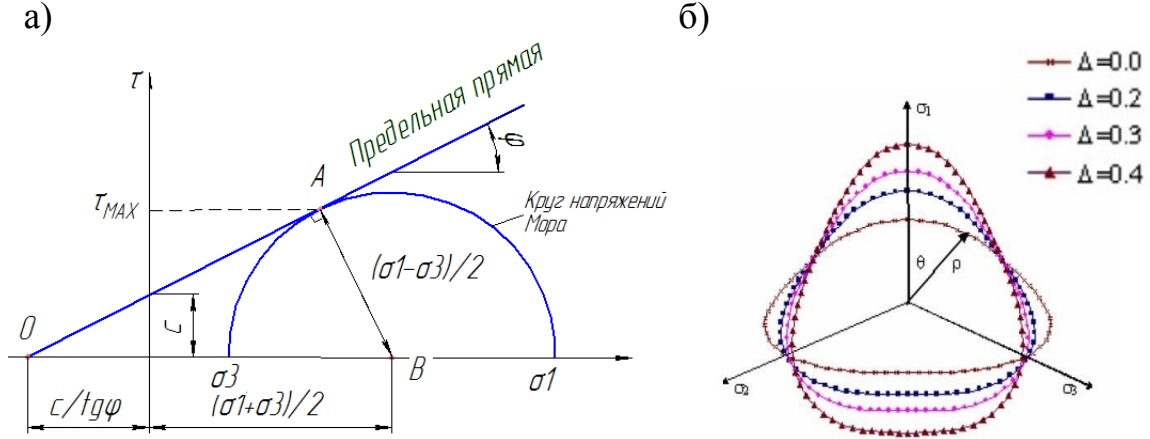


Рисунок 1 – Схема напряжённо-деформированного состояния (НДС) асфальтобетона при уплотнении а) и Форма поверхности текучести в девиаторной плоскости в зависимости от степени анизотропии « Δ » б)

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

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\varepsilon\} &= \{\Delta\varepsilon^e\} + \{\Delta\varepsilon^p\} \\ \{\Delta\sigma\} &= \{\Delta D^e\}\{\Delta\varepsilon^e\} \\ \{\Delta\varepsilon^p\} &= \Delta\lambda\{df/d\sigma\} \\ \{df/d\sigma\}^T\{\Delta\sigma\} &= 0 \\ \{\Delta\sigma\} &= \{\Delta D^{ep}\}\{\Delta\varepsilon\} \end{aligned} \right\}; \quad (5)$$

Таким образом, общие выражения упругопластических матриц $[D^{ep}]$ для изотропного и анизотропного вариантов асфальтобетонной среды идентичны:

$$[D^{ep}] = [D^e] - [D^e] \frac{\{df/d\sigma\}\{df/d\sigma\}^T[D^e]}{\{df/d\sigma\}^T[D^e]\{df/d\sigma\}}; \quad (6)$$

Компоненты вектора $\{df/d\sigma\}$ определяются согласно:

$$\{df/d\sigma\} = \begin{Bmatrix} \frac{\sin\varphi_\mu}{2\sin A_\mu} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{zx}^2}} \\ \frac{\sin\varphi_\mu}{2\sin A_\mu} - \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{zx}^2}} \\ \frac{2\tau_{xz}}{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{zx}^2}} \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

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

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.

Ввод обозначений деформационных постоянных: E_{xx}, E_{yy}, E_{zz} - модули деформации в направлении осей x, y, z ; $\nu_{xz}, \nu_{xy}, \nu_{yx}$ коэффициенты Пуассона, позволяет определять деформацию в направлении оси z от усилия, действующего в направлении оси x ; G_{xy}, G_{zy}, G_{xz} - модули сдвига в плоскостях xoy, zoy, xoz .

Осуществив вычислительные операции для случаев сжатия отдельно по каждой оси x, y, z получаем:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_{xx}} (\sigma_x - \nu_{yx}\sigma_y - \nu_{zx}\sigma_z) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E_{yy}} (-\nu_{xy}\sigma_x + \sigma_y - \nu_{zy}\sigma_z) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_{zz}} (-\nu_{xz}\sigma_x - \nu_{yz}\sigma_y + \sigma_z) \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz} \\ \gamma_{xz} &= \frac{1}{G_{xz}} \tau_{xz} \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu_{xy})}{E_{xx}} \tau_{xy} \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

Проверка теоретических исследований была проведена методом конечных элементов (МКЭ). 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. В таблице 1 приведены экспериментально определённые в лаборатории параметры для модели взаимодействия силового поля вальца с уплотняемым материалом.

Таблица 1 – Параметры МКЭ модели для изотропного и анизотропного материалов

Материал	Толщина слоя h , м	Модуль упругости $E1$, Мпа	к-т Пуассона $\nu1$	Модуль упругости $E2$, Мпа	к-т Пуассона $\nu2$	к-т внутреннего трения $tg\phi1$	к-т внутреннего трения $tg\phi2$	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	-

На рисунке 2 приведены изо поля касательных напряжений, возникающих в асфальтобетонах с различной степенью изотропии при проезде пневматического колеса дорожного катка. Данные полученные расчётом в программе ABAQUS с использованием упругопластической модели для уплотнения асфальтобетона. С помощью математической модели мы можем с достаточно высокой точностью

описать поведение материала под нагрузкой. Разница в величине деформаций между изотропным и анизотропным материалом составляет 29%.

а)

б)

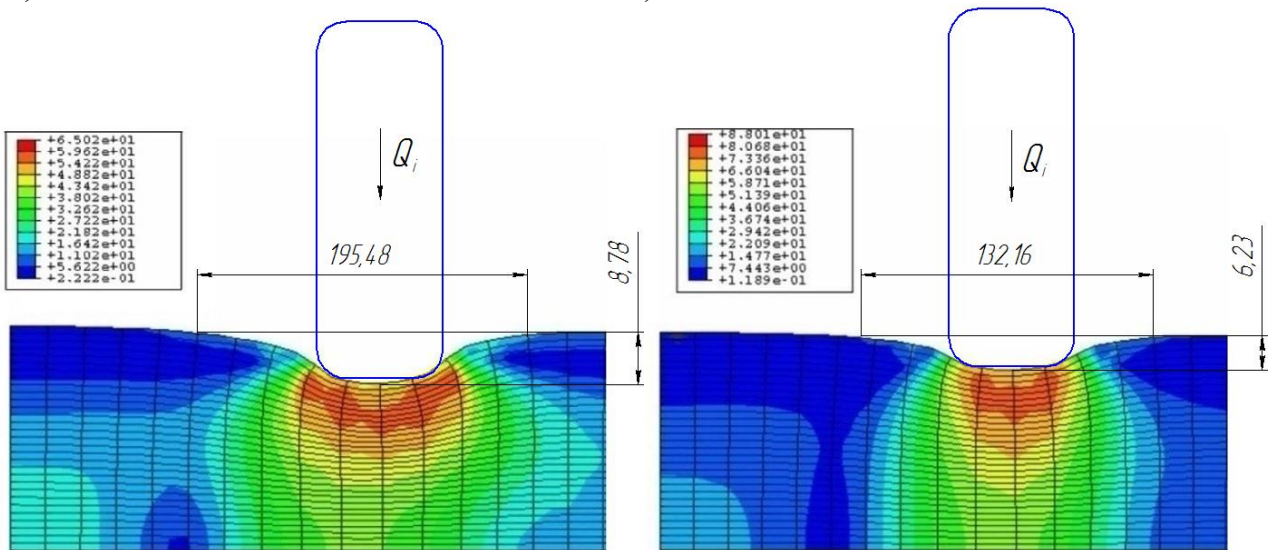


Рисунок 2 – Касательные напряжения в поперечном сечении слоя асфальтобетонного покрытия для: а) анизотропного б) изотропного материала

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

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

Предлагаемая методика позволяет оценить влияние степени анизотропии свойств на образование колеи. Сдвигоустойчивость асфальтобетона рассматривается как свойство материала, определяющееся структурой, полученной в результате процесса уплотнения. Образцы для испытаний представляют собой подготовленные на специальной установке, позволяющей моделировать уплотнение существующими дорожными катками, плиты из асфальтобетона с размерами 320×320×40 мм.

В исследовании рассмотрены три состава асфальтобетонных смесей. Первая смесь типа А и две другие ЦМА 15 и ЦМА 20. Проверку устойчивости подготовленных образцов различных смесей асфальтобетонов к образованию колеи осуществляли на специальной испытательной установке «колёсный стенд» в соответствии с стандартом EN 12697-26. В нашей стране существует рекомендательный стандарт ОДМ 218.3.017-2011 для проведения экспериментальной оценки образования колеи в асфальтобетонных смесях.

Предлагаемая методика отличается от известной, необходимостью дополнительно испытывать образцы на развитие колееобразования в

поперечном направлении, относительно направления уплотнения и исследовать сходимость кривых деформирования - Δ (см. рисунок 3). Предлагаемая методика позволяет оценить деформационные свойства асфальтобетона и позволяет снизить величину колееобразования на дороге.

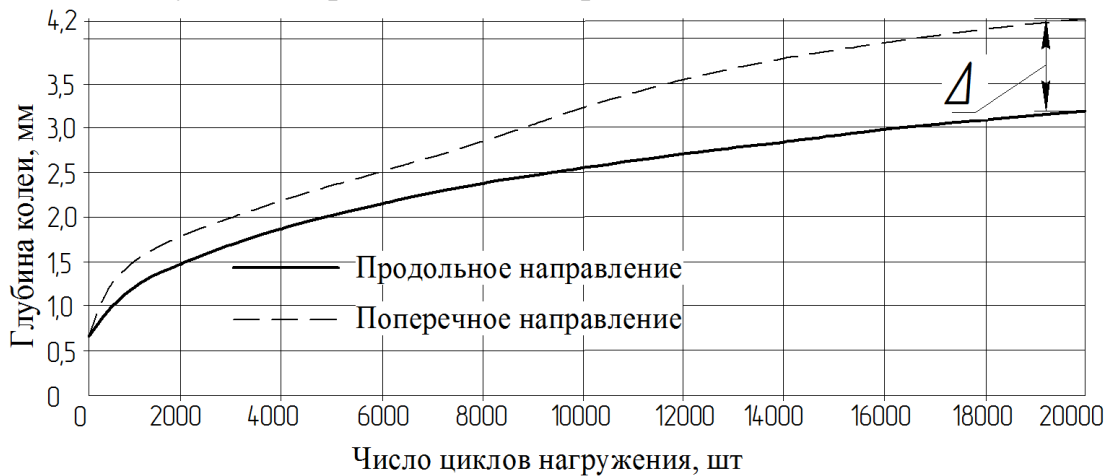


Рисунок 3 – Оценка анизотропии свойств по сходимости кривых колееобразования в продольном и поперечном направлении

С целью установления влияния направленности силового воздействия на формирование структуры испытуемых образцов из асфальтобетона, их уплотнение выполнялось по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Испытание по определению развития колеи для этих образцов на «колёсном стенде» осуществлялось только в продольном направлении. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 4.

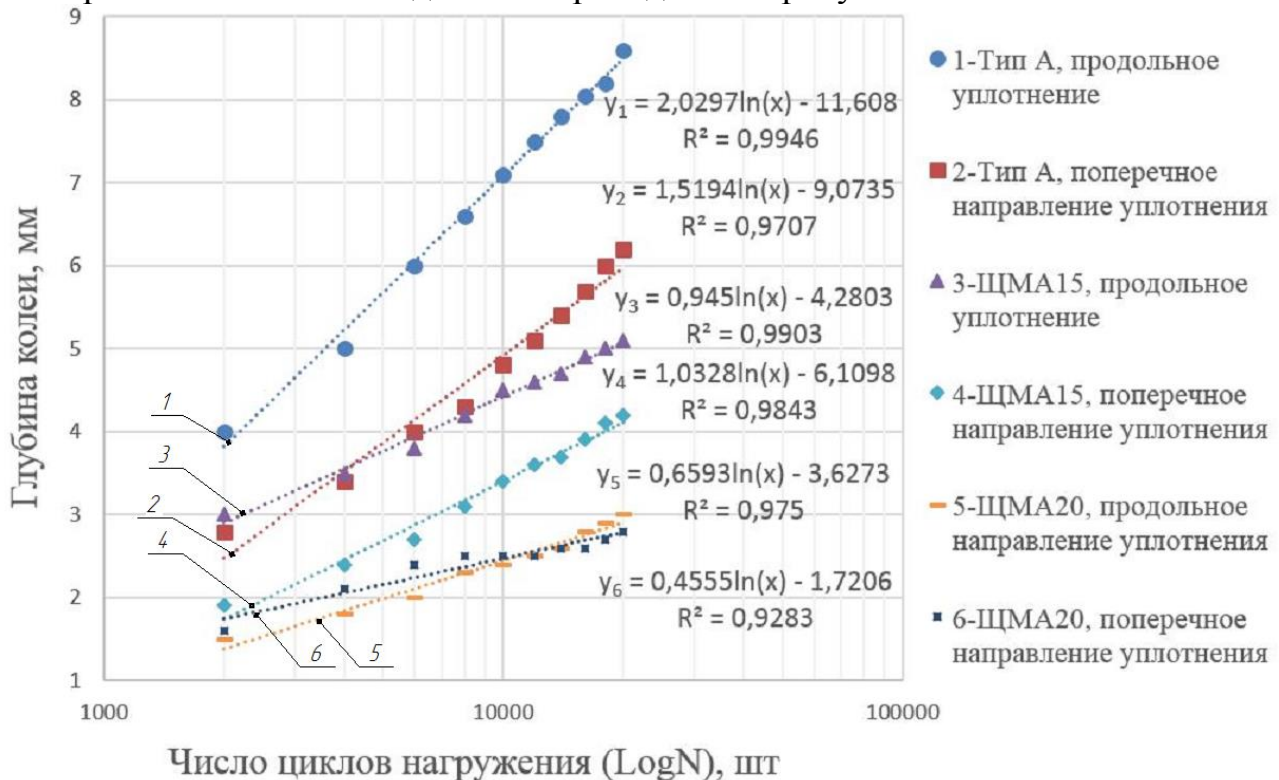


Рисунок 4 – Результаты испытаний на колееобразование для образцов, уплотнённых в различных направлениях

Экспериментальная проверка величины колееобразования выявила разницу в 27% между изотропным и анизотропным материалом, что хорошо согласовывается с результатами теоретического исследования (расхождение 7% с МКЭ моделью).

Таким образом, лабораторное исследование процесса образования колеи в продольном и поперечном направлениях с помощью фиксации процесса развития деформаций в зависимости от числа циклов проездов колеса может служить эффективным критерием оценки деформационных свойств асфальтобетона, учитывающим анизотропию его свойств. Этот метод оценки анизотропных свойств является недорогим и пригодным для использования и анализа в лаборатории, а также не требует трудоёмких вычислений.

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

Анализ напряжённого состояния слоя показывает, что при воздействии на уплотняемый материал вальцом катка, в нем должен реализовываться равный девиаторный характер нагружения как в продольной, так и в поперечной плоскости дороги. Когда материал находится в упругом состоянии необходимо, что бы компоненты матриц упругости (5) 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.

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 характеристики асфальтобетонов.

Воздействие катка, создающего изотропное покрытие на уплотняемый слой асфальтобетонной смеси, должно отличаться от схем воздействия традиционных средств уплотнения. Изотропное силовое воздействие на слой уплотняемой смеси осуществляется за счёт создания в ней дополнительных касательных напряжений, что показано на рисунке 5. Вследствие этого происходит перестроение внутренней структуры асфальтобетонной смеси в поперечной плоскости, что приведёт к снижению уровня анизотропных свойств.

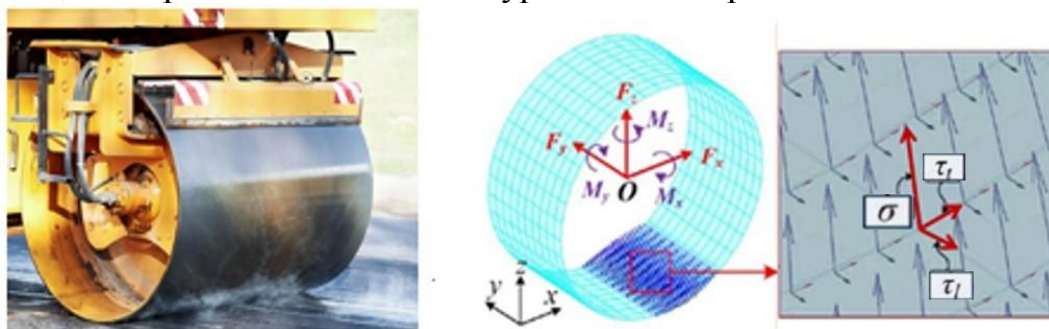


Рисунок 5 – Создание девиаторного режима нагружения рабочим органом катка (ось x сонаправлена с продольной осью дороги)

Предлагаемый новый валец дорожного катка с изотропным силовым воздействием на асфальтобетонную смесь оснащён покрытием из эластомерного материала переменной твёрдости в радиальном направлении. Форма этого слоя выполнена в виде ленточной резьбы шевронного исполнения с величиной наклона винтовой линии α меньше угла внутреннего трения ϕ уплотняемого материала. Толщина эластомерного слоя $h_{\max}$ должна составлять одну треть от толщины уплотняемого слоя и не должна превышать размер наибольших минеральных частиц уплотняемой смеси. Рекомендуется установить расстояние между витками эластомерного материала аналогичного расстоянию между шинами пневматического катка: 0,4 от ширины шины катка. На рисунке 6 приведена схема устройства вальца дорожного 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 меньшую твёрдость. Часть 4 слоя эластомерного материала имеет повышенную твёрдость и соприкасается непосредственно с металлической обечайкой. Валец катка обладает сегментной поверхностью и состоит из нескольких симметричных модулей 5 для предотвращения изменения траектории движения катка в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси.

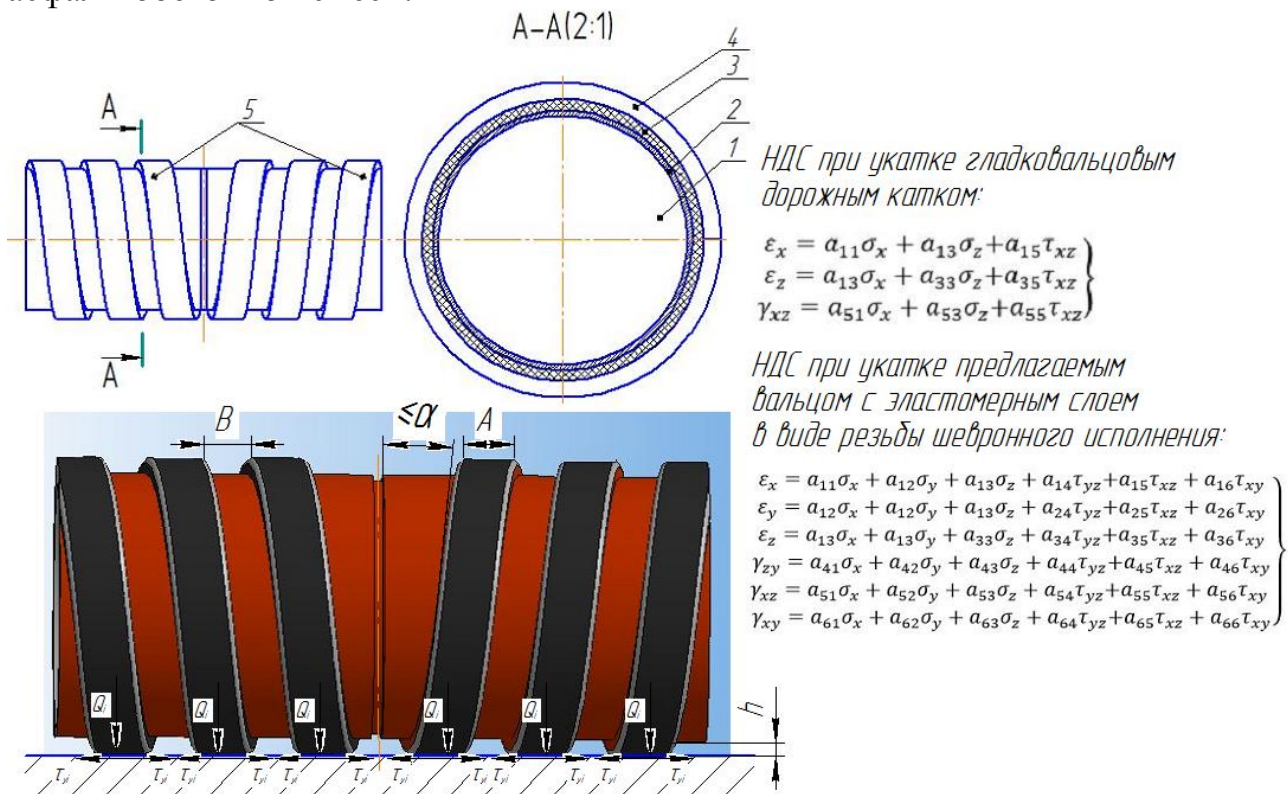


Рисунок 6 – Валец дорожного катка с эластомерным слоем и протектором направленного действия, общий вид и поперечный разрез

Для получения изотропного дорожного покрытия при уплотнении пневматическими катками необходимо выполнить ряд конструктивных изменений для усиления сдвигового эффекта в поперечном направлении. Рекомендуется установка вибрационного возбуждателя поперечно направленного

действия на пневматический каток (см. рисунок 7-а). Вибратор, действующий в поперечном, относительно траектории 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 сцепления $F_{тр}$ колес пневматического катка с уплотняемым слоем:

$$m_{э} \cdot r_{э} \leq \frac{\varphi_{сц} \cdot Q_i}{\omega^2 \sin \omega t} ; \quad (9)$$

где $m_{э}$ - масса эксцентрика; $r_{э}$ - радиус эксцентрика; Q_i - нагрузка на пневматическое колесо; ω - круговая частота нагружения; $\varphi_{сц}$ - коэффициент сцепления.

Замена стандартных шин (см. рисунок 7-в) на гладкопрофильные (см. рисунок 7-б) в пневматических катках 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 с протектором, применявшаяся ранее. Переход к стандартным шинам значительно увеличит напряжения в поперечном направлении, возникающие в уплотняемом материале, 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 .

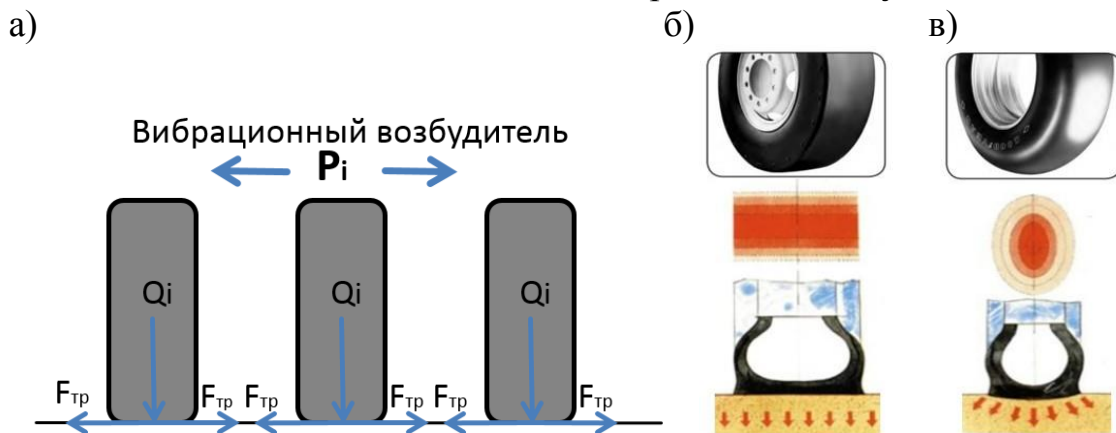


Рисунок 7 – Установка вибрационного возбудителя в поперечном направлении а) и Схема НДС под действием пневматического катка, оснащённого гладкопрофильными б) и стандартными шинами в)

Другим методом повышения эффективности пневматического катка может быть изменение конструкции шин путём добавления направленного протектора (с углом наклона α меньшим угла внутреннего трения ϕ уплотняемого материала) или изменение рисунка плетения слоёв каркаса шин, что сможет изменить НДС со стороны пневматического катка на слой уплотняемого материала. Расчёт в ABAQUS показывает, что при укатке пневматическим катком увеличение угла развала на 1° увеличивает величину касательных напряжений в 2,5 раза.

Для подтверждения эффективности предлагаемых рабочих органов были изготовлены специальные накладки на роликовый уплотнительный сектор. Результаты экспериментальной проверки новых рабочих органов приведены на рисунке 8.

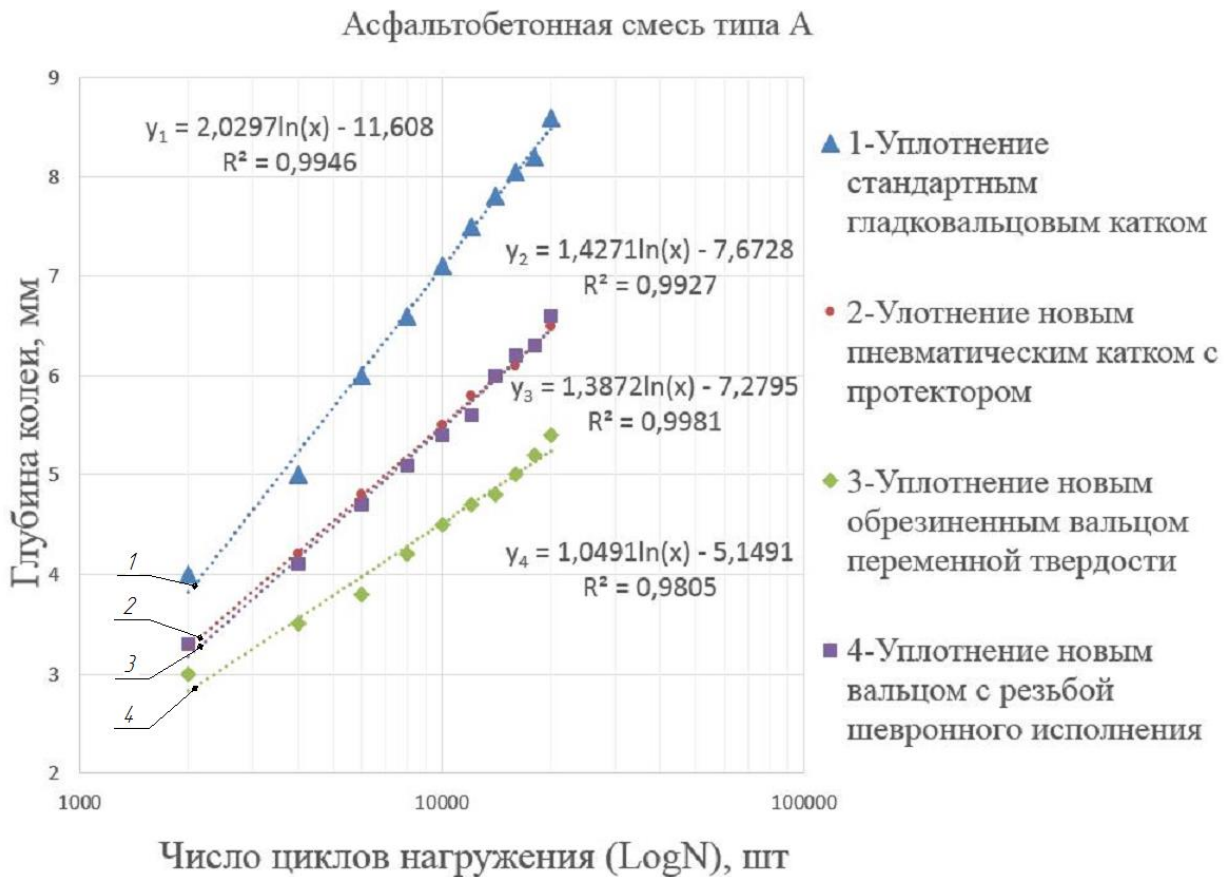


Рисунок 8 – Результаты экспериментальной проверки новых рабочих органов с изотропным силовым воздействием на асфальтобетонную смесь

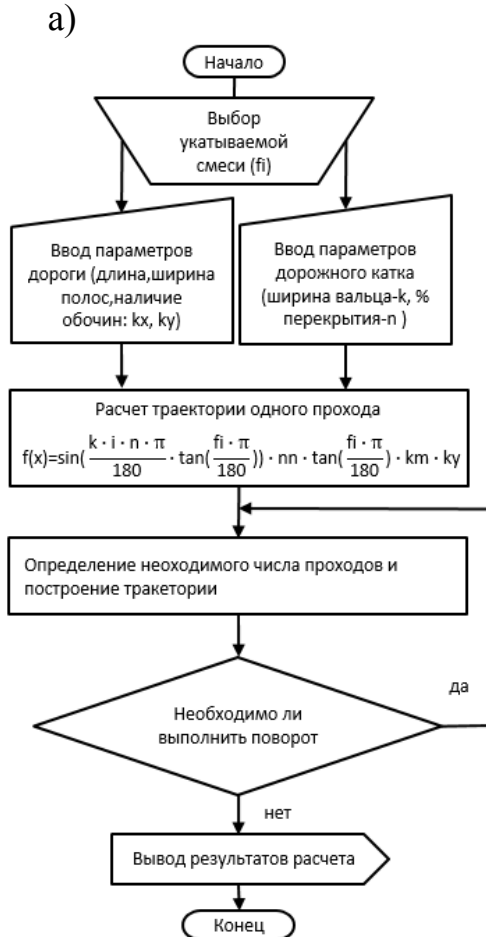
Таким образом, в работе обоснованы рекомендации по определению параметров рабочих органов дорожных катков с изотропным силовым воздействием для гладковальцовых и пневматических катков, обеспечивающих получение изотропного дорожного покрытия.

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

Программа SinusRoll (патент РФ №2017610912) предназначена для выполнения расчёта оптимальной траектории движения рабочих органов уплотняющих машин. Программа позволяет, указав входные данные укатываемого асфальтобетонного слоя и дорожного катка, вычислить оптимальную траекторию движения при уплотнении с целью получения изотропного дорожного покрытия. Рабочее окно программы и алгоритм расчёта показаны на рисунке 9-а. Для построения траектории уплотнения необходимо

ввести информацию об уплотняемом материале в дорожном покрытии (угол внутреннего трения материала, ширина полосы, величина перекрытия, длина участка, ширина обочины) и параметры вальца (ширина и тип дорожного катка).

Угол α (см. рисунок 9-б) должен быть меньше угла внутреннего трения ϕ уплотняемого материала $\alpha \leq \phi$, т.к. в противном случае будет происходить разрушение материала.



б)

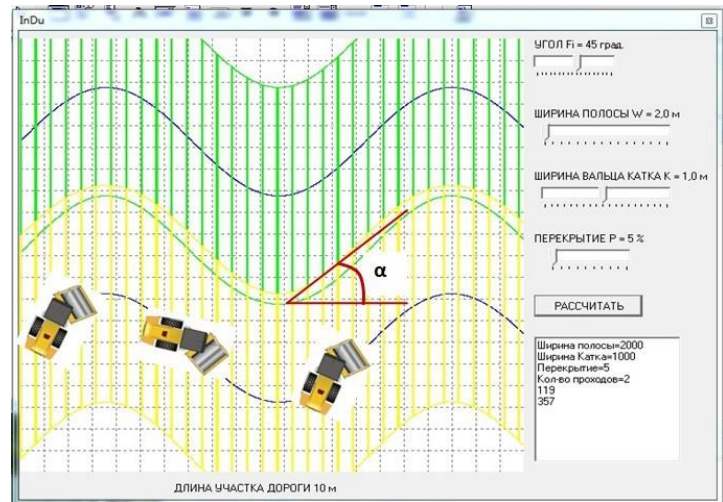


Рисунок 9 – Алгоритм расчёта а) и Рабочее окно программы SinusRoll б)

Благодаря разработанному алгоритму расчёта и программе SinusRoll, возможно обеспечить получение изотропного силового воздействия на уплотняемый материал при укатке традиционными дорожными катками без внесения изменений в их конструкции.

5. Разработана методика обоснования характеристик взаимодействия рабочих органов дорожных катков с изотропным силовым воздействием с асфальтобетонной смесью.

Конструкции рабочих органов должны создавать дополнительные касательные напряжения, которые при уплотнении должны образовывать соответствующий суммарный вектор сил, обеспечивающий равный сдвиг материала вдоль и поперёк дорожного покрытия. Такой сдвиг могут создавать новые конструкции рабочих органов (вальцов). Величина этого сдвига должна быть ограничена по величине деформации в уплотняемом слое, относительно продольной и поперечной осей дороги. Для установления угла наклона суммарного силового вектора в горизонтальной плоскости, относительно

продольной оси дороги, необходимо знать физико-механические свойства уплотняемого материала. 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 10.

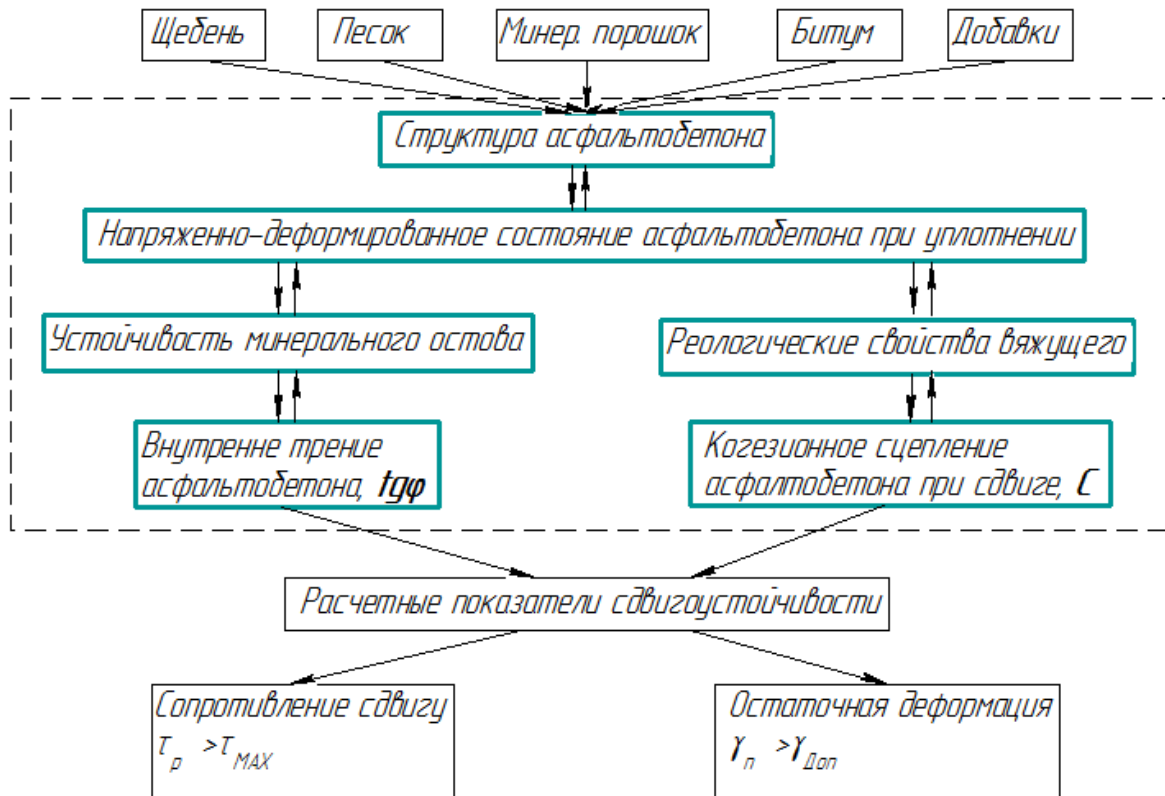


Рисунок 10 – Схема взаимосвязи структурных свойств асфальтобетона в зависимости от НДС при уплотнении

За счёт создания дополнительных касательных напряжений в поперечном направлении сдвиговая прочность асфальтобетона увеличится. Это достигается благодаря снижению анизотропии свойств, что в свою очередь приведёт к повышению стойкости к колееобразованию. Важно заметить, что дополнительные касательные напряжения не должны разрушать силы адгезии и когезии, которые связывают частицы между собой в уплотняемом слое. Поэтому при проектировании новых рабочих органов уплотняющих машин необходимо ограничение максимальных касательных напряжений, создаваемых рабочими органами в уплотняемом слое. В противном случае верхний уплотняемый слой асфальтобетонной смеси может быть повреждён из-за разрыва связей 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. Это произойдёт если максимальные сдвигающие напряжения в уплотняемом асфальтобетонном слое не превысят расчётное сопротивление асфальтобетона сдвигу:

$$\tau_p \geq \tau_{max}, \quad (10)$$

где τ_p - расчётное сопротивление асфальтобетона сдвигу, МПа;

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

$$\tau_{p.}^{анизотр.} < \tau_{p.}^{изотр.}, \quad (11)$$

где $\tau_{p.}^{анизотр.}$ - расчётное сопротивление сдвигу для анизотропного асфальтобетона; $\tau_{p.}^{изотр.}$ - сопротивление сдвигу изотропного дорожного покрытия.

Это и обуславливает повышенную стойкость изотропного материала к образованию колеи. Касательные напряжения от действия пневматического катка τ_{max} должны быть меньше допустимого сопротивления асфальтобетона сдвигу τ_p .

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

$$\tau_p = p \operatorname{tg} \varphi + C_{.л} \left(\frac{t_{.л}}{t_1 t_n N} \right)^m \exp \left[\frac{mU}{R} \left(\frac{1}{T_{п+}} - \frac{1}{T_{.л}} \right) \right], \quad (12)$$

где p - удельное давление, создаваемое рабочим органом дорожного катка;

$C_{.л}$ - 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, прох./ч;

m - коэффициент пластичности по Н.Н. Иванову;

U - необходимое количество энергии для начала вязкопластичного разрушения в асфальтобетоне согласно Г.М. Бартеневу, 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.

Касательные напряжения τ_x в x -направлении могут быть смоделированы следующим уравнением, полученным профессором Пасейкой:

$$\tau_x(x, y) = \tau_{xM} \left(\frac{x^{2n+1}}{a^{2n+1}} \right) \cdot \sin^2 \left(\frac{x}{a} \pi \right) \cdot \cos \left(\frac{y}{2b} \pi \right), \quad (14)$$

где a и b указывают размеры контактной зоны (как показано на рисунке 11); параметр $n \in \mathbb{N}$ и определяется типом шины (радиальная, не радиальная, сочетанием слоёв корда...); τ_{xM} - максимальные касательные напряжения в x -направлении.

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

Аналогично в y -направлении касательное напряжение τ_y может быть смоделировано с помощью уравнения:

$$\tau_y(x, y) = -\tau_{yM} \left(\frac{x^{2n}}{a^{2n}} - 1 \right) \cdot \sin \left(\frac{y}{b} \pi \right); \quad (15)$$

где τ_{ym} – максимальные касательные напряжения в x-направлении.

Пятно контакта и направления касательных напряжений при уплотнении пневматическим катком приведены на рисунке 11.

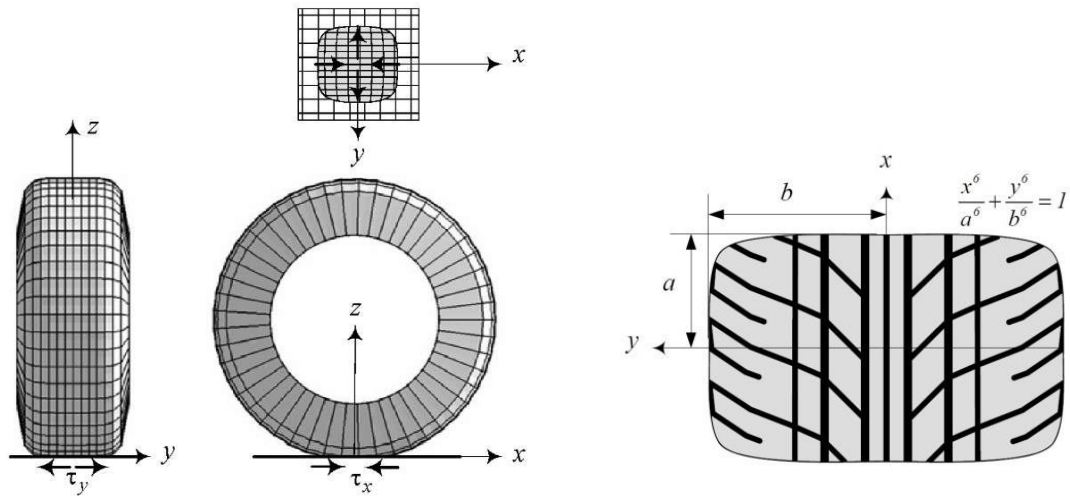


Рисунок 11 – Направление касательных напряжений на плоскости контакта при уплотнении пневматическим катком

Основываясь на результатах и выводах диссертационного исследования данную методику обоснования параметров валцов дорожных катков с изотропным воздействием на асфальтобетонную смесь рекомендуется использовать при проектировании новых рабочих органов уплотняющих машин.

III 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 валцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью с целью установления критерия оценки степени изотропности силового воздействия на неё.

2. Разработана методика экспериментальной оценки степени анизотропии прочностных и деформационных характеристик асфальтобетонных смесей.

3. Разработаны рекомендации по определению параметров рабочих органов дорожных катков, обеспечивающих получение изотропного дорожного покрытия в процессе уплотнения.

4. Разработан алгоритм расчёта и программа ЭВМ, обеспечивающие построение траектории движения с получением изотропного силового воздействия на уплотняемый материал при укатке традиционными дорожными катками без внесения изменений в конструкции дорожных катков.

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

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. **Бойцев А.В.** Методы оценки анизотропных свойств дорожного покрытия [Текст] / А.В. Бойцев, А.А. Шестопалов // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 3(55)

2. **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)

3. **Бойцев А.В.** Обоснование параметров вальца дорожного катка с изотропным силовым воздействием [Текст] / А.В. Бойцев // «Вестник ТОГУ». – 2016. – № 2(41)

4. **Бойцев А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ «SinusRoll» №2017610912 от 18.01.2017

Публикации в других изданиях:

5. **Бойцев А.В.** К проблеме колееобразования на дорогах// СПбГПУ, Сборник докладов молодёжной научно-практической конференции «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ Материалы научного форума с международным участием» – СПб, 2015, с. 305-308.

6. **Бойцев А.В.** Уплотнение асфальтобетона как средство борьбы с колееобразованием //СПбГПУ, Сборник лучших докладов недели науки СПбПУ Материалы научного форума с международным участием» – СПб, 2015, с. 93-96

7. **Бойцев А.В.** Конструкционная анизотропия свойств дорожного покрытия и методы борьбы с ней//5-я Международная научно-практическая конференция современное машиностроение: наука и образование (ММЕСЕ-2016), 2015