

**Г. С. ЕРИЦЯН
М. А. КАРАПЕТЯН
А. Г. АВАКЯН**

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
НА РЕСУРС ШИН**

Монография

Москва
2022

УДК 629.3.027.5.004.2
ББК 39.3
Е 711

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева **В. А. Евграфов**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и эксплуатации техники НАУ Армении **А. С. Маркрян**

Ерицян Г. С., Карапетян М. А., Авакян А. Г.

Е 711 Влияние условий эксплуатации на ресурс шин: монография / Г. С. Ерицян, М. А. Карапетян, А. Г. Авакян / Национальный политехнический университет Армении; ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева. – М. : ООО «Мегаполис», 2022. – 129 с.

ISBN 978-5-6048430-5-5

В монографии рассматриваются вопросы, посвященные исследованию влияния эксплуатационных факторов на ресурс шин, а также вопросам контактного взаимодействия шин с грунтовыми основаниями.

Монография может быть полезна инженерно-техническим работникам, а также студентам и аспирантам механических и машиностроительных факультетов вузов в качестве дополнительного учебного пособия.

УДК 629.3.027.5.004.2
ББК 39.3

ISBN 978-5-6048430-5-5

© Коллектив авторов, 2022
©ООО «Мегаполис», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
ГЛАВА 1. Состояние вопроса	5
1.1. Оперативное нормирование ресурса шин как актуальная проблема.....	5
1.2. Эффективность эксплуатации автомобиля.....	8
1.3. Факторы и методы нормирования ресурса, влияющие на долговечность шин.....	10
1.4. Нагрузочные режимы автомобиля в различных условиях эксплуатации.....	17
ГЛАВА 2. Исследование влияния эксплуатационных факторов на ресурс шин	23
2.1. Общая методика исследования.....	23
2.2. Общие понятия, термины и определения, используемые в процессе изменения состояния шин.....	25
2.3. Идентификация и локализация исследуемой системы.....	28
2.4. Закономерности теоретического распределения ресурса шин.....	40
2.5. Особенности работы шин в условиях горных регионов.....	42
2.6. Изменения коэффициента сопротивления качению шин в горных регионах.....	48
2.7. Методы определения и корректирования нормативов ресурса шин.....	50
2.8. Метод ускоренных ресурсных испытаний шин.....	53
ГЛАВА 3. Экспериментальные исследования	57
3.1. Экспериментальная оценка влияния атмосферного давления воздуха на внутреннее давление в шинах.....	57
3.2. Методика обработки экспериментальных исследований.....	62
3.3. Оценка работоспособности шин.....	65
3.4. Оценка влияния конструктивных факторов на устойчивость автомобильных шин к износу по результатам испытаний.....	77
3.5. Методика оценки изменения коэффициента сопротивления качению шины и результаты испытаний.....	79
ГЛАВА 4. Теория и расчет контактного взаимодействия шин грунтовыми основаниями	84
4.1. Математическая модель пневматической шины как многослойной эластокомпозитной оболочки.....	84
ГЛАВА 5. Контактное взаимодействие эластокомпозитной оболочки с деформируемым основанием	100
Общие выводы	117
Список литературы	118
Приложения	120

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своей маневренности, провозной способности «от двери до двери», автомобильный транспорт играет важную роль в перевозке грузов и пассажиров. Следует отметить, что автомобильный транспорт более развит в горных областях, в том числе в Республике Армения. Статистические данные показывают, что в Республике Армения 89 % от всего объема пассажирских перевозок приходится на автомобильный транспорт, а в сфере грузооборота – 62 %. С другой стороны, самые простые расчеты показывают, что в себестоимости автомобильных перевозок значительное место занимают расходы, связанные с шинами.

Один из путей снижения этих затрат и уменьшения спроса на шины – это полное использование ресурса или, как обычно говорят, использование потенциальной долговечности шин. Необходимым условием успешного решения этой задачи является разработка и внедрение объективных нормативов ресурса шин.

Нормы ресурса шин, действующие в странах СНГ, в том числе и в нашей республике, были разработаны 40–45 лет назад. Причем базовые нормативы были разработаны на основе фактического среднего ресурса списанных шин. За период с момента принятия стандартов и до сих пор можно отметить, что полностью изменился модельный ряд шин, и следовательно, разработанные нормативы не соответствуют современным шинам. В связи с этим оперативное определение и корректировка норм ресурса шин считается актуальной проблемой.

Ресурс шины, в числе прочих факторов, зависит от внутреннего давления в шине, повышение которого, при изменении географического положения местности, может быть с положительным или отрицательным значением (изменяется атмосферное давление воздуха).

Изменение внутреннего давления приводит к изменению сопротивления качению. Последнее оказывает влияние на расход топлива автомобиля. В связи с этим становится важным выявление и определение закономерностей данных изменений.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Оперативное нормирование ресурса шин как актуальная проблема

Трудно представить выживание современного общества без автомобильного транспорта. Автомобильный транспорт, являясь неразрывной частью транспортного комплекса страны, играет важную роль в деле перевозки грузов и пассажиров. Существенное влияние на благосостояние населения, экономическую эффективность и себестоимость промышленной продукции оказывают затраты на эксплуатацию автотранспорта.

Доля затрат, связанная с шинами значительна в себестоимости перевозки. Так, в зависимости от вида перевозки эта доля может достигать до 10 %. Понятно, что снижение этих расходов позволит уменьшить стоимость перевозок и повысить эффективность использования автомобиля. Зависимость эффективности использования автомобиля от нормы пробега шины показана на рисунок 1.1 [1].

Одним из способов снижения затрат, связанных с шинами и уменьшения спроса организаций на шины является полная реализация потенциала долговечности шин. Необходимым условием успешного решения этой задачи является наличие объективных норм их ресурса.

Влияние норм на фактическую долговечность и стоимость шин доказывается экспериментально. Исследования в этой области [2] выявили данные о ресурсе шин, которые эксплуатировались в одних и тех же условиях, но имели различные нормы пробега и эксплуатировались разными транспортными компаниями. Данные таб-

лицы 1.1 свидетельствуют о том, что средний ресурс шин увеличивается с увеличением норм.

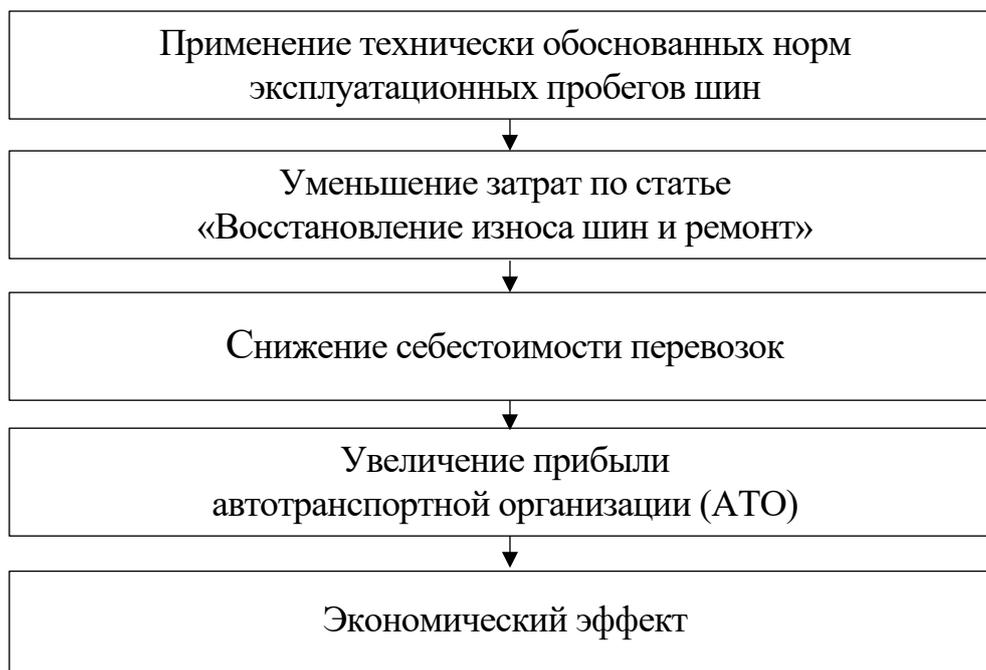


Рисунок 1.1 – Соотношение норм эксплуатационного пробега шин и эффективности использования автомобилей

В последнее время в нашей стране значительно расширился ассортимент шин как для легковых, так и для грузовых автомобилей. Это расширение также связано с увеличением количества импортируемых шин.

В связи с этим возникает необходимость определения норм ресурса для шин новых моделей. В отношении автомобильных шин, для которых нормы эксплуатационного пробега не установлены в установленном порядке, автохозяйства с согласия вышестоящих организаций, исходя из среднего пробега списанных шин утверждает временные нормы».

Данные в последних двух строках таблицы 1.1 основаны на результатах наших наблюдений.

**Таблица 1.1 – Влияние норм эксплуатационного пробега
на долговечность шин**

Модели шин	Марка и модель автомобиля	Норма эксплуатационного пробега, тыс. км	Средний пробег шин до снятия с эксплуатации, тыс. км
ИД-220	ГАЗ-24 (АТП-1)	45	52,2
ИД-220	ГАЗ-24 (АТП-2)	50	55,1
И-111А	ИКАРУС М-260 (АТП-3)	68	84,6
И-111А	ИКАРУС М-260 (АТП-4)	52	78,8
ВИ-203	HIGER KLQ 6770G (ЗАО Автобус)	80*	75
ВИ-243	БОГДАН АО-92 (ЗАО Автобус)	70*	67

*нормы разработаны ЗАО «Автобус» Мэрии г. Еревана

Кроме того, нормы определялись исходя из фактических средних ресурсов списанных шин. За последние 40–45 лет модели шин, а также модели и марки автомобилей почти полностью изменились.

Сегодня на междугородных и междугородных пассажирских маршрутах республики курсируют автобусы семейств Honda, Lehman и Zonda, для шин которых не зарегистрированы нормы в вышеуказанных документах.

Как было сказано выше, для шин, не имеющих соответствующие нормы, обычно, с согласия вышестоящей организации, определяются и устанавливаются временные нормы исходя из среднего пробега выведенных из эксплуатации шин. Однако решение среднего пробега становится серьезной проблемой, так как отсутствует методика определения среднего пробега шин.

Таким образом, если в первую очередь выбрать необходимое количество (допустим, 50–60) шин из определенной партии, и определить их средний ресурс, то мы получим заниженное значение ресурса [1]. По этой причине необходимо случайным отбором создать такую группу шин, в которой количество входящих шин обеспечит адекватное представление, и после этого, когда шины достигнут своего предельного состояния, определить средний ресурс.

В этом случае возникает еще одна проблема, срок службы шин довольно большой, и может достигать нескольких лет. Поэтому для определения надежной (корректной) нормы пробега шин необходимо много времени. В этом случае задачу можно решить на основе ускоренных стендовых или эксплуатационных испытаний.

На основании вышеизложенного можно отметить:

1. В настоящее время нет методик оперативного определения и корректировки норм ресурса шин.

2. Эффективность использования автомобилей существенно зависит от наличия нормативов ресурса шин, их объективности и оперативности.

3. Для оперативного определения и корректирования этих норм предпочтительнее метод ускоренного испытания, предусматривающий специальные исследования.

1.2. Эффективность эксплуатации автомобиля

Качественно новый этап экономики – условия либерального хозяйствования продвинул проблему научно обоснованного повышения эффективности производства.

Для автомобильного транспорта данная проблема имеет важное значение, так как отрасль имеет ряд особенностей.

Эффективность эксплуатации подвижного состава автомобильного транспорта, а также производительность работы автотранспортных предприятий находятся на низком уровне. При этом расходы на выполнение всех видов автомобильных перевозок значительно высоки. Известно, что указанные расходы связаны с употреблением топливо-смазочных материалов, шин, аккумуляторных батарей и т. п. Решению повышения эффективности эксплуатации автомобилей может способствовать разработка более эффективных методов эксплуатации подвижного состава и их практическое применение, а также обоснованный выбор экологических, технико-эксплуатационных показателей, соответствующих конкретным условиям эксплуатации.

В течение всего времени нахождения в наряде автомобиль выполняет установленный пробег. При этом маршрут, на котором работает автомобиль, часто может проходить через местности, имеющие разные дорожные и природно-климатические условия. В этом

случае, в зависимости от рельефа, изменяются технико-эксплуатационные и экологические качества, а также технико-экономические показатели работы автомобиля и, как следствие, изменяется эффективность эксплуатации автомобиля.

Эффективность эксплуатации автомобиля является комплексное технико-экономическое, технико-эксплуатационное и технико-психологическое свойство и зависит от технологичности, производительности, экологических и эксплуатационных свойств автомобиля, условий эксплуатации, себестоимости перевозки и других показателей. Эксплуатационная эффективность автомобиля – это осуществление перевозок в наименьших сроках, при минимальных материальных и трудовых расходах, одновременно с безопасным и минимальным ущербом для окружающей среды.

Здесь словом «безопасным» учитывается, что независимо от трудовых и материальных затрат, для эффективности автомобиля важное значение имеет обеспечение экологической безопасности и безопасности движения. Они – основные показатели, характеризующие процесс перевозки и эффективность эксплуатации.

Роль транспортной системы возрастает в каждом экономическом регионе. Транспорт становится инфраструктурной системой, которая соединяет интересы региональной, государственной и всемирной экономики.

Особенностью развития любой транспортной системы, в том числе и автомобильного транспорта, является то, что оно не может рассматриваться изолированно. По этому здесь критерии эффективности – не только известные показатели рационального использования ресурсов. Действительно, пути повышения эффективности транспорта и его использования определяют не отдельные факторы, проявляющиеся изолированно, а комплекс взаимосвязанных требований экономического характера, которые выступают из конкретных особенностей текущего периода и перспективных целей.

В работе отмечается, что к проблемам транспорта необходим здравый, обдуманный подход, когда на первый план выдвигается не повышение рентабельности, а снижение расходности, когда транспортная сеть выполняет функции, выходящие за экономические рамки. Это в частности означает, что эффективность транспорта должна оцениваться не только сопоставлением расходов и доходов, но и учитывая «не транспортный» результат, то есть экологическую

эффективность, безопасность движения.

Современное общество характеризуется интенсивными передвижениями (процессами сообщения). С другой стороны, экономика не может существовать без обмена энергии и материала. Сегодня важное место придается информационным технологиям, которые определяют научно-технический потенциал общества, формируют новый стиль жизни. Однако для общества, все процессы движения информации по сравнению с передвижением людей и материала (товара) считаются второстепенными. Следовательно, весь транспортный комплекс, в том числе автомобильный транспорт, является производственной инфраструктурой экономики, материальной основой передвижения людей и материальных ценностей, а также общим условием производства товаров и всеобщим средством труда.

В республике быстрое развитие автотранспорта, учитывая количественные, качественные и возрастные особенности подвижного состава, требует решить экономические, экологические и социальные проблемы, обеспечивающие развитие автомобильного транспорта.

На основании вышеизложенного можно отметить, что задача экологической безопасности и эффективности эксплуатации автомобиля, с позиции удовлетворения социальных, экономических, политических, а также экологических требований общества, является актуальной проблемой.

1.3. Факторы и методы нормирования ресурса, влияющие на долговечность шин

На долговечность шин влияют многочисленные факторы. У разных авторов они по-разному объединяются в группы. Кроме того, существуют разные оценки влияния этих факторов на долговечность шин.

На ресурс шин больше всего влияют дорожные и климатические условия, скорость движения автомобиля и превышение расчетной нагрузки по массе. С этой точки зрения целесообразно дать общую характеристику условий эксплуатации республики.

Площадь территории Республики Армения составляет 29,74 тыс. км². Территория, протяженность которой с северо-запада на

юго-восток примерно 400 км, а максимальная ширина с запада на восток 200 км, на юго-востоке выступает уступом (Зангезур), самая узкая часть которого составляет всего 26 км в ширину.

Армения – горная страна горные районы которой занимают около 90 % всей территории, 42 % расположены на высоте 2000 м и более над уровнем моря. Средняя высота местности 1850 м.

Изменение основных показателей автомобильных дорог республики (уклон продольного профиля, качество дорожного покрытия, ширина дорожного покрытия, спиралевидность) является следствием того, что территория страны имеет пересеченный рельеф и дороги проходят через горные перевалы. Этими обстоятельствами обусловлено и то, что для одной и той же трассы основные показатели, характеризующие климатические условия, температура воздуха, плотность, давление, не остаются стабильными.

На равнинной территории республики уклон продольного профиля не превышает 3 %, а на горных перевалах достигает 12 %. Есть отдельные участки дороги, уклон которых составляет 22 %.

Средний уклон продольный профиля горных дорог Армении составляет 7...9 %.

Как уже отмечалось, на одной и той же дороге республики можно встретить разные климатические условия. В качестве примера рассмотрим изменение температуры воздуха на дороге Ереван-Севан. Наблюдения показывают, что например, в Ереване средняя температура июля составляет +25,6 °С, а в Севане +15,7 °С. Если принять среднюю скорость за 60 км/ч, то автомобиль понесет значительные изменения климатических условий за один час.

От состояния и качества дороги зависит скорость движения транспортного средства, а следовательно, производительность труда и безопасность движения. В связи с этим следует отметить, что длительность и толщина снежного покрова на дорогах республики в течение года не постоянны. Толщина снежного покрова в разных районах составляет от 10 до 200 см, а продолжительность неморозного периода 50...250 дней. Резко изменяются и другие показатели климата плотность воздуха, влажность, атмосферное давление, скорость ветра.

Наибольшее влияние на работу эксплуатируемого в горных условиях транспортного средства, оказывают следующие факторы и характеристики дорожно-климатических условий:

- высота местности над уровнем моря, географическая высота, следовательно, атмосферное давление, влажность воздуха;
- температура окружающей среды;
- тип, состояние, качество дорожного покрытия;
- продольные и поперечные уклоны профиля дороги, их длина;
- количество кривых участков на единицу длины дороги (спиралевидность дороги);
- радиусы криволинейных участков дороги;
- расстояние видимости и поле зрения;
- интенсивность движения, ширина проезжей части и т. д.

Наиболее заметно влияние вышеперечисленных факторов на двигатель автомобиля (системы питания, охлаждения, зажигания), трансмиссию (коробка передач, главная передача), шины, тормозную систему, рулевые механизмы и другие системы.

Имеется четыре ключевых фактора: касательная нагрузка, передаваемая через шину, изменение этой нагрузки по времени, температура и качество дорожного покрытия.

В некоторых публикациях классифицируются факторы, влияющие на долговечность шин.

Классификация, проведенная Московским автодорожным институтом, состоит из пяти основных групп факторов: техническое состояние автомобиля, организационно-технологические факторы, качество вождения автомобиля, условия эксплуатации, конструкция и технология изготовления шин. На основе априорного ранжирования определено, что наиболее значимыми считаются техническое состояние автомобиля, организационно-технологические факторы, условия эксплуатации.

На основании этих исследований была разработана другая классификация, согласно которой все факторы, влияющие на ресурс шин, сгруппированы в восемь групп (рисунок 1.2).

1. Эксплуатационные факторы (крутящий момент и тормозной момент (боковая сила и износ, вертикальная нагрузка на колесо, внутреннее давление воздуха в шинах, скорость движения, автомобиль, режим работы, интенсивность движения).

2. Техническое состояние автомобиля.

3. Организационно-технологические факторы.

4. Квалификация водителя.

5. Дорожно-климатические условия.
6. Конструкция и технология изготовления шин.
7. Конструкция автомобиля.
8. Другие факторы (езда по горячему асфальту, длительная консервация автомобиля и др.).

Ранжирование показывает, что первые пять групп факторов являются наиболее значимыми.



Рисунок 1.2 – Классификация факторов, влияющих на ресурс шин [8]

Нормы ресурса автомобильных шин необходимы для планирования спроса, разработки и оценки эффективных мер по увеличению долговечности шин.

Работы по нормированию ресурса шин проводились в основном в 70-е годы прошлого столетия. В то же время практически отсутствуют исследования, направленные на изучение характеристик эксплуатационной надежности автомобильных шин в горных условиях, в частности шин микроавтобусов, эксплуатируемых по конкретному маршруту, и определение ресурсных показателей, в частности пробега.

Пробел несколько восполняется в [2], где утверждается, что разработка с достаточной точностью нормы пробега шины конкретного автомобиля для конкретных дорожных условий является сложной практической задачей, так как в данном случае можно в полной мере учесть факторы, влияющие на долговечность шины, такие как тип покрытия, состояние и качество, рельеф местности, приспособляемость различных шин к изменению дорожных условий и т. д.

Поэтому, если пробег установлен для данной шины, то в случае изменения дорожных условий корректировка нормы распространяется на все модели шин. Однако опыт эксплуатации автотранспорта показывает, что при равномерном изменении дорожных условий разные шины изнашиваются неодинаково.

Например, шины 260-508P, которые устанавливаются на грузовых автомобилях семейства ЗИЛ и КамАЗ, имеют разную нагрузку (13 650 Н и 22 350 Н) при одинаковых дорожных условиях в зависимости от полной массы автомобилей, и по этой причине интенсивность износа шин не одинакова.

Однако норма была разработана в 2004 году с учетом качества и технологического уровня производства шин того периода, плановых показателей надежности, материалов, необходимых для изготовления шин, состояния дорог и т. д., которые в прошлом претерпели существенные изменения.

Нормы, указанные в, основаны на исследованиях, проведенных примерно 35 лет назад, и применяются к служебным транспортным средствам и мотоциклетным шинам. Нормы были установлены на основе исследований, проведенных в 1973–1975 годах. Численные значения норм определены для шин определенных типоразмеров при использовании на автомобилях определенных марок.

Корректировка норм осуществляется по территориальному признаку. В зависимости от дорожных и погодных условий территория нашей республики делится на три (грузовые – для автобусных шин) или четыре (для легковых шин) группы, для которых установлены разные стандарты.

Кроме того, корректировка нормативов ресурса предусмотрена в следующих случаях: нормы на шины легковых автомобилей снижаются на 10 % в случае постоянной работы автомобиля на горных дорогах. Стандарты шин для автобусов снижены на 15 % при эксплуатации на междугородних и международных маршрутах.

Нормы для шин грузовых автомобилей снижаются на 15 % при работах в карьерах, угольных и других шахтах, на 10 % при постоянных работах на горных дорогах, в лесохозяйствах, сооружениях, дорожном строительстве, при работах в сфере ремонта дорог, на 10 % при работе транспортного средства с прицепами или полуприцепами.

Действующие стандарты хотя и учитывают нагрузку на шины и максимальную скорость автомобиля, все же имеют определенные недостатки, в частности, нормативы не учитывают:

- состояние окружающей среды. То есть не учитывается наличие в атмосферном воздухе региона таких химических соединений, как диоксид серы (SO_2), который при взаимодействии с дождем будет выделять серную кислоту, что непременно изменит свойства протектора шины, в частности эластичность, что ускорит износ шин;

- тип перевозимого груза. Утечка груза также может увеличить износ;

- климатические условия, особенно температура и давление атмосферного воздуха.

При изучении надежности шин необходимо знать закономерности распределения их ресурса. Естественно, что этому вопросу уделялось и уделяется большое внимание. Поэтому в публикациях встречаются многочисленные исследования в данной области, в которых приводятся примеры распределения ресурсов шин (сроков эксплуатации, амортизационного пробега).

В ранее проведенных исследованиях чаще приводились данные о нормальном законе распределения ресурса шин. Автор работы [1] представил графики распределения ресурса шин различных типов транспортных средств (рисунок 1.3), где показал что для легковых автомобилей (рисунок 1.3, кривая 1) и для грузовых автомобилей (рисунок 1.3, кривая 3) ресурсы шин распределяются по нормальному закону, а для автобусных шин распределяются по закону непропорционального распределения с положительной диспропорцией (рисунок 1.3, кривая 3).

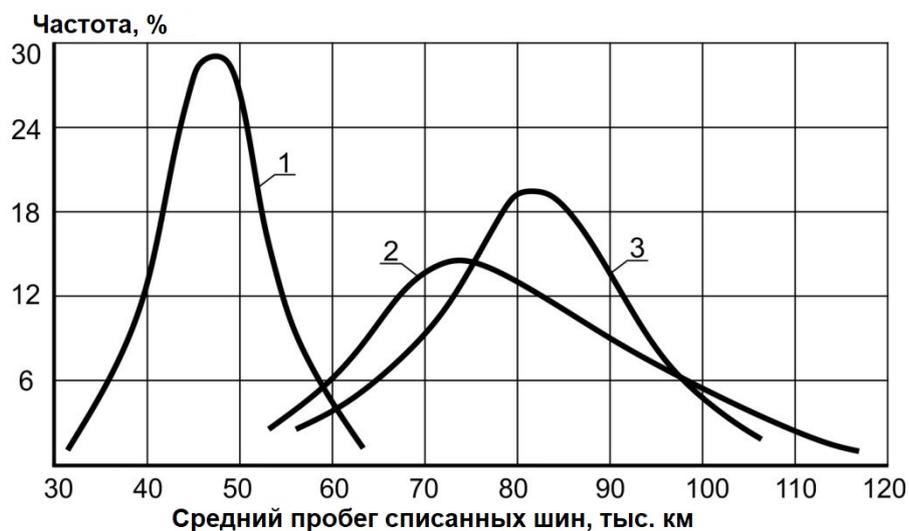


Рисунок 1.3 – Фактическое распределение среднего пробега шин:
 1 – легковые автомобили; 2 – автобусы; 3 – грузовые автомобили [2]

Таким образом, анализ результатов предыдущих исследований показывает, что для аппроксимации экспериментальных распределений наиболее часто используются нормальные логарифмические законы Вейбула-Гнеденко. Но, в то же время, непонятно, в чем обусловлено формирование распределений по тому или иному закону, какие факторы влияют на вид распределения.

Чтобы установить и скорректировать нормы ресурса, необходимо спрогнозировать долговечность шин. В таких случаях используется ряд математических методов.

Прежде всего, это разработка статистических выборок для оценки показателей долголетия, с целью приближения теоретического распределения. Для цельных вариантов можно использовать ряд программ. Для цензурированных вариантов программное обеспечение скудно. Кроме того, как правило, они обычно используют приближенные методы.

Моделирование закона распределения случайных величин реализовано практически во всех статистических пакетах, кроме узко специализированных. Набор статистических данных таких программ, функций черчения и специальных возможностей, таких как STATGRAPHICS, STATISTICA для Windows и STADIA, удовлетворяют любого пользователя. При этом наборы законов распределения, реализованных в программах, фиксируются. Нет возможности внести дополнения в первоначальный список функций распределения.

Это исключает использование пакетов при разработке оригинальных моделей закона распределения.

Кроме того, ни в одной из программ нет возможности импортировать сгруппированные варианты.

При прогнозировании часто используется анализ корреляционно-обратной связи и инструменты анализа временных рядов.

Анализ корреляционной обратной связи был выполнен в ряде программных материалов. Наиболее популярными из них являются STATGRAPHICS (версии 2...7) STATISTICA для Windows (версии 4...5), STADIA (версии 5.0, 6.00), STADIA Prof (версии 5.0, 6.0), SYSTAT 5.0.

Эти пакеты универсальны и позволяют решать множество статистических задач. Их главный недостаток – использование в однофакторном анализе обратной связи всего 4–5 типов, обычно линейной, экспоненциальной, логарифмической, гиперболической (утрированной), полуномиальной моделей. В многофакторном анализе обратной связи используется только линейная модель.

С другой стороны, предполагаемый набор статистических характеристик ограничен. В частности, ни одна из программ не учитывает среднюю ошибку аппроксимации, коэффициент эластичности и коэффициент воздействия.

Говоря о популярных программных материалах, нельзя не упомянуть об их высокой стоимости. Например, пакет SPSS стоит 4290 долларов, STADIA 6.0 Prof – 800 долларов, STATGRAPHICS Plus 7.0 – 1695 долларов, STATISTICA для Windows 5.1 – 1756 долларов, а SYSTAT 5.0 – 1100 долларов [1].

1.4. Нагрузочные режимы автомобиля в различных условиях эксплуатации

Эффективность транспортной работы зависит от массы перевозимого груза, скорости перевозки (скорость движения транспортного средства, время погрузки-разгрузки, срок нахождения груза на складе и т. д.), расходов необходимых для перевозки, экологичности автомобиля. Высокая производительность работы автомобиля будет обеспечена при соответствии нагрузочных режимов подвижного состава и условий эксплуатации.

Подвижной состав является элементом системы Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда (ВАДС) или дорожного движения, и его признаки проявляются в результате взаимодействия элементов этой системы. Следовательно, при оценке эффективности эксплуатации и качества транспортного средства необходимо учитывать, что значение конкретного эксплуатационного функционального признака зависит от тех условий, в которых проявляется данный признак, то есть от условий эксплуатации.

Факторы, характеризующие эксплуатационные условия многочисленны и многохарактерны. Они имеют большое влияние на эффективность деятельности подвижного состава, значительно изменяют производительность автомобиля, топливную экологичность, надежность и т. д.

Эти факторы классифицируются в нижеследующие группы:

1. Транспортные условия характеризуются видом груза, объемом перевозок, партией отправок, способом погрузочно-разгрузочных работ, режимами работы, расстоянием перевозки, видом маршрута и организацией перевозок, условиями хранения подвижного состава, технических обслуживаний и ремонтов. Вследствие изменения факторов, характеризующие транспортные условия, изменяются скоростные, нагрузочные и температурные режимы подвижного состава. Следовательно, транспортные условия корректируют та или иная эксплуатационная норма подвижного состава.

2. Природно-климатические условия включают следующие основные факторы: температура воздуха (низкая или высокая), дневные и годовые колебания их амплитуд, влажность воздуха, солнечное излучение, количество осадков, скорость и направленность ветра и т. д.

Атмосферное давление как фактор природно-климатических условий, также влияет на работу подвижного состава. В результате его изменения изменяется внутреннее давление шины, коэффициент избытка воздуха, сила сопротивления воздушной среды. Влияние изменения давления атмосферного воздуха особенно заметно на горных и высокогорных автодорогах.

3. Дорожные условия. Из эксплуатационных условий, наиболее важными, которые изменяются в широких пределах, считаются дорожные факторы. Для того, чтобы убедиться в их многочисленности, вспомним техническую классификацию автомобильных дорог,

согласно которой каждая из пяти категорий дорог характеризуется типом покрытия, шириной проезжей части, продольными и поперечными уклонами, радиусами кривизны и их количеством и другими характеристиками.

Дорожные условия оказывают большое влияние на надежность работы всех узлов подвижного состава. Поэтому, исходя из дорожных условий, для подвижного состава устанавливаются нормы амортизационных отчислений, расхода топлива, пробега шин. В частности, эксплуатационная норма шин грузовых автомобилей, в зависимости от группы дорог, может сократиться:

- а) для горных дорог – до 30 %;
- б) в строительных объектах – до 10 %.

Необходимо отметить, что разработка нормы достаточной точности для пробега шин, в конкретных условиях эксплуатации, довольно сложная работа, так как при этом невозможно полностью учитывать такие факторы, влияющие на долговечность автомобильной шины, как тип, состояние и качество покрытия, рельеф местности, приспособленность разных шин к изменениям дорожных условий. Следовательно, если норма пробега установлена для данной шины, то при изменении дорожных условий размер корректирования нормы распространяется на все модели шин. Но опыт эксплуатации автомобильного транспорта показывает, что при одинаковом изменении дорожных условий разные модели изнашиваются неодинаково. Например, шины 260×508R, которые предназначены для грузовых автомобилей семейства ЗиЛ и КамАЗ, при одинаковых дорожных условиях, в зависимости от полной массы автомобилей, имеют различные нагрузки (13 650Н и 22 350Н) и именно по этой причине интенсивности их изнашивания различаются.

С точки зрения расхода топлива дороги бывают:

- со сложным планом;
- дороги месторождений (тяжелые дорожные условия), полевые-предусмотренные для осуществления сельскохозяйственных работ, для перевозки лесоматериала;
- дороги, проходящие через горную местность, то есть горные дороги.

Каждое из перечисленных условий эксплуатации предъявляет к подвижному составу конкретные требования. Так, транспортными

условиями определяется необходимость специализированного автомобиля, следовательно, его конструкция, технические параметры и эксплуатационные свойства.

Дорожными условиями и, в частности, горными эксплуатационными условиями объясняется снабжение автомобиля специальными тормозными системами, устройствами, предотвращающими перерасход топлива и восстанавливающими потери мощности двигателя.

Для региона транспорт является как производственной (грузовой подвижной состав) так и социальной (пассажирский транспорт) инфраструктурой. В этом аспекте, с целью обеспечения нормальной эффективной работы транспорта в регионе, необходимо соответствие свойств транспортного средства к условиям эксплуатации.

Так как состав и количество выбросов автотранспорта также зависит от нагрузочных режимов двигателя и других механизмов, то важно знать характер этих режимов в эксплуатационных условиях Республики Армения.

Режим работы – это величина нагрузки, влияющая на деталь (давление в зоне контакта), относительная скорость передвижения трущихся поверхностей, температура деталей и смазочных материалов, а также изменение указанных параметров во времени, то есть динамичность режима.

Во время движения автомобиля его механизмы и детали находятся под влиянием внутренних и внешних усилий. Из внутренних усилий, в основном, можно отметить крутящий момент, передаваемый от двигателя к ведущим колесам при тяговом режиме и, тормозной момент, развиваемый в тормозных механизмах в тормозном режиме. В качестве внешних усилий можно отметить статические нагрузки, создаваемые при изменении передач в коробке передач и вследствие неровностей дорожного покрытия.

Особенностью нагрузки подвижного состава является то, что изменяющиеся условия и режимы при движении для подвижного состава в целом и для отдельных агрегатов и узлов предусматривают различные рабочие режимы.

Исследование рабочих режимов подвижного состава автомобильного транспорта осуществляется, определяя следующие показатели:

1. Средняя скорость движения и средняя скорость на каждой передаче;

2. Количество переключений передач на единице пути, продолжительность работы каждой передачи и пройденный путь на этой передаче;

3. Количество включений (выключений) сцепления на единице пути;

4. Количество торможений на единице пути, их продолжительность, пройденный путь при торможении (тормозной путь) и замедлении.

При разных дорожных условиях, например на равнинных и горных дорогах указанные показатели значительно отличаются друг от друга. То же самое можно сказать и для разных природно-климатических условий (например, для холодной и жаркой зон).

Результаты наших наблюдений для показателей рабочих режимов отдельных агрегатов и узлов грузового автомобиля ГАЗ-3307 с полной массой 6,8 т на перевальных (Спитакский перевал) и равнинных (дорога Спитак-Ванадзор) участках автодорог, а также на городской улице (участок ул. Эребуни г. Еревана) приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Показатели рабочих режимов агрегатов и узлов автомобиля в разных дорожных условиях (на пересчете 1 км пути)

Показатель рабочего режима агрегата	Участок дороги		
	Перевальный	Равнинный	Городская улица
Механизм сцепления: количество включений	4,6	2,7	4,1
Коробка передач: количество переключений	9,5	3,1	8,2
Тормозная система: количество торможений	3,8	1,2	3,1

Часть перевозок осуществляется плохими дорогами (грунтовое покрытие), а в отдельных случаях, например, при сельскохозяйственных перевозках, даже в условиях бездорожья. При этом скоростные возможности подвижного состава используются не полностью. С другой стороны, данные таблицы 1.2. свидетельствуют также, что как на горных дорогах, так и в городских условиях наблюдаются снижения скоростных возможностей. Исследования показа-

ли, что в горных условиях эксплуатации, по сравнению с равнинной местностью, средняя скорость подвижного состава снижается на 40...50 %.

В горных условиях сохранение продолжительности работы промежуточных передач (что имело место в равнинных условиях) требует повышения мощности двигателя или передаточного числа трансмиссии. Но повышение мощности двигателя приводит к изменению конструкции трансмиссии, так как изменяется нагрузочный режим последнего. При увеличении числа передач трансмиссии снижается максимальная скорость подвижного состава. Следовательно, за счет снижения производительности снижается эффективность автомобиля, и с другой стороны, в горных условиях возрастают силы сопротивления движению, из-за которых происходят дополнительные потери мощности двигателя. Указанные потери способствуют снижению уровня эффективности эксплуатации, в частности – экологической эффективности.

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

На основании приведенного выше краткого анализа проведенных исследований по нормированию ресурса и для увеличения долговечности шин можно сделать вывод:

1. Исследования по разработке методов оперативного определения и корректировки норм ресурса с целью полного использования ресурса шин, снижения затрат, связанных с их эксплуатацией, считаются актуальной проблемой и требуют безотлагательного решения.

2. На долговечность шин влияет ряд факторов. Эти факторы разными авторами классифицируются по-разному, единого способа оценки влияния факторов эксплуатации на ресурс шин нет.

3. Ни один из существующих пакетов прикладных программ не отвечает полностью требованиям прогнозирования срока службы шин.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА РЕСУРС ШИН

2.1. Общая методика исследования

В монографии разработана общая методика исследования, в методологической основе которой лежит системный подход. Суть последнего заключается в наблюдении объектов как систем. Соответственно, на первом этапе определяется объект исследования, обосновывается объективность и определяется цель исследования (рисунок 2.1).

В качестве объекта исследования выбран процесс формирования ресурса шин в конкретных условиях эксплуатации. Средний ресурс складывается из суммы отдельных освоений (ресурсов отдельных шин). В процессе эксплуатации шины изнашиваются (достигают точки невозврата) в различные моменты времени. После износа очередной шины средний ресурс изменяется, то есть формируется его следующее значение. Соответственно изменяется состояние системы, состоящее из множества шин.

Целевую функцию работы в общем виде можно представить следующим образом:

$$P_{\text{ш}} = N_{\text{ш}} C_{\text{ш}} \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

где $P_{\text{ш}}$ – сумма, затраченная на шины, $C_{\text{ш}}$ – эксплуатационные расходы на одну шину, $N_{\text{ш}}$ – количество шин, необходимых автопарку.

$$N_{\text{ш}} = L_{\text{общ}} L_{\text{н}}, \quad (2.2)$$

где $L_{\text{общ}}$ – общий пробег всех шин данной модели в расчетный период, $L_{\text{н}}$ – норма пробега шин.

Из (2.1) и (2.2) имеем:

$$P_{ш} = \frac{L_{общ}}{L_{н}} C_{ш} \rightarrow \min. \quad (2.3)$$

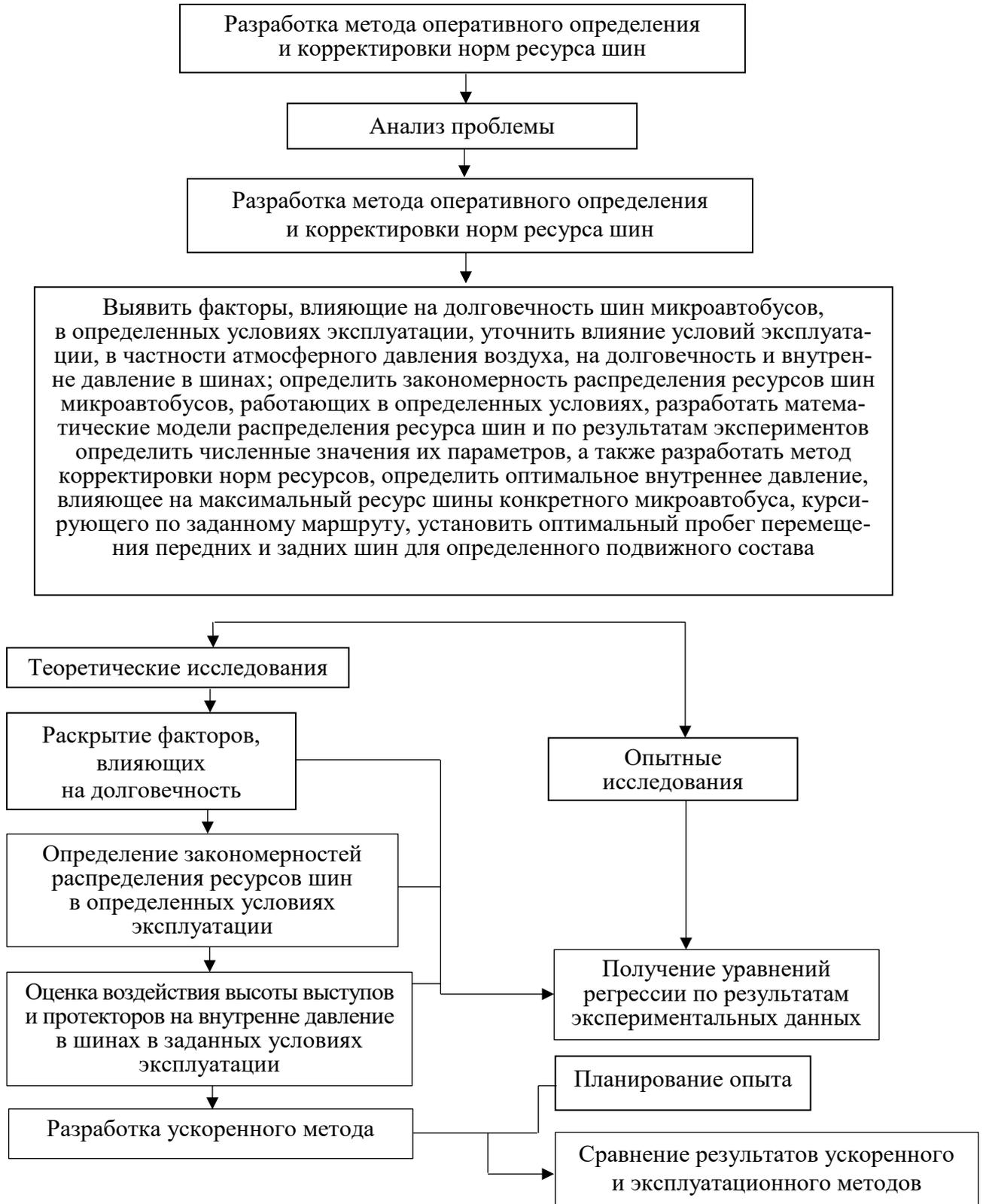


Рисунок 2.1 – Схема общей методики исследования

Из (2.3) видно, что чем выше норма пробега шин, тем меньше затраты на шины. На эту сумму, как мы уже упоминали, влияет долговечность шины. Для ее определения, прежде всего, на основе априорных методов выделяют факторы, влияющие на долговечность шин. После чего на основе научно-исследовательских исследований определяется зависимость ресурса шин от этих факторов в заданных условиях эксплуатации.

На следующем этапе теоретических исследований оценивается влияние различных факторов на ресурс шин.

Необходимо также проводить экспериментальные исследования.

Научно-опытные исследования включают в себя разработку методики эксперимента, ее реализацию, разработку и анализ результатов, обосновывают результаты проведенных теоретических исследований.

На основании проведенных исследований разрабатываются методы определения и корректировки норм ресурса шин.

Оценивается их точность, определяются области применения.

2.2. Общие понятия, термины и определения, используемые в процессе изменения состояния шин

Длительность процесса производства продукта (в нашем примере продолжительность работы шины) называется объемом труда (наработка). Для автомобильных шин, как правило, наработка определяется пробегом, то есть км, а для некоторых специальных автомобилей – в моточасах.

Ресурс – это объем труда до конечного состояния продукта [1]. Следует отметить, что определение, имеет более широкий смысл. Ресурс – это наработка, в течение которого показатель качества изменяется от начального значения до конечного или номинального показателя.

Под «состоянием» здесь подразумевается техническое состояние. Техническое состояние шин определяют по остаточной высоте защитного слоя протектора, состоянию каркаса, состоянию боковины, наличию порезов, отслоений и т. д. Кроме того, к техническому состоянию шин относится и давление в них. Учитывая, что этот параметр может быть восстановлен при техническом обслуживании до нормативного уровня, а его изменение не считается необратимым,

некоторые авторы в ближайшем будущем не обсуждают эту причину с точки зрения прекращения эксплуатации или истощения ресурса.

Однако при определенных условиях эксплуатации, особенно в горной местности, внутреннее давление в шинах изменяется из-за изменения атмосферного давления и температуры воздуха. В связи с этим мы сочли целесообразным учесть в показатель внутреннего давления в шине.

Предельно допустимые значения параметров технического состояния регламентируются требованиями нормативно-технических документов. Прежде всего, это касается минимальной высоты покрытия (протектора) (2 мм для автобусов, 1,6 мм для легковых автомобилей, 1 мм для грузовых автомобилей).

Процессы изменения качества автомобилей делятся на непрерывные и дискретные. Непрерывные процессы характеризуются способностью последовательно переходить от одного качества к другому через ряд промежуточных состояний, а дискретные процессы характеризуются быстрой сменой показателей качества. С точки зрения надежности шин износ является непрерывным процессом, а дискретным является разрушение каркаса, порезы, расслоение защитного слоя и так далее.

На рисунке 2.2 представлена схема состояния шин. $S_j^{(1)}$ рабочее (исправное) состояние. Другие ($S_j^{(2)} \dots S_j^{(k)}$) не рабочие состояния, т. е. то есть ситуации отказа, достигнутые по разным причинам. Индексы состояний: $2 \dots n$ – соответствуют причинам отказов

($S_j^{(1)} \dots S_j^{(i)}$) в результате перехода, где $i = 2 \dots n$, реализуется предельное состояние шин в соответствующий момент наработки L_j . Момент наработки означает реализацию ресурса.

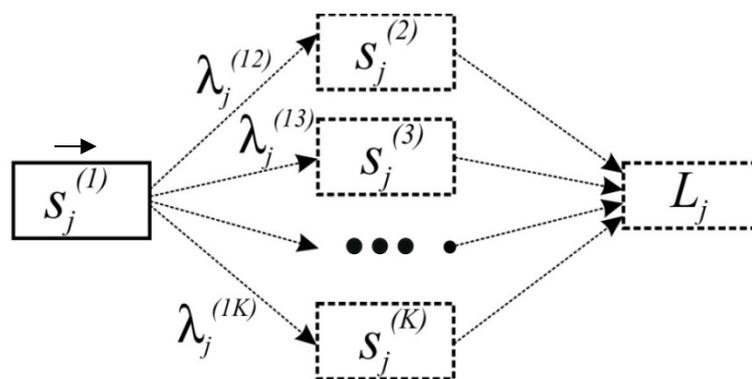


Рисунок 2.2 – Состояния шин

Каждому переходу соответствует интенсивность перехода $\lambda_j^{(li)}$. Для каждой j шины возможен только один переход.

В случае непрерывного процесса скорость изменения качества характеризуется интенсивностью процесса, которая принимается как дифференцированный показатель качества.

Дифференцированные показатели характеризуют интенсивность изменения качества в моментобъема работ L .

$$y_i = \frac{dY_i}{dL}, \quad (2.4)$$

Результат процесса (достигнутый уровень качества) характеризуется интегральным показателем. Интегральные показатели оценивают достигнутый уровень специфичности.

$$Y_i = Y + \int_0^{L_i} y \times dL, \quad (2.5)$$

Дифференциальным показателем для шин является интенсивность износа, а интегральным показателем – износ.

При обсуждении процесса разработки ресурса нельзя не использовать термины «вероятность отказа», «вероятность безотказной работы». При расчете этих показателей обычно исходят из дифференциальной функции $f(L)$, которая также является дифференциальным показателем качества.

Вероятность безотказной (бесперебойной) работы и вероятность отказа в свою очередь являются интегральными показателями процесса становления ресурса шины [12].

$$R(L) = \int_L^{\infty} f(L) \times dL; \quad (2.6)$$

$$F(L) = \int_{-\infty}^L f(L) \times dL. \quad (2.7)$$

Понятно, что решение задач, поставленных в работе, обусловлено решением ресурсных методов прогнозирования. Для этого используются обработки цензурированных выборок или как их еще называют, незавершенные эксперименты.

Цензурирование это событие, которое приводит к прекращению испытаний или эксплуатационных проверок объекта до наступления отказа исследуемого характера (конечного состояния).

Элементами цензурированной выборки являются значения наработки до отказа и наработки до цензурирования.

2.3. Идентификация и локализация исследуемой системы

Опыт эксплуатации автомобильного транспорта показывает, что существенное влияние на ресурс шин оказывают условия эксплуатации. Более того, в результате такого воздействия часть шин может внезапно (сразу) выйти из строя или что тоже самое, может прийти в состояние неработоспособности (неисправность). Остальные могут находиться в аварийном состоянии из-за постепенного износа. Поэтому для определения ресурса целесообразно иметь систему, объединяющую условия эксплуатации, нерабораспособности и исправности шин. В таком случае, вводя условия эксплуатации, на выходе мы получим средний ресурс шины. Структура системы представлена на рисунке 2.3.

Система, исследуемая в работе Р. Б. Бакеева [1], классифицируется по следующим признакам:

- по происхождению: технические, искусственные;
- по положению системы в иерархии: подсистема, система высокого уровня – автомобиль с его состояниями;
- по связям с внешней средой – открытая система, то есть в крайнем случае с одним входом и выходом;
- по мере изменения состояния – мобильная, так как состояния с течением времени изменяется;
- по характеру действия – стохастическая, так как возможные варианты действий можно предполагать только с определенной вероятностью;
- по типу элементов (с точки зрения их специфичности) – конкретные (элементы – реальные объекты);
- по характеру зависимости выхода – последовательная (секвентивная) (выход зависит от входа и других величин);
- по степени сложности строения –простая;
- по типу элементов – система типа «процесс» (действиями перехода из одного состояния в другое являются элементы).

В данной работе под локализацией подразумевается выбор элементов, которые важны для наблюдения закономерностей дея-

тельности системы. Методически это приводит к оценке значимости тех факторов условий эксплуатации, которые существенно влияют на долговечность шин.

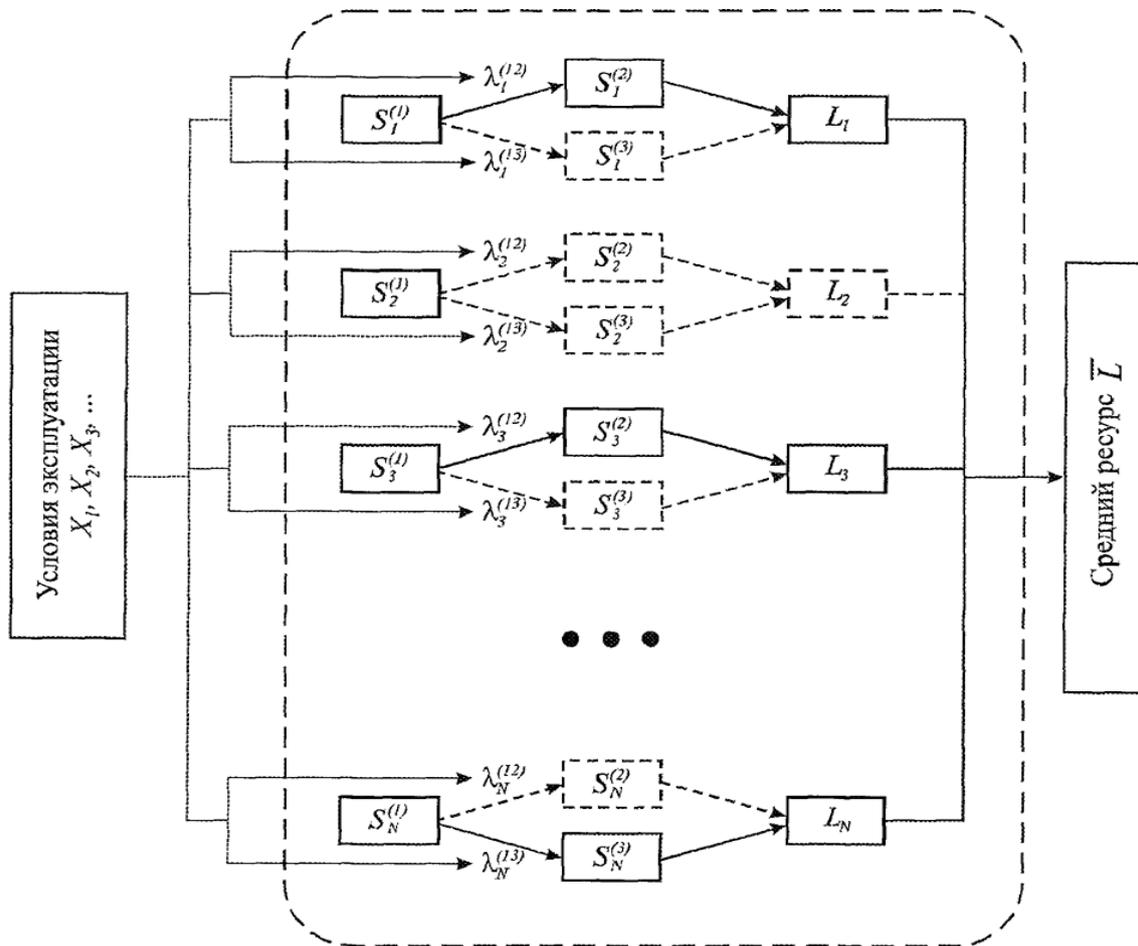


Рисунок 2.3 – Структура исследуемой системы

На долговечность (ресурс) автомобильных шин влияет ряд факторов, которые можно сгруппировать так, как показано на рисунке 2.4 [7].

На рисунке 2.4 представлены следующие факторы по группам:

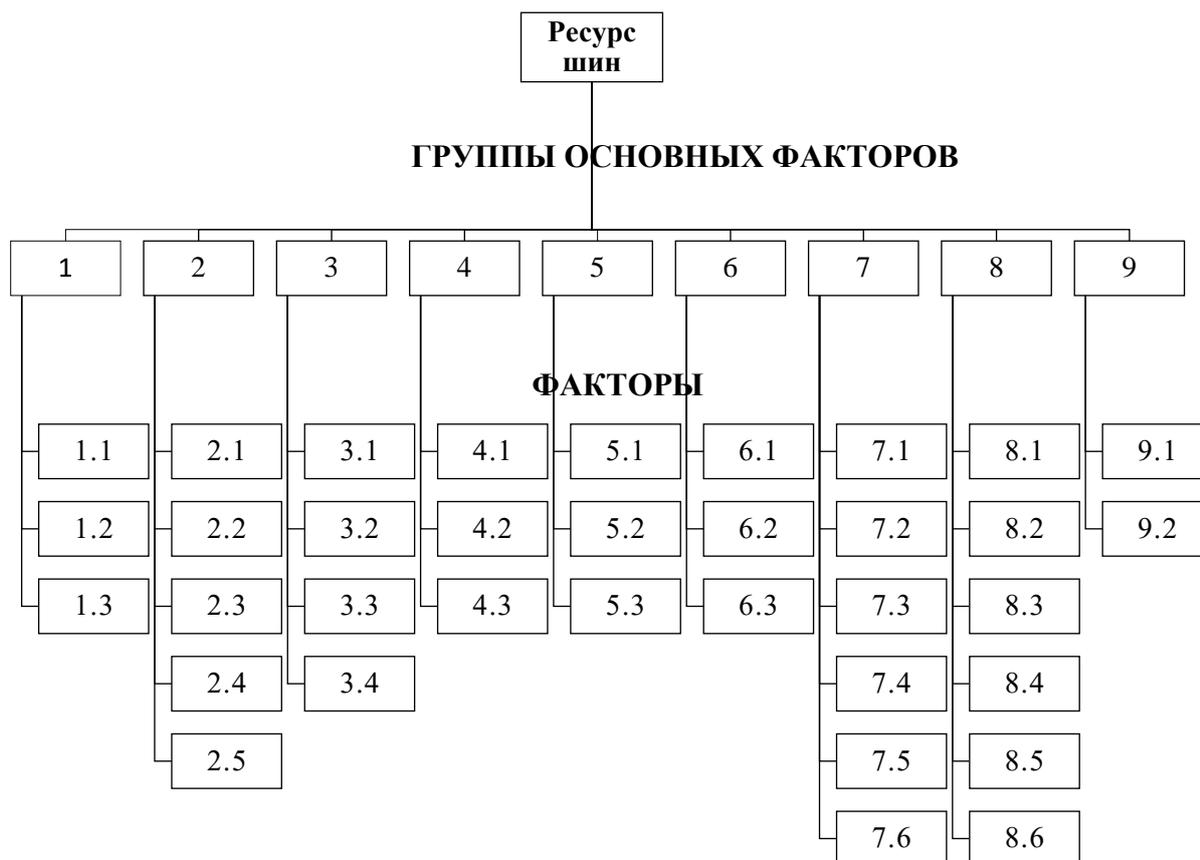


Рисунок 2.4 – Факторы, влияющие на ресурс шин и их основные группы:

1 – группа факторов, характеризующих конструкцию автомобиля (конструкция автомобиля); 2 – техническое состояние автомобиля; 3 – дорожные условия; 4 – климатические условия; 5 – режим работы автомобиля; 6 – качество вождения автомобиля; 7 – группа организационно-технологических факторов; 8 – технология конструкции и производства шин; 9 – группа прочих факторов

1.1 – распределение всей массы автомобиля по осям (нагрузка на шину);

1.2 – конструкция рулевого управления;

1.3 – конструкция ходовой части автомобиля;

2.1 – состояние механизма рулевого управления;

2.2 – состояние ходовой части;

2.3 – внутреннее давление шин;

2.4 – дисбаланс шин;

2.5 – состояние тормозной системы /механизмов/;

3.1 – состояние и тип дорожного покрытия;

3.2 – уклон поперечного профиля;

- 3.3 – уклон продольного профиля;
- 3.4 – спиралевидность дороги;
- 4.1 – температура атмосферного воздуха;
- 4.2 – давление атмосферного воздуха,
- 4.3 – наличие снега, льда, влаги;
- 5.1 – скорость движения автомобиля;
- 5.2 – нормальная нагрузка;
- 5.3 – момент, примененный к колесу;
- 6.1 – характер вождения;
- 6.2 – квалификация водителя;
- 6.3 – стаж водителя;
- 7.1 – учет пробега;
- 7.2 – условия хранения шин;
- 7.3 – соблюдение правил ухода за шинами;
- 7.4 – использование надбавки к зарплате в случае ресурсосбережения;
- 7.5 – вычет с зарплаты в случае не сохранения ресурса;
- 7.6 – соответствие шины и автомобиля;
- 8.1 – вид протектора шины;
- 8.2 – качество изготовления шины;
- 8.3 – конструкция каркаса шины;
- 8.4 – высота рисунка шины;
- 8.5 – насыщенность (плотность) выступов шины;
- 8.6 – радиус шины;
- 9.1 – погодные условия;
- 9.2 – регулярная проверка высоты протектора и т. д.

Оценка влияния каждого из этих факторов на ресурс шин имеет большое теоретическое и практическое значение. Решение задачи может быть достигнуто методом априорного дифференцирования (ранжированием). Для этого были отобраны 10 экспертов, являющихся работниками вузов и автотранспортных организаций.

Дифференцирование производилось следующим образом:

Учитывая, имеющиеся 35 факторов, влияние каждого из них оценивается до 35 баллов. При этом чем выше оценочный балл, тем меньше воздействие данного фактора на ресурс шин.

Суть метода заключается в следующем.

1. Определить сумму рангов в каждой строке.
2. Найдите среднее арифметическое значение данной суммы.

3. Определить среднюю арифметическую разность заданной суммы (Δi).

4. Определить среднеквадратичное отклонение (Δi^2).

5. Определить сумму среднеквадратичных отклонений (S).

$$s = \sum_{i=1}^k \Delta i^2, \quad (2.8)$$

где k – количество факторов (в данном случае $k = 35$)

6. Определить степень совпадения мнений экспертов:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)}, \quad (2.9)$$

где m – число экспертов, которые являются работниками ВУЗ-ов и эксплуатирующих организаций (в нашем примере $m = 10$):

W коэффициент может быть от $0 \dots 1$, если он значительно отличается от 0 , то можно принять, что во мнениях экспертов есть определенный консенсус. В случае степени свободы $K-1$ консенсус неслучайной экспертной гипотезы оценивается с помощью критерия Пирсона. Факторы, не превышающие среднюю сумму ранжирования, имеют существенное значение (значимые факторы). Затем строим соответствующие гистограммы.

В таблице 2.1. приведены результаты ранжирования.

Анализ выполненных расчетов (таблица 2.1) и построенной гистограммы (рисунок 2.5) показывает, что наибольшее влияние на ресурс шины оказывают следующие факторы:

- 1) внутреннее давление в шинах;
- 2) качество изготовления шин;
- 3) высота протектора шины;
- 4) конструкция рамы шины;
- 5) нагрузка шины;
- 6) пробег шин;
- 7) полная масса автомобиля и ее распределение по осям;
- 8) дисбаланс шин,
- 9) наличие снега, льда, влаги;
- 10) насыщенность (плотность) выступов шин.

Путем расчетов получили $W = 0,76$. Это значение показывает, что в мнениях экспертов есть некоторый консенсус, а значение кри-

тест Пирсона $\chi^2 = 12,6$ свидетельствует, что этот консенсус не случайный, так как это значение больше чем приведенная в таблице вероятность.

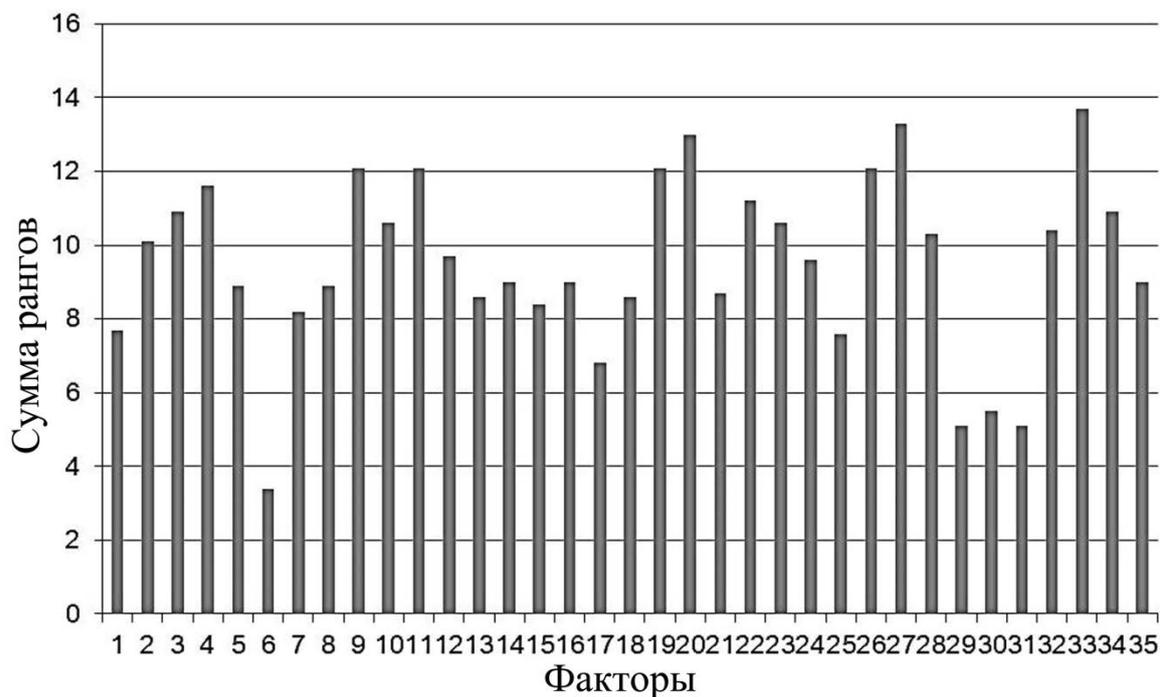


Рисунок 2.5 – Гистограмма звязи между средними значениями ранговой суммы и факторов

Таблица 2.1 – Результаты экспертных оценок

№	Факторы по группам	Эксперты и выставленные им баллы										Среднее значение	Отклонение от среднего арифметического (Δi)	Среднеквадратичное отклонение (Δi^2)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				Сумма ранжирования
1. Группа факторов, характеризующих строение автомобиля (конструкция автомобиля)															
1.1	Общая масса автомобиля и ее распределение по осям	5	8	6	10	7	9	11	6	7	8	77	7,7	69,3	4802,49
1.2	Конструкция рулевого управления	6	12	14	12	9	11	15	6	6	10	101	10,1	90,9	8262,81
1.3	Характеристика ходовой части	10	12	10	13	15	11	12	7	8	11	109	10,9	98,1	9623,61
2. Техническое состояние автомобиля															
2.1	Состояние механизма рулевого управления	10	12	13	11	12	10	12	12	11	13	116	11,6	104,4	10 899,36
2.2	Состояние ходовой части	10	9	8	9	10	11	8	9	7	8	89	8,9	80,1	6416,01
2.3	Внутреннее давление в шинах	1	5	2	1	5	6	7	5	1	1	34	3,4	30,6	936,36
2.4	Дисбаланс шин	6	10	7	8	9	11	10	8	7	6	82	8,2	73,8	5446,44
2.5	Состояние тормозной системы (механизмов)	8	10	11	12	12	10	9	10	8	14	104	10,4	93,6	8760,96
3. Дорожные условия															
3.1	Вид и состояние дорожного покрытия	10	12	11	13	12	11	10	15	14	13	121	12,1	108,9	11 859,21
3.2	Уклон продольного профиля	10	11	12	12	10	9	8	11	13	10	106	10,6	95,4	9101,16
3.3	Уклон поперечного профиля	10	15	16	13	12	10	11	12	12	10	121	12,1	108,9	11 859,21
3.4	Спиралевидность дороги	12	11	10	8	9	8	10	11	9	9	97	9,7	87,3	7621,29

4.	Климатические условия															
4.1.	Температура атмосферного воздуха	8	9	7	8	10	11	8	9	7	9	86	8,6	77,4	5990,76	
4.2.	Давление атмосферного воздуха	12	9	8	8	9	9	7	11	8	9	90	9	81	6561	
4.3.	Наличие снега, льда, влаги	10	9	8	7	6	9	10	9	8	8	84	8,4	75,6	5715,36	
5.	Режим работы автомобиля															
5.1.	Скорость движения автомобиля	12	10	9	7	8	7	9	8	9	11	90	9	81	6561	
5.2.	Нормальная нагрузка	5	8	7	9	10	6	8	5	5	5	68	6,8	61,2	3745,44	
5.3.	Момент применяется к шине	6	10	7	7	8	9	10	6	11	12	86	8,6	77,4	5990,76	
6.	Качество управления автомобилем															
6.1.	Характер вождения	12	13	14	15	11	10	12	11	11	12	121	12,1	108,9	11 859,21	
6.2.	Квалификация водителя	12	15	12	11	13	14	15	13	13	12	130	13	117	13 689	
6.3.	Опыт водителя	8	9	10	8	7	9	12	7	6	11	87	8,7	78,3	6130,89	
7.	Группа организационно-технологических факторов															
7.1.	Учет пробега	10	108	11	16	11	15	10	11	8	10	112	11,2	100	10 160,64	
7.2.	Условия хранения шин	10	10	10	11	12	9	8	13	14	11	106	10,6	8	9101,16	
7.3.	Соблюдение правил ухода за шинами	10	7	12	11	9	8	11	10	7	8	96	9,6	95,4	7464,96	
7.4.	Использование надбавки в случае ресурсосбережения	6	10	8	5	9	10	8	7	8	8	76	7,6	86,4	4678,56	
7.5.	Вычет в случае не сохранения ресурса	15	14	12	11	13	13	12	11	10	14	121	12,1	68,4	11 859,21	
7.6.	Соответствие шины и автомобиля	11		13	12	14	11	15	12	15	16	133	13,3	119,7	14 328,09	

8.	Конструкция шин и технология изготовления															
8.1	Вид протектора шины	10	11	11	12	14	11	10	9	8	8	8	10,3	92,7	8593,29	
8.2	Качество изготовления шины	4	6	6	6	7	4	5	6	4	4	4	5,1	45,9	2106,81	
8.3	Конструкция каркаса шины	4	7	7	5	6	7	4	5	6	6	6	5,5	49,5	2450,25	
8.4	высота рисунка протектора	3	7	7	3	7	5	6	4	7	5	5	5,1	45,9	2106,81	
8.5	Насыщенность (плотность) выступов шин	9	11	11	8	11	7	8	10	7	8	8	8,9	80,1	6416,01	
8.6	Радиус шины	12	15	15	15	16	16	14	12	12	12	12	13,7	123,3	15 202,89	
9.	Группа других факторов															
9.1	Погодные условия	8	11	7	9	11	7	8	11	10	8	90	9		6561	

С целью классификации факторов, влияющих на ресурс, их делят на две группы соответственно роли ресурсообразования.

Первая группа факторов определяет номинальное качество шин, включая конструкцию, материалы и технологию изготовления. Эти факторы в дальнейшем обсуждаться не будут, так как нормы для конкретных моделей шин устанавливаются конкретными производителями.

Вторая группа факторов изменяет номинальное качество шин в процессе эксплуатации. Вторая группа делится на восемь подгрупп:

1. X_1 – конструкция шины:
 - ✓ $X_{1.1}$ – полная масса автомобиля и распределение по осям;
 - ✓ $X_{1.2}$ – конструкция рулевого управления;
 - ✓ $X_{1.3}$ – конструкция ходовой части.
2. X_2 – техническое состояние автомобиля:
 - ✓ $X_{2.1}$ – состояние ходовой части;
 - ✓ $X_{2.2}$ – состояние механизма рулевого управления;
 - ✓ $X_{2.3}$ – состояние тормозной системы;
 - ✓ $X_{2.4}$ – состояние кузова.
3. X_3 – дорожные условия:
 - ✓ $X_{3.2}$ – продольный и поперечный профиль;
 - ✓ $X_{3.3}$ – план дороги.
4. X_4 – режим работы:
 - ✓ $X_{4.1}$ – момент приложенный к колесу;
 - ✓ $X_{4.2}$ – нормальная нагрузка;
 - ✓ $X_{4.3}$ – скорость движения.
5. X_5 – климатические условия:
 - ✓ $X_{5.1}$ – температура окружающей среды;
 - ✓ $X_{5.2}$ – наличие на дороге снега, влаги и льда.
6. X_6 – качества управления автомобилем:
 - ✓ $X_{6.1}$ – характер вождения;
 - ✓ $X_{6.2}$ – класс водителя;
 - ✓ $X_{6.3}$ – рабочий стаж водителя.
7. X_7 – организационно-технологические факторы:
 - ✓ $X_{7.1}$ – учет пробега, премирование за перепробег шин и удержание за недопробег.
8. X_8 – другие факторы.

В соответствии с данной классификацией оценивалась степень влияния факторов на долговечность шин (таблица 2.2).

Для этой цели были использованы результаты ранее проведенных исследований. Степень влияния определялась с использованием методологии пошагового анализа [9]. Соответственно количество рангов было принято равным количеству изучаемых факторов, т. е. восьми. Согласно расчетам, получилось:

$$W = \frac{12 \times 1124,5}{7^2(8^3 - 8) - 162} = 0,56. \quad (2.10)$$

Построенная по данным таблицы 2.2 диаграмма рангов, представлена на рисунке 2.6, где пунктирной линией показана средняя сумма рангов.

На основе анализа данных рисунка 2.6 и таблицы 2.2 можно отметить, что более важен фактор «конструкция автомобиля», тем менее значимы дорожные условия (уровень). Однако следует иметь в виду, что значимыми считаются те факторы, сумма рангов которых не превышает среднюю сумму.

Таблица 2.2 – Исходная таблица рангового анализа

№ п/п	Эксплуатационные факторы								Показатель равных рангов T_j
	Конструкция автомобиля	Техническое состояние автомобиля	Дорожные условия	Режим работы	Климатические условия	Качество вождения	Организационные и технологические факторы	Прочие факторы	
1	6,5	6,5	1	4	2	3	6,5	6,5	60
2	7,5	3	1	4	7,5	2	5	6	6
3	6	2	1	7	3	4	5	8	0
4	7	5	1	3	2	4	7	7	24
5	6	3	2	5	1	4	7,5	7,5	6
6	6,5	3	6,5	2	6,5	1	4	6,5	60
7	7,5	2	1	6	3	4	5	7,5	6
8	47	24,5	13,5	31	25	22	40	49	162
9	15,5	-7	-18	-0,5	-6,5	-9,5	8,5	17,5	31,5
d^2 – квадрат отклонений	240,3	49	324	0,25	42,25	90,25	72,25	306,6	1124,5

Таким образом, наиболее значимыми факторами являются:

- дорожные условия;
- качество вождения;
- климатические условия;
- техническое состояние автомобиля;
- режим работы.

С другой стороны можно отметить, что:

1. Качество вождения и техническое состояние автомобиля – управляемые факторы, поэтому при нормировании их учитывать не нужно.

2. Климатические условия эксплуатации автомобилей одного предприятия одинаковы для всех автомобилей, но меняются в течение года.

Таблица 2.3 – Результаты рангового анализа

Наименование факторов	Обозначение	Сумма рангов	Распределение по уровню значимости
Конструкция автомобиля	X_1	47,0	7
Техническое состояние автомобиля	X_2	24,5	4
Дорожные условия	X_3	13,5	1
Режим работы	X_4	31,0	5
Климатические условия	X_5	25,0	3
Качество вождения автомобиля	X_6	22,0	2
Организационные и технологические факторы	X_7	40,0	6
Прочие факторы	X_8	49,0	8
Средняя сумма рангов – 31,5			

Рисунок 2.6 – Диаграмма рангов факторов, влияющих на ресурс [9]

Исследованиями [1] установлено, что ресурс элементов автомобилей зависит от сезона начала эксплуатации в том случае, когда срок реализации ресурса существенно меньше года. Для шин грузовых автомобилей срок эксплуатации шин существенно больше года и достигает нескольких лет.

Следовательно при нормировании ресурса шины климатические условия следует учитывать только в том случае, когда рассматривается обширный регион с различными климатическими зонами (например, в масштабах Армении в целом). В обсуждаемом случае, когда рассматриваются методы установления норм для конкретных предприятий, климатические условия учитывать не нужно.

Следовательно, можно отметить, что при определении норм нужно рассматривать дорожные условия и режим работы.

Дорожные условия характеризуются типом дорожного покрытия и рельефом местности.

Режим работы определяется режимом движения (скорость, ускорение, замедление) и от грузоподъемности.

2.4. Закономерности теоретического распределения ресурса шин

Как отмечалось выше, случай 1 практически не реализуется для автомобильных шин. Поэтому, зная вообще, что такое распределение описывается экспоненциальным законом, перейдем к рассмотрению других закономерностей.

Для данной системы второе предельное распределение – случай 2. Известно, что такие распределения описываются нормальным законом. Математически это можно представить следующим образом:

$$f(L) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\bar{L}-L)^2}{2\sigma_L^2}}. \quad (2.11)$$

Вариация случайной величины в данном случае не превышает 0,33.

При анализе для случая 3 необходимо выяснить, какова вариация случайной величины при данных условиях.

Исходя из того, что для предельного распределения случая 1 коэффициент вариации $V = 1$, а для второго предельного распределения (случай 2) – $V \leq 0,33$, можно предположить, что, коэффициент вариации для рассматриваемого распределения будет находиться в пределах $V \leq 0,5$, поскольку в комбинации, какую составляет данное распределение, превалирует распределение с небольшим коэффициентом вариации. Следовательно для этого случая выдвинем гипотезу о возможности описания таких распределений функцией логарифмически нормального закона

$$f(L) = \frac{1}{\sigma_{\ln} \sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{(\ln \bar{L} - \ln L)^2}{2\sigma_{\ln}^2}}. \quad (2.12)$$

Рассматривая случай 4, отметим, что в данном случае на протекание процесса перехода шин из работоспособного состояния в состояние отказа влияет сравнительно небольшое число факторов, при этом один из факторов (предположим, разрушение каркаса) является превалирующим. Или, рассуждая иначе, с позиций смещения распределений случая 1 и случая 2, придем к выводу, что при условии доминирования распределения 1 мы получим асимметричное распределение с положительной асимметрией и коэффициентом вариации существенно более 0,33.

Анализ известных математических моделей показывает, что в наибольшей степени данному случаю соответствует закон Вейбулла

$$f(L) = \frac{\alpha}{\beta} (L - L_H)^{\alpha-1} \times e^{-\frac{(L-L_H)^\alpha}{\beta}}. \quad (2.13)$$

График функции распределения закона Вейбулла представлен на рисунке 2.7.

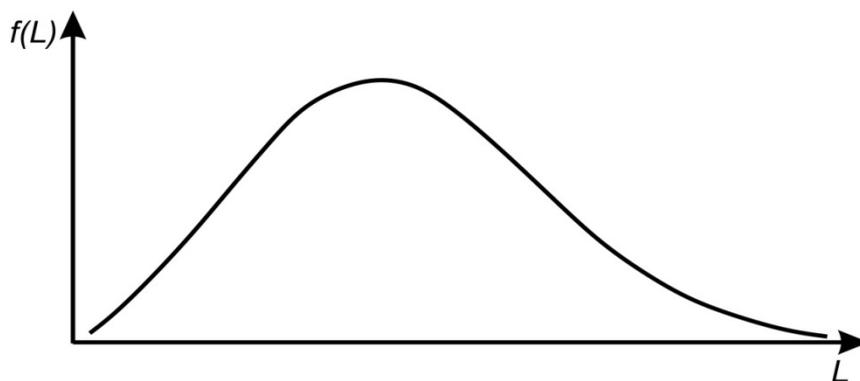


Рисунок 2.7 – Графический вид дифференциальной функции закона распределения Вейбулла

Таким образом, адекватность выдвинутых гипотез о виде математических моделей закономерностей распределения ресурсов шин необходимо проверить на основе эксперимента.

2.5. Особенности работы шин в условиях горных регионов

Анализ данных ДТП показывает, что из-за технических неисправностей шин совершаются почти 10 % аварий от всех происшествий. В этом аспекте задача обеспечения шин в исправном состоянии выдвигается на первый план. Кроме этого в себестоимости перевозок расходы связанные с шинами значительно большие. Следовательно важное значение приобретает исследование влияния эксплуатационных факторов на изнашиваемость шин.

Износ шин увеличивается, если имеются несоответствия между эксплуатационными условиями и факторами, влияющими на изнашивание шин.

Из факторов, влияющих на пробег шины, рассмотрим ее внутреннее давление, скорость, температуру и нагруженность транспортного средства.

Современные автотранспортные средства развивают такие скорости, для которых большое значение имеет каждое изменение внутреннего давления шины.

Исследования показывают, что при увеличении внутреннего давления на 1 % пробег шины сокращается на 2...5 %, а при сниже-

нии давления на 1 % от 0,25...6,0 %. Но, когда внутренне давление снижается на 50 %, то пробег сокращается на 20 %.

Необходимо отметить, что на практике допускается изменение внутреннего давления шины на $\pm 0,02$ МПа (для шин грузовых автомобилей) и $\pm 0,01$ МПа (для шин легковых автомобилей).

Для автомобилей работающих в горных условиях вопрос изменения внутреннего давления усугубляется.

В горных условиях изменение высоты местности над уровнем моря вызывает изменение внутреннего давления воздуха в шине [4–9]. В результате этого, изменяется сила сопротивления качению, увеличивается износ шин, изменяется расход топлива. Изменение внутреннего давления, на наш взгляд, имеет большой практический интерес, т.к. перепад атмосферного давления в горных условиях, в зависимости от высоты проложения автомобильных дорог (примерно 0...4000 м), согласно Международному стандарту атмосферы (МСА), составляет приблизительно 0,04 МПа [8].

Ниже проведен расчет внутреннего давления в шине в зависимости от внешнего давления, температуры и упругих характеристик материала шин.

Для оценки изменения внутреннего давления шины вследствие изменения атмосферного давления можно использовать уравнение (2.14):

$$P_{в0} = P_{ш0} + P_{н0}, \quad (2.14)$$

где $P_{ш0}$ – давление, создаваемое резиной (материалом) шины, вследствие упругости материала, на высоте $Н_0$; $P_{в0}$ – внутреннее давление шины на высоте $Н_0$; $P_{н0}$ – атмосферное давление на высоте $Н_0$.

Принимая, что модуль упругости материала шин равен E , а средняя толщина резины – d , силу, приходящуюся на единицу длины разрезов шины в сечении, перпендикулярной к оси шины (αr) и в сечении, проходящей через ось шины ($\alpha r k$), можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{r_k} &= \frac{F}{2\pi r_k} = \frac{\Delta_1 r_k}{r_k} E_{r_k} d \\ \alpha_r &= \frac{F}{2\pi r_k} = \frac{\Delta_1 r_k}{r_k} E_{r_k} d \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

где $\Delta_1 r_k = r_{k1} - r_{k0}$ – изменение радиуса качения; $\Delta_1 r = r_1 - r_0$ – изменение радиуса профиля; r_{k0} и r_0 – радиусы качения и профиля не накачанной воздухом шины (т. е. когда внутреннее давление равно атмосферному давлению) на Но; r_{k1} и r_1 – радиусы качения и профиля шины (когда в шине накачана некоторая масса воздуха) на высоте Но; E_{r_k} и E_r – модули упругости соответствующие двум направлениям растяжения (рисунок 2.8).

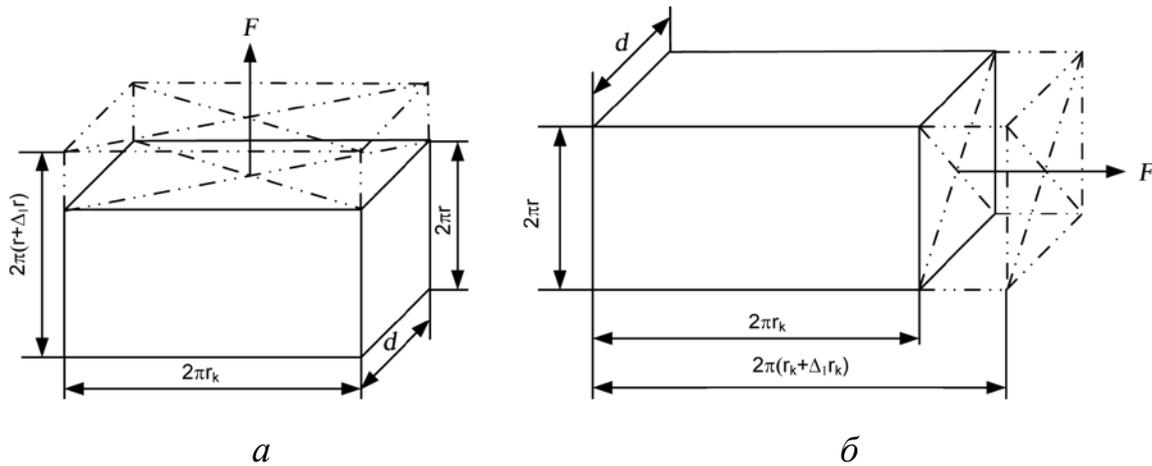


Рисунок 2.8 – Расчетная схема коэффициента поверхностного натяжения:
a – изменяется только радиус r ; *б* – изменяется только радиус r_k

Для упрощения расчетов принимаем, что изменения указанных радиусов одинаковы ($\Delta_1 r = \Delta_1 r_k$).

Давления создаваемые из-за кривизны шины по радиусам r и r_k будут:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{шр}} &= \frac{\Delta_1 r}{r^2} E_r d \\ P_{\text{шк}} &= \frac{\Delta_1 r_k}{r_k^2} E_{r_k} d \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

В уравнениях (3.32) величины $\Delta_1 r$ и $\Delta_1 r_k$ характеризуют приращения соответствующих радиусов без учета влияния изменения высоты и температуры воздуха.

Повышение температуры самой шины вследствие ее работы не учитываем, принимая, что в разных высотных условиях приращения температур шины одинаковы. С увеличением высоты уменьшается как атмосферное давление, так и температура окружающего воздуха. Это приводит к уменьшению температуры шины.

Из (2.14) получаем:

$$\Delta P_B = \Delta P_{ш} + \Delta P_H. \quad (2.17)$$

С другой стороны, согласно уравнению состояния газа, имеем:

$$\Delta P_B = -\frac{m}{M} \frac{R_T T}{V^2} \Delta V + \frac{m}{M} \frac{R_T \Delta T}{V}, \quad (2.18)$$

где R_T – газовая универсальная константа ($R_T = 8,3$ Дж/кМ); T – температура воздуха в шине, К; V – внутренний объем шины, м³, на высоте Н0 ($V = 2\pi^2 r_k r^2$).

Имея в виду уравнения (2.16–2.18) и учитывая, что $\Delta V = 2\pi^2 r(2r_k + r)\Delta r$, получим следующую систему.

$$\left. \begin{aligned} & \left[-\frac{m}{M} \frac{R_T T}{V^2} 2\pi^2 r(2r_k + r) - d \left(\frac{E_r}{r^2} + \frac{E_{r_k}}{r_k^2} \right) \right] \Delta r = \Delta P_H - \frac{m}{MV} R_T \Delta T \\ & \Delta V = 2\pi^2 r(2r_k + r)\Delta r \end{aligned} \right\}. \quad (2.19)$$

Из этой системы получаем:

$$\Delta r = \frac{\Delta P_H - \frac{m R_T \Delta T}{MV}}{-\frac{m R_T T}{M V^2} 2\pi^2 r(2r_k + r) - d \left(\frac{E_r}{r^2} + \frac{E_{r_k}}{r_k^2} \right)}. \quad (2.20)$$

Так как $\frac{m}{M} R_T T_0 = P_{B0} V$, то $\frac{m}{M} R_T = P_{B0} V / T_0$, и окончательно получим:

$$\Delta P_B = \left[-\frac{P_{B0} T}{T_0 V} 2\pi^2 r(2r_k + r) \right] \frac{\Delta P_H - \frac{P_{B0} \Delta T}{T_0}}{-\frac{P_{B0} T}{T_0 V} 2\pi^2 r(2r_k + r) - d \left(\frac{E_r}{r^2} + \frac{E_{r_k}}{r_k^2} \right)} + \frac{P_{B0} \Delta T}{T_0}. \quad (2.21)$$

В этой формуле известны $P_{B0}, d, r_k, r, \Delta T, T_0, \Delta P_H$ (они измеряются непосредственно), что касается модулей E_r и E_{r_k} , то они измеряются экспериментально. Имея эти данные, определяем ΔP_B и по формуле $\Delta P_B = P_B - P_{B0}$, определяем P_B .

Выражение (2.21) удобно представить в виде:

$$\Delta P_B = A \Delta P_H - (A-1) \frac{P_{B_0}}{T_0} \Delta T, \quad (2.22)$$

где

$$A = \frac{-\frac{P_{B_0} T}{T_0 V} 2\pi^2 r (2r_k + r)}{-\frac{P_{B_0} T}{T_0 V} 2\pi^2 r (2r_k + r) - d \left(\frac{E_r}{r^2} + \frac{E_{r_k}}{r_k^2} \right)}.$$

На основании теоретических расчетов (по формуле 2.21) на рисунке 2.9 приведен график изменения внутреннего давления в зависимости от высоты и температуры местности. График построен для шины 185-14, для следующих параметров: $P_{H_0} = 0,09 \times 10^5$ Па, $T_{H_0} = 281,5$ °K, $r = 0,074$ м, $r_k = 0,32$ м, $d = 0,015$ м, $V = 0,034$ м³, $E_r = E_{r_k} = 240 \times 10^5$ Па, $P_{B_0} = 1,2 \times 10^5$ Па. Значения T и P_H определены по Международному Стандарту Атмосферы (МСА).

График показывает, что с увеличением высоты и уменьшением температуры воздуха, т. е. с увеличением ΔP_H и ΔT уменьшается внутреннее давление шины.

Анализ формулы (2.21) показывает, что в зависимости ΔP_H и ΔT давление ΔP_B и может быть как положительным, так и отрицательным, то есть, давление ΔP_B может быть больше P_{B_0} или быть меньшим.

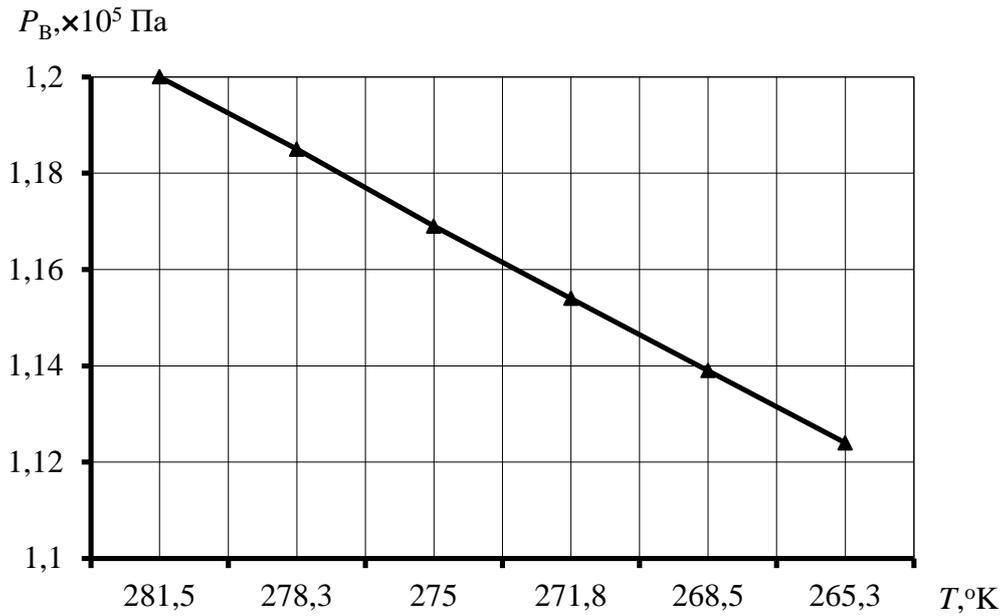


Рисунок 2.9 – Зависимость РВ от температуры воздуха и атмосферного давления

Интересно узнать при каких изменениях температуры и давления атмосферного воздуха внутреннее давление шины остается постоянным. Вопрос выяснен графиком, представленным на рисунок 2.10.

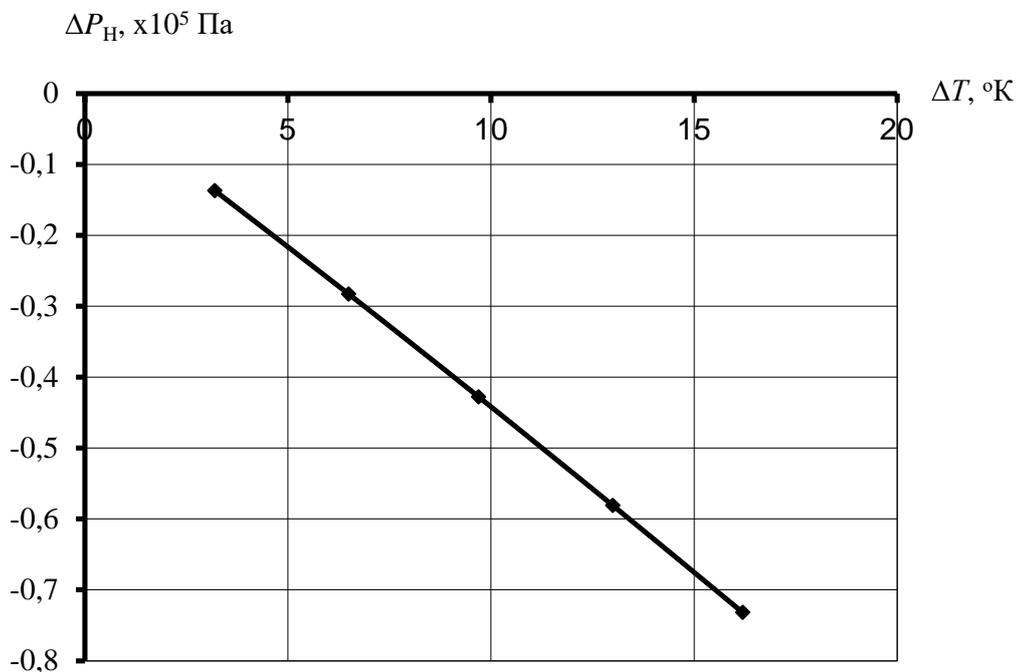


Рисунок 2.10 – Условия, обеспечивающие постоянство внутреннего давления шины

При построении графика принято, что высота местности соответствует атмосферному давлению, определяемому по МСА.

Анализ графика показывает, что при изменении высоты местности в пределах 1000...3000 м, когда $\Delta P_H = 0,202 \times 10^5$ Па, а ΔT от 8.50 до $-4,50$ °С, внутреннее давление шины понижается от 1.2×10^5 Па до 1.122×10^5 Па.

2.6. Изменения коэффициента сопротивления качению шин в горных регионах

По своему влиянию на тягово-скоростные свойства автомобиля снижение мощности двигателя из-за высотного фактора равноценно соответствующему увеличению коэффициента сопротивления движению, поэтому его величину можно представить в виде трех слагаемых:

$$K_D = \psi_0 + \Delta\psi_R + \Delta\psi_D, \quad (2.23)$$

где ψ_0 – коэффициент сопротивления движению обусловленный макро- и микро-профилем опорной поверхности; $\Delta\psi_R$ – прирост коэффициента сопротивления движению от криволинейности траектории; $\Delta\psi_D$ – условное приращение его, равное по величине снижению динамического фактора автомобиля от высоты местности над уровнем моря.

В горных условиях эксплуатации снижение скорости движения автомобиля осуществляется по следующим основным причинам:

- увеличение общего (суммарного) дорожного сопротивления движению;
- ухудшение тягово-динамической характеристики автомобиля.

Снижение скорости влечет за собой снижение количества фактического груза находящегося в кузове автомобиля и его производительности. Этим явлениям одновременно сопутствует увеличение расхода топлива, что приводит к изменению экологической безопасности подвижного состава.

Формула (2.23) показывает, что если в равнинной местности, где высота близка к уровню моря, суммарное дорожное сопротивление движению составляет ψ_0 , то в горных условиях оно возрастает и достигает до K_D . С другой стороны, в горных условиях снижению скорости движения подвижного состава способствуют следующие обстоятельства:

1. По мере увеличения высоты, если снижается внутреннее давление шины, конечно, увеличивается коэффициент f и сила сопротивления качению Pf . Одновременно, по мере снижения плотности воздуха сила сопротивления воздушной среды уменьшается. Но это снижение происходит медленнее, чем снижение динамического фактора автомобиля;

2. С целью снижения энергонагруженности тормозных систем и обеспечения безопасности движения, на спусках, водители пользуются низшими передачами. Хотя, при малых скоростях не высока и сила Pf , однако, увеличение коэффициента сопротивления качению шин в горных условиях заметно при всех передачах. В этом можно убедиться простейшими расчетами. Так, при изменении скорости от 20 до 100 км/ч (5 раз), коэффициент f изменяется на 1,47 раза, а при изменении высоты местности от 1000 м до 2000 м (2 раза) внутреннее давление шины изменяется приблизительно на $0,04 \times 10^5$ Па (1.1 раза).

Испытания, проведенные нами, показали, что при изменении внутреннего давления шины от 0.21 до 0.20 МПа (на 5 %) коэффициент f изменяется в пределах 0.0137...0.0156 (увеличивается на 13,8 %). В результате, увеличивается расход топлива. Таким образом, при отмеченных двух обстоятельствах коэффициент f увеличивается. Следовательно, в формуле (2.21) можно добавить еще одно слагаемое:

$$K'_d = \psi_0 + \Delta\psi_R + \Delta\psi_d + \Delta\psi_B, \quad (2.24)$$

где $\Delta\psi_B$ – изменение коэффициента сопротивления качению шины в результате изменения внутреннего давления.

То есть, расход топлива увеличивается также по той причине, что суммарное дорожное сопротивление в горных условиях увеличивается от ψ_0 до K'_d .

На первый взгляд кажется, что, так как в горных условиях скорость движения снижается из-за нескольких причин, то уменьшается и сила PW , в результате сокращается расход топлива. Но вспомним, что на расход топлива скорость влияет через PW и удельный расход g_e . Кроме этого, скорость непосредственно влияет на производительность и, если эксплуатационные условия позволяют, то выгоднее двигаться с высокими скоростями. При этом увели-

чивается расход топлива. Таким образом, можно сказать, что экологическая безопасность автомобиля зависит от сил сопротивления качению шин и сопротивления воздушной среды.

2.7. Методы определения и корректирования нормативов ресурса шин

Очевидно, что за основу разработки методов оперативного определения и корректирования нормативов ресурса шин необходимо взять способы прогнозирования надежности на основе незавершенных испытаний. Иначе говоря, необходимо обрабатывать цензурированные выборки.

Для корректного прогнозирования долговечности при обработке цензурированных выборок необходимо, чтобы число отказавших шин составляло не менее 50 % [10]. Таким образом, на раннем этапе эксплуатации невозможно оценить долговечность шин с использованием традиционных методов прогнозирования.

Поэтому необходимо на раннем этапе использовать другие, пусть менее точные, методы. Это, в основном, методы ускоренных испытаний.

Для определения нормативов в основном пользуются расчетно-экспериментальными методами (рисунок 2.11).

Экспериментальный метод, в свою очередь, делится на лабораторную и производственную группы. В первом случае норма устанавливается на основании опытов, проведенных в лабораторных условиях, во втором на основании наблюдений, сделанных при эксплуатации нормируемых шин.

На основании изложенного можно сделать вывод, что в условиях быстрой смены серии моделей шин, их нормы целесообразно определять методом оперативной нормировки, используя результаты незавершенных испытаний.

Очевидно, что на самом раннем этапе норму можно определить только по прототипу, методом аналогий. Для этого выбирают шину, близкую по конструкции и технологии изготовления, и на уровне ее ресурса устанавливают норму пробега. На практике обычно так и есть.



Рисунок 2.11 – Методы оперативного определения и корректирования норм пробега шин

Как известно, закон распределения связывает значение случайной величины и соответствующую ей вероятность.

Предположим что:

1. Закон распределения наработок шин до предельного состояния $f(L)$ известен;
2. Вариация наработок на отказ V известна;
3. Нарботки шин разных автомобилей растут во времени с одинаковой интенсивностью, то есть

$$\frac{dl_1}{d\tau_1} = \frac{dl_2}{d\tau_2} = \dots = \frac{dl_N}{d\tau_N}. \quad (2.25)$$

В этом случае l вероятность отказа шин к наработке составит:

$$F_1 = \int_{-\infty}^{l=l_1} f(L) dl. \quad (2.26)$$

При изменении наработки изменяется вероятность отказа (рисунок 2.17). Чем больше наработка, тем выше F_1 .

Если предположить, что вероятность безотказной работы равна доле отказавших шин

$$\Delta i = \frac{mi}{N} = F_i \quad (2.27)$$

то появляется возможность оценить среднюю наработку на отказ. Для этого отметим:

$$\beta_{Fi} = \frac{l_i}{L}, \quad (2.28)$$

где β_{Fi} – эта наработка в долях средней наработки на отказ, соответствующая вероятности отказа F_i , L – средняя наработка на отказ.

Перейдем к нормированному распределению. Выразим отклонение от математического ожидания в долях среднего квадратического отклонения:

$$Z_i = \frac{l_i - \bar{L}}{\sigma_L}. \quad (2.29)$$

Для перехода к относительным величинам произведем преобразование:

$$Z_i = \frac{l_i - \bar{L}}{\sigma_L}. \quad (2.30)$$

где V – коэффициент вариации.

Из последнего выражения получим:

$$\beta_{Fi} = 1 - Z_i V. \quad (2.31)$$

Вероятность отказа можно определить по следующей формуле:

$$F(L = l_i) = \int_{-\infty}^{l_i} f(L) dL. \quad (2.32)$$

Через нормированную функцию нормального распределения отказа рассчитывается следующим образом:

$$F_i = 1 - \Phi(Z_i). \quad (2.33)$$

Зная наработку можно оценить средний ресурс шин:

$$\bar{L} = \frac{l_i}{\beta_{Fi}}. \quad (2.34)$$

Таким образом, исходя из фактической наработки, можно определить реализуемую вероятность безотказной работы. Для практического использования этого метода необходимо определить значение β (таблица 2.4) или составить номограмму (рисунок 2.11).

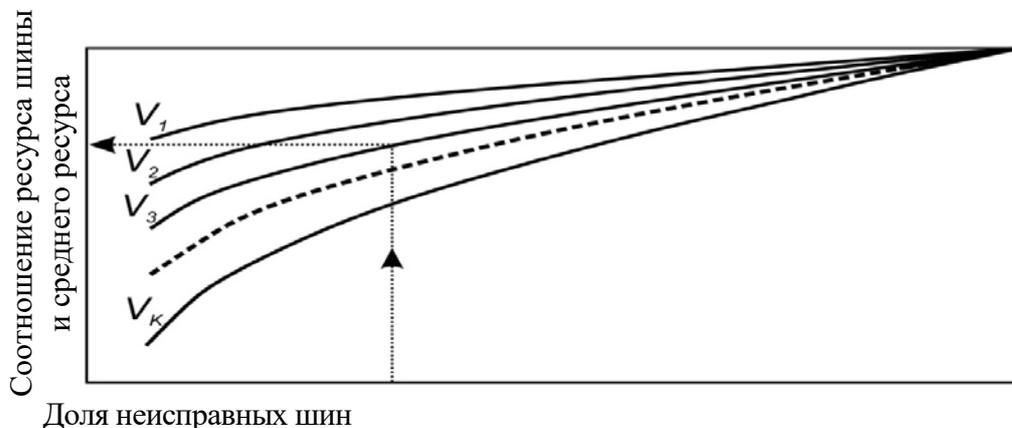


Рисунок 2.12 – Номограмма для определения соотношения наработки и среднего ресурса шин [2]

Таблица 2.4 – Изменение вероятности бесперебойной работы в зависимости от β

Доля неисправных шин	Значения β при разных V				
	V_1	V_2	V_3	...	V_k
Δ_1	β_{11}	β_{12}	β_{13}	...	β_{1k}
Δ_2	β_{21}	β_{22}	β_{23}	...	β_{2k}
Δ_3	β_{31}	β_{32}	β_{33}	...	β_{3k}
...
Δ_h	β_{h1}	β_{h2}	β_{h3}	...	β_{hk}

2.8. Метод ускоренных ресурсных испытаний шин

Известно различные методы оперативного определения ресурса автомобильных шин (рисунок 2.13) [1]:

- по методу аналогий (по прототипу);
- метод, основанный на обработке обсуждаемой (цензурированной) выборки;
- метод, основанный на анализе результатов незавершенных испытаний с использованием вероятностных таблиц;
- использование метода наименьших квадратов, на основе анализа результатов незавершенных испытаний;
- метод ускоренного тестирования.

В ходе эксплуатационных испытаний установлен контроль за работой шин, кроме того:

- шины сгруппированы по выполненному пробегу в следующем диапазоне: группа I: 0–20 000 км (16 шин), группа II: 20–40 000 км (52 шины) и группа III: 40–60 000 км (44 шины);
- пробег шин, внутреннее давление, масса измерялась после каждых 2000 км пробега;
- сгруппированные шины имели следующие значения давления 2.8, 3.0 и 3.2×10^5 ПА.

Количество шин по группам приведены в таблице 2.5. Ускоренные испытания проводились на стенде. Были протестированы абсолютно новые шины. Суть метода ускоренного тестирования заключается в следующем (таблица 2.5):

Таблица 2.5 – Количество шин по группам

Пробег шины, тыс. км	Давление ($\times 10^5$ ПА) и количество, шт.		
	2.8	3.0	3.2
0–20	4	6	6
20–40	20	16	16
40–60	12	20	12

Принцип ускоренных испытаний с целью определения нормы пробега должен обеспечивать максимально возможное сокращение длительности испытаний. В этом случае должны быть получены описательные отрицания нормальных условий испытаний, если таковые имеются [11].

В основе используемый нами метода ускоренного тестирования лежат испытания, проводимые на стенде. Суть ускоренных испытаний заключается в сокращении рабочих циклов шины.

Для определения пробега шины за рабочий цикл можно принять время эксплуатации шины. В ходе эксплуатационных испытаний микроавтобусы проехали 61 000 км за 1016 ч.

Ускоренные испытания проводились для двух Radial шин марки 215/75R16С.

Испытываемые шины с соответствующим колесом устанавливались на стенд СТWIST. Стенд обеспечивал нагрузку 1250 кг на шину, затем включали стенд, запускали вращение испытуемых шин. Коэффициент ускорения опытов определялся по следующей формуле.

$$K = (M(C_{NN})) / (M(\ddot{C}_{NN})),$$

где M – математическое ожидание C_{NN} срок эксплуатации объекта N , согласно нормальным испытаниям, \ddot{C}_{NN} срок эксплуатации объекта N , согласно ускоренным испытаниям.

В нашем случае размерность сроков C_{NN} и \ddot{C}_{NN} принимаем за час. Как отмечалось, предварительными исследованиями установили, что пробег шин 215/75R16С на трассе Ванадзор-Ереван-Ванадзор примерно составил 61 000 км. Расчеты показывают, что микроавтобусы, работающие на данном маршруте в случае эксплуатационных испытаний, этот пробег проходят за 1016 ч, а на стенде этот же путь проходят за 336 ч, следовательно коэффициент ускорения будет $K = 1016/336 = 3$.



Рисунок 2.13 – Методы оперативного определения и корректирования нормативов ресурса шин

Следует отметить, что в целях защиты шины от перегрева работу стенда периодически останавливали, поддерживая общее время работы стенда на уровне 336 ч. Время работы стенда составляло 16 часов в сутки. Причем отключение стенда и переход в работу осу-

ществлялся в соответствии с режимом, предусмотренным системой автоматического управления. Анализ данных таблицы показывает, что результаты эксплуатационных стендовых испытаний практически совпадают, погрешность в среднем составляет 5 %.

Отметим, что результаты эксплуатационных испытаний в таблице 3.14 даны для 16 шин.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. При определении ресурса шины, в отличие от факторов «дорожные условия» и «режим эксплуатации», определяемых ранжированием на основе известной классификации, необходимо учитывать пробег шины и внутреннее давление.

2. На основе теоретических исследований разработана математическая модель, устанавливающая зависимость между атмосферным давлением и температурой воздуха и радиусом профиля шины. По полученному значению радиуса определяется внутренний объем шины и внутреннее давление на заданной высоте местности над уровнем моря.

Выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на ресурс шин. Это внутреннее давление в шинах, качество изготовления шины, высота протектора шины, конструкция каркаса шины, нагрузка на шину, пробег шины, полная масса автомобиля и его распределение по осям, дисбаланс шин, наличие снега, льда, влажности, протектор насыщенность (плотность) выступов протектора шины. При этом, в случае оценки по 35-балльной системе фактор, оказывающий наибольшее влияние на ресурс, внутреннее давление в шинах, оценивалось в среднем на 34 балла.

3. Разработан метод определения ресурса шин на основе анализа результатов ускоренных испытаний. В отличие от известных подходов к определению ресурса, метод ускоренных испытаний рекомендуется использовать в реальных условиях эксплуатации, при которых контролируемый пробег шины будет частью ресурса, а не пробегом, необходимым для полной реализации ресурса.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Экспериментальная оценка влияния атмосферного давления воздуха на внутреннее давление в шинах

Во второй главе теоретические исследования коррелировали между внутренним давлением в шинах и атмосферным давлением воздуха и температурой (параграф 2.5). Описание экспериментальных исследований в этом направлении и результаты приведены ниже, а схема эксперимента и некоторые необходимые элементы показаны на рисунке 3.1.

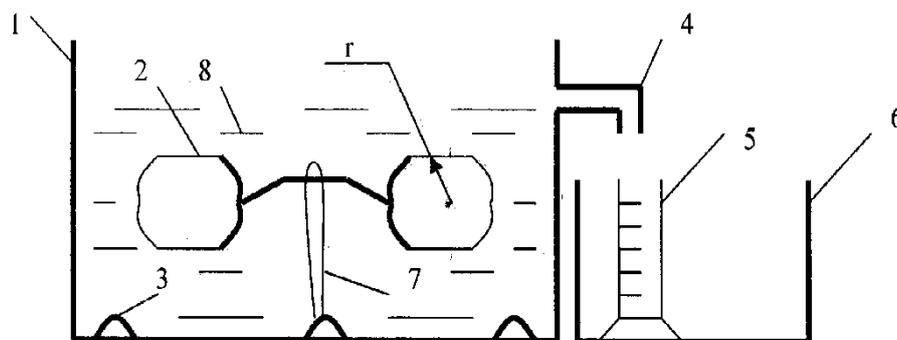


Рисунок 3.1 – Схема определения объема шин:

1 – бак; 2 – шина; 3 – крюк крепежный; 4 – кран; 5 – мензура; 6 – водосборник;
7 – провод; 8 – вода

Проведем опыт в следующей последовательности: вода должна быть залита в бак до тех пор, пока уровень воды не сравняется с уровнем крана. При прекращении подачи воды измеряют внутреннее давление колеса, затем его опускают в бак, определяют объем воды вытесненной из колеса. Точно так же определяет объем обода.

Искомым объемом шины будет разница между объемом шины и обода. Зная объемом шины под давлением и подставив полученный результат в формулу $V = 2\pi^2 r_k r_0^2$ определим радиус профиля шины.

В ходе эксперимента использовались измерительные приборы – мензур, манометр, термометр, барометр. Опыты проводились для шины 215/75R16С, данные которой приведены в таблице 3.1.

По результатам опытов (таблица 3.2) определяя объем шины (при разных давлениях) помещаем его в формулу $V = 2\pi^2 r_k r_0^2$ вычисляем радиус r профиля.

В этой формуле радиус качения рассчитывается по формуле $r_k = 1,02r_D$, где r_D – динамический радиус шины, определяемый по (3.1).

$$r_D = 0,5d + \Delta\lambda B = 33 \text{ мм}, \quad (3.1)$$

где d – диаметр колеса, м, $\Delta = H / B$, где H и B – соответствующая высота и ширины профиля шины соответственно, а λ -коэффициент нагрузки профиля шины (вертикальный), учитывающий радиальную деформацию (мы приняли $\lambda = 0,85$).

В Ереване и Ванадзоре были проведены эксперименты, целью которых было уточнение, что в Ванадзоре, атмосферное давление и температура которого отличается от таких же показателей атмосферного воздуха Еревана, как изменится внутреннее давление в шинах. Результаты этого эксперимента приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.1 – Конструктивные параметры шины 215/75R16С

Параметры Марка шины	Ширина профиля B , мм	Высота профиля H , мм	$\Delta = H/B$	Коэффициент радиального изменения, λ	Диаметр колеса d , мм
215/75R16С	215	161	0,7	0,85	406,4

Таблица 3.2 – Результаты экспериментальных решений производной средней толщины материала шины и модуля Юнга (шина 215/75R16С, количество 3, объем $V_0 = 49,58$ л)

Место эксперимента	Данные места эксперимента			Внутренне давление шины $\times 10^5$ Па			Объем шины V , м ³			Радиус профиля шины r , м			aE
	Высота H , м	Температура воздуха, °К	Давление атмосферного воздуха $\times 10^5$ Па	P_{B1}	P_{B2}	P_{B3}	V_1	V_2	V_3	r_1	r_2	r_3	$\times 10^5$ Па
Ереван	1000	297	0,92	2,8	3,0	3,2	0,0497	0,04978	0,04984	0,08648	0,08655	0,08660	28,35

Таблица 3.3 – Изменение внутреннего давления шины 215/75R16С, в зависимости от температуры и атмосферного давления воздуха

Место опыта и высота от уровня моря	Параметры атмосферного воздуха		Внутренне давление шины $\times 10^5$ Па		
	Давление $\times 10^5$ Па	Температура, °К	$P_{В1}$	$P_{В2}$	$P_{В3}$
Ереван $H = 1000$ м	0,93	299	2,8	3,0	3,2
Ванадзор $H = 1500$ м	0,88	294	2,76	2,94	3,1

Таблица 3.4 – Влияние давления и температуры МСА на ВДШ

Высота местности H , м	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
Давление МСА, $P_H \times 10^5$ Па	1,01	0,95	0,90	0,85	0,79	0,75	0,70	0,66
Температура МСА, T_H , К ⁰	288,0	284,2	281,5	278,3	275,0	271,8	268,5	265,3
215/75R16С	r , М	0,4735	0,4735	0,4735	0,4735	0,4735	0,4734	0,4734
	$P_{ВH} \times 10^5$ Па	3,300	3,250	3,200	3,180	3,166	3,155	3,090

Теоретическое важное значение имеет влияние на внутреннее давление в шинах параметров международного стандарта атмосферы (МСА). С этой целью в таблице 3.4 приведены необходимые расчетные данные, которые показывают изменения внутреннего давления в шинах (ВДШ) в зависимости от температуры и давления атмосферного воздуха.

Для того чтобы получить более наглядное представление о результатах расчетов и испытаний, на рисунке 3.2 представлены соответствующие графики по результатам вышеуказанного исследования. На рисунке 3.3 показан один из эпизодов этих экспериментов.

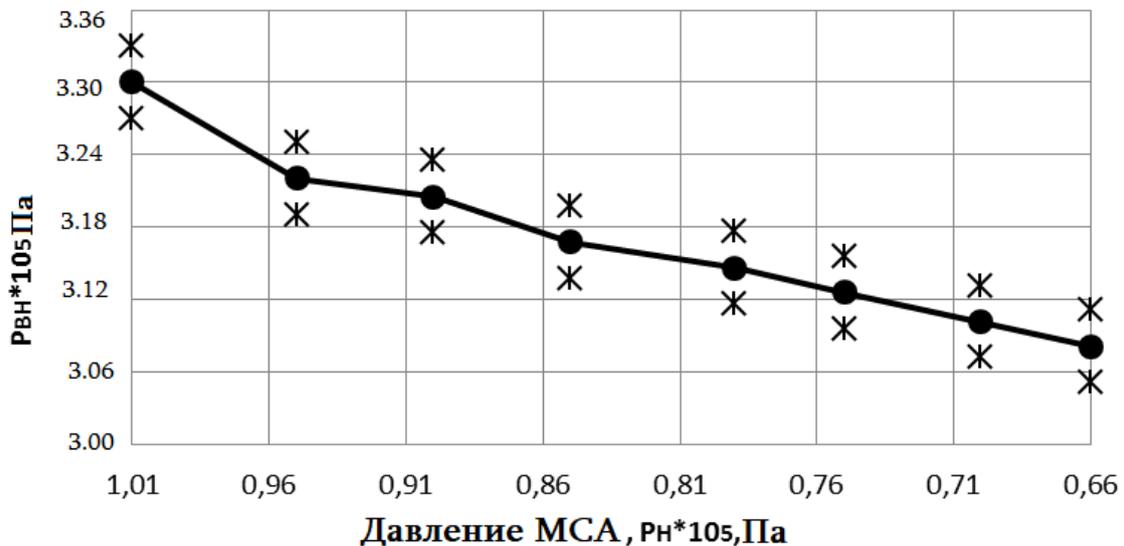
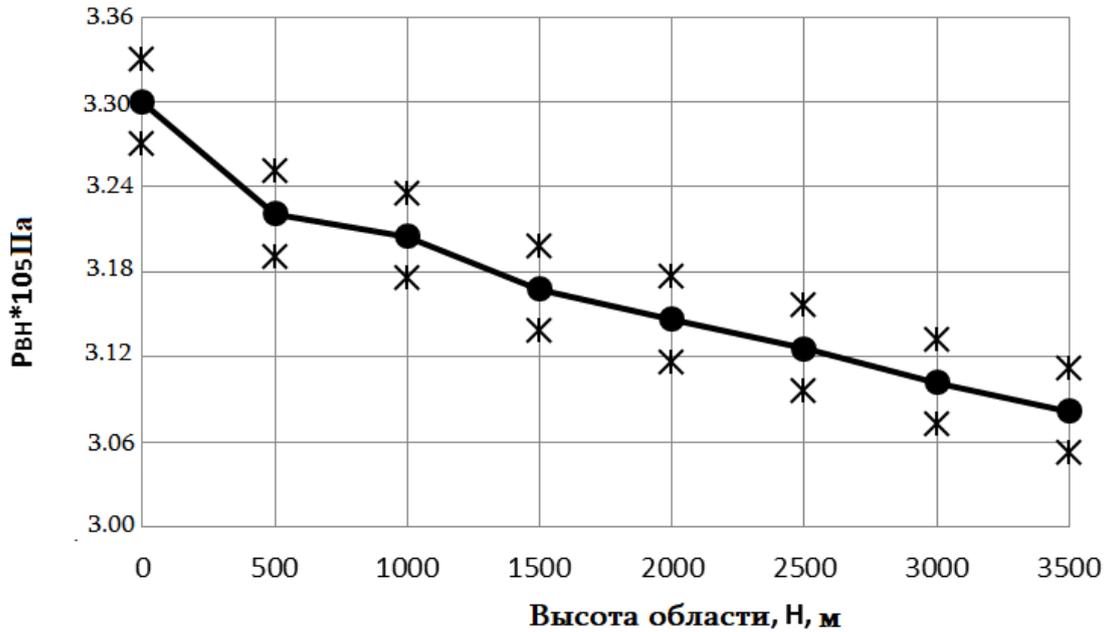


Рисунок 3.2 – Влияние температуры и давления атмосферного воздуха на ВДШ 215/75R16С

На основании вышеизложенного можно отметить:

1. Внутреннее давление в шинах в зависимости от высоты над уровнем моря, изменяется, так как атмосферное давление и температура воздуха меняются при изменении высоты.
2. Изменение внутреннего давления в шинах в зависимости от высоты местности можно оценить по предложенной формуле (2.22).
3. По данным МСА параллельно с высотой местности давление в шинах снижается.



Рисунок 3.3 – Процесс выполнения эксперимента

3.2. Методика обработки экспериментальных исследований

Композиционные планы типа B_k используются для обработки экспериментальных данных.

В случае статистического подхода математическая модель объекта или процесса представляется двухфакторным квадратичным полиномом, который выглядит следующим образом [26]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (3.2)$$

где b_0 – свободный член; b_i – коэффициент линейного воздействия; b_{ij} – парный коэффициент взаимодействия; b_{ii} – квадратичный коэффициент воздействия; k – количество факторов.

Наиболее распространенное использование полиномов второго порядка связано с тем, что они легко согласовываются с экстримумами. Отметим, что для описания поверхности отклика полинома второго порядка необходимо наличие не менее трех различных значений независимых факторов.

Общее количество опытов рассчитывается по следующей формуле [25].

$$N = N_0 + 2k + n_0, \quad (3.3)$$

где N_0 – полноценный факторный эксперимент; k – количество факторов, n_0 – количество экспериментов в центре плана.

В случае двух факторов получаем $N = 9$.

Композиционные планы легко трансформируются в ортогональные планы путем выбора звездочного α плеча и количества n_0 опытов в центре плана.

Ортогональный центральный композиционный план второго порядка с двумя факторами представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Двухфакторная ортогональная центральная композиционная план матрица второго порядка

Содержание плана	Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y
План типа 2^2	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_1
	2	+1	-1	+1	-1	+1	+1	y_2
	3	+1	+1	-1	-1	+1	+1	y_3
	4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	y_4
§звездочный план	5	+1	$+\alpha$	0	0	α^2	0	y_5
	6	+1	$-\alpha$	0	0	α^2	0	y_6
	7	+1	0	$+\alpha$	0	0	α^2	y_7
	8	+1	0	$-\alpha$	0	0	α^2	y_8
Нулевая точка	9	+1	0	0	0	0	0	y_9

Для того чтобы матрица планирования имела свойство ортогональности, необходимо вставить столбцы x' определенного значения, которые рассчитываются по следующей формуле [26].

$$x'_1 = x_1^2 - \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 \sum x_i^2}{N} = x_1^2 - x_i^{-2} = x_1^2 - \frac{4 + 2\alpha}{N}. \quad (3.4)$$

Используя уравнение (3.2), мы определим новые переменные в матрице ортогонального центрального композиционного плана для двух факторов.

$$x'_1 = x_1^2 - \frac{4 + 2\alpha^2}{9} = x_1^2 - \frac{2}{3}, \quad (3.5)$$

$$x'_2 = x_2^2 - \frac{4 + 2\alpha^2}{9} = x_2^2 - \frac{2}{3}. \quad (3.6)$$

Матрица для расчета коэффициентов уравнения регрессии (3.2) представлена в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Двухфакторный центральный композиционный ортогональный план второго порядка

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$x_1^2 - \frac{2}{3}$	$x_2^2 - \frac{2}{3}$	y
1	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	y_1
2	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	y_2
3	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	y_3
4	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	y_4
5	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	y_5
6	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	y_6
7	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	y_7
8	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	y_8
9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	y_9

Учитывая данные таблица 3.6 постоянные коэффициенты модели рассчитываются по следующим независимым формулам [18].

$$\left. \begin{aligned}
 b_1 &= \frac{\sum_{i=1}^N (x_{1i} y_i)}{\sum_{i=1}^N x_{1i}^2}, & b_2 &= \frac{\sum_{i=1}^N (x_{2i} y_i)}{\sum_{i=1}^N x_{2i}^2} \\
 b_{11} &= \frac{\sum_{i=1}^N (x'_{1i} y_i)}{\sum_{i=1}^N (x'_{1i})^2}, & b_{22} &= \frac{\sum_{i=1}^N (x'_{2i} y_i)}{\sum_{i=1}^N (x'_{2i})^2} \\
 b_{12} &= \frac{\sum_{i=1}^N (x_{1i} x_{2i} y_i)}{\sum_{i=1}^N (x_{1i} x_{2i})^2}, & b_0 &= \frac{\sum_{i=1}^N (x_{0i} y_i)}{N}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

После получения уравнения регрессии проверяют значимость коэффициентов по критерию Стьюдента, а эквивалентность полученного уравнения регрессии проверяют по критерию Фишера.

Если коэффициенты незначимы, их вычитают из уравнения регрессии.

Степень значимости уравнений регрессии рассчитывается по достоверным диапазонам критерия Стьюдента.

$$S^2 \{b_i\} = \frac{1}{N} S_y^2, \quad (3.8)$$

где S_y – дисперсия воспроизводимости.

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2 = \left(\frac{1}{N(n'-1)} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_{ij} - y_{ij})^2, \quad (3.9)$$

где S_i – дисперсия экспериментальных данных, n' – количество параллельных опытов.

Расчетные значения критерия Стьюдента определяются следующим выражением:

$$t_h = \frac{|b_i|}{S \{b_i\}}, \quad (3.10)$$

где t_h – расчетное значение критерия Стьюдента $t_h > t_{3\bar{0}}$, $t_{3\bar{0}}$ – табличное значение критерия Стьюдента.

Если оценочное значение надежного диапазона получается меньше табличного, коэффициент исключается из уравнения регрессии.

После чего соответствие полученного уравнения регрессии проверяется по стандарту Фишера.

Критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{\bar{N}}^2}{S_y^2}, \quad (3.11)$$

где $S_{\bar{N}}^2$ – дисперсия соответствия:

$$S_{\bar{N}}^2 = \frac{1}{N - (k + 1)} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \bar{y}_{\bar{N}i})^2, \quad (3.12)$$

где $N - (k + 1) = f$ число степеней свободы, \bar{y}_i – значение оптимизации в опыте i , $\bar{y}_{\bar{N}i}$ – значение расчетного параметра оптимизации модели для условий эксперимента; k – количество значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

3.3. Оценка работоспособность шин

Один из основных факторов, влияющих на износ шин, из которых наибольшее влияние имеют:

1. Внутреннее давление в шинах;
2. Качество изготовления шины;
3. Высота протектора шины*;
4. Конструкция каркаса шины;
5. Нагрузка на шины;
6. Пробег шин;
7. Полная масса автомобиля и ее распределение по осям;
8. Дисбаланс шин;
9. Наличие снега, льда, влаги;
10. Насыщенность выступов протекторов (плотность).

* высота протектора шины принимается в качестве параметра оптимизации.

Для изучения характера износа модельных шин 215/75R16C Radial были проведены научные эксперименты как с использованием соответствующего стенда, так и в реальных условиях эксплуатации шин.

В ходе стендовых испытаний измерялась масса шин, высота протектора при разных значениях пробега, а также масса передней и задней шин при одинаковых пробегах в условиях реальной эксплуатации. Стендовые испытания проводились на стенде СТВИСТ, технические характеристики и внешний вид которого приведены в Приложении 1. Результаты стендовых испытаний приведены в таблицах 3.7–3.8.

Таблица 3.7 – Высота протектора шины радиальной модели 215/75R16C в зависимости от пробега при различных значениях давления воздуха

Номер опыта	Пробег L , км	Внутренне давление шины $p \times 10^5$ Па		
		$p = 2,8$	$p = 3,0$	$p = 3,2$
1	12 000	8,984	8,671	8,898
2		8,880	8,800	8,740
3		8,778	8,930	8,584
среднее		8,881	8,800	8,741
1	36 000	5,997	5,003	4,998
2		5,212	5,477	4,864
3		5,600	5,200	4,930
среднее		5,603	5,227	4,931
1	60 000	2,263	1,739	1,693
2		2,090	1,870	1,810
3		1,920	1,999	1,925
среднее		2,091	1,869	1,809

**Таблица 3.8 – Масса шины радиальной модели 215/75R16С
в зависимости от пробега при различных значениях давления воздуха**

Номер опыта	Пробег L , км	Масса, т,кг		
		$P = 2,8 \times 10^5$ Па	$P = 3,0 \times 10^5$ Па	$P = 3,2 \times 10^5$ Па
1	12 000	23,420	23,352	23,062
2		23,324	23,241	23,159
3		23,230	23,130	23,258
среднее		23,325	23,241	23,160
1	36 000	21,842	21,368	21,430
2		21,550	21,611	21,210
3		21,700	21,486	21,322
среднее		21,697	21,488	21,321
1	60 000	20,401	20,121	20,168
2		20,280	20,170	20,088
3		20,155	20,220	20,006
среднее		20,279	20,170	20,087

По данным таблиц 3.7 и 3.8 построены графики изменения высоты протектора и изменение массы шины в зависимости от пробега автомобиля при различных значениях давления воздуха в шинах (рисунки 3.4–3.6).

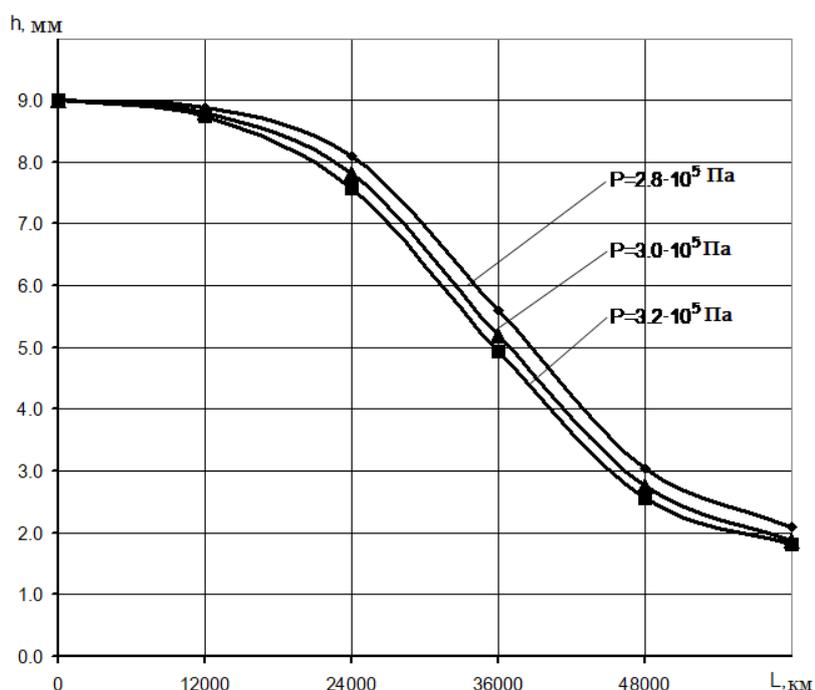


Рисунок 3.4 – Изменение высота протектора шины радиальной модели 215/75R16С в зависимости от пробега автомобиля при различных значениях давления воздуха в шинах

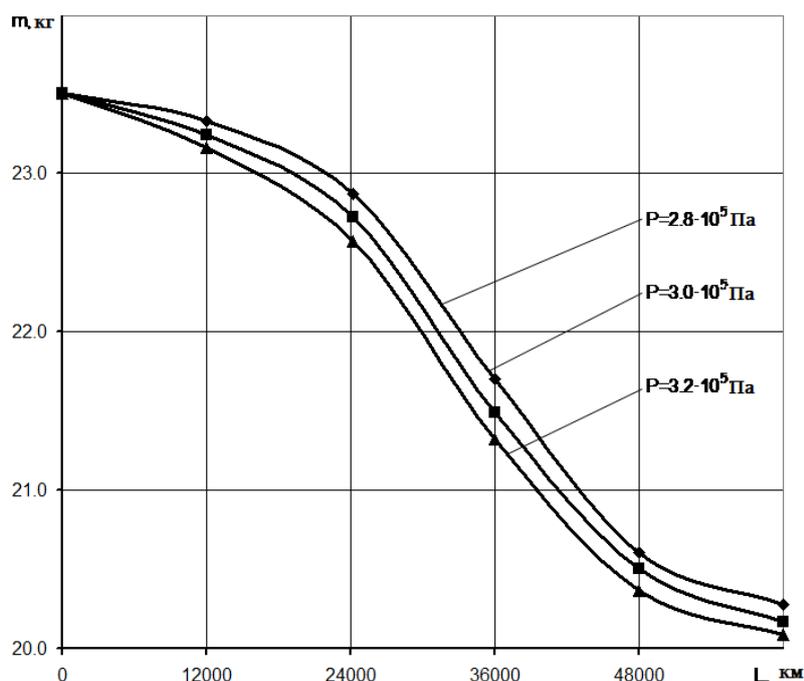


Рисунок 3.5 – Изменение массы шины радиальной модели 215/75R16C в зависимости от пробега автомобиля при различных значениях давления воздуха в шинах

Эксперименты проводились с использованием метода планирования эксперимента. В качестве независимого фактора (X) был выбран пробег (L) и давление воздуха (P) в шинах. В качестве коэффициента оптимизации (Y) была выбрана высота протектора и масса шины.

Таблица 3.8 – Уровни факторов и диапазоны сдвига

Уровень факторов и диапазон изменения	Исследуемые фактора	
	Давление, P	Пробег, L
Назначение кода	X_1	X_2
Нулевой уровень, $x_i = 0$	3	36 000
Диапазон изменения, d	0,2	24 000
Нижний уровень, $x_{\min} = -1$	2,8	12 000
Верхний уровень, $x_{\max} = +1$	3,2	60 000

Затем разрабатывается двухфакторный ортогональный центральный композиционный план второго порядка и матрица расчета коэффициентов двухфакторной модели.

Матрица планирования эксперимента для определения фактической высоты протектора и массы шины модели 215/75R16C в зависимости от пробега (L) и давления воздуха (P) и матрица расчета

коэффициентов двухфакторной модели приведены в приложениях 3–6.

В результате математической обработки экспериментальных данных были определены коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.7).

– для определения высоты протектора шины:

$$b_1 = -0,182, b_2 = -3,442, b_{11} = -0,044, b_{22} = -0,112, b_{12} = -0,035, b_0 = 5,328;$$

– для определения массы шины:

$$b_1 = -0,182, b_2 = -3,442, b_{11} = -0,044, b_{22} = -0,112, b_{12} = -0,035, b_0 = 21,641$$

Проверяем коэффициенты уравнения регрессии по критерию Стьюдента. Расчетные значения приводятся в таблицах 3.9 и 3.10.

Таблица 3.9 – Расчетные значения критерия Стьюдента проверки коэффициентов уравнения регрессии для определения высоты протектора шины

Коэффициенты		$t_j = \frac{ b_j }{S(b_j)}$	t_T	Проверка
Обозначение	Значение			
b_1	-0,182	4,97	2,10	$> t_T$
b_2	-3,442	93,82		$> t_T$
b_{11}	0,044	1,19		$t_{pj} < t_T$
b_{22}	0,112	3,05		$> t_T$
b_{12}	-0,035	0,97		$t_{pj} < t_T$, ВЫТЕСНЕННЫЙ
b_0	5,328	145,2		$> t_T$

Таблица 3.10 – Расчетные значения критерия Стьюдента проверки коэффициентов уравнения регрессии для определения массы шины

Коэффициенты		$t_{pj} = \frac{ b_j }{S(b_j)}$	t_T	Проверка
Обозначение	Значения			
b_1	-0,122	5,93	1,05	$> t_T$
b_2	-1,532	74,29		$> t_T$
b_{11}	0,012	0,56		$t_{pj} < t_T$, ВЫТЕСНЕННЫЙ
b_{22}	0,208	10,10		$> t_T$
b_{12}	-0,007	0,32		$t_{pj} < t_T$, ВЫТЕСНЕННЫЙ
b_0	21,641	1049,70		$> t_T$

На основании полученных данных была сформирована эмпирическая зависимость в виде уравнения регрессии:

- для определения высоты протектора шины модели 215/75R16C Radial:

$$h(X) = 5,328 - 0,182X_1 - 3,442X_2 + 0,112X_2^2 \quad (3.13)$$

- для определения массы шины модели 215/75R16C Radial

$$m(X) = 21,641 - 0,122X_1 - 1,532X_2 + 0,208X_2^2 \quad (3.14)$$

Соответствие уравнения регрессии проверялось по критерию Фишера по формулам 3.11, 3.12 и получилось $F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_y^2} = 0,02 < F_1 = 5,1$.

Результат критерия Фишера показывает, что уравнение регрессии соответствует изучаемому явлению.

На рисунках 3.6 и 3.8 показаны графики изменения высоты протектора и массы шины модели Radial 215/75R16C, зависимости от пробега автомобиля и давления в шинах.

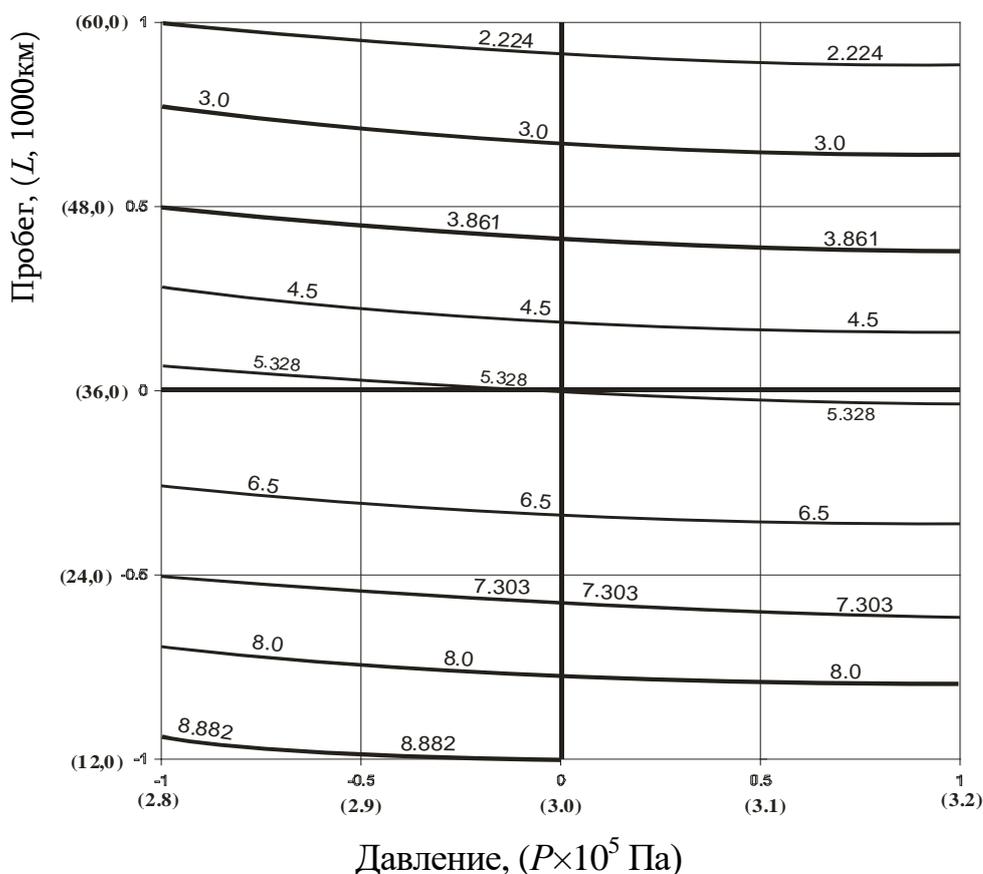


Рисунок 3.6 – Группа графиков изменения высоты протектора шины модели 215/75R16C Radial в зависимости от пробега автомобиля (X_1) и давления в шинах (X_2)

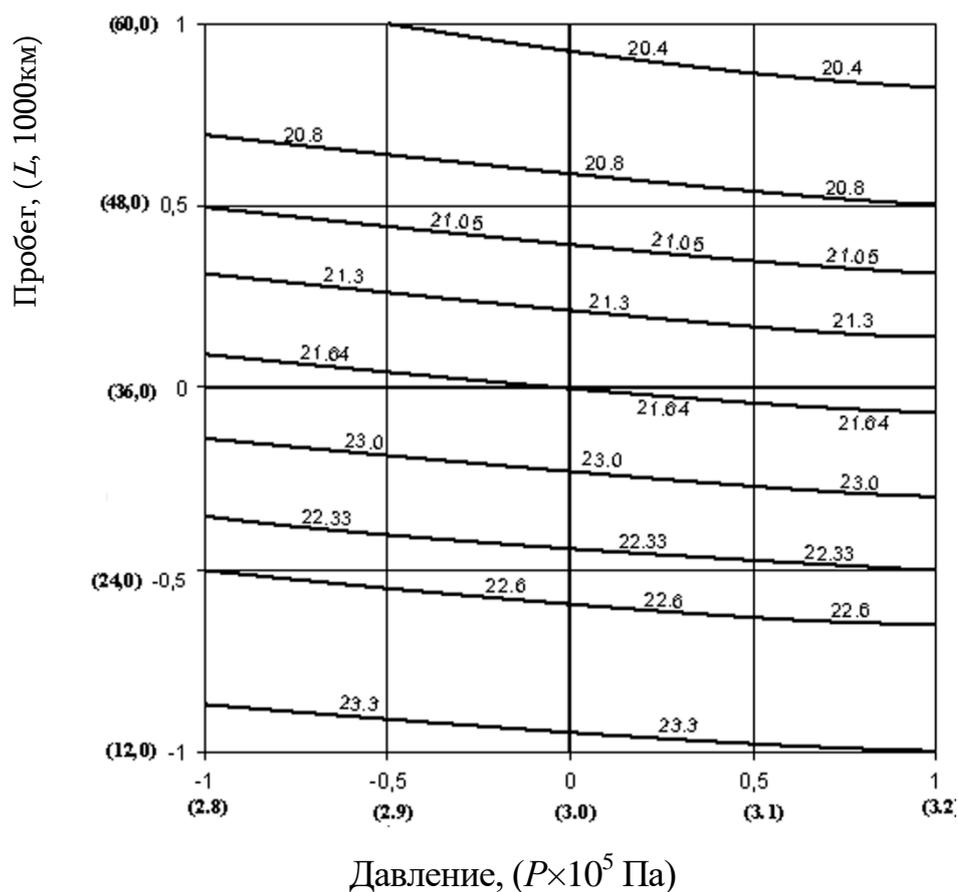


Рисунок 3.7 – Группа графиков изменения массы шины модели 215/75R16C Radial в зависимости от пробега автомобиля (X_1) и давления в шинах (X_2)

На основании анализа приведенных графиков можно отметить, что шины интенсивнее изнашиваются в диапазоне пробега 24 000...36 000 км.

В реальных условиях эксплуатации шина взаимодействует с дорожным покрытием, его неровностями, острыми и режущими краями дороги. В результате этого взаимодействия, а также при буксовании, в режиме торможения и набирания оборотов выступы шин изнашиваются неравномерно. Следовательно, при дорожных испытаниях погрешность измерения высоты выступов может превышать допустимый предел.

Учитывая это обстоятельство при дорожных испытаниях целесообразно было вместо измерения высоты выступов взвешивать шину, для определения потери массы последних, происходящей в следствии износа. Результаты измерений в эксплуатационных условиях сведены в таблицу 3.15 и 3.16. С целью сохранения стабильности значений внутреннего давления в шинах, указанных в таблицах

внутреннее давление измерялось каждый день после окончания эксплуатации микроавтобуса и доходило до 4 % от требуемого давления. Кроме того, при испытаниях не учитывалось влияние повышения температуры шины при эксплуатации на ее внутреннее давление.

По данным таблиц 3.11 и 3.12 построены графики изменения массы шин в зависимости от пробега автомобиля при различных значениях давления воздуха в шинах (рисунки 3.8 и 3.9).

Таблица 3.11 – Масса задних шин, зависящая от пробега при разных значениях давления в шинах

Номер опыта	Пробег L , км	Масса m , кг		
		$P = 2,8 \times 10^5$ Па	$P = 3,0 \times 10^5$ Па	$P = 3,2 \times 10^5$ Па
1	12 000	23,150	23,091	23,098
2		23,107	23,049	23,024
3		23,065	23,007	22,950
среднее		23,107	23,049	23,024
1	36 000	21,320	20,980	20,800
2		21,200	21,120	20,932
3		21,260	21,000	20,866
среднее		21,260	21,033	20,866
1	60 000	20,300	20,295	20,226
2		20,341	20,200	20,133
3		20,382	20,105	20,041
среднее		20,341	20,200	20,133

Таблица 3.12 – Масса передних шин, зависящая от пробега при разных значениях давления в шинах

Номер опыта	Пробег L , км	Масса m , кг		
		$P = 2,8 \times 10^5$ Па	$P = 3,0 \times 10^5$ Па	$P = 3,2 \times 10^5$ Па
1	12 000	23,172	23,170	23,072
2		23,100	23,030	22,991
3		23,029	22,889	22,911
среднее		23,100	23,030	22,991
1	36 000	21,260	20,980	20,760
2		21,140	20,820	20,640
3		21,200	20,900	20,700
среднее		21,200	20,900	20,700
1	60 000	20,170	19,900	19,760
2		20,100	19,850	19,700
3		20,030	19,800	19,640
среднее		20,100	19,850	19,700

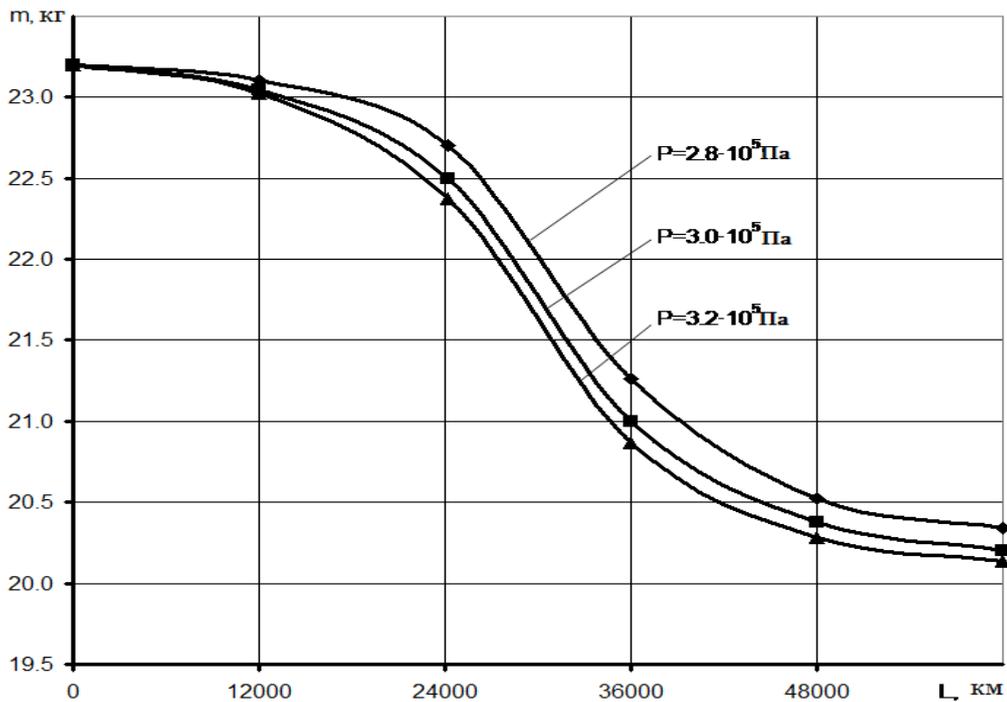


Рисунок 3.8 – Изменения массы задних шин, зависящая от пробега при разных значениях давления в шинах

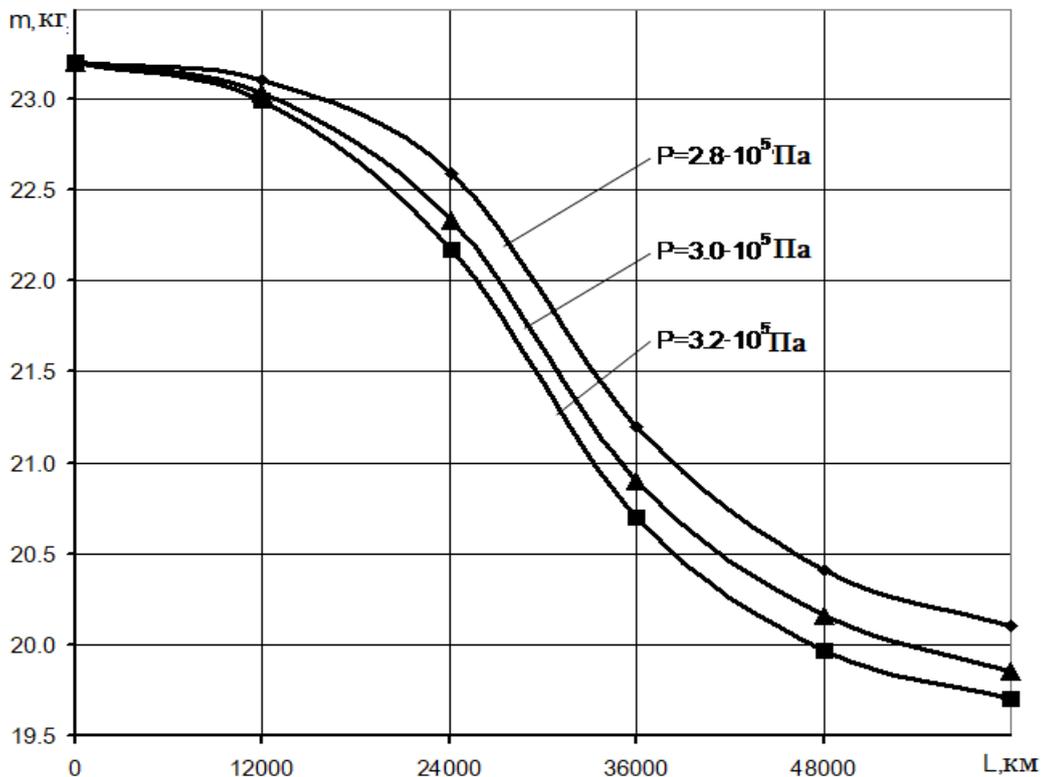


Рисунок 3.9 – Изменения массы передних шин, зависящая от пробега при разных значениях давления в шинах

Матрица экспериментального планирования для расчета массы шин в зависимости от пробега (L) автомобиля и давления воздуха в шинах и матрица для расчета коэффициентов двухфакторной модели приведены в приложениях 7–10.

В результате математической обработки экспериментальных данных были определены коэффициенты уравнения регрессии по формулам (3.7).

– для определения массы задней шины:

$$b_1 = -0,114, b_2 = -1,418, b_{11} = -0,028, b_{22} = -0,589, b_{12} = -0,031, b_0 = 21,446;$$

– для определения массы передней шины:

$$b_1 = -0,168, b_2 = -1,579, b_{11} = -0,039, b_{22} = -0,529, b_{12} = -0,073, b_0 = 21,286.$$

Тестируем уравнения регрессии по критерию Стьюдента. Расчетные значения приведены в таблицах 3.13 и 3.14.

Таблица 3.13 – Расчетные значения критерия Стьюдента для проверки коэффициентов уравнения регрессии для определения массы задней шины

Коэффициенты		$t_j = \frac{ b_j }{S(b_j)}$	t_T	Проверка
Обозначение	Значение			
b_1	-0,182	5,22	2,10	$> t_T$
b_2	-3,442	49,04		$> t_T$
b_{11}	0,044	0,69		$t_{pj} < t_T$, вытесненный
b_{22}	0,112	9,48		$> t_T$
b_{12}	-0,035	1,845		$t_{pj} < t_T$, вытесненный
b_0	5,328	300,69		$> t_T$

Таблица 3.14 – Расчетные значения критерия Стьюдента для проверки коэффициентов уравнения регрессии определения массы передней шины

Коэффициенты		$t_j = \frac{ b_j }{S(b_j)}$	t_T	Проверка
Обозначения	Значения			
b_1	-0,168	11,08	1,05	$> t_T$
b_2	-1,579	104,05		$> t_T$
b_{11}	0,039	2,55		$> t_T$
b_{22}	0,529	34,84		$> t_T$
b_{12}	-0,073	4,80		$> t_T$

Уравнения регрессии составляются следующим образом:

– для определения массы задних шин:

$$m(x) = 21,446 - 0,114X_1 - 1,418X_2 + 0,589X_2^2; \quad (3.15)$$

– для определения массы передних шин:

$$m(x) = 21,286 - 0,168X_1 - 1,579X_2 + 0,529X_2^2 \quad (3.16)$$

Соответствие уравнения регрессии проверялось по критерию Фишера по формулам (3.11) и (3.12). согласно которым уравнение регрессии соответствует изучаемому явлению.

На рисунках 3.12 и 3.13 приведены графики изменения массы передней и задней шин соответственно. в зависимости от пробега автомобиля и давления воздуха в шинах.

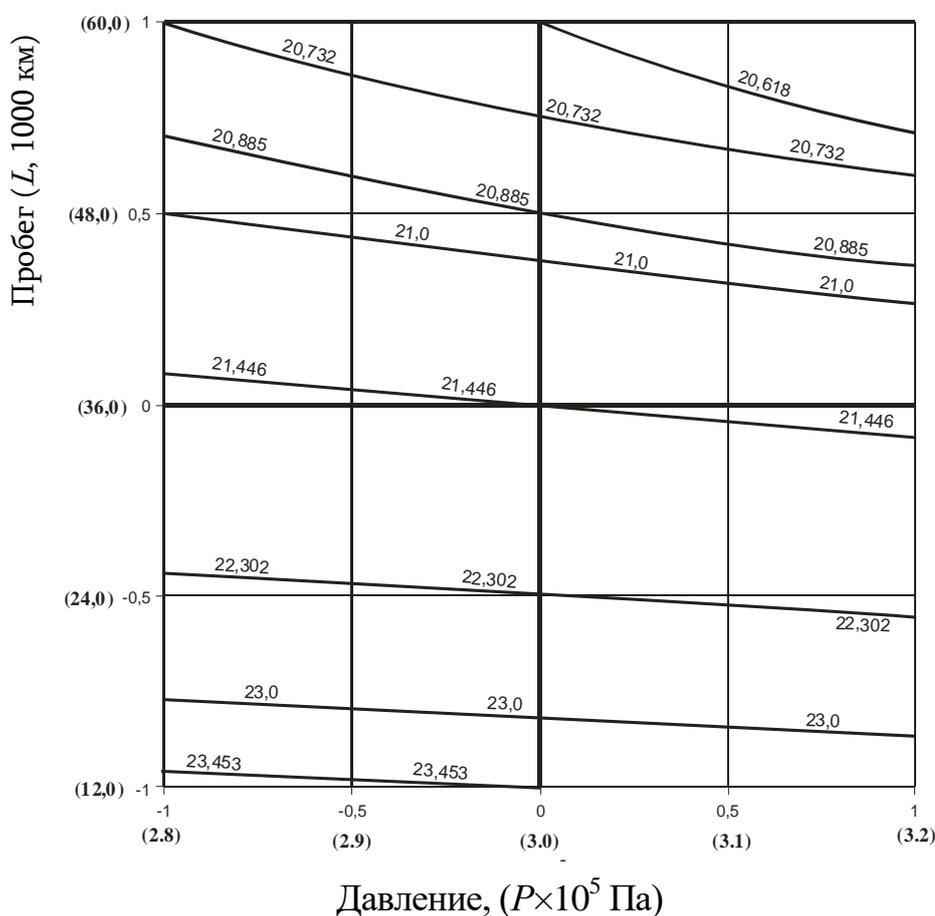


Рисунок 3.10 – Группа графиков изменения массы задних шин в зависимости от пробега автомобиля (X_1) и давления воздуха в шинах (X_2)

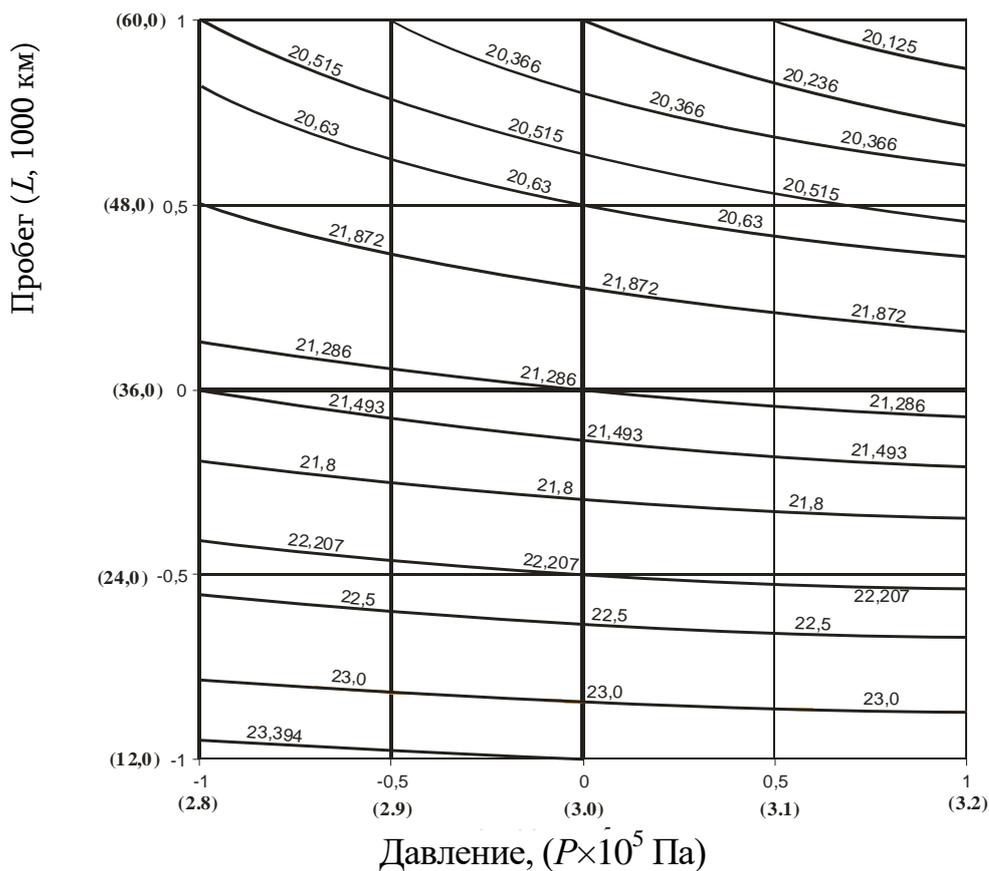


Рисунок 3.11 – Группа графиков изменения массы передних шин в зависимости от пробега автомобиля (X_1) и давления воздуха в шинах (X_2)

Эксплуатационные испытания шин микроавтобусов показали, что при оптимальном давлении в шинах автомобиль проделает максимальный пробег.

Например, когда внутреннее давление в шине находится в пределах $3 \pm 0,2 \times 10^5$ масса задней шины составляет 21 872 кг на 36 000 км пробега и 21 496 кг на 48 000 км пробега (высота протектора находится в пределах 5,2 мм, следовательно износ составляет 2,8 мм). поэтому при оптимальном давлении износ стремится к минимуму.

Сравнение результатов стендовых и эксплуатационных испытаний показывает, что разница в потере массы шин составляет 3...7 %, а при сравнении с результатов определения интенсивности износа – в среднем 5 %. Это означает, что ускоренный метод испытаний можно использовать для оценки ресурса шин любого типа.

3.4. Оценка влияния конструктивных факторов на износостойкость автомобильных шин к износу по результатам испытаний

Были протестированы шины модели Infinity и Radial 215/75R16C, которые эксплуатировались двумя микроавтобусами марки Ford Transit. Микроавтобусы эксплуатировались по одному и тому же маршруту (Ванадзор-Ереван-Ванадзор) одними и теми же водителями.

Шины первого микроавтобуса полностью изношены в одном случае при пробеге 58 000 км в другом случае при пробеге 60 000 км (средний ресурс – около 59 000 км).

Шины второго микроавтобуса, после пробега 61 000 км были выведены из эксплуатации по причине износа, а в другом случае после 61 500 км пробега.

Так как шины модели 215/75R16C Infinity были изношены при пробеге 59 000 км, а шины 215/75R16C Radial при пробеге 61 000 км, то эти пробеги учитывались при определении средней интенсивности износа. При этом после указанного эксперимента изменение высоты рисунка протектора составило 6,27 мм и 6,04 мм соответственно.

Среднюю интенсивность износа определяли как отношение текущей высоты протектора к пробегу от заданной высоты до полного износа. Результаты представлены в таблице 3.15 и на графиках показанных на рисунках 3.12–3.14.

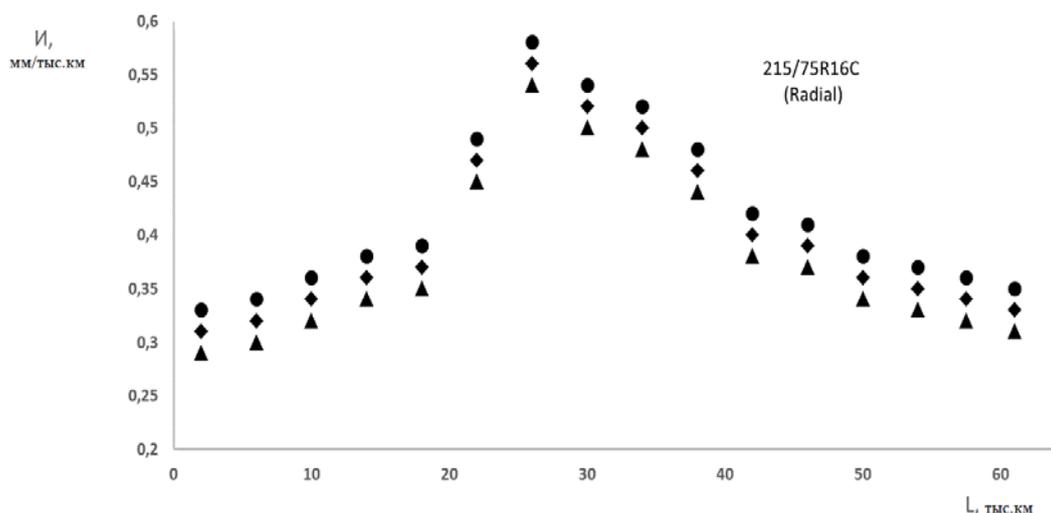


Рисунок 3.12 – 215/75R16C (Radial) средняя интенсивность износа шин в зависимости от пробега автомобиля

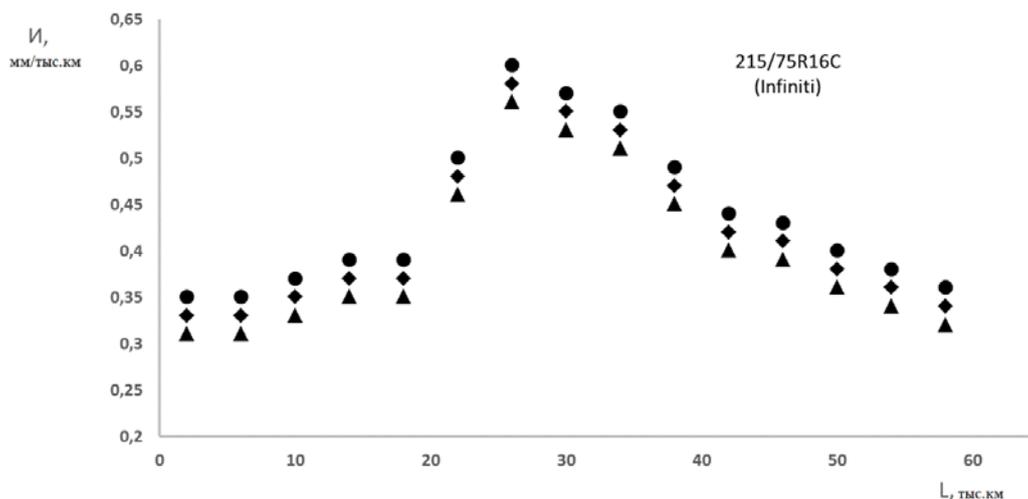


Рисунок 3.13 – 215/75R16C (Infiniti) средняя интенсивность износа шин в зависимости от пробега автомобиля

Таблица 3.15 – Результаты контролируемых эксплуатационных и стендовых испытаний шин микроавтобусов на маршруте Ванадзор-Ереван

Интервал пробега ΔS , тыс. км ($\Delta S = (S_i - S_{i+1})$)	Изменение высоты протектора Δh , мм	
	<i>Эксплуатационные испытания</i>	<i>Стендовые испытания</i>
	215/75R16C	215/75R16C Radial
0–4	0,31/0,33	0,30
4–8	0,32/0,33	0,326
8–12	0,34/0,35	0,331
12–16	0,36/0,37	0,351
16–20	0,37/0,37	0,374
20–24	0,47/0,48	0,413
24–28	0,56/0,58	0,457
28–32	0,52/0,55	0,447
32–36	0,50/0,53	0,458
36–40	0,46/0,47	0,459
40–44	0,40/0,42	0,381
44–48	0,39/0,41	0,371
48–52	0,36/0,38	0,352
52–56	0,35/0,36	0,331
56–60	0,33/0,34	0,332

*В числителе указана интенсивность износа шины 215/75R16C Radial, а в знаменателе указана интенсивность износа шины 215/75R16C Infiniti.

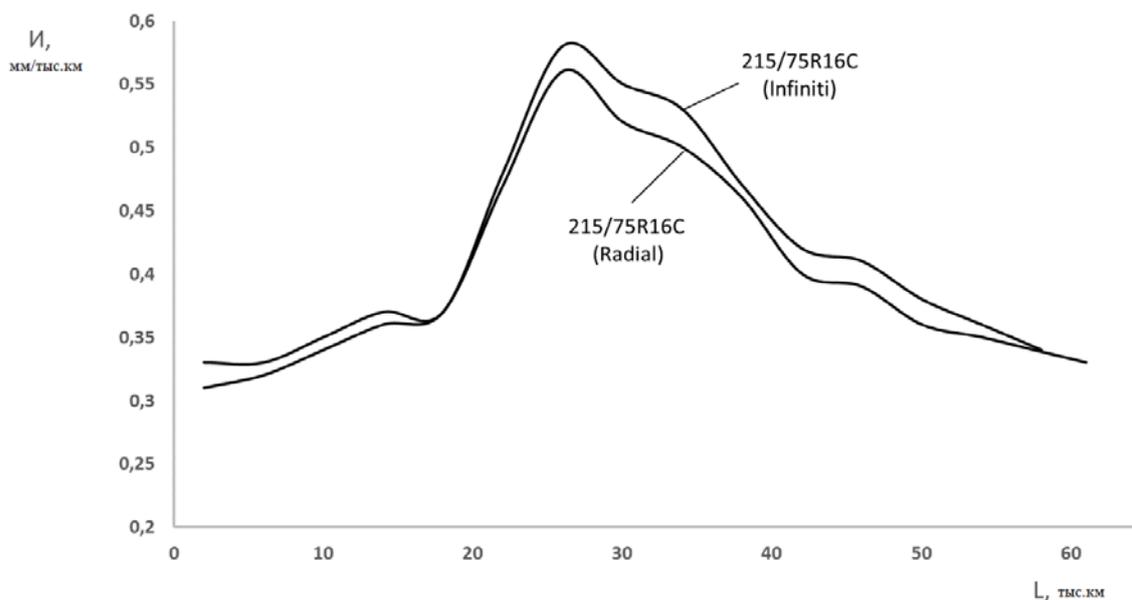


Рисунок 3.14 – Средняя интенсивность износа шин зависит от пробега автомобиля

Как видно из графиков шины начинают интенсивнее изнашиваться в диапазоне пробега 24 000...36 000 км.

Так ресурс шин Infiniti 215/75R16C на маршруте Ванадзор-Ереван составляет 59 000 км, а модели 215/75R16C Radial – 61 000 км.

В приложении 15 описывается работа манометра внутреннего давления в шинах.

3.5. Методика оценки изменения коэффициента сопротивления качению шины и результаты испытаний

Для оценки изменения коэффициента сопротивления качению шины нами проводились испытания по ниже описанной методике:

1. Внутренние давления шин автомобиля приведены в нормативные значения.

2. В автомобиле сидели 2 человека с общим весом 150 кг.

3. На прямолинейном горизонтальном участке автомобиль двигался со скоростями $V_0 = 20, 30, 40, 50, 60$ км/ч.

4. Как только скорость достигалась соответствующего значения, рычаг коробки передач приводился в нейтральное положение и освобождалась педаль «газа». Начиная с этого момента секундомером измерялось время выбега.

5. С целью исключения влияния уклона дороги на результаты опыта, опыты проводились на прямом и обратном направлениях. При этом, для каждого направления и скорости опыты проводились три раза.

6. Нагрузка автомобиля была увеличена на 215 кг и пункты 2-6 повторялись для данного значения давления.

7. Давления в шинах было снижено на 0,1 МПа и пункты 2-6 повторялись для данного значения давления.

При испытаниях замеренные величины (начальные скорости выбега и времена выбега при этих скоростях), а также значения среднеквадратического отклонения случайных величин (времени) и коэффициенты вариации приведены в приложениях (таблицы 1–4).

Как видно из этих приложений, фактическое значение коэффициента вариации составляет 0,048, когда его значение была принята 0,132 при расчете количества экспериментов $n = 2$. Следовательно, количество экспериментов $n = 3$ обеспечивает результаты с необходимой точностью.

Все необходимые опытные и расчетные данные для определения коэффициента сопротивления качению экспериментально-расчетной методикой приведены в таблицах 3.16–3.17. Представленные значения в таблице 3.16 соответствуют значениям внутренних давлений шин для передних колес $P_{В1} = 2,1 \times 10^5$ Па и для задних колес – $P_{В2} = 2,5 \times 10^5$ Па, а в таблице 3.17 – $P_{В1} = 2,0 \times 10^5$ Па; $P_{В2} = 2,5 \cdot 10^5$ Па.

Таблица 3.16 – Значения коэффициента сопротивления качению и времени выбега при $P_{В1} = 2,1 \times 10^5$ Па, $P_{В2} = 2,5, \times 10^5$ Па, когда масса автомобиля $m_1 = 1600$ кг и $m_2 = 1825$ кг

$V_0, \text{ м/с}$		5,55	8,33	11,11	13,88	16,66
$t, \text{ с}$	m_1	52	74	92	105	113
	m_2	50	72	89	102	111
f	m_1	0,0106	0,0109	0,0114	0,0119	0,0129
	m_2	0,0111	0,0113	0,0119	0,0125	0,0137

Таблица 3.17 – Значения коэффициента сопротивления качению и времени выбега при $P_{ВН1} = 2,0 \times 10^5$ Па, $P_{ВН2} = 2,4 \times 10^5$ Па, когда масса автомобиля $m_1 = 1610$ кг и $m_2 = 1825$ кг

$V_0, \text{ м/с}$		5,55	8,33	11,11	13,88	16,66
$t, \text{ с}$	m_1	47	66	82	93	99
	m_2	45	65	80	92	97
f	m_1	0,0119	0,0122	0,0128	0,0137	0,0150
	m_2	0,0123	0,0126	0,0133	0,0142	0,0156

Зависимость коэффициента сопротивления качению от массы автомобиля, начальной скорости, внутреннего давления, показано на графиках (рисунки 3.15–3.16).

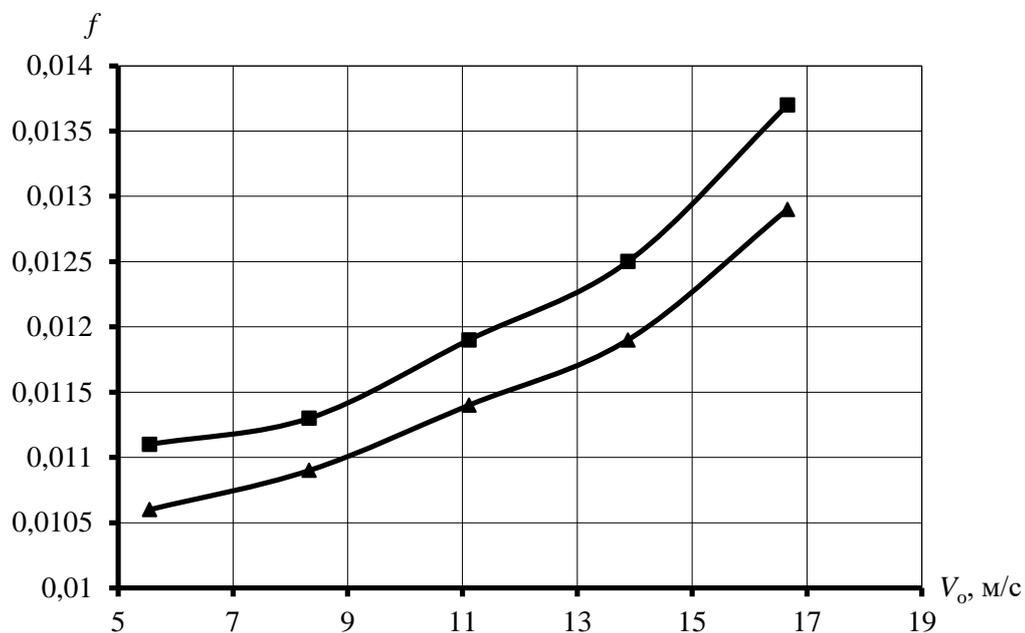


Рисунок 3.15 – Зависимость коэффициента f от начальной скорости при $P_{ВН1} = 2,1 \times 10^5$ Па, $P_{ВН2} = 2,5 \times 10^5$ Па, $\blacktriangle - m = 1610$ кг и $\blacksquare - m = 1825$ кг

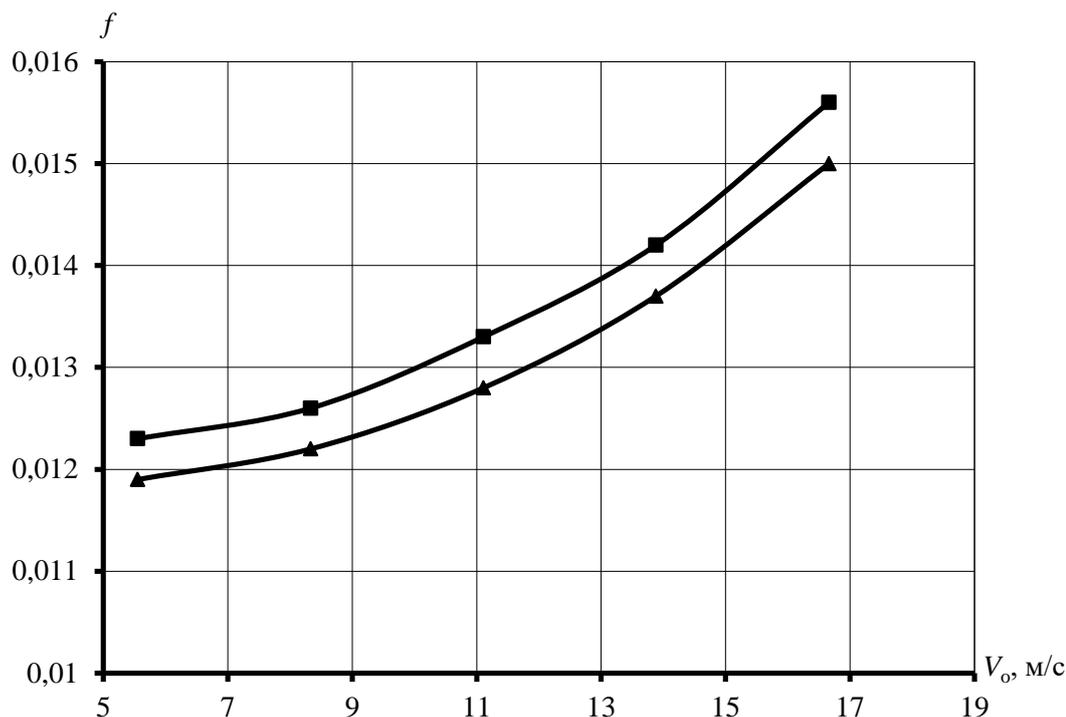


Рисунок 3.16 – Зависимость коэффициента f от начальной скорости при $PВН1 = 2,0 \times 10^5$ Па, $PВН2 = 2,4 \times 10^5$ Па, $\blacktriangle - m = 1610$ кг и $\blacksquare - m = 1825$ кг

Из анализа данных указанных таблиц и графиков следует:

1. По мере увеличения начальной скорости увеличивается и коэффициент f , например при $V_0 = 5,55$ м/с, $f = 0,0106$, а при $V_0 = 16,66$ м/с, $f = 0,0129$. То есть, когда скорость растет в три раза, f увеличивается на 1,22 раза (на 22 %);

2. Увеличение полной массы автомобиля на 13 %, приводит к увеличению коэффициента f на 4,5 %;

3. При неизменной массе ($m = 1825$ кг) снижение давления шины на $0,1 \times 10^5$ Па, увеличивает коэффициент f приблизительно на 10...17 %, если скорость автомобиля в пределах 20...60 км/ч;

4. На горизонтальном участке дороги первой категории коэффициент сопротивления качению, при средних скоростях, находится в пределах 0,0111...0,0134.

Сопоставление полученных и литературных данных показывает, что последние в некоторой степени преувеличены (примерно 18...22 %). Так, согласно работе [64], коэффициент f легковых автомобилей на дорогах первой категории составляет 0,013...0,014.

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1. Опыты по определению изменения объема шин показали, что параллельно с изменением высоты над уровнем моря, а следовательно, с изменением давления и температуры атмосферного воздуха, изменяется внутренне давление в шинах, для определения которого воспользовались эмпирической формулой. Расчеты, произведенные по указанной формуле, показывают, что по данным международной стандартизированной атмосферы вместе с высотой местности снижается внутреннее давление в шине.

2. Эксплуатационные испытания показали, что при одинаковом давлении, шины переднего моста микроавтобуса изнашиваются интенсивнее, чем шины заднего моста. Таким образом, при давлении $P = 3 \times 10^5$ износ шин переднего моста составляет 1,91 мм, а задних шин 1,08 мм.

3. Анализ уравнений регрессии, полученных в ходе экспериментальных исследований, как стендовых, так и в реальных условиях эксплуатации, и построенных на их основе графиков показывает, что изменение высоты протектора шин зависит от пробега автомобиля, давления воздуха в шинах и насыщенности выступов. Причем износ интенсивнее в средней части ресурса, точнее в диапазоне 24 000...36 000 км. Давление 3×10^5 Па считается оптимальным с точки зрения обеспечения ресурса шины.

4. Результаты ускоренных стендовых и эксплуатационных испытаний по выявлению влияния внутреннего давления и пробега на массу шины и на высоту (износ) выступов практически идентичны. Учитывая, что разница между результатами вышеперечисленных испытаний не превышает 5 %, можно отметить, что ускоренный метод испытаний применим для оценки ресурса шин любого типа.

4. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШИН С ГРУНТОВЫМИ ОСНОВАНИЯМИ

Адекватное описание контактного взаимодействия шины с деформируемым грунтовым основанием возможно только при учете таких основных особенностей системы «колесо-шина-основание» как геометрическая нелинейность деформирования шины, малая сжимаемость, вязкоупругость и физическая нелинейность эластомерных компонент шины, односторонний характер условий контакта шины и основания, неоднородность и сложный реологический характер деформирования последнего.

Ниже предлагается система моделей шины как многослойной эластокомпозитной оболочки; модель грунтового основания как пористого частично водонасыщенного неоднородного полупространства.

4.1. Математическая модель пневматической шины как многослойной эластокомпозитной оболочки

Пневматическая шина представляет собой многослойную эластокомпозитную оболочку вращения со сложной формы меридиана со слоями переменной толщины (рисунок 4.1).

Обсуждаемый ниже подход к моделированию шин как многослойных оболочек является дальнейшим развитием и уточнением перехода, предложенного в работах Ю. Н. Новичкова и А. С. Кузьмина, А.С. Кузьмина и Д. И. Ремизова и тесно примыкает к варианту, разработанному Ю. Н. Новичковым, А. С. Кузьминым и А. М. Бутко.

А. Кинематика деформирования многослойной эластокомпозитной оболочки сложной формы

Для описания кинематики деформирования шины введем совокупность локальных баз параметризации, в качестве которых примем срединные поверхности слоев оболочки Ω_i , и глобальную базу параметризации – каноническую поверхность вращения, например, тороидальную, близкую к локальным базам параметризации в смысле взаимной пологости,

Каждая из баз параметризации описывается ее естественным гауссовым триэдром, причем, поскольку в естественном состоянии шина является оболочкой вращения, так введенные системы координат суть ортогональные криволинейные базисы, характеризуемые коэффициентами Ламе H_α^K и кривизнами K_α^K ; K – номер слоя, греческие индексы здесь и далее принимают значения 1 и 2.

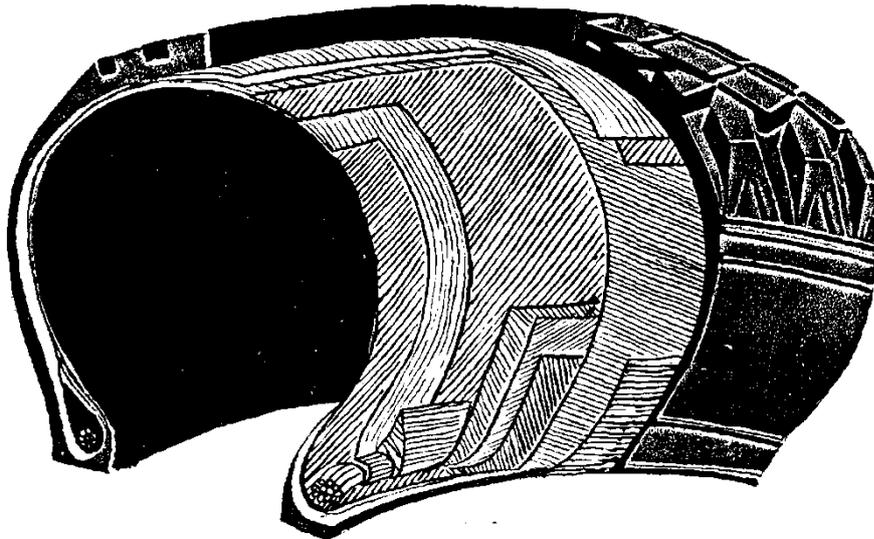


Рисунок 4.1 – Эластокомпозитная оболочек

Адекватное описание кинематики деформирования слоев, с учетом контактного характера загрузки шины, характерных для эластокомпозитных оболочек соотношений жесткостных параметров слоев и их относительных толщин, возможно только в рамках теории оболочек Тимошенко-Мищулина, то есть перемещения произвольной точки i -го слоя описываются в локальной базе параметризации $\vec{v}^i = (v_1^i, v_2^i, w^i)^T$ и вектором трансверсальных сдвигов и обжатий нормали $\vec{\xi}^i = (\xi_1^i, \xi_2^i, \xi^i)^T$, причем

$$\begin{aligned}
u_\alpha^i(z^i) &= (v_\beta^i + z^i \xi_\beta^i) \times (\delta_\alpha^\beta + z^i b^{\beta i}); \\
u_3^i(z^i) &= w^i + z \xi^i
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Здесь δ – дельта-тензор Кронеккера, b – тензор кривизны локальной базы параметризации.

В (4.1), как и повсюду ниже, принято правило Эйнштейна суммирования по неммым индексам

$$g_\alpha C^\alpha = \sum_{\alpha=1}^2 g_\alpha C^\alpha. \tag{4.2}$$

Учитывая, что перемещения шины имеют порядок ее толщины, для описания деформированного состояния слоя естественно ограничиться соотношениями среднего изгиб, так что тензор деформаций Коши-Грина в произвольной точке слоя имеет вид

$$\begin{aligned}
e_{\alpha j}^i &= \varepsilon_{\alpha j}^i + z H_{\alpha j}^i; \\
e_{33}^i &= \varepsilon_{33}^i,
\end{aligned} \tag{4.3}$$

где i – номер слоя, $j = 1, 2, 3$; ε – тензор деформаций базы параметризации, определяемый соотношениями

$$\begin{aligned}
2\varepsilon_{\alpha\beta}^i &= \varepsilon_{\alpha\beta}^i + \varepsilon_{\beta\alpha}^i + \varepsilon_{\alpha\gamma}^i \varepsilon_{\beta}^{\gamma i} + \omega_\alpha^i \omega_\beta^i; \\
2\varepsilon_{\alpha 3}^i &= \omega_\alpha^i (1 + \xi^i) + \xi_\beta^i (\delta_\alpha^\beta + \varepsilon_\alpha^{\beta i}); \\
2\varepsilon_{33}^i &= 2\xi^i + \xi_\alpha^i \xi^{\alpha i} + (\xi)^2.
\end{aligned} \tag{4.4}$$

причем жонглирование индексами осуществляется первым метрическим тензором локальной базы параметризации

$$a = \begin{pmatrix} H^2 & 0 \\ 0 & H_2^2 \end{pmatrix}.$$

$$\omega_\alpha^i = \partial_\alpha^i \omega^i + b_\alpha^{\beta i} v_\beta^i. \tag{4.5}$$

$$\varepsilon_{\alpha\beta}^i = \nabla_\alpha^i v_\beta^i - b_{\alpha\beta}^i w^i.$$

Здесь $\partial_\alpha^i f = \partial f / \partial x^{\alpha i}$, ∇_α^i – набла – оператор Гамильтона локальной базы параметризации,

Что касается тензора изменения кривизны H , входящего в (4.3), то для него, как показано в рамках рассматриваемого приближения справедливы линейные соотношения

$$2H_{\alpha\beta}^i = \Omega_{\alpha\beta}^i + \Omega_{\beta\alpha}^i - b_{\alpha}^{\gamma i} \varepsilon_{\beta\gamma}^i - b_{\beta}^{\gamma i} \varepsilon_{\alpha\gamma}^i; \quad (4.6)$$

$$2H_{\alpha 3}^i = \Omega_{\alpha}^i,$$

$$\text{где } \Omega_{\alpha\beta}^i = \nabla_{\alpha}^i \xi_{\beta}^i - b_{\alpha\beta}^i \xi^i; \quad (4.7)$$

$$\Omega_{\alpha}^i = \partial_{\alpha}^i \xi^i + b_{\alpha}^{\beta i} \xi_{\beta}^i.$$

Описание кинематики деформирования слоя в локальной базе параметризации, естественное с «внутренней», относящейся к слою, точки зрения, значительно усложняет рассмотрение как условий контакта слоев по перемещениям, так и анализ деформирования оболочки в целом,

Именно для того, чтобы избежать этих сложностей и вводится глобальная база параметризации, и наряду с локальным описанием кинематики слоя строится глобальное ей описание,

Учитывая взаимную пологость локальных и глобальной баз параметризации и следуя В. Н. Паймушину, можно отнести вектора \vec{v}^i и $\vec{\xi}^i$ к глобальной системе координат, причем

$$v_{\alpha}^i = v_{\alpha}^i - y_{\alpha}^i \omega^i.$$

$$\xi_{\alpha}^i = \xi_{\alpha}^i - y_{\alpha}^i \xi^i; \quad (4.8)$$

$$\omega = \omega^i + y_{\alpha}^i v^{\alpha i};$$

$$\xi = \xi^i + y_{\alpha}^i \xi^{\alpha i},$$

$$\text{где } y_{\alpha}^i = \frac{1}{H_{\alpha}^{\circ} \theta_{\alpha}^i} \times \frac{\partial H^i}{\partial x_{\alpha}^{\circ}}; \quad (4.9)$$

$$\theta_{\alpha}^i = 1 + HK_{\alpha}.$$

Здесь индекс i – номер слоя, индексом «0» помечены характеристики глобальной базы параметризации, H^i – расстояние между i , локальной и глобальной базами параметризации по нормали к последней,

Аналогичным образом осуществляется и преобразование тензора деформаций, и его выражение через глобальный базис.

Соотношения (4.1) – (4.9) полностью характеризуют кинематику слоя вектором его обобщенных перемещений

$$z^i = (v_1^i, v_2^i, \omega, \xi_1^i, \xi_2^i, \xi^i) \quad (4.10)$$

Как и в работах будем считать контакт слоев по перемещениям идеальным, так что на границе раздела i -го и $(i - 1)$ -го слоев имеет место равенство

$$u \left(-\frac{h^i}{2} \right) = u \left(-\frac{h^{i-1}}{2} \right) = u_{i-1}, \quad (4.11)$$

где h^k – толщина k -го слоя

С учетом соотношений (4.1), (4.8) в условиях взаимной пологости поверхности контакта слоев и глобальной базы параметризации (вытекающей из взаимной пологости локальных баз параметризации всех слоев и глобальной базы), из (4.11) следует

$$z = A_{i-1}^i u_{i-1} + A_{i+1}^i u_i, \quad (4.12)$$

где A_j^i – матричные арифметические операторы, определяющиеся только геометрией многослойной оболочки и глобальной параметризацией.

Соотношения (4.12) позволяют полностью охарактеризовать кинематику шины в целом $3(N + 1)$ компонентным вектором перемещений лицевых поверхностей слоев, где N – число слоев оболочки.

В. Определяющие соотношения материалов шины при статическом и циклическом деформировании

Одним из основных вопросов при построении адекватной модели эластокомпозитных оболочек является вопрос выбора определяющих соотношений материалов слоев.

Как и во многих литературных источниках выделим три основные группы слоев шины:

- 1) армированные слои каркаса и брекера;
- 2) резиновые прослойки в каркасе и брекере, слои прослойки каркас-брекер, покровные слои, гермослой;
- 3) протектор.

Последний представляет собой слой из неармированной резины с сильно переменной толщиной, что обусловлено наличием рисунка.

Из литературы известно, что в случаях, когда НДС рисунка представляет относительно малый интерес, естественно рассмотреть протектора как конструктивно-анизотропной оболочки.

Несмотря на то, что рисунок протектора оказывает существенное влияние на характеристики контактного взаимодействия шин с опорными поверхностями, предполагается, что это влияние может быть учтено путем введения анизотропии характеристик трения на поверхности контакта. Подробнее этот вопрос рассматривается ниже.

Основным материалом многослойных эластокомпозитных оболочек, и шин в том числе, является резина или резиноподобные эластомеры.

Вопросу описания упругих и вязкоупругих свойств резин посвящена обширнейшая литература.

Учитывая, что в работе рассматриваются только статическое и циклическое деформирование эластокомпозитных оболочек, ограничимся описанием свойств резин именно в этих случаях.

При статическом термостатическом деформировании резина может рассматриваться как нелинейный гиперупругий материал,

Существенное различие в жесткостях эластомеров при объемном и сдвиговом деформировании приводит к принятию для них либо модели несжимаемого материала, либо модели слабосжимаемого тела.

В слоях второй группы наиболее естественным является применение модели несжимаемого материала, причем, с учетом того, что деформации резин в шинах не превышают 0,5, допустимо применение полиномиальных потенциалов, отвечающих нелинейной теории упругости второго порядка и обобщающих потенциалы Бидермана и Клоснера-Сегала:

$$w = \frac{1}{2} p(I_3 - 1) + \sum_{m=1}^3 C_m (I_1 - 3)^m + \sum_{i=1}^2 B_i (I_2 - 3)^i + D(I_1 - 3) \times (I_2 - 3), \quad (4.13)$$

где I_j – инварианты метрического тензора деформированной конфигурации; p – гидростатическое давление; C_i, B_i, D – константы материала.

Вопрос о моделировании эластомеров в армированных слоях решается несколько сложнее, поскольку представление (4,13), справедливо только в случае $\tilde{E} \leq 10^{-2} K$, где K – объемный модуль резины, E – касательный модуль арматуры.

При $\tilde{E} \leq 10^3 G$, где G – касательный модуль сдвига резины, последняя может рассматриваться как классический сжимаемый материал, описываемый потенциалом Мурнагана; наконец, при $10^{-2} K < \tilde{E} < 10^3 G$ необходимо применение потенциала Геррмана

$$w = G \left(e_{ij} e^{ij} + \frac{9\nu}{1+\nu} S\theta - \frac{9\nu(1-2\nu)}{4(1+\nu^2)} S^2 \right) \quad (4.14)$$

и его нелинейных обобщений,

Здесь ν – коэффициент Пуассона эластомера, $S = p/G$, e – тензор деформации, $\theta = \frac{e_i^i}{3}$.

Достаточно сложным является и вопрос об адекватном описании армирующих кордных волокон. Принимаем следующее обобщение моделей О. В. Фотинич и В. Л. Бидермана:

$$w_a = \nu' \tilde{E} \varepsilon' \varepsilon + \frac{1}{2} \tilde{E} \varepsilon'^2 + \int_{-\infty}^{\varepsilon} (\sigma_0 + \tilde{E} \varepsilon)^2 H(\varepsilon + \varepsilon_0) d\varepsilon, \quad (4.15)$$

где $\varepsilon, \varepsilon'$ – продольная и поперечная деформации волокна, $\nu', \sigma_0, \tilde{E}, \varepsilon_0$ – материальные константы; H – функция Хевисайда.

Потенциал армированного слоя в гиперупругом случае мы определяем, принимая подход Л. П. Хорошуна, в виде

$$w = \Psi w_a + (1 - \Psi) w, \quad (4.16)$$

где Ψ – объемная концентрация армирующих волокон, а выбор w оговорен в предшествующих абзацах.

Вопрос о выборе определяющих соотношений значительно усложняется в вязкоупругом случае.

С одной стороны, существенные противоречия, лежащие в основе наиболее употребительной модели поведения эластомера как энтропийноупругого материала, и неприменимость в случае деформирования эластомеров моделей линейной вязкоупругости заставляют принимать весьма сложные нелинейные вязкоупругие модели, обеспечивающие адекватный учет саморазогрева, термомеханической связанности и физической нелинейности.

С другой стороны, учет вязкоупругости значительно усложняет построение определяющих соотношений для армированных слоев как квазиоднородных, поскольку непосредственное применение

энергетической континуализации по Болотину или осреднения по Хорошуну в этом случае приводит к качественно неверным результатам. Так, для композита из двух компонент о простейшей Фойхтовской вязкоупругостью осреднение по Болотину или Хорошуну приводит к Фойхтовской модели, в то время как корректное применение многомасштабных асимптотик показывает, что композит описывается только в рамках модели Вольтерра-Работнова.

Ситуация значительно упрощается в случае циклического деформирования, которое и анализируется в работе, поскольку оно является наиболее характерным для эластокомпозитных оболочек, в частности шин. Пусть эластокомпозитная конструкция нагружается циклически, с периодом нагружения T_c .

В конструкции реализуются четыре основных типа процессов:

1) процесс распространения, отражения и интерференции волн до установления стабилизированного состояния типа вынужденных колебаний. Характерное время этого процесса T , как правило, мало по сравнению с T_c , по крайней мере, в рассматриваемом случае качения шины по опорной поверхности;

2) установившийся процесс типа слабозатухающих вынужденных колебаний или квазистационарный квазистатический (в смысле пренебрежимости локальными инерционными эффектами) процесс с постоянной времени порядка T_c ;

3) процессы механической релаксации и ползучести с характерным временем $T \gg T_c$;

4) процессы саморазогрева и термической стабилизации с характерным временем $T_T \geq T_q \gg T_c$.

Тогда при анализе деформирования в пренебрежении волновыми процессами можно применить многомасштабный асимптотический метод, а именно ввести «быстрое» время t для описания деформирования в пределах цикла, причем при рассмотрении цикла «медленное» время τ рассматривается как параметр («заморожено»), и можно пренебречь изменением температуры, и «медленное» время τ , причем эволюция термо НДС в «медленном» времени описывается осредненными на периоде нагружения T_c уравнениями.

Рассматривая деформирование в «быстром» времени, с учетом почти – периодичности процесса, можно представить характеристики НДС в виде рядов

$$\begin{aligned}
\vec{u} &= \vec{u}_o + \sum_{k=1}^N \vec{u}_{ks} \sin \frac{2\pi kt}{T_c} + \sum_{k=1}^N \vec{u}_{kc} \cos \frac{2\pi kt}{T_c}; \\
\vec{e} &= \vec{e}_o + \sum_{k=1}^N \vec{e}_{ks} \sin \frac{2\pi kt}{T_c} + \sum_{k=1}^N \vec{e}_{kc} \cos \frac{2\pi kt}{T_c}; \\
\vec{\delta} &= \vec{\delta}_o + \sum_{k=1}^N \vec{\delta}_{ks} \sin \frac{2\pi kt}{T_c} + \sum_{k=1}^N \vec{\delta}_{kc} \cos \frac{2\pi kt}{T_c}; \\
T &= T_o.
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Здесь $\vec{\delta}$ – отвечающий выбранному описанию нелинейного деформирования; \vec{e} – тензор напряжений (в случае тензора деформаций Коши-Грина $\vec{\delta}$ – тензор Пиола–Кирхгоффа; T – температура.

Подстановка соотношений (4.17) в выражения для функционала свободной энергии ψ и диссипативного потенциала D , которые принимаются в работе в виде, приведенном в литературе, позволяет, по сути дела, с использованием метода гармонической линейризации или метода Бубнова-Галеркина свести задачу на цикле к системе $2N + I$ квазигиперупругих задач, связанной в случае процедуры Бубнова-Галеркина и несвязанной в случае гармонической линейризации.

Более того, как показано в литературных источниках, для задачи на цикле справедлив аналог вариационного принципа Лагранжа с заменой гиперупругого потенциала на квазипотенциал ψ_N , получаемый подстановкой (4.17) в ψ .

Что же до задачи в «медленном» времени, она оказывается несвязанной линейной задачей термовязкоупругости.

Эволюция температурного поля определяется из решения задачи теплопроводности с внутренними источниками для многослойной оболочками, причем источники определяются потенциалом диссипации; а эволюция НДС описывается уравнениями линейной вязкоупругости с переменными (вследствие изменения температур и строения) параметрами, так что применимо обобщение вариационного принципа Био.

Применимость описанного выше аналога принципа Лагранжа к задаче на цикле позволяет вновь, как и в гиперупругом случае, применять для определения приведенных характеристик армированных слоев, процедуры осреднения по Хорошуну или энергетической (здесь – квазиэнергетической) континуализации по Болотину.

Более того, использование амплитудно-частотной аналогии, характерной для большинства резин, позволяет выбрать квазипотенциал для резин, обобщая подход И. К. Сенченкова с одномерного на общий пространственный случай, что приводит к выражениям, в некотором смысле аналогичный (4.13), (4.14).

С. Вариационная и локальная формулировка уравнений теории эластокомпозитных оболочек в перемещениях и давлениях

Выше были введены кинематические гипотезы относительно деформированного состояния многослойной эластокомпозитной оболочки и обосновано применение вариационных принципов к исследованию как статического, так и циклического деформирования шин.

Перейдем к построению разрешающих уравнений для оболочки.

Наряду с классическим путем построения теорий слоистых конструкций посредством подстановки выражения для тензора деформаций, определяемого кинематическими гипотезами (в нашем случае (4.3) в лагранжиан, или применением принципа Рейсснера с принятием независимых совокупностей кинематического и статических гипотез, к построению теорий многослойных оболочек можно применить предложенное А. С. Кузьмина обобщение метода сопряженных аппроксимаций на аппроксимации по Канторовичу, что приводит как к снижению погрешности аппроксимации в энергетической норме, так и к устройению нефизичных разрывов трансверсальных напряжений на границах слоев. Для применения этого подхода применимо преобразование Юнга-Фенхеля к w и ψ_N , переходя, таким образом, к дополнительной энергии \bar{w} и дополнительному квазипотенциалу $\bar{\psi}_N$.

Вариационные тождества, которым удовлетворяет НДС тела, в форме, обобщающей форму Сьяре, в гиперупругом случае имеет вид:

$$\forall \underline{\tau} \in \sum_v \int \frac{\partial \bar{w}(\delta^{ij})}{\partial \delta^{ij}} \tau^{ij} dv = \int_v e_{ij}(\vec{u}) \tau^{ij} dv$$

$$\begin{aligned}
\forall \vec{v} \in \nu \int_{\nu} \left[\sigma^{ij} \tilde{e}_{ij}(\vec{v}) + \sigma^{kj} \nabla_k u_i \nabla_j v_i \right] dv = \\
= \int_{\nu} f^i v_i dv + \int_{\Omega_{+-}} g^i v_i d\Omega + \int_{\Omega\delta} h^i v_i d\Omega.
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Здесь ν – пространство перемещений; Σ – пространство напряжений; \tilde{e} – тензор малых деформаций; ∇_i – трехмерный оператор ковариантного дифференцирования; f^i , g^i , h^i – заданные массовая сила и поверхностная нагрузка на лицевых Ω_{+-} и боковых $\Omega\delta$ поверхностях оболочки.

Разобьем интегралы в (2.18) следующим образом:

$$\begin{aligned}
\int_{\nu} \frac{\partial \bar{w}(\delta_{ij})}{\partial \delta_{ij}} \tau_{ij} dv &= \int_{\nu} \frac{\partial \bar{w}(\delta_{ij})}{\partial \delta_{\alpha\beta}} \tau_{\alpha\beta} dv + 2 \int_{\nu} \frac{\partial \bar{w}(\delta_{ij})}{\partial \delta_{\alpha 3}} \tau_{\alpha 3} dv + \int_{\nu} \frac{\partial \bar{w}(\delta_{ij})}{\partial \delta_{33}} \tau_{33} dv; \\
\int_{\nu} e_{ij}(\vec{u}) \tau_{ij} dv &= \int_{\nu} e_{\alpha\beta}(\vec{u}) \tau_{\alpha\beta} dv + 2 \int_{\nu} e_{\alpha 3}(\vec{u}) \tau_{\alpha 3} dv + \int_{\nu} e_{33}(\vec{u}) \tau_{33} dv; \tag{4.19} \\
\int_{\nu} \left[\delta^{ij} \tilde{e}_{ij}(\vec{v}) + \delta^{ij} \nabla_i u_k \nabla_j v_k \right] dv &= \int_{\nu} \left[\delta^{\alpha\beta} \tilde{e}_{\alpha\beta}(\vec{v}) + \delta^{\alpha\beta} \nabla_{\alpha} u_k \nabla_{\beta} v_k \right] dv + \\
+ \int_{\nu} \left[\delta^{\alpha 3} \tilde{e}_{\alpha 3}(\vec{v}) + \nabla_{\alpha} u_k \nabla_3 v_k + \nabla_3 u_k \nabla_{\alpha} v_k \right] dv &+ \int_{\nu} \delta^{33} \left[\tilde{e}_{33}(\vec{v}) + \nabla_3 u_k \nabla_3 v_k \right] dv.
\end{aligned}$$

Рассматривая выражения (4.19) можно установить, что если в пространстве перемещений ν введено аппроксимирующие пространство ν^h , определяемое (4.1), (4.11), так что в пространстве деформаций ε введено аппроксимирующее подпространство ε^h , определенное (4.3), то компоненты $\delta^{\alpha 3}$, δ^{33} , τ^{33} , $\tau^{\alpha 3}$ можно рассматривать как элементы пространства \sum' , сопряженного к ν .

Как известно по литературным данным, тогда τ^{i3} представляется в виде

$$\tau_k^{i3} = \sum_{k=1}^{N+1} \tau_{k-1}^{i3k} \chi_k^{k-1}(z), \tag{4.20}$$

причем, если согласно (4.1) функции $\eta_{l-1}^1(z)$, по которым раскладываются перемещения, имеют носитель, сосредоточенный в пределах

l -го и $l-1$ -го слоев, то $\chi_k^{k-1}(z)$ – линейные комбинации этих функций, непрерывные по z .

Здесь под z понимается толщинная координата оболочки.

Таким образом, условие идеального контакта слоев по напряжениям удовлетворяется автоматически, а определяющие соотношения в трансверсальном направлении – лишь в среднем. Определяющие соотношения для $\delta^{\alpha\beta}$ предполагаются выполненными точно.

Применим преобразования Юнга-Фанхеля к получаемому после подстановки указанных аппроксимаций и интегрирования по толщине оболочки потенциалу $\bar{w}(\{\delta_{ijk-1}^k\})$, и получим, таким образом,

потенциал $\bar{w}(e_{ij}\{u_{k-1}^k\})$.

Подставим его во второе из соотношений (2.18), проинтегрированное по толще с учетом точного выполнения определяющих соотношений для $\delta^{\alpha\beta}$ и принятых аппроксимаций для $\delta^{\alpha\beta}$, и принимая $\vec{v} = \vec{u}$, посмотрим лагранжиан оболочки в перемещениях лицевых поверхностей слоев и давлениях в несжимаемых и слабосжимаемых слоях, для которых примем аппроксимацию, совпадающую с аппроксимацией для δ^{33} .

Варьирование так полученного лагранжиана приводит к уравнениям, совпадающим по структуре с уравнениями, вытекающими из применения классического подхода, но отличающимся коэффициентами. Более того, в этих уравнениях возможно провести переход от перемещений лицевых поверхностей, как независимых переменных к обобщенным перемещениям нечетных слоев. Тогда уравнения построенной здесь модели оболочки совпадут с полученными в литературе с точностью до коэффициентов, что позволяет применять развитые разными авторами методы и программные комплексы для расчета оболочек.

В то же время, полученные здесь уравнения в силу сделанных выше замечаний представляются более точными.

Процедура получения разрешающих уравнений в случае циклической вязкоупругости, по сути дела, ничем не отличаются от описанной выше с точностью до замены w на Ψ_N и использования соотношений (4.17).

Учитывая, что при анализе взаимодействия шины с основанием в системе колесной машины основной интерес представляют интегральные характеристики НДС шины, и классический, и развитых здесь подходы представляются равно применимыми. Однако эффекты саморазогрева, особенности локальных распределений напряжений, определяющие точность предсказания механизмов разрушения шины, безусловно определяются точнее в рамках развитых здесь представлений.

Разрешающая система дифференциальных уравнений квазистатического деформирования, не приводимая здесь ввиду громоздкости, имеет общий $16\left(\left(\frac{N}{2}\right)+1\right)$ порядок и является дифференциальной по координатам базы параметризации x_o^α и разностной по номеру слоя, или, что то же самое, по толщинной координате,

Последнее замечание позволяет применить для решения прямых задач механики шин структурно-континуальный подход, предложенный Ю. Н. Новичковым и А. С. Кузьминым.

Как уже отмечалось, что «основное состояние» шины, как многослойной эластокомпозитной оболочки, хорошо описывается в рамках модели шины, получаемой из структурной модели применением процедуры энергетической континуализации и последующим переходом от трехмерной модели композита, как квазиоднородного неклассической деформируемого твердого тела к двумерной модели шины, как оболочки, основанной, таким образом, на некоторой совокупности гипотез для пакета в целом.

Конкретно эту процедуру применим в следующей форме:

1. Заменяем все конечно-разностные соотношения по толщинной координате (разности по номеру слоя) их дифференциальными аналогами второго порядка точности, а именно, рассмотрим

$$f^{n+1} = f(z^{n+1}),$$

тогда

$$f^{n+1} + f^n = 2\bar{f} + \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} \Big|_{z_n^*} (\delta_+^{n+1} - \delta_-^n) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \bar{f}}{\partial z^2} \Big|_{z_n^*} [(\delta_+^{n+1})^2 - (\delta_+^n)^2]; \quad (4.21)$$

$$f^{n+1} - f^n = (\delta_+^{n+1} + \delta_-^n) \left[\frac{\partial \bar{f}}{\partial z} \Big|_{z_n^*} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \bar{f}}{\partial z^2} \Big|_{z_n^*} (\delta_+^{n+1} - \delta_-^n) \right].$$

В рамках принятого вышеописанного

$$\delta_+^{n+1} + \delta_+^n = h^n, \quad (4.22)$$

где h^n – толщина n -го слоя.

Выбирая z_n^* из условия $\delta_+^{n+1} = \delta_-^n = \frac{h^n}{2}$, (4.23) приведем соотношения (2.21) к виду

$$f^{n+1} + f^n = 2\bar{f} + \frac{\partial^2 \bar{f}}{\partial z^2} \times \frac{(h^n)^2}{4}; \quad f^{n+1} - f^n = \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} \times h^n, \quad (4.24)$$

2. Заменяем в квазипотенциале, описывающем деформирование шины, как эластокомпозитной оболочки, конечную сумму квазипотенциалов слоев ее интегральным аналогом:

$$\sum_{n=1}^N w_n = \sum_{n=1}^N \int_{h^n} w_n dz^n = \int_{\mathbb{H}} \bar{w} dz, \quad (4.25)$$

причем подставим в выражения для w_n представления искомым функций (4.24).

Получаемая модель есть модель неоднородной (вследствие нерегулярности строения оболочки) неклассической среды.

3. Примем гипотезы (2.1) для описания поля перемещений в среде; аналогичные аппроксимации примем для внутренних переменных

$$\bar{\chi} \equiv \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \bar{\xi} \equiv \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (4.26)$$

по отношению к ним пренебрежем в соотношениях, аналогичных со отношениям Коши, трансверсальными компонентами.

В лагранжиане системы конечные суммы заменяются их интегральными аппроксимациями, а конечные разности – дифференциальными аналогами, того же порядка точности, что и исходные кинематические гипотезы. Это приводит к модели шины как квазиоднородного трехмерного неклассического упругого тела (континуум с внутренними степенями свободы) в гиперупругом случае или неклассического вязкоупругого тела в случае циклического деформирования.

В рамках этой «континуальной» модели определяется «основное состояние».

На основе предположения о малости относительной толщины шины для оболочки в целом принимаются гипотезы (4.1) или аппроксимация рядами по полиномам Лежандра по толщинной координате z .

С применением вышеописанной процедуры сопряженных аппроксимаций, обобщаемой на моментноупругие среды или среды с более высоким типом нелокальности за счет анализа законов сохранения моментов высоких порядков, получается разрешающая система уравнений нетонкой оболочки из неклассического материала,

В общем случае ее порядок не превышает 36, что при числе слоев более 4 отвечает понижению порядка задачи, В случае $N > 13$, что характерно для радиальных сельскохозяйственных шин, понижение порядка является не менее чем трехкратным, что значительно упрощает численное решение задачи, особенно в циклическом случае.

Использование гипотез (2.1) приводит к уравнениям порядка не выше 14, то есть снижает порядок системы еще вдвое, снижая, однако, и точность.

4. С использованием вариационного принципа Сенченкова-Карнаухова получим уравнения шины в рамках принятой совокупности гипотез для пакета в целом.

Заметим, что учет поперечных сдвигов и трансверсального обжатия приводил бы к существенным нефизичным особенностям в распределении контактных усилий.

Получаемая система двумерных уравнений (общего 20-го порядка в квазистатическом случае) вполне удовлетворительно описывает «основное состояние» эластокомпозитной оболочки (погрешность на уровне 7...8 %), В то же время, погрешность в определении циклов полей напряжений и трансверсальных деформаций в слоях оболочки может достигать 30 %, при погрешности в энергии деформации шины и в суммарной диссипации за цикл не превышают 4...6 %.

5. При необходимости уточнения локальных полей напряжений и деформаций в зонах искажения НДС (околоконтактные зоны, краевые зоны, зоны резкого изменения геометрических и жесткостных параметров, такие как окрестность точки брекера, окрестность поляры тора) на базе исходных уравнений структурной теории с использованием концепции обобщенных краевых эффектов опреде-

ляются корректирующие самоуравновешенные (в интегральном смысле по толщине) решения.

Заметим, что вклад в интегральные характеристики эти корректирующие решения практически не дают, что позволяет исключить пятую стадию структурно-континуального исследования при анализе интегральных характеристик, например, при определении выходных характеристик шины.

5. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛАСТОКОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ОСНОВАНИЕМ

Выше введены модели эластокомпозитной оболочки и деформируемого основания.

В реальных условиях рассматриваемого приложения шина находится в контакте с деформируемым основанием, с одной стороны, и с ободом колеса, с другой (рисунок 5.1), таким образом, нагружение шины имеет существенно контактный характер.

Учитывая, что жесткость колеса с ободом многократно превышает жесткости слоев шины, естественно предполагать обод абсолютно жестким шероховатым штампом с известной геометрией.

Зона контакта шины с ободом, обозначаемая даже в этом параграфе \mathcal{C}_k , зависит от нагруженности шины, причем контакт является односторонним с трение.

Введем две системы координат: подвижную систему координат, связанную с центром колеса, такую, что ось колеса совпадает с осью y , ось z направлена вертикально, и конвективную систему координат, сопутствующую лицевой поверхности зоны обода шины (рисунки 5.2, 5.3), Последняя в начальной конфигурации шины частично совпадает с торцевой поверхностью оболочки, а частично с лицевой поверхностью наружного слоя шины, и, таким образом, в начальной конфигурации может быть репараметризована координатами гауссова триэдра глобальной базы параметризации оболочки, введенной выше, Вопрос об одновременном использовании конвективной системы координат и лагранжева описано Л. М. Зубовым применительно к задачам теории тонких оболочек и В. Н. Винни-

ченко и А. С. Кузьминым применительно к оболочкам типа Тимошенко. Следуя Винниченко и Кузьмину, наряду с «естественными» системами координат оболочки, сопутствующим начальной и актуальной конфигурациям, введем еще одну систему координат, сопутствующую некоторому фиктивному состоянию шины, возможно неравновесному, которое отвечает совпадению торцевой поверхности оболочки с ответной зоной обода. Введение этой системы имеет то преимущество, что для нее полностью задана геометрия, а перемещения, которыми осуществляется переход от этой конфигурации, в актуальную малы.

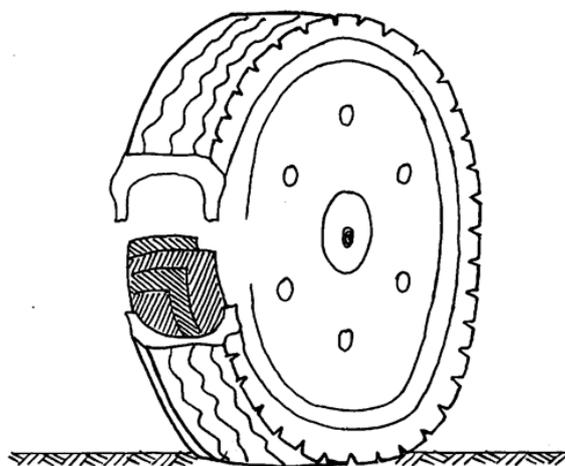


Рисунок 5.1 – Контактное нагружение шины

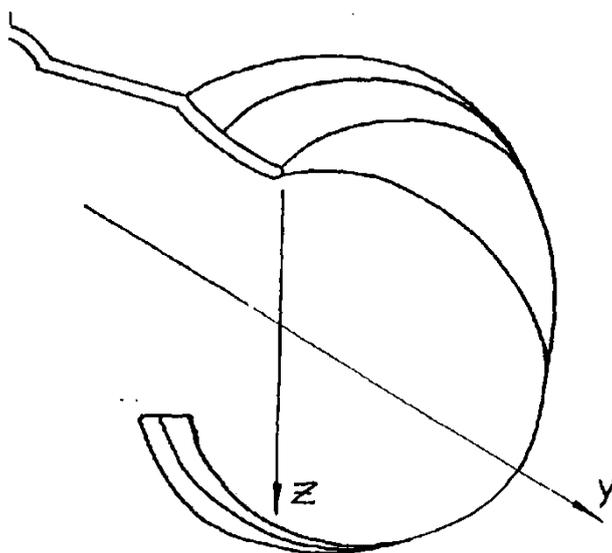


Рисунок 5.2 – Подвижная система координат колеса

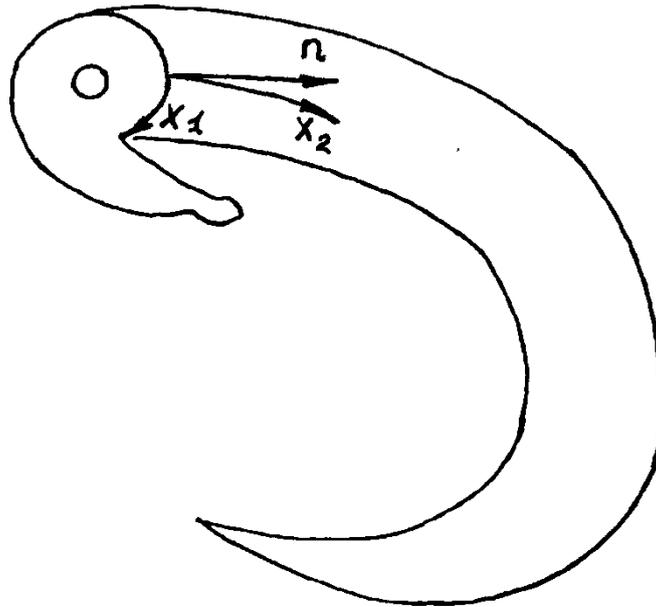


Рисунок 5.3 – Параметризация зоны обода шины

Уравнение поверхности обода в этой системе координат имеет вид

$$\psi(\vec{R}) = 0, \quad (5.1)$$

где \vec{R} – радиус-вектор точки на обode; ψ – известная функция координат.

Переход от базиса колеса к такой параметризации представляется весьма простым, поскольку в системе координат колеса уравнение поверхности обода есть

$$\chi(\vec{R}^*) = 0 \quad (5.2)$$

и, таким образом, соотношение

$$\psi(\vec{R}) = \chi(\vec{R}^*) \quad (5.3)$$

устанавливает функциональную связь между этими системами координат, так как задает совпадение касательных плоскостей и нормалей к поверхности обода в этих системах координат.

Переход от начального базиса к отсчетному получается методом фиктивной деформации.

Уравнение непроникания шины в обод в базисе отсчетной конфигурации имеет вид

$$\psi(\vec{R}) + \vec{u}_i \nabla_i \psi \geq 0, \quad (5.4)$$

где \vec{u} – вектор перемещения лицевой поверхности зоны обода шины из фик-

тивного состояния в актуальное, ∇_i – оператор ковариантного дифференцирования в вышеописанной системе координат фиктивного отсчетного состояния.

В зоне контакта шины с ободом ставятся статические граничные условия:

1. Контактное давление неотрицательно

$$q_n \geq 0, \quad (5.5)$$

причем

$$\begin{cases} q_n > 0 & \vec{R} \in \mathcal{C}_k \\ q_n = 0 & \vec{R} \notin \mathcal{C}_k, \end{cases} \quad (5.6)$$

то есть

$$q_n(\vec{R}) \left[\vec{\psi}(\vec{R}) + u_i \nabla_i \psi \right] = 0 \quad (5.7)$$

2. Касательные составляющие вектора контактных усилий связаны с нормальной компонентой, то есть с контактным давлением, и скоростью проскальзывания в зоне скольжения – части контактной зоны, в которой имеют место взаимные тангенциальные смещения шины и обода, законом трения. Несмотря на многие существующие обобщения классического закона трения, нами для простоты принята простая обобщенная кулоновская модель трения:

$$\begin{cases} |\vec{q}_\tau| < g(g_n) \vec{v}_\tau = 0; R \in \mathcal{C}'_k \\ |\vec{q}_\tau| = g_1(q_n, |\vec{v}_\tau|) \vec{v}_\tau = -\lambda \vec{q}_\tau; R \in \mathcal{C}''_k; \lambda > 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

Здесь \vec{v}_τ – касательная компонента скорости движения шины относительно обода; g_0, g_1 – функции трения, причем далее будем считать

$$g_0(q_n) = g_1(q_n, 0), \quad (5.9)$$

что приводит к некоторым упрощениям дальнейшего анализа; $\mathcal{C}'_k, \mathcal{C}''_k$ – зоны сцепления и скольжения, соответственно.

Рассмотрим теперь контакт шины с деформируемым основанием.

Очевидно, что не существует легко определяемого фиктивного состояния оболочки, обеспечивающего одновременной близости поверхностей контакта шины и с ободом и с основанием в актуаль-

ной конфигурации к ее соответствующим поверхностям в отсчетной конфигурации. Более того, весьма непросто предсказать сам вид такой конфигурации, поскольку осадки основания, особенно в процессе колееобразования, сопоставимы с толщиной шины.

Рассмотрим систему координат, сопутствующую дневной поверхности основания с осью Z , направленной по внутренней (по отношению к основанию) нормали к этой поверхности и осуществляющей движение вместе со следом системы координат колеса на основание (рисунок 4.4). Заметим, что в такой системе координат колесо с ободом находится во вращении относительно оси и перемещении по вертикали.

Уравнение отсчетной конфигурации шины в этой системе координат имеет вид

$$z_{\text{ш}} = \eta(x^1, x^2). \quad (5.10)$$

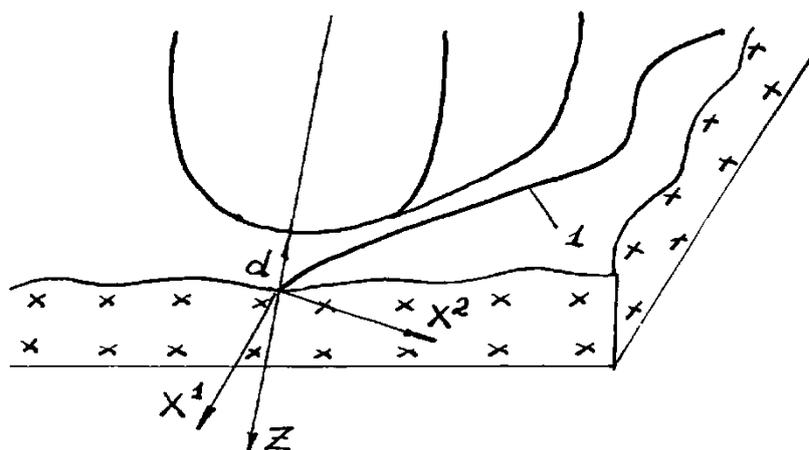


Рисунок 5.4 – Параметризация основания:

l – Траектория следа центра колеса на основание

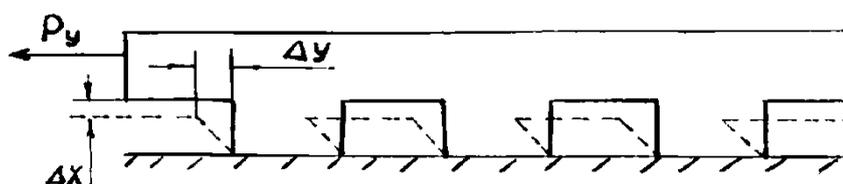


Рисунок 5.5 – Схема контактного деформирования протектора

В деформированном состоянии дневная поверхность основания может быть описана уравнением

$$z_{\delta}^* = \chi(x_*^1, x_*^2), \quad (5.11)$$

Здесь

$$x_*^{\alpha} = x^{\alpha} + u_{\delta}^{\alpha}; \quad z_{\delta}^* = w_{\delta}, \quad (5.12)$$

где $(u_{\delta}^1, u_{\delta}^2, w_{\delta})^T$ – вектор перемещения дневной поверхности основания.

Поверхность шины в актуальной конфигурации в этой системе координат есть

$$z_{\text{ш}}^* = \eta^* (x_{*\text{ш}}^1, x_{*\text{ш}}^2), \quad (5.13)$$

где

$$x_{*\text{ш}}^{\alpha} = x^{\alpha} + u_{\text{ш}}^{\alpha}; \quad (5.14)$$

$$z_{\text{ш}}^* = z_{\text{ш}} (x_{*\text{ш}}^1, x_{*\text{ш}}^1) + w_{\text{ш}} (x_{*\text{ш}}^1, x_{*\text{ш}}^1).$$

Здесь $(u_{\text{ш}}^1, u_{\text{ш}}^2, w_{\text{ш}})$ – вектор перемещения поверхности шины в той же системе координат,

Вектор нормали к дневной поверхности в деформированном состоянии есть

$$\vec{m}_* = (\vec{m}E_3 + E_{\alpha} \vec{r}_{\alpha}) I^{-\frac{1}{2}}, \quad (5.15)$$

где $\{\vec{r}^{-1}, \vec{r}^{-2}, \vec{m}\}$ – единичный базис рассматриваемой системы координат, вообще говоря, криволинейной;

$$E_{\alpha} = \omega_{\beta} e_{\alpha}^{\beta} - \omega_{\alpha} (1 - e_{\gamma}^{\gamma}) \quad (5.16)$$

$$E_3 = (1 + e_1^1)(1 + e_2^2) - e_2^1 e_1^2,$$

$$I = I + 2\varepsilon_{\alpha}^{\alpha} + 4(\varepsilon_1^1 \varepsilon_2^2 - \varepsilon_2^1 \varepsilon_1^2). \quad (5.17)$$

В соотношениях (4.17), (4.18)

$$\varepsilon_{\beta}^{\alpha} = \frac{1}{2}(e_{\beta}^{\alpha} + e_{\beta}^{\alpha} + e_{\beta}^{\gamma} e_{\beta}^{\alpha} + \alpha^{\alpha\gamma} \omega_{\beta} \omega_{\gamma})$$

$$e_{\beta}^{\alpha} = \nabla_{\beta} u_{\delta}^{\alpha} + B_{\delta}^{\alpha} w_{\delta} \quad (5.18)$$

$$\omega_{\alpha} = B_{\alpha\beta} u_{\delta}^{\beta} - \nabla_{\alpha} w_{\delta}.$$

Здесь $\underset{\sim}{a}, \underset{\sim}{B}$ – первый и второй метрические тензоры дневной поверхности основания в вышеописанной параметризации, ∇_{α} – оператор ковариантного дифференцирования в этой метрике, $u_{\delta}^{\beta}, w_{\delta}$

– компоненты вектора перемещения дневной поверхности.

Для координатных векторов деформированной дневной поверхности имеем соотношения, аналогичные (5.16):

$$\vec{r}_\alpha^* = \vec{r}_\beta^* (\delta_\beta^\alpha + e_\alpha^\beta) + \vec{m}\omega_\alpha \quad (5.19)$$

Тогда для расстояния между актуальными поверхностями шины и основания имеем (по нормали к последней)

$$d(\vec{x}_*) = \left\{ \left[\eta(\vec{x}_{\text{ш}}) + w_{\text{ш}}(\vec{x}_{\text{ш}}) \right] E_3(\vec{x}_\delta) I^{-\frac{1}{2}}(\vec{x}_\delta) - w_\delta(\vec{x}_\delta) E_3(\vec{x}_{\text{ш}}) I^{-\frac{1}{2}}(\vec{x}_{\text{ш}}) + x_*^\alpha \right. \\ \left. \left[\omega_\alpha(\vec{x}_\delta) \times E_3(\vec{x}_{\text{ш}}) I^{-\frac{1}{2}}(\vec{x}_{\text{ш}}) - \omega_\alpha(\vec{x}_{\text{ш}}) E_3(\vec{x}_\delta) I^{-\frac{1}{2}}(\vec{x}_\delta) \right] \right\} \\ \times \frac{I^{\frac{1}{2}}(\vec{x}_{\text{ш}}) I^{\frac{1}{2}}(\vec{x}_\delta)}{E_3(\vec{x}_\delta) E_3(\vec{x}_{\text{ш}})} \quad (5.20)$$

где $\vec{x}_{\text{ш}}, \vec{x}_\delta$ – определяются системой нелинейных уравнений

$$x_{\text{ш}}^\beta = x_*^\alpha \left[\delta_\alpha^\beta + e_\alpha^\beta(\vec{x}_{\text{ш}}) - \frac{a^{\gamma\beta}(\vec{x}_{\text{ш}}) E_\gamma(\vec{x}_{\text{ш}}) \omega_\alpha(\vec{x}_{\text{ш}})}{E_3(\vec{x}_{\text{ш}})} \right] - \\ - u_{\text{ш}}^\beta(\vec{x}_{\text{ш}}) + \frac{E_\alpha(\vec{x}_{\text{ш}}) a^{\alpha\beta}(\vec{x}_{\text{ш}})}{E_3(\vec{x}_{\text{ш}})} \left[\eta(\vec{x}_{\text{ш}}) + w_{\text{ш}}(\vec{x}_{\text{ш}}) \right] \\ x_\delta^\beta = x_*^\alpha \left[\delta_\alpha^\beta + e_\alpha^\beta(\vec{x}_\delta) - \frac{a^{\gamma\beta}(\vec{x}_\delta) E_\gamma(\vec{x}_\delta) \omega_\alpha(\vec{x}_\delta)}{E_3(\vec{x}_\delta)} \right] - \\ - u_\delta^\beta(\vec{x}_\delta) + \frac{E_\alpha(\vec{x}_\delta) a^{\alpha\beta}(\vec{x}_\delta)}{E_3(\vec{x}_\delta)} w_\delta(\vec{x}_\delta) \quad (5.21)$$

В продолжении о малости деформаций основания при больших перемещениях ($e_\beta^\alpha \approx 0, \omega_\alpha \approx 0$) и первоначально почти плоской дневной поверхности ($B_\beta^\alpha \approx 0, a^{\alpha\beta} = a_{\alpha\beta} = a_\beta^\alpha = \delta_\beta^\alpha$), соотношения (5.21), (5.20) допускают значительное упрощение:

$$x_{\text{ш}}^\beta = x_*^\beta - u_{\text{ш}}^\beta; \quad x_\delta^\beta = x_*^\beta - u_\delta^\beta \quad (5.22)$$

$$d(\vec{x}_*) = \eta(\vec{x}_*) + w_{\text{ш}}(\vec{x}_*) - w_\delta(\vec{x}_*) - \frac{\partial n}{\partial x^\alpha} \Big|_{x_*} u_{\text{ш}}^\alpha(\vec{x}_*)$$

Более реалистичным представляется предположение о среднем изгибе первоначально почти плоской дневной поверхности ($e_\beta^\alpha \approx 0, \omega_\alpha \neq 0$). Тогда соотношения (5.21) преобразуются к виду

$$\begin{aligned}
 x_{\text{ш}}^\beta(\bar{x}_*) &= x^\alpha \left[\delta_\alpha^\beta + \frac{\omega_\alpha \omega^\beta}{(1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_{\text{ш}}}} \right] - \\
 &- u_{\text{ш}}^\delta(\bar{x}_{\text{ш}}) + \frac{\omega^\beta (\eta + w_{\text{ш}})}{(1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_{\text{ш}}}} \\
 x_{\delta}^\beta(\bar{x}_*) &= x^\alpha \left[\delta_\alpha^\beta + \frac{\omega_\alpha \omega^\beta}{(1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_\delta}} \right] - \\
 &- u_{\delta}^\beta(\bar{x}_\delta) - \frac{\omega^\beta \omega_\delta}{(1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_\delta}}.
 \end{aligned} \tag{5.23} \text{ и } (5.24)$$

а выражение для расстояния $d(\bar{x}_*)$ принимает форму

$$\begin{aligned}
 d(\bar{x}_*) &= \left[(1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_\delta} (1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_{\text{ш}}} \left\{ \left[\eta(\bar{x}_{\text{ш}}) + \right. \right. \right. \\
 &+ w_{\text{ш}}(\bar{x}_{\text{ш}}) \left. \left. \left. \right] (1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_\delta} - w_\delta(\bar{x}_\delta) (1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_{\text{ш}}} + \right. \right. \\
 &\left. \left. \left. x^\alpha \left[\omega_\alpha(\bar{x}_\delta) (1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_{\text{ш}}} - \omega_\alpha(\bar{x}_{\text{ш}}) (1 - \omega_\gamma \omega^\gamma)^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_\delta} \right] \right\} \right].
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

Дальнейшее упрощение (5.25) с использованием (5.23), (5.24) приводит к следующим соотношениям:

$$\begin{aligned}
x_{\text{ш}}^{\beta}(\bar{x}_{\delta}) &= x_{\delta}^{\beta} + u_{\delta}^{\beta}(\bar{x}_{\delta}) - u_{\text{ш}}^{\beta}(\bar{x}_{\delta}) - \\
& - \frac{\omega^{\beta}(\bar{x}_{\delta})}{(1 - \omega_{\gamma} \omega^{\gamma})^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_{\delta}}} \left[(\eta + w_{\text{ш}}) \Big|_{\bar{x}_{\delta}} - w_{\delta} \Big|_{\bar{x}_{\delta}} \right] \\
d(\bar{x}_{\delta}) &= \left[\eta(\bar{x}_{\delta}) + w_{\text{ш}}(\bar{x}_{\delta}) - w_{\delta}(\bar{x}_{\delta}) \right] \left[1 - \right. \\
& \left. - \frac{\partial \eta}{\partial x^{\beta}} \Big|_{\bar{x}_{\delta}} \frac{\omega^{\beta}(\bar{x}_{\delta})}{(1 - \omega_{\gamma} \omega^{\gamma})^{\frac{1}{2}} \Big|_{\bar{x}_{\delta}}} \right] + \frac{\partial \eta}{\partial x^{\beta}} \Big|_{\bar{x}_{\delta}} \left[u_{\delta}^{\beta}(\bar{x}_{\delta}) - u_{\text{ш}}^{\beta}(\bar{x}_{\delta}) \right].
\end{aligned} \tag{5.26}$$

Нетрудно видеть, что второе из соотношений (5.26) вполне пригодно для формулировки условия непроникания шины в основание в точке \bar{x}_{δ} :

$$d(\bar{x}_{\delta}) \geq 0 \tag{5.27}$$

Замечание. Введенная система координат, вообще говоря, не только криволинейна, но и стохастична вследствие микропрофиля и макрорельефа основания,

Соотношения (5.19–5.21) позволяют получить с учетом (5.10) уравнения, связывающие систему координат шины в фиктивной отсчетной конфигурации, введенную при рассмотрении контакта шины с ободом, а систему координат дневной поверхности основания. Заметим, что эти связи также являются существенно нелинейными. Их явный вид не приводится ввиду громоздкости.

Рассмотрим теперь статические условия на контакте шины с основанием.

Представляется очевидным, что принятая нами модель протектора, по сути дела исключает применение условий вида (5.15–5.17), ибо их использование, безусловно, вызовет весьма значительную погрешность в определении контактной зоны, зон скольжения и сцепления.

В то же время, подробный анализ контактного взаимодействия элементов рисунка протектора с основанием представляет собой весьма сложную самостоятельную задачу, выходящую за рамки нашего исследования.

Ниже применяется подход, развитый Фремоном, Змитровичем, Куренье и Кларбрингом, обобщаемый нами с целью учета анизотропии контактной поверхности в тангенциальном направлении. Заметим, что аналогичный подход к моделированию поверхностей и линий раздела тел развит (безотносительно к трению) Ю. З. Повстенко и Я. С. Подстригачем.

Рассмотрим сначала весьма грубо реальную работу протектора (рисунок 4.4). Из рисунка видно, что действие касательной силы на грунтозацепы приводит к развитию нормальных перемещений, причем эта зависимость в случае геометрической анизотропии системы грунтозацепов в пределах зоны контакта является анизотропной.

В силу принципа взаимности, очевидно, аналогичная анизотропия должна быть характерна и для влияния нормальной силы на тангенциальные смещения.

Учитывая, что даже в рамках модели Амонтона-Кулона коэффициент трения по направлению \vec{a} пропорционален суммарной площадке микроконтактного, пересекаемой \vec{a} , а в случае анизотропии системы грунтозацепов анизотропия этого параметра в зависимости от \vec{a} имеет место, следует ожидать анизотропии связи касательных напряжений на поверхности контакта со скоростью взаимного проскальзывания контактирующих тел, а также анизотропии критического касательного напряжения проскальзывания.

С учетом сделанных выше замечаний, условие непроникания шины в основание (5.27) заменяется условием

$$\overline{d(x_\delta)} + \varepsilon q_n \geq 0. \quad (5.28)$$

При этом, обобщая результаты Кларбринга, для контактного давления примем

$$q_n = C_N [d]^{m_N} + \frac{1}{2} l d^{l-1} \gamma^{\alpha\beta} \tilde{u}_\alpha^\tau \tilde{u}_\beta^\tau; \quad d < 0 \quad (5.29)$$

$$q_n = 0; \quad d \geq 0.$$

При этом для условий контакта в касательном направлении примем согласованную с (5.29) в смысле возможности термодинамически корректного описания модель

$$q_\tau^\alpha = d^l \gamma^{\alpha\beta} \tilde{u}_\beta^\tau \quad d < 0 \quad (5.30)$$

$$\vec{u} = \vec{u}^\tau - \vec{\xi} \quad (5.31)$$

$$\beta_{\alpha\beta} q_\tau^\alpha q_\tau^\beta \leq C_T |d|^{m_T} \vec{\eta} = 0 \quad (5.32)$$

$$\beta_{\alpha\beta} q_\tau^\alpha q_\tau^\beta = C_T |d|^{m_T} \quad (5.33)$$

$$\frac{\beta_{\alpha\beta} q_\tau^\alpha}{|q_\tau|} = C_T |d|^{m_T} \frac{\eta_B}{|\eta_B|} \vec{\eta} \neq 0 \quad (5.34)$$

В соответствии (5.23–5.34) показатели степени m_N, m_T, l симметричные тензоры $\tilde{\gamma}$ и $\tilde{\beta}$, коэффициенты $\tilde{\mathcal{E}}, C_N, C_T$, – константы контактного взаимодействия, $\vec{\xi}$ – вектор взаимного касательного смещения контактирующих тел, определяемого скоростными эффектами $\vec{\eta} = \frac{\partial \vec{\xi}}{\partial t}$, \vec{u}_τ – вектор полного взаимного касательного смещения контактирующих тел.

Этот закон может рассматриваться как некоторое преобразование и обобщение принятого в литературе.

При решении задачи термовязкоупругости для шин, точнее, при расчете полей температуры необходимо учесть тепловое сопротивление этого слоя и диссипацию энергии в зонах скольжения, определяемую диссипативным потенциалом

$$D = C_T |d|^{m_T} |\chi^{\alpha\beta} \eta_\beta|, \quad (5.35)$$

где тензоры $\beta_{\alpha\beta}$ и $\chi^{\alpha\beta}$ связаны соотношением

$$\beta_{\alpha\beta} \chi^{\alpha\beta} = \delta_\alpha^\beta, \quad (5.36)$$

δ_α^β – символ Кронекера.

Таким образом, замыкая системы уравнений моделей шины и основания граничными условиями, условиями контактного взаимодействия шины с основанием и ободом, и, наконец, законом движения колеса как абсолютно твердого тела, полностью характеризуемого динамо на его оси, приходим к полной замкнутой постановке задачи о контактном взаимодействии колеса с шиной с деформируемым основанием.

Эта задача допускает формулировку в виде задачи нелинейного программирования.

Действительно, для абсолютно твердого колеса существует лагранжиан. Ограничиваясь рассмотрением квазистатического циклического деформирования шины, как показано выше, по крайней мере, для задачи на цикле также может быть введен квазипотенциал. Аналогичный квазипотенциал может быть введен и для деформируемого основания. Здесь мы не будем останавливаться подробнее на особенностях его построения, заметим только, что для его формулировки используются вариационные принципы теории фильтрации и принцип Седова.

Таким образом, для каждой из подсистем без учета контактного взаимодействия может быть, по крайней мере в рассматриваемом случае циклического деформирования, введен по меньшей мере квазипотенциал.

Как известно, для контактных условий (5.4–5.9); (5.28–5.33) могут быть введены суперпотенциалы в смысле Панайотопулоса или Рубинова.

Более того, для этих суперпотенциалов может быть определено преобразование двойственности, что позволяет применить предложенный А. С. Кравчуком подход к постановке задач, сводящихся к решению вариационных и квазивариационных неравенств, к которым, очевидно относится и рассматриваемая проблема, как задач нелинейного программирования.

А именно, применяя, по сути дела, подход Куна-Таккера при учете ограничений типа неравенств, на основе квазипотенциалов и лагранжианов подсистем «колеса», «шины», «основание» и контактных суперпотенциалов строится функционал L , имеющий седловую точку на решение.

При этом он достигает минимума по переменным, непосредственно входящим в квазипотенциалы (основным переменным), и максимума по множителям Лагранжа, являющимся двойственными величинами по отношению к явно входящим в суперпотенциалы; причем на решении значения этих множителей Лагранжа приобретает ясный физический смысл. Так, множители Лагранжа при условии непроникания имеют смысл контактных давлений и т. д.

Явный вид функционала L мы здесь не выписываем ввиду громоздкости.

Основным методом решения задачи о седловой точке является метод Нелдера-Мида в форме алгоритма Удзавы, то есть метод альтернирующих итераций, в случае статической задачи с учетом пластичности, термовязкоупругости и фильтрации имеющей вид:

1. Задаются контактными зонами C_0^0, C^0 , распределениями контактных давлений $\overline{q_0^0}, \overline{q_s^0}$ параметром пластичности ω , концентрациями n_a^0, n_w^0 .

2. Решаем прямую задачу механики колеса с шиной на деформируемом основании, минимизируя, таким образом, функционал по основным переменным.

3. Проекционным методом с использованием стандартных проекторов теории контактных задач, связанной термовязкоупругости, теории пластичности и теории фильтрации определяем следующие приближения для введенных в п. 1. полей и зон.

4. Повторяем шаги 1–3 до достижения удовлетворительной точности по интересующим характеристикам.

В случае динамических задач процедура Нелдера-Мида применяется в сочетании с методом временных слоев при нестационарной динамике и одним из достаточно хорошо разработанных и обсужденных выше методов усреднения для задач циклического деформирования.

Так, например, в случае прямолинейного в среднем движения колеса с постоянной в среднем угловой скоростью Ω естественно ввести быстрое время $\tau = \omega t$, и в пределах «цикла» искать решение в рядах Фурье по ωt , а усредняя за цикл, перейти к осредненной задаче для определения длительного поведения. При этом жесткостные характеристики шины, потери на качение и т. д. определяются расчетом цикла; температурные поля в шине, глубина колеи, дальнейшее поле давлений в основании и др. – решением квазистатической задачи методом временных слоев.

Статические характеристики шины определяются в упругом приближении для материала шины и упругопластическом – для основания.

Остановимся на методах прямых задач механики шины на деформируемом основании.

Учитывая, что при решении прямой задачи заданы контактные давления, зона сцепления и зона скольжения, то задача распадается

на три:

1. Задача динамики колеса под действием заданных контактных условий и внешних нагрузок.

Как правило, в этой задаче нетрудно найти точное аналитическое решение.

2. Задача механики шины под действием заданных контактных условий с заданным законом изменения вектора перемещения, контактирующей поверхности в зоне сцепления и заданной нормальной компонентной вектора перемещения в зоне скольжения в контакте с ободом.

3. Задача деформирования слоистого полупространства под действием заданных контактных условий при известном параметре пластичности.

Для решения задачи 3 используем метод Канторовича в следующей форме,

А. Решения задачи теории слоистого основания отыскиваются в виде рядов по полиномам Лежандра по толщинной координате в пределах слоя:

$$f^k = \sum_{n=0}^{N_k} f^{kn}(x^1, x^2, t) P_n \left(\frac{z - z_c^k}{H_c^k} \right), \quad (5.37)$$

где f^{kn} – неизвестные функции координат базы параметризации x^1, x^2 ; z_c^k – координата срединной поверхности слоя, H_c^k – толщина слоя.

Для подстилающего полупространства используются разложения в степенные ряды:

$$f = \sum_{n=1}^{N_0} \frac{f^n(x^1, x^2, t)}{z^n} \quad (5.38)$$

и, таким образом, исходная трехмерная задача сводится к двумерной.

При контактных расчетах, как показали вычислительные эксперименты, достаточно $N_1 = 3, N_2 = 7, N_0 = 4$.

В. Для решения двумерной задачи применяется следующая методика:

1. В контактной зоне проводится конечноэлементная триангуляция, причем триангулируется не только контактная зона, но и зона, величиной $1/2$ ширины шины в каждую сторону. Это позволяет

не перестраивать грануляционную секту при изменении пятна контакта. В расчетах, как правило, принималось количество конечных элементов, не превосходящее 250, элементы использовались с простейшими функциями формы /симплекс-элементы/ и применялась процедура сопряженных аппроксимаций при определении матриц жесткости.

2. Вне этой зоны в направлении, ортогональном кривой геометрических центров последовательных пятен контакта, использовалась аппроксимация рядами экспонент

$$f = \sum_{k=1}^K f_k(S, t) e^{-\lambda_k v}, \quad (5.39)$$

где S – координата вдоль кривой геометрических центров пятен контакта, v – нормальная к ней координат.

Обратный переход к координатам x^1, x^2 осуществляется стандартным образом.

Таким образом, задача сводится к системе алгебраических и обыкновенных дифференциальных нелинейных уравнений в статическом случае, в динамическом же случае – к системе обыкновенных дифференциальных и двумерных уравнений в частных производных, для дифференциальных уравнений вне зоны последовательных пятен контакта ставятся условия затухания на бесконечности, что обеспечивается принятием в этой аппроксимации решений суммами обратных экспонент:

$$f_k(S, t) = \sum_{j=1}^J f_k^j(t) e^{-j s}. \quad (5.40)$$

Как показывает численный эксперимент, удовлетворительная точность достигается при $J = 8, K = 6$.

3. Циклические задачи решаются разложением на периоде в тригонометрические ряды с использованием метода Бубнова-Галеркина или метода гармонического баланса для быстрого времени, и методом временных слоев – для медленного.

С. Для решения нелинейных прямых используется метод предположения по параметру с коррекцией по Ньютону.

Описанная методика реализована на ЭВМ в программном вычислительном комплексе, STROG M разработанном А. С. Кузьминым и др. при участии автора.

Для решения прямой задачи механики шин используется методика расчета эластокомпозитных слоистых оболочек и описанная в литературе.

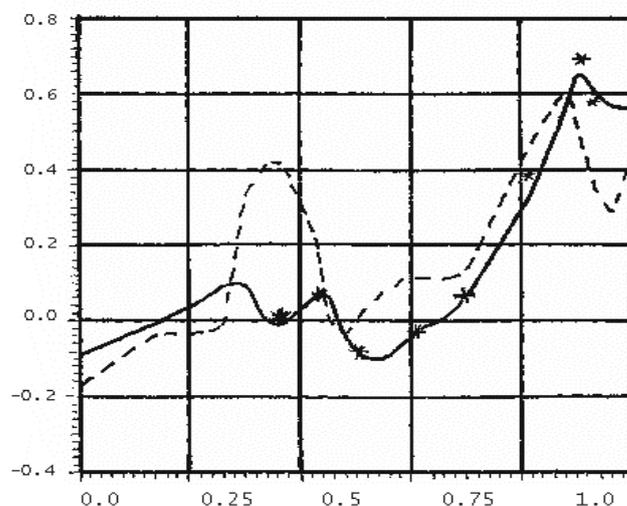
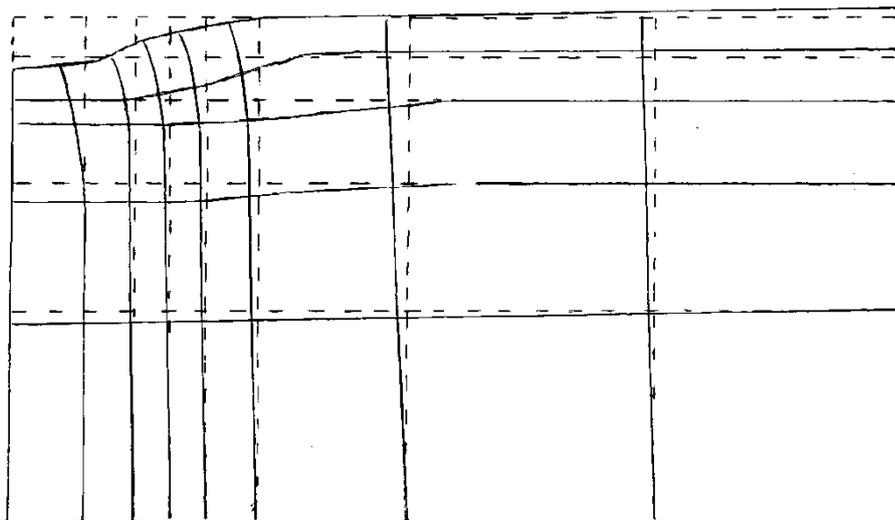


Рисунок 5.6 – Меридиональные деформации покровных резин



**Рисунок 5.7 – Осадки основания в окрестности
прямоугольного штампа при промывке**

При этом контактная и околоконтактная зоны (размер околоконтактной зоны $4\sqrt{HR}$, где H – толщина беговой части шины, R – максимальный радиус беговой части шины при загрузке только внутренним давлением) триангулируются контактными элементами в рамках континуальной теории на основе сочетания метода расчленения НДС, метода понижения размерности Канторовича-Власова и метода последовательных нагружений с коррекцией по Ньютону, с использованием алгоритма Ракитского для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и уточняется, корректирую-

щими структурными решениями, конечноэлементными в контактных и околоконтактных зонах и решениями типа краевых эффектов для сопряжения структурного решения и основного состояния.

Компоненты векторов перемещений и повторов колеса используются для глобального сопряжения.

На рисунке 4.6 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных результатов для меридиальным деформаций покровных резин шины радиального строения 11/80 R 20 модели Alpha – 10 фирмы Pirelli, Расхождения между результатами расчета и эксперимента не превышают 10 %.

Рисунок 4.7 иллюстрирует осадки в основании (толщины армированного слоя равна нулю, материала – глина Бангкок лой и полупространство разной плоскости) под прямоугольным штампом при условии свободного водообмена через дневную поверхность (режим «проливка» основания). Результаты расчета сопоставлены с конечноэлементным расчетом Генса, откуда и заимствованы данные.

Нетрудно видеть, что согласие результатов в качественном отношении превосходно, а количественные расхождения составляют 10...15 %. Глине моделировалось соотношениями Астаратон с учетом пластичности в рамках модели Генса «поверхности состояния».

Таким образом, сложно считать, что предложенные модели шины и грунта, методики их расчета и реализующее эти методики математическое обеспечение достаточно корректны и эффективны.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Факторы, оказывающие наибольшее влияние на ресурс шины, оценены путем априорной дифференциации. Это внутреннее давление в шинах, качество изготовления шины, высота протектора, конструкция рамы, нагрузка на шины, пробег шин, общая масса автомобиля и ее распределение по осям, дисбаланс шин, наличие снега, льда, влаги, насыщенность (плотность) выступов протектора шин. При этом оценка производилась по 35-бальной шкале.

2. Разработана математическая модель определения влияния атмосферного давления и температуры воздуха на радиус профиля шины. На основании которой подставляя значение в математическое выражение, можно определить внутреннее давление на заданной высоте.

По данным Международного стандарта атмосферы, и по проведенным расчетам данной модели выяснилось, что внутреннее давление в шинах 215/75R16С на высоте 1000 м, где атмосферное давление воздуха было $0,9 \times 10^5$ Па, составляло $3,200 \times 10^5$ Па 5 Па, а на высоте 1500 м оно уменьшилось и достигло $3,180 \times 10^5$ Па.

3. Разработан метод оперативного определения ресурса шин, основанный на анализе результатов ускоренных испытаний. Нормативы ресурса шин также были определены в реальных условиях эксплуатации с использованием незавершенного метода испытаний, результатом которого является прогноз.

4. Получены уравнения регрессии, выражающие связь между износом шин (выраженным в массе) и факторами, влияющими на него-пробега автомобиля и давления воздуха в шинах.

5. Анализ уравнений регрессии, полученных как из ускоренных стендовых, так и в реальных эксплуатационных условиях экспериментов, и построенных на их основании графиков показывает, что износ шин более интенсивен в середине ресурса, а именно в диапазоне 24 000–36 000 км. При внутреннем давлении шины $3 \pm 0,2 \times 10^5$ (оптимальное значение) ресурс шины обеспечен.

6. Результаты стендово-ускоренных и эксплуатационных испытаний, проведенных для выявления влияния внутреннего давления и пробега на массу шины и высоту протектора (на износ), практически идентичны. Учитывая, что разница между результатами вышеперечисленных испытаний не превышает 5 %, можно отметить, что ускоренный метод испытаний применим для оценки ресурса шин любого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бакеев Р. Б.** Определение и корректирование нормативов ресурса автомобильных шин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Бакеев Рустем Борисович. 2003. 20 с.
2. **Ерицян Г., Гаспарян Н.** Экологическая безопасность как одна из эксплуатационных характеристик автотранспортных средств // Вестник МАНЕБ. 2005. Т. 10, № 5. С. 82–84.
3. **Ерицян Г. С., Пирумян Г. П.** К оценке экологической безопасности автомобиля // Известия ЕрГУАС. 2010. № 3. С. 77–81.
4. **Пирумян Г. П., Ерицян Г. С.** Влияние условий эксплуатации на экологическую эффективность автотранспортных средств // В коллект. монографии «Проблемы и пути развития российской провинции», Ч II «Качество жизни населения и экология». Пенза : РИО ПГСХА, 2011. С. 107–115.
5. **Тарвердян А. П., Ерицян Г. С.** К оценке изменения внутреннего давления шин при эксплуатаций автомобилей в горных условиях // Известия аграрной науки. Тбилиси: 2009. № 2. Т.7, С. 103–106.
6. **Ерицян Г. С., Пирумян Г. П.** Методика определения выбросов вредных веществ при работе грузового автомобиля по заданному маршруту // Известия инж. акад. РА. 2010. Т. 7, № 4. С. 723–725.
7. **Ерицян Г. С., Карапетян М. А.** Экспериментально-расчетная методика определения коэффициента сопротивления качению шин // Сборник научных трудов МГУП. М. : 2004. С. 277–280.
8. **Ерицян Г. С., Тарвердян А. П.** К оценке изменения внутреннего давления шин при эксплуатаций автомобилей в горных условиях // Известия аграрной науки. Тбилиси : 2009. № 2. Т. 7, С. 103–106.
9. **Ерицян Г. С.** Особенности работы грузового автомобиля в городских условиях // Вестник МОАЭБП. 2008. № 5. С. 127–132.
10. **Авакян А. Г.** Оценка влияния конструкционных факторов на износостойкость автомобильных шин // Вестник МОАЭБП. 2013. № 14 (21).С. 30–36.
11. Меганорм. Система нормативных документов [Электронный ресурс]. URL: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293850/4293850197.htm>.

12. **Карапетян М. А.** Повышение эффективности технологических процессов путем уменьшения уплотнения почв ходовыми системами сельскохозяйственных тракторов : дис. ... доктора техн. наук : 05.20.01 / Карапетян Мартик Аршалуйсович. МГУП, М. : 2010.

13. **Карапетян М. А., Пряхин В. Н.** Механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства. М. :ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. 216 с.

14. **Тургиев А. К., Карапетян М. А., Мочунова Н. А.** К вопросу определения буксования ведущих колес трактора // Естественные и технические науки. М. : «Спутник+», 2010. №. С. 570–572.

15. **Тургиев А. К., Карапетян М. А., Мочунова Н. А.** Касательная сила тяги колесного трактора // Тракторы и сельхоз машины. М. : 2010. № 11. С. 17–18.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Результаты дорожных испытаний определения коэффициента f

Таблица 1 – ($m_a = 1825$ кг, $P_{B1} = 2,4 \times 10^5$ Па, $P_{B2} = 2,0 \times 10^5$ Па)

Скорость, км/ч	Направ- ление	Опыт, №	Результат замера, с	$\bar{X} = \bar{t}$	$n_i (X_i - \bar{X})^2$	$D = \frac{n_i (X_i - \bar{X})^2}{n}$	$\sigma = \sqrt{D}$	$\nu = \frac{\sigma}{\bar{X}}$
20	прямое	1	51	52	1	1,66	1,29	0,024
		2	50		4			
		3	52		0			
	обратное	4	53		1			
		5	52		0			
		6	54		4			
30	прямое	1	71	74	18	9,5	3,08	0,041
		2	71		18			
		3	73		1			
	обратное	4	74		0			
		5	76		4			
		6	78		16			
40	прямое	1	90	92	8	5,5	2,34	0,025
		2	89		9			
		3	90		8			
	обратное	4	93		2			
		5	95		4			
		6	93		2			
50	прямое	1	102	105	18	12	3,46	0,032
		2	102		18			
		3	103		4			
	обратное	4	107		8			
		5	109		16			
		6	107		8			
60	прямое	1	110	113	9	6,5	2,54	0,022
		2	111		4			
		3	112		1			
	обратное	4	115		8			
		5	115		8			
		6	116		9			

Таблица 2 – ($m_a = 1825$ кг, $P_{B1} = 2,5 \times 10^5$ Па, $P_{B2} = 2,1 \times 10^5$ Па)

Скорость, км/ч	Направление	Опыт, №	Результат замера, с	$\bar{X} = \bar{t}$	$n_i (X_i - \bar{X})^2$	$D = \frac{n_i (X_i - \bar{X})^2}{n}$	$\sigma = \sqrt{D}$	$\nu = \frac{\sigma}{\bar{X}}$
20	прямое	1	47	50	9	5	2,23	0,044
		2	48		8			
		3	48		8			
	обратное	4	51		2			
		5	53		1			
		6	51		2			
30	прямое	1	70	72	8	6,33	2,51	0,034
		2	70		8			
		3	71		1			
	обратное	4	73		1			
		5	74		4			
		6	76		16			
40	прямое	1	86	89	18	11,5	3,39	0,038
		2	86		18			
		3	87		4			
	обратное	4	93		16			
		5	91		4			
		6	92		9			
50	прямое	1	98	102	16	5,66	2,38	0,023
		2	100		4			
		3	102		0			
	обратное	4	104		4			
		5	103		1			
		6	105		9			
60	прямое	1	108	111	18	11,5	3,39	0,030
		2	109		18			
		3	114		4			
	обратное	4	113		9			
		5	113		4			
		6	115		16			

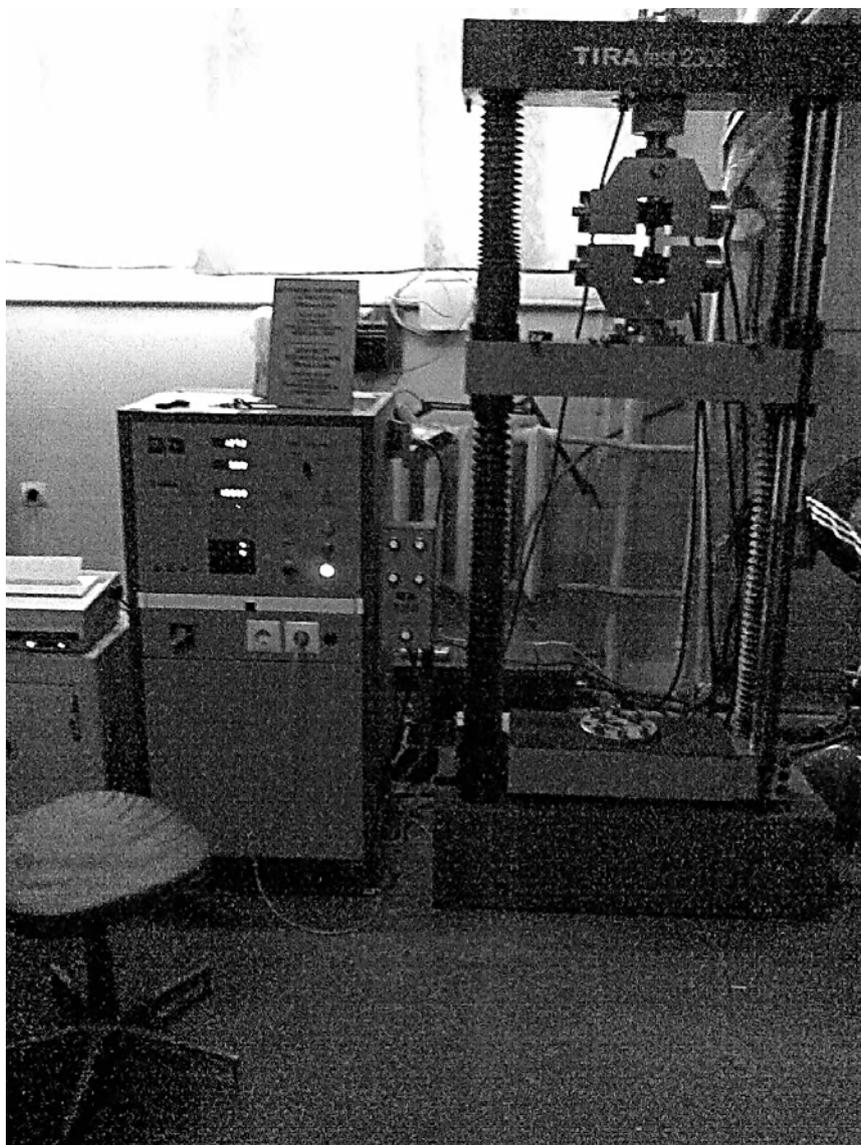
Таблица 3 – ($m_a = 1610$ кг, $P_{B1} = 2,4 \times 10^5$ Па, $P_{B2} = 2,0 \times 10^5$ Па)

Скорость, км/ч	Направление	Опыт, №	Результат замера, с	$\bar{X} = \bar{t}$	$n_i (X_i - \bar{X})^2$	$D = \frac{n_i (X_i - \bar{X})^2}{n}$	$\sigma = \sqrt{D}$	$\nu = \frac{\sigma}{\bar{X}}$
20	прямое	1	45	47	4	5,16	2,27	0,048
		2	44		9			
		3	46		1			
	обратное	4	48		1			
		5	49		8			
		6	49		8			
30	прямое	1	63	66	9	6,5	2,54	0,038
		2	64		4			
		3	65		1			
	обратное	4	69		9			
		5	68		8			
		6	68		8			
40	прямое	1	81	82	1	5,66	2,38	0,029
		2	80		8			
		3	80		8			
	обратное	4	83		1			
		5	84		8			
		6	84		8			
50	прямое	1	90	93	9	5,16	2,27	0,024
		2	91		4			
		3	92		1			
	обратное	4	95		8			
		5	95		8			
		6	94		1			
60	прямое	1	97	99	4	2,16	1,47	0,014
		2	98		2			
		3	98		2			
	обратное	4	99		0			
		5	100		1			
		6	101		4			

Таблица 4 – ($m_a = 1825$ кг, $P_{B1} = 2,5 \times 10^5$ Па, $P_{B2} = 2,1 \times 10^5$ Па)

Скорость, км/ч	Направление	Опыт, №	Результат замера, с	$\bar{X} = \bar{t}$	$n_i (X_i - \bar{X})^2$	$D = \frac{n_i (X_i - \bar{X})^2}{n}$	$\sigma = \sqrt{D}$	$\nu = \frac{\sigma}{\bar{X}}$
20	прямое	1	44	45	1	0,33	0,57	0,012
		2	45		0			
		3	45		0			
	обратное	4	45		0			
		5	45		0			
		6	46		1			
30	прямое	1	64	65	22	1,33	1,15	0,017
		2	64		2			
		3	65		0			
	обратное	4	66		2			
		5	66		2			
		6	65		0			
40	прямое	1	79	80	1	0,83	0,91	0,011
		2	80		0			
		3	80		0			
	обратное	4	80		0			
		5	81		2			
		6	81		2			
50	прямое	1	90	92	8	5,66	2,38	0,025
		2	90		8			
		3	91		1			
	обратное	4	93		1			
		5	94		8			
		6	94		8			
60	прямое	1	96	97	2	2,16	1,47	0,015
		2	96		2			
		3	95		4			
	обратное	4	98		1			
		5	97		0			
		6	99		4			

Стенд определения модуля упругости материала шины



Приложение 3

Матрица планирования эксперимента зависимости фактической высоты протектора от пробега (L) и давления воздуха (P) в шинах модели Radial 215/75R16C

№	P	L	X_1	X_2	h_1	h_2	h_3	\bar{h}_i	S_i^2
1	3,2	60 000	1	1	1,693	1,810	1,925	1,809	0,0135
2	2,8	60 000	-1	1	2,263	2,090	1,920	2,091	0,0294
3	3,2	12 000	1	-1	8,898	8,740	8,584	8,741	0,0246
4	2,8	12 000	-1	-1	8,984	8,880	8,778	8,881	0,0106
5	3,2	36 000	1	0	4,998	4,864	4,930	4,931	0,0045
6	2,8	36 000	-1	0	5,997	5,212	5,600	5,603	0,1541
7	3	60 000	0	1	1,739	1,870	1,999	1,869	0,0169
8	3	12 000	0	-1	8,671	8,800	8,930	8,800	0,0168
9	3	36 000	0	0	5,003	5,477	5,200	5,227	0,0567

Приложение 4

Матрица планирования эксперимента зависимости массы шины от пробега (L) и давления воздуха (P) в шинах модели Radial 215/75R16C

№	P	L	X_1	X_2	m_1	m_2	m_3	\bar{m}	S_i^2
1	3,2	60 000	1	1	20,168	20,088	20,006	20,087	0,007
2	2,8	60 000	-1	1	20,401	20,280	20,155	20,279	0,015
3	3,2	12 000	1	-1	23,062	23,159	23,258	23,160	0,010
4	2,8	12 000	-1	-1	23,420	23,324	23,230	23,325	0,009
5	3,2	36 000	1	0	21,430	21,210	21,322	21,321	0,012
6	2,8	36 000	-1	0	21,842	21,550	21,700	21,697	0,021
7	3	60 000	0	1	20,121	20,170	20,220	20,170	0,002
8	3	12 000	0	-1	23,352	23,241	23,130	23,241	0,012
9	3	36 000	0	0	21,368	21,611	21,486	21,488	0,015

Приложение 5

Матрица коэффициентов уравнения регрессии для определения фактической высоты протектора в зависимости от пробега (L) и давления воздуха (P) в шинах модели Radial 215/75R16C

№	X_0	X_1	X_2	\bar{h}_i	$(X'_1)^2$	$(X'_2)^2$	$(x_1)^2 \bar{h}_i$	$(x_2)^2 \bar{h}_i$	$x_1 \bar{h}_i$	$x_2 \bar{h}_i$	$x_1 x_2$	$x_1 x_2 \bar{h}_i$	h_p	$(h_p - \bar{h}_i)^2$	$h_p - \bar{h}_i$	Ошибка, %
1	1	1	1	1,809	0,33	0,33	0,60	0,60	1,81	1,81	1,00	1,81	1,859	0,0	0,05	2,68
2	1	-1	1	2,091	0,33	0,33	0,70	0,70	-2,09	2,09	-1,00	-2,09	2,224	0,0	0,13	5,97
3	1	1	-1	8,741	0,33	0,33	2,91	2,91	8,74	-8,74	-1,00	-8,74	8,743	0,0	0,00	0,03
4	1	-1	-1	8,881	0,33	0,33	2,96	2,96	-8,88	-8,88	1,00	8,8	9,108	0,1	0,23	2,49
5	1	1	0	4,931	0,33	-0,67	1,64	-3,29	4,93	0,00	0,00	0,00	5,189	0,1	0,26	4,99
6	1	-1	0	5,603	0,33	-0,67	1,87	-3,74	-5,60	0,00	0,00	0,00	5,554	0,0	-0,05	-0,88
7	1	0	1	1,869	-0,67	0,33	-1,25	0,62	0,00	1,87	0,00	0,00	1,998	0,0	0,13	6,43
8	1	0	-1	8,800	-0,67	0,33	-5,87	2,93	0,00	-8,80	0,00	0,00	8,882	0,0	0,08	0,92
9	1	0	0	5,227	-0,67	-0,67	-3,48	-3,48	0,00	0,00	0,00	0,00	5,328	0,0	0,10	1,90

Приложение 6

Матрица коэффициентов уравнения регрессии для определения фактической массы шины в зависимости от пробега (L) и давления воздуха (P) в шинах модели Radial 215/75R16C

№	X_0	X_1	X_2	\bar{m}	$(X'_1)^2$	$(X'_2)^2$	$(x_1)^2 \bar{m}_i$	$(x_2)^2 \bar{m}_i$	$x_1 \bar{m}_i$	$x_2 \bar{m}_i$	$x_1 x_2$	$x_1 x_2 \bar{m}_i$	m_p	Ψ	$m_p - \bar{m}_i$	Ошибка, %
1	1	1	1	20,087	0,3	0,3	6,7	6,7	20,1	20,1	1,0	20,1	20,195	0,0	0,11	0,54
2	1	-1	1	20,279	0,3	0,3	6,8	6,8	-20,3	20,3	-1,0	-20,3	20,440	0,0	0,16	0,79
3	1	1	-1	23,160	0,3	0,3	7,7	7,7	23,2	-23,2	-1,0	-23,2	23,258	0,0	0,10	0,43
4	1	-1	-1	23,325	0,3	0,3	7,8	7,8	-23,3	-23,3	1,0	23,3	23,503	0,0	0,18	0,76
5	1	1	0	21,321	0,3	-0,7	7,1	-14,2	21,3	0,0	0,0	0,0	21,519	0,0	0,20	0,93
6	1	-1	0	21,697	0,3	-0,7	7,2	-14,5	-21,7	0,0	0,0	0,0	21,763	0,0	0,07	0,30
7	1	0	1	20,170	-0,7	0,3	-13,4	6,7	0,0	20,2	0,0	0,0	20,318	0,0	0,15	0,73
8	1	0	-1	23,241	-0,7	0,3	-15,5	7,7	0,0	-23,2	0,0	0,0	23,381	0,0	0,14	0,60
9	1	0	0	21,488	-0,7	-0,7	-14,3	-14,3	0,0	0,0	0,0	0,0	21,641	0,0	0,15	0,71

Приложение 7

Матрица планирования эксперимента определения фактической массы задних колес в зависимости от пробега (L) и давления воздуха (P) в шинах модели Radial 215/75R16C

№	P	L	X_1	X_2	m_1	m_2	m_3	\bar{m}	S_i^2
1	2,8	12 000	-1	-1	23,150	23,107	23,065	23,107	0,002
2	3,2	12 000	1	-1	23,098	23,024	22,950	23,024	0,005
3	2,8	60 000	-1	1	20,300	20,341	20,382	20,341	0,002
4	3,2	60 000	1	1	20,226	20,133	20,041	20,133	0,009
5	3	36 000	0	0	20,980	21,120	21,000	21,033	0,006
6	3,2	36 000	1	0	20,800	20,932	20,866	20,866	0,004
7	2,8	36 000	-1	0	21,320	21,200	21,260	21,260	0,004
8	3	60 000	0	1	20,295	20,200	20,105	20,200	0,009
9	3	12 000	0	-1	23,091	23,049	23,007	23,049	0,002

Приложение 8

Матрица планирования эксперимента определения фактической массы передних колес в зависимости от пробега (L) и давления воздуха (P) в шинах модели Radial 215/75R16C

№	P	L	X_1	X_2	m_1	m_2	m_3	\bar{m}	S_i^2
1	2,8	12 000	-1	-1	23,172	23,100	23,029	23,100	0,005
2	3,2	12 000	1	-1	23,072	22,991	22,911	22,991	0,006
3	2,8	60 000	-1	1	20,170	20,100	20,030	20,100	0,005
4	3,2	60 000	1	1	19,760	19,700	19,640	19,700	0,004
5	3	36 000	0	0	20,980	20,820	20,900	20,900	0,006
6	3,2	36 000	1	0	20,760	20,640	20,700	20,700	0,004
7	2,8	36 000	-1	0	21,260	21,140	21,200	21,200	0,004
8	3	60 000	0	1	19,900	19,850	19,800	19,850	0,002
9	3	12 000	0	-1	23,170	23,030	22,889	23,030	0,020

Приложение 9

Матрица определения коэффициентов регрессионного уравнения для определения фактической массы задних колес в зависимости от пробега (L) и давления воздуха (P) в шинах модели Radial 215/75R16C

№	X_0	X_1	X_2	\bar{m}	$(X'_1)^2$	$(X'_2)^2$	$(x_1)^2 \bar{m}_i$	$(x_2)^2 \bar{m}_i$	$x_1 \bar{m}_i$	$x_2 \bar{m}_i$	$x_1 x_2$	$x_1 x_2 \bar{m}_i$	m_p	$(m_p - \bar{m}_i)^2$	$m_p - \bar{m}_i$	Ошибка, %
1	1	-1	-1	23,107	0,33	0,33	7,70	7,70	-23,11	-23,11	1,0	23,11	23,567	0,2	0,46	1,99
2	1	1	-1	23,024	0,33	0,33	7,67	7,67	23,02	-23,02	-1,0	-23,02	23,339	0,1	0,31	1,37
3	1	-1	1	20,341	0,33	0,33	6,78	6,78	-20,34	20,34	-1,0	-20,34	20,732	0,2	0,39	1,92
4	1	1	1	20,133	0,33	0,33	6,71	6,71	20,13	20,13	1,0	20,13	20,504	0,1	0,37	1,84
5	1	0	0	21,033	-0,67	-0,67	-14,02	-14,02	0,00	0,00	0,0	0,00	21,446	0,2	0,41	1,96
6	1	1	0	20,866	0,33	-0,67	6,96	-13,91	20,87	0,00	0,0	0,00	21,332	0,2	0,47	2,23
7	1	-1	0	21,260	0,33	-0,67	7,09	-14,17	-21,26	0,00	0,0	0,00	21,560	0,1	0,30	1,41
8	1	0	1	20,200	-0,67	0,33	-13,47	6,73	0,00	20,20	0,0	0,00	20,618	0,2	0,42	2,07
9	1	0	-1	23,049	-0,67	0,33	-15,37	7,68	0,00	-23,05	0,0	0,00	23,453	0,2	0,40	1,75

Приложение 10

Матрица определения коэффициентов регрессионного уравнения для определения фактической массы передних колес в зависимости от пробега (L) и давления воздуха (P) в шинах модели Radial 215/75R16C

№	X_0	X_1	X_2	\bar{m}	$(X'_1)^2$	$(X'_2)^2$	$(x_1)^2 \bar{m}_i$	$(x_2)^2 \bar{m}_i$	$x_1 \bar{m}_i$	$x_2 \bar{m}_i$	$x_1 x_2$	$x_1 x_2 \bar{m}_i$	m_p	$(m_p - \bar{m}_i)^2$	$m_p - \bar{m}_i$	Ошибка, %
1	1	-1	-1	23,10	0,33	0,33	7,70	7,70	-23,10	-23,10	1,0	23,1	23,527	0,2	0,43	1,85
2	1	1	-1	22,991	0,33	0,33	7,66	7,66	22,99	-22,99	-1,0	-23,0	23,336	0,1	0,34	1,50
3	1	-1	1	20,10	0,30	0,33	6,70	6,70	-20,10	20,10	-1,0	-20,1	20,515	0,2	0,42	2,07
4	1	1	1	19,70	0,30	0,33	6,57	6,57	19,70	19,70	1,0	19,7	20,034	0,1	0,33	1,69
5	1	0	0	20,90	-0,67	-0,67	-13,93	-13,93	0,0	0,00	0,0	0,0	21,286	0,1	0,39	1,85
6	1	1	0	20,70	0,33	-0,67	6,90	-13,80	20,70	0,00	0,0	0,0	21,156	0,2	0,46	2,20
7	1	-1	0	21,20	0,33	-0,67	7,07	-14,13	-21,20	0,00	0,0	0,0	21,493	0,1	0,29	1,38
8	1	0	1	19,85	-0,67	0,33	-13,23	6,62	0,00	19,85	0,0	0,0	20,236	0,1	0,39	1,94
9	1	0	-1	23,03	-0,67	0,33	-15,35	7,68	0,00	-23,03	0,0	0,0	23,393	0,1	0,36	1,58

Научное издание

Ерицян Гагик Суренович
Карапетян Мартик Аршалуйсович
Авакян Ани Гагиковна

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РЕСУРС ШИН

Монография

Издается в авторской редакции
Оригинал-макет *Алексей Карев*
Дизайн обложки *Роман Бурак*

Подписано в печать 12.08.2022. Формат 60х90/16
Усл.-печ. л. 8,1. Тираж 500 экз. Заказ № 30

ООО «Мегаполис»
www.mmegapolis.ru
Тел.: 8 (495) 643-28-71
E-mail: zakaz@m-megapolis.ru
127550, Москва, ул. Прянишникова, д. 23А

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»
Тел.: +7 (499) 322-38-31
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5