

Саркисов Павел Игоревич

**РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНОГО КАЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА
ПО НЕДЕФОРМИРУЕМОМУ ОПОРНОМУ ОСНОВАНИЮ**

05.05.03 – Колёсные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2014

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:

Попов Сергей Дмитриевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Котляренко Владимир Иванович
доктор технических наук,
начальник отдела технической политики
департамента государственной политики в
области автомобильного и городского
пассажирского транспорта Минтранса России

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2061645

Саркисов П.И. Расчетно-экс

-646

Зузов Игорь Валерьевич
кандидат технических наук,
менеджер по продукту
ООО «МАН Трак энд Бас РУС»

Ведущая организация:

**Московский государственный
индустриальный университет
(ФГБОУ ВПО «МГИУ»)**

Защита диссертации состоится 13 октября 2014 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д.212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Е.Б. Сарач

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В транспортной стратегии на период до 2030 года, утверждённой распоряжением правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. №1734-Р, обозначены задачи по повышению уровня безопасности транспортной системы и снижению тяжести дорожно-транспортных происшествий. В федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013-2020 годах» также указано на необходимость «повышения уровня технического состояния эксплуатируемых транспортных средств, их активной и пассивной безопасности», что предусматривает стимулирование внедрения и использования новых систем безопасности автомобиля.

Разработка и исследование таких систем является сложным и трудоёмким процессом. Многие современные системы активной безопасности корректируют курс и траекторию автомобиля, что достигается целенаправленным кинематическим и силовым воздействием индивидуально на каждое его колесо.

Известно, что определение внешних силовых факторов, требуемых для обеспечения устойчивости автомобиля, как правило, не вызывает проблем. В то же время определение такого воздействия на колесо с эластичной шиной, которое вызовет в зоне контакта требуемые силы и моменты, до сих пор остается одной из сложнейших фундаментальных задач механики, полностью не решённой. При этом в отличие от авиационных шин, процессы в контакте катящегося автомобильного колеса существенно осложняются высоким уровнем эластичности конструкции, значительной шириной зоны контакта, наличием больших продольных нагрузок, достигающих предельных по сцеплению значений, и существованием в зоне контакта обширных областей с интенсивным проскальзыванием элементов шины относительно опорной поверхности.

Коррекция и автоматическое управление движением автомобиля целесообразны, прежде всего, при его движении с высокими скоростями, которые реализуются, как правило, на дорогах с твердым покрытием. В сочетании с общей сложностью задачи о нестационарном качении автомобильного эластичного колеса это позволяет ограничиться исследованием качения колеса по недеформируемой опорной поверхности.

До настоящего времени в практике проектирования автомобилей применяются расчётно-экспериментальные модели колеса с эластичной шиной, основанные на использовании больших массивов экспериментальных данных, получаемых в ходе стендовых испытаний. К сожалению, за последние годы систематические испытания автомобильных шин в России в необходимом объёме не проводились, что снижает степень достоверности применяемых расчётных моделей. Это требует обязательной идентификации новых разрабатываемых моделей с использованием высокоточного оборудования, а также накопления систематизированных экспериментальных данных по современным шинам.

Таким образом, исследование процесса формирования боковой реакции и стабилизирующего момента автомобильного колеса с эластичной шиной,двигающегося в нестационарном режиме, является вполне актуальной задачей.

Решение этой задачи в инженерной постановке открывает возможность адекватного моделирования динамических систем автомобиля, содержащих пневматическую шину. Это, в свою очередь, позволит повысить эффективность процесса разработки новых автомобилей за счет использования более производительных, эффективных и достоверных моделей их движения и работы отдельных систем.

Цель работы: повышение адекватности и точности описания нестационарного качения эластичного автомобильного колеса по недеформируемой опорной поверхности.

Достижение цели требует разработки расчётно-экспериментального метода моделирования, строящегося на решении следующих задач:

1. Разработать структуру расчётно-экспериментальной модели, свободной от основных недостатков известных моделей рассматриваемого класса, в том числе:

- провести анализ и систематизировать известные способы решения задачи о качении колеса;
- построить систему предпосылок, обеспечивающую учёт только значимых для данной задачи свойств шины;
- изучить процессы в зоне контакта шины, сформировать уравнения связей и систему уравнений движения колеса;

2. Разработать и реализовать алгоритмы, обеспечивающие численное решение системы уравнений;

3. Провести идентификацию разработанной модели и комплекс базовых расчётов применительно к современной автомобильной шине, предварительно выполнив расчётно-экспериментальную метрологическую экспертизу испытательного оборудования.

Методы исследований

Теоретические исследования проводились методами математического моделирования, вычисления выполнялись различными численными методами, реализованными в программных пакетах и средах имитационного моделирования.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием барабанного стенда кафедры автомобильной техники Дрезденского технического университета.

Научная новизна, положения которой выносятся на защиту, заключается в трёх основных элементах:

1. Новый подход к математическому моделированию работы автомобильного колеса с эластичной шиной, основанный на механической модели, отличающийся тем, что каркас шины моделируется аналогом типа «лента на упругом основании», а периферийный слой резины протектора шины описывается двумерным массивом «щёточных элементов».

2. Способ построения системы уравнений, описывающих движение колеса в рамках предложенной модели, отличающийся тем, что уравнения получены с помощью теории изгиба стержней и описания кинематических связей.

3. Математическое обеспечение инженерных расчётов по предложенной модели, необходимое для численного решения полученной системы уравнений, отличающееся применением итерационного метода с коррекцией приближений и вспомогательной упрощённой модели шины для расчёта начального приближения.

Практическая ценность работы

1. Возможность моделирования процесса нестационарного движения колеса с эластичной шиной при разработке, испытаниях и исследованиях автомобилей в целом и их систем в частности (рулевое управление, тормозная система, системы управления трансмиссией и индивидуального привода, системы активной безопасности, помощи водителю и др.), а также их программного обеспечения с точностью, необходимой при проведении инженерных расчётов.

2. Возможность исследовать физические процессы внутри зоны контакта шины с опорной поверхностью с помощью относительно простой механической структуры (не выходя на уровень детализации на основе конечных элементов), обеспечивая простоту и доступность параметризации модели, а также её нужное быстроедействие в составе модели автомобиля.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируется на накопленном в автомобильной и авиационной промышленности опыте теоретических, расчётных и экспериментальных исследований качения колес с эластичными шинами, а также на результатах экспериментальных работ, идентификационных расчётов и имитационного моделирования, полученных в данном исследовании.

Апробация работы проведена путём обсуждения её положений и результатов на следующих мероприятиях: научно-техническом семинаре кафедры колёсных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва. 2011, 2012, 2013, 2014); научном семинаре «Wissenschaftsbesprechung» кафедры автомобильной техники Дрезденского технического университета (Дрезден. 2013, 2014); 2-й конференции Чешской Ассоциации Научных Технических Обществ CSVTS «Transport, Logistics and Information Technology» (Прага. 2013); VI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва. 2013); XXV Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва. 2013); 72-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (Москва. 2014); 85-й Международной конференции Ассоциации Автомобильных Инженеров «Будущее автомобилестроения в России», Университет Машиностроения МАМИ (Москва. 2014); 86-й Международной научно-технической конференции Ассоциации Автомобильных Инженеров «Конструктивная безопасность автотранспортных средств», Центр испытаний НАМИ (п. Автополигон. 2014); симпозиуме «Wissenschaftliche Gesellschaft für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik», Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена (Ахен. 2014).

Реализация работы

Результаты исследования используются следующим образом: в работах по направлению транспортных систем ОАО "Всероссийский научно-исследовательский институт транспортного машиностроения"; при исследовании влияния кривизны поверхности опорного основания на уводные характеристики шин при их испытаниях на барабанном стенде производителем испытательного оборудования Automobil Forschung Dresden GmbH (Германия);

в работах научно-производственного центра «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана по моделированию качения шин широкого профиля и пневмокатов; в учебном процессе – в рамках теоретических и практических занятий на кафедре колёсных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана и на кафедре автомобильной техники Дрезденского технического университета (Германия).

Публикации: основное содержание работы отражено в 10 изданиях, включая публикации в трёх журналах по Перечню ВАК РФ.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 156 листах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 14 таблиц. Список литературы включает 68 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общие сведения о современных требованиях к математическим моделям автомобильного колеса, обоснование актуальности темы, описание структуры работы, характеристику целей, задач и методов исследования, перечень выносимых на защиту положений и данные о практических применениях результатов работы.

Первая глава представляет собой исследование состояния вопроса, состоящее из двух компонент: обзора имеющихся подходов к решению проблемы и анализа современных требований к моделям.

Несмотря на более чем 150-летнюю историю, шина по-прежнему остаётся элементом, исчерпывающее описание которого пока не доступно. Предметом данного исследования выступает взаимосвязь между законами движения обода колеса по линейным и угловым координатам и силовыми характеристиками в пятне контакта – продольной и боковой реакциями и стабилизирующим моментом (Рис. 1).

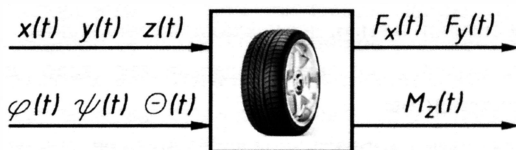


Рис. 1. Параметры, взаимосвязь которых является предметом исследования

Актуальность вопроса моделирования уводных характеристик подтверждается очень большим количеством выполненных работ. Их можно разделить на три принципиально разных подхода к решению задачи.

Эмпирические методы (Я.М. Певзнер, Д.А. Антонов, А.С. Литвинов, А.Б. Дик, М.В. Келдыш, Н.В. Расејка, Е. Bakker) способны весьма точно описать конкретную зависимость по экспериментальным данным, но не позволяют перейти от неё к другим свойствам шины. Для описания каждой новой характеристики или режима (например, качения с нестационарным уводом) эмпирической моделью, как правило, требуется проведение соответствующего эксперимента.

Модели на основе физических аналогов (И.П. Петров, М.А. Левин, Н. Fromm, J.R. Ellis, F. Böhm, E. Fiala) описывают лишь те свойства шины, которые являются значимыми для рассматриваемого режима качения, путём представления их примитивными механическими элементами, поддающимися математическому описанию. Такие модели сочетают доступность параметризации с возможностью регулировать их точность и быстрдействие, варьируя сложность аналога.

Конечно-элементные методы (А.Е. Белкин, Н.Л. Нарская, О.А. Одинцов, Н.С. Вольская, М. Gisper) заключаются в детальном воссоздании структуры шины, что отражается в высокой точности, но повышенной трудоёмкости вычисления и построения модели.

В последнее время с развитием вычислительной техники происходит интенсивное замещение традиционных методов НИОКР методами моделирования. Поэтому выдвигаются более строгие требования к пригодности модели к параметризации, повышается их приоритет. В этих условиях применимость эмпирических и конечно-элементных методов ограничена, поэтому сделан вывод о том, что в контексте современных требований целесообразно сконцентрироваться на подходе к моделированию колеса с эластичной шиной с помощью физических аналогов.

Среди всего множества предложенных для описания шины аналогов можно выделить два основополагающих инструмента:

1. Модель типа «нить на упругом основании», которая описывает упругое тело шины связной нитью, допускающей один излом;
2. Щёточная модель, которая представляет тело шины массивом несвязных упругих элементов.

С учётом связности каркаса и слоёв брекера шины и несвязности элементов её протектора целесообразным представляется комбинирование названных инструментов, примером которого является модель «Treadsim»: она описывает каркас несколькими рядами не связанных друг с другом нитей на упругом основании, а протектор – одним рядом щёточных элементов на каждой нити (Рис. 2).

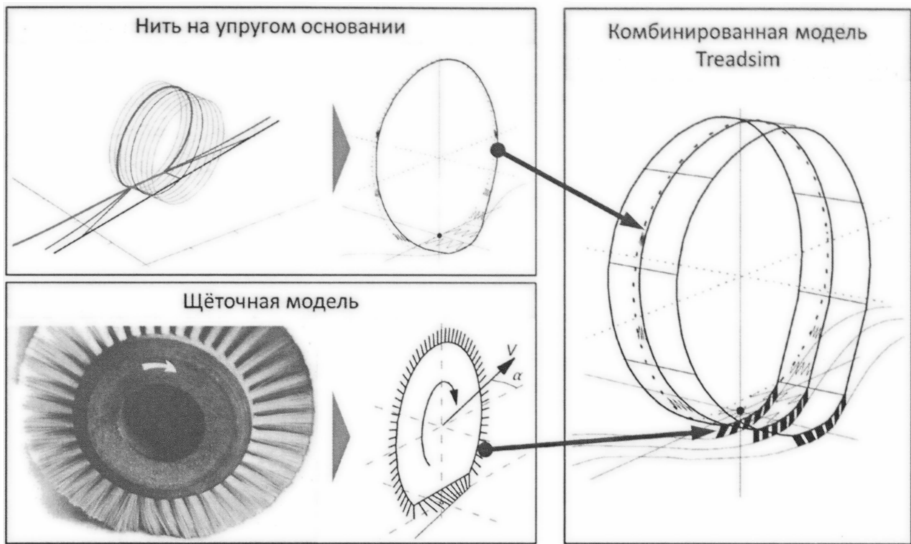


Рис. 2. Комбинированная модель Treadsim

Недостатком данной модели является отсутствие учёта связанного каркаса как основания щёточных элементов. Поэтому в результате анализа состояния вопроса и современных требований сделан следующий вывод: описание физическими моделями боковой силы при нестационарном качении с уводом раскрыто недостаточно; исчерпывающее описание ими стабилизирующего момента отсутствует. Завершается глава уточнением цели и задач повышения адекватности моделирования этих характеристик через описание физических процессов, их обуславливающих.

Во второй главе в результате анализа литературы, конструктивных свойств и особенностей производственного процесса шины предлагается структура механической модели, направленной на решение поставленных задач (Рис. 3). Каркас со слоями брекера моделируется замкнутой лентой, принадлежащей плоскости в зоне контакта шины и цилиндрической поверхности в свободной её части. Перемещение сечений ленты в радиальном направлении шины возможно только при изменении вертикальной нагрузки на колесо. Лента имеет возможность изгибаться вокруг радиальной оси колеса и перемещаться в его осевом направлении, не покидая указанной кусочно-заданной поверхности. Такому перемещению ленты препятствуют упругие связи с жёстким ободом, распределённые по периметру окружности (т.н. Винклеровское основание). Слой резины беговой дорожки описывается щёточной моделью, но, в отличие от аналогов, двумерным массивом щёточных элементов, закреплённых на широкой ленте.

Отличие данной структуры от многорядных моделей заключается в применении общего связного основания двумерного массива щёточных элементов, а не совокупности не связанных друг с другом одномерных нитей.

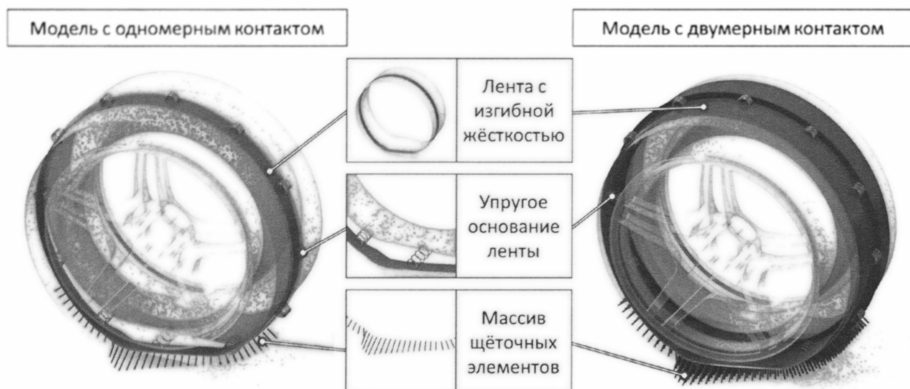


Рис. 3. Структура предложенных механических моделей

Для математического описания полученной структуры были исследованы процессы, происходящие при качении колеса с упругой шиной. Построены уравнения кинематических связей для нескользящих точек зоны контакта, математически реализовано ограничение деформации упругого тела в точке по пределу её сцепных свойств и записаны зависимости деформаций скользящих элементов от законов движения обода.

Для нахождения деформированной формы каркаса шины применены методы теории изгиба стержней при рассмотрении замкнутой ленты в виде её развёртки на плоскость опорного основания (Рис. 4).

Функция прогиба ленты $y(x)$ определяется дифференциальным уравнением 4-го порядка, коэффициентами которого являются её изгибная жёсткость вокруг радиальной оси колеса EI , сила её окружного натяжения T и коэффициент жёсткости упругого основания ленты k . Правая часть соответствует внешней нагрузке на ленте, обусловленной распределённой поперечной силой $q_y(x)$ и распределённым изгибающим моментом $\mu_z(x)$:

$$EI y^{IV}(x) - T y''(x) + k y(x) = q_y(x) + \frac{d\mu_z(x)}{dx} \quad (1)$$

Разложение функции правой части уравнения (1) в ряд Фурье на интервале, равном длине зоны контакта шины, позволяет записать решение неоднородного дифференциального уравнения прогиба в общем случае:

$$y(x) = \sum_{i=1}^4 C_i e^{\lambda_i x} + \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{\pi n}{a} x + b_n \sin \frac{\pi n}{a} x \right) \quad (2)$$

где: C_i – четыре константы интегрирования;

$\lambda_i = \pm \sqrt{(T \pm \sqrt{T^2 - 4EI k}) / (2EI)}$ – корни характеристического полинома;

a_n, b_n – коэффициенты ряда Фурье;

a – половина длины конечного интервала, то есть зоны контакта.

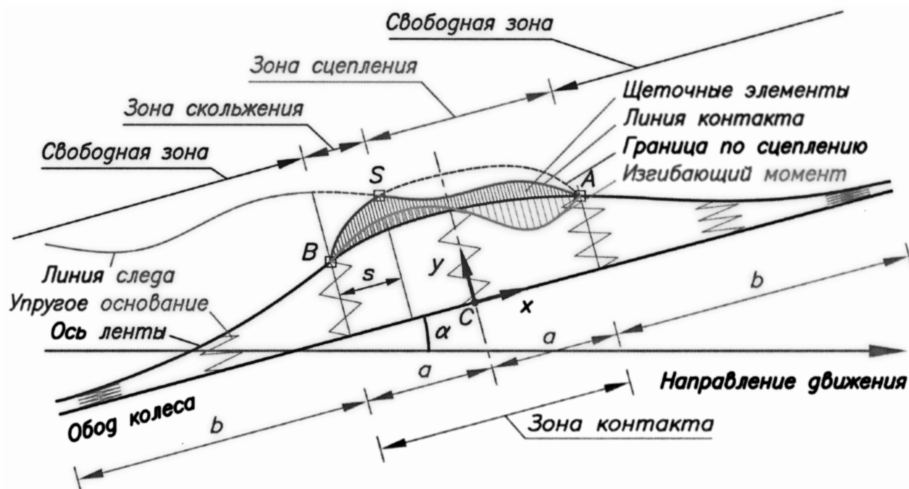


Рис. 4. Расчётная схема изогнутой ленты

Уравнения функции прогиба ленты (2) вместе с уравнениями кинематических связей образуют совместную систему, определяющую движение механического аналога в нестационарном режиме. Установлено, что такая система уравнений не допускает аналитического решения и характеризуется высокой трудоёмкостью численного решения: она содержит ряд дифференциальных уравнений в частных производных, кроме того, использование единичной функции Хевисайда, необходимой для кусочного задания функций деформаций из-за их усечения пределом сцепных свойств, затрудняет решение уравнений методами операционного исчисления. Глава завершается выводом о том, что для решения системы уравнений модели требуется разработка специального математического обеспечения.

Третья глава посвящена построению необходимого набора методов численного решения уравнений модели. Совместная система разделена на две подзадачи (Рис. 5):

1. Нахождение функции прогиба ленты по известной нагрузке со стороны массива щёточных элементов методами теории изгиба стержней;
2. Определение нагрузки, передаваемой деформированными щёточными элементами на изогнутую ленту, с помощью кинематических связей.

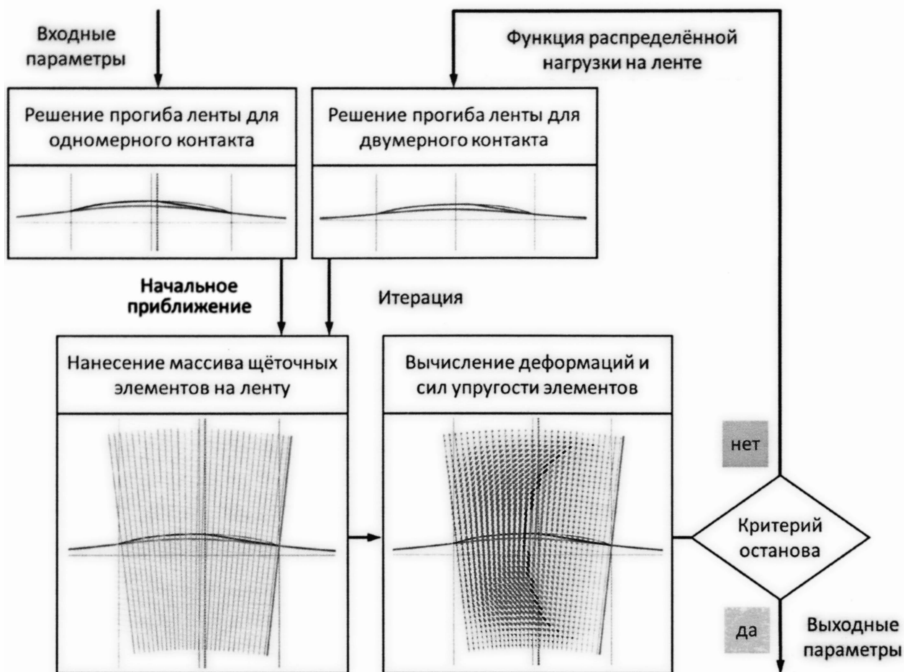


Рис. 5. Блок-схема итерационного процесса решения системы уравнений

Поскольку результаты решения одной задачи являются входными параметрами другой, то для данной системы целесообразно применение итерационного процесса, телом цикла которого является последовательное решение сначала первой, а затем второй задачи. В качестве результата итерации выступает функция нагрузки на ленте, обусловленная напряжённо-деформированным состоянием массива щёточных элементов (Рис. 6). В рамках исследования физического аналога выявлена и исследована предрасположенность итерационного процесса решения описывающих его уравнений к расходимости.

Во избежание этого явления разработана стратегия коррекции вычисляемых на каждой итерации приближений, обеспечивающая сходимость метода к решению. Сходящийся процесс проиллюстрирован примером для случая усреднения результатов двух соседних приближений на Рис. 6: кривые

функций нагрузок текущей и предыдущей итераций сходится к кривой функции нагрузки равновесного состояния, то есть к решению системы уравнений.

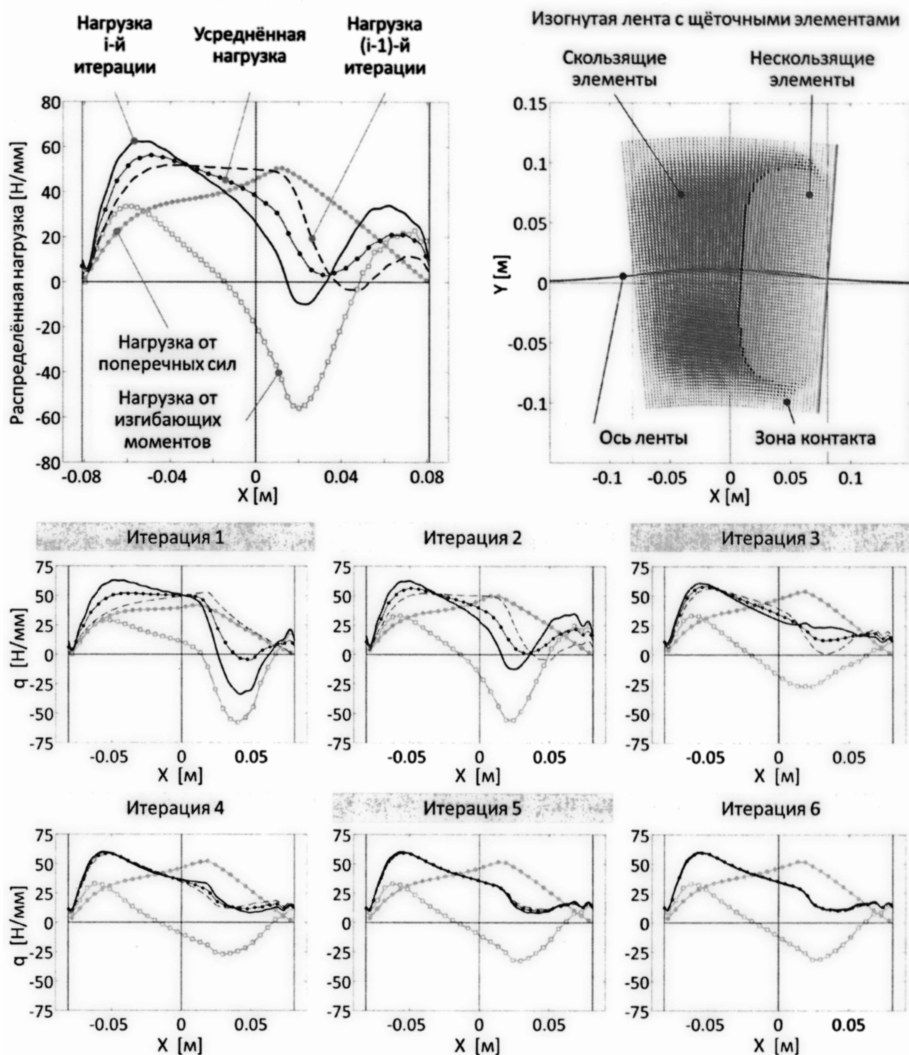


Рис. 6. Итерации процесса с усреднением функции нагрузки

Выбор начального приближения существенно влияет на процесс сходимости. Поэтому для его нахождения разработана вспомогательная механическая модель, являющаяся упрощённым вариантом основной: зона контакта такой модели сводится от площадки к одномерной кривой линии,

ввиду чего систему уравнений модели удаётся свести к СЛАУ размерностью 12×12 , численное решение которой методом Гаусса проблем не вызывает, и к одному нелинейному уравнению, решаемому численным методом поиска нуля.

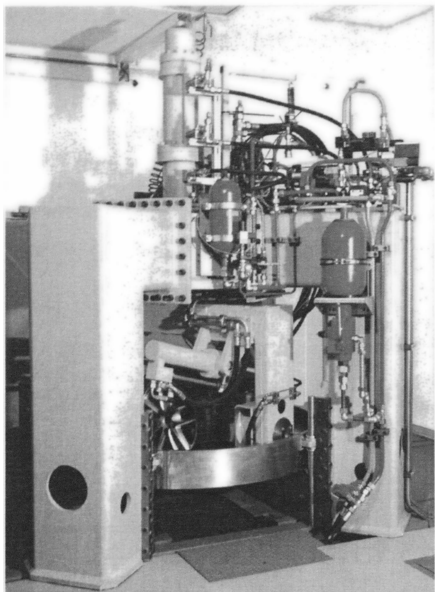


Рис. 7. Барабанный стенд

неподвижного колеса вокруг вертикальной оси. Расчёты проведены для двух случаев – для модели с одномерной и двумерной зоной контакта (Рис. 3).

Результаты показали, что модель с одномерным контактом количественно точно описывает характеристики боковой силы при качении с уводом и при статическом поперечном смещении обода: отклонение от эксперимента в обоих случаях не превышает 8% (Рис. 8). Однако описание моделью стабилизирующего момента показало недопустимую погрешность при качественно правильных зависимостях. Для проверки данного эффекта был исследован статический поворот неподвижного колеса вокруг вертикальной оси. Полученные явления подтвердились: модель с одномерной зоной контакта показывает качественно верные результаты, но количественно неточные. Это говорит об ограниченности моделей с одномерным контактом и подтверждает целесообразность рассмотрения подходов с двумерной площадкой.

Поскольку уравнения модели с пространственной зоной контакта решаются итерационными методами, важную информацию несёт сравнение результатов нескольких итераций (Рис. 9).

Вычисленные с помощью итерационного метода решения уравнений сформированной структуры подлежат экспериментальной проверке, изложенной в четвёртой главе. Испытания проводились на барабанном стенде (диаметр барабана – 2 м, Рис. 7) для шины размерностью 245/45 R18. Поскольку рассматриваемые процессы требовательны к точности, был выполнен анализ погрешностей измерительного оборудования (до 0.25%) и ошибки, обусловленной податливостью несущих конструкций установки (до 1.4%).

Эксперименты были проведены в трёх режимах: качение колеса с уводом (60 км/ч), боковое смещение обода неподвижного колеса и поворот обода

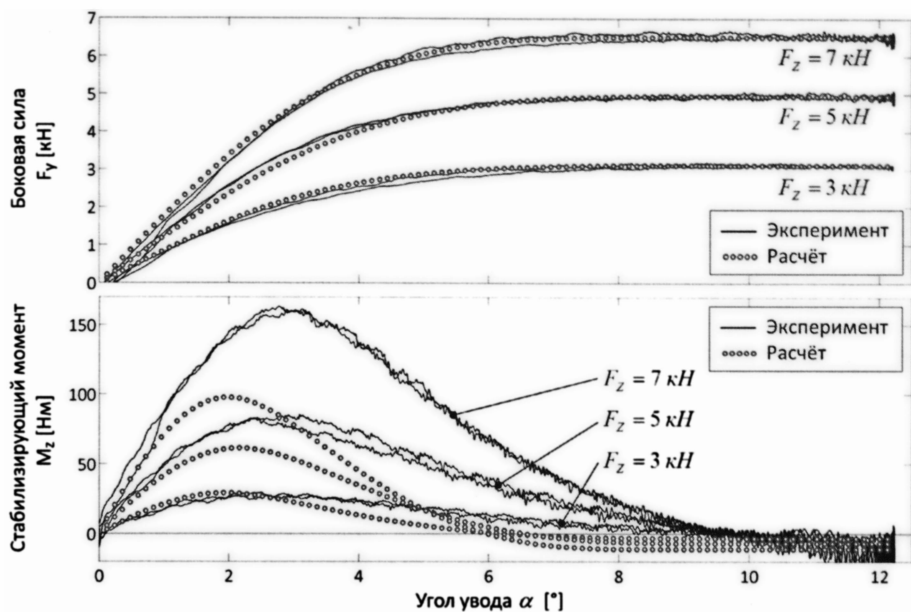


Рис. 8. Результаты эксперимента и расчёта модели с одномерным контактом

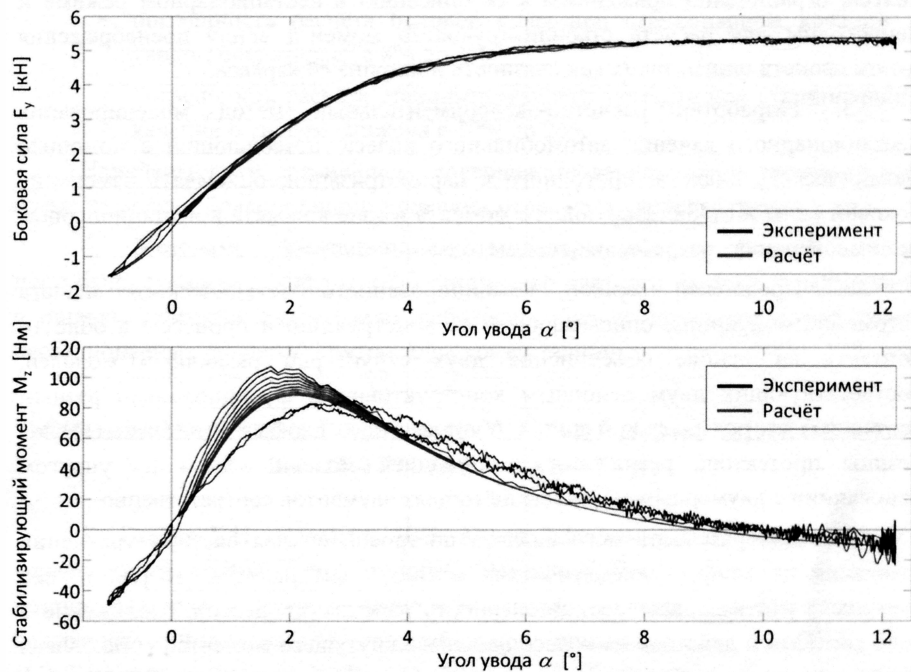


Рис. 9. Результаты эксперимента и расчёта модели с двумерным контактом

Учёт двумерной зоны контакта по сравнению с одномерной незначительно уточняет описание боковой силы при уводе (ошибка 4% вместо 8%). В описании стабилизирующего момента модель с двумерной зоной контакта показывает по-прежнему недостаточно точный результат (отклонение до 26%), но существенно более близкий к эксперименту, нежели модель с одномерным контактом (ошибка до 50%). По мере расчёта результат итерации меняется значительно, что говорит об удалённости начального приближения от решения и подчёркивает разницу между одномерным и двумерным контактом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Установлено, что современный уровень развития средств исследования автомобиля и его систем требует математического описания колеса с эластичной шиной при сочетании не только точности и быстродействия, но и доступности параметризации модели его качения.

2. На основании результатов экспериментов и имитационного моделирования доказано, что наиболее развитые существующие механические модели способны описывать боковую силу стационарно катящегося с уводом колеса, ограниченно применимы к её описанию в нестационарном режиме и непригодны для расчёта стабилизирующего момента ввиду пренебрежения рядом свойств шины, таких как связность и ширина её каркаса.

3. Разработан расчётно-экспериментальный метод моделирования нестационарного качения автомобильного колеса, позволяющий с помощью механического аналога, пригодного к параметризации, описывать изменения боковой силы и стабилизирующего момента в зоне контакта в нестационарном режиме. В рамках разработки этого метода:

3.1. Предложен вариант комбинированного механического аналога автомобильной шины, описывающего ее конструкцию и процессы в области контакта на основе объединения двух структурно различных моделей, соответствующих двум основным конструктивно и функционально разным составным частям реальной шины. Учёт связного каркаса и несвязного слоя резины протектора реализован комбинацией модели «лента на упругом основании» с двумерным массивом щётчных элементов соответственно.

3.2. Для разработанного аналога построена полная система уравнений движения на основе кинематических связей и соображений теории изгиба стержней, учитывающая нестационарность рабочих процессов, скольжение в зоне контакта и действие на колесо внешнего крутящего момента. Установлена необходимость разработки специального подхода к решению системы.

3.3. Разработан и реализован метод численного решения системы уравнений, описывающих предложенную модель, на основе итерационного процесса с коррекцией приближений.

3.4. Для вычисления начального приближения итерационного процесса построена отдельная модель, являющаяся упрощённой версией основной.

3.5. В рамках идентификации модели с двумерной зоной контакта для шины размерностью 245/45 R18 был реализован предложенный итерационный процесс, сходимость с вычислительной ошибкой 1% достигнута за 10 итераций.

4. Экспериментально получены характеристики отпечатков зоны контакта, боковой и продольной сил, а также стабилизирующего момента на ободе колеса при качении с уводом, при статическом поперечном смещении обода и при статическом его повороте вокруг вертикальной оси для современной шины размерностью 245/45 R18.

5. С помощью экспериментальных данных и результатов имитационного моделирования доказано уточнение уводных характеристик шины при учёте связанного деформируемого каркаса и двумерной зоны контакта в сравнении с существующими моделями с несвязным деформируемым каркасом с одномерными участками контакта:

- погрешность расчёта боковой силы при стационарном качении с уводом сократилась с 8% до 4%;
- погрешность расчёта стабилизирующего момента при стационарном качении с уводом снижена с 50% до 26%.

Намечены пути дальнейшего совершенствования метода, показана его совместимость с более точными моделями отдельных свойств (трения и др.).

6. Методами имитационного моделирования установлено, что построенная модель с учётом деформируемого связанного каркаса и двумерной площадки контакта качественно работоспособна и позволяет исследовать нестационарные процессы внутри зоны контакта шины.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Гладов Г.И., Саркисов П.И. Анализ влияния расположения осей на управляемость четырёхосных колёсных машин // Проектирование колёсных машин. Материалы Всерос. научн.-техн. конф., посвящ. 100-летию начала подготовки инженеров по автомобильной специальности в МГТУ им. Н.Э. Баумана. 25-26 нояб. 2009 г., М., 2010. С. 83-85. (0,1 п.л. / 0,2 п.л.).

2. Гладов Г.И., Саркисов П.И. Расположение осей и манёвренные свойства четырёхосных АТС // Автомобильная промышленность. 2010. №8. С. 15-19. (0,2 п.л. / 0,3 п.л.).

3. Гладов Г.И., Маркова В.В., Саркисов П.И. Concept of transformable running gear for four-axle vehicles // Сборник тезисов докладов общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая научная весна – 2011». 2011. Т. XI, ч. 3. С. 268-270. (0,1 п.л. / 0,1 п.л.).

4. Саркисов П.И. Конструктивные особенности четырёхосных шасси с трансформируемым двигателем // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». 2011. №10. Режим доступа: <http://www.technomag.edu.ru/doc/229537.html>. (0,4 п.л. / 0,4 п.л.).

5. Гладов Г.И., Саркисов П.И. Система адаптации автотранспортных средств к условиям движения // Электронное научно-техническое издание «Молодежный научно-технический вестник», №05. 2012. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/486504.html>. (0,1 п.л. / 0,2 п.л.).

6. Гладов Г.И., Саркисов П.И. Режимы поворота колесных машин с трансформируемым двигателем // Известия ВУЗов. Серия «Машиностроение», №11. 2011. С. 33-38. (0,4 п.л. / 0,5 п.л.).

7. Гладов Г.И., Саркисов П.И. Система адаптации автотранспортных средств к условиям движения // XXIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов: материалы конференции. М: Изд-во ИМАШ РАН, 2011. С. 134-134. (0,1 п.л. / 0,1 п.л.).

8. Popov S., Sarkisov P. Active tire pressure control as a step to sustainable automotive mobility // Proceedings of Multidisciplinary Academic Conference on Transport, Logistics and Information Technologies (MAC – TLIT 2013). 1st ed., Prague. MAC Prague consulting Ltd. 2013. (0,3 п.л. / 0,4 п.л.).

9. Попов С.Д., Саркисов П.И. Подход к моделированию качения колеса с упругой шиной без скольжения на основе кинематических связей // XXV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов, 13-15.09.13, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. С. 306-310. (0,3 п.л. / 0,4 п.л.).

10. Попов С.Д., Саркисов П.И. Обзор моделей нестационарного качения колеса с упругой шиной по недеформируемому опорному основанию // Инженерный журнал: наука и инновации, вып. 12. 2013. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1129.html>. (0,7 п.л. / 1,0 п.л.).