

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Гусак Галины Валерьевны
на тему: «Изучение контактного взаимодействия колеса и дороги с
использованием модели стержневого протектора»
по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа Гусак Г.В. посвящена исследованию контактного взаимодействия колеса и дороги на основе модели колеса с деформируемой периферией. Актуальность темы исследования обусловлена огромной ролью, которую играют колесные транспортные средства в современной жизни человека. Это пассажирские и грузовые перевозки, сельскохозяйственная, строительная и другая специальная техника, авиация, автоспорт. Изучение взаимодействия колеса и дороги важно для лучшего понимания динамики колесных машин, решения вопросов, связанных с безопасностью транспортных средств, а также с проблемой износа колес.

Интерес к указанному кругу задач значительно возрос в последние десятилетия в связи с появлением новых технологий и конструкций шин, а также в связи с развитием вычислительных и аналитических методов при исследовании динамики качения колес.

В диссертационной работе Гусак Г.В. предложена новая модель колеса, состоящего из абсолютно твердого диска и деформируемого протектора, представленного множеством упругих стержней, закрепленных на диске. В недеформированном состоянии ось стержневого элемента направлена вдоль радиуса диска и перпендикулярна диску в точке закрепления стержня. Дорога считается недеформируемой. Внешние концы стержней либо свободны, либо контактируют с дорогой. Предполагается, что этот контакт осуществляется только в одной концевой точке стержня.

Содержание и основные результаты работы. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 141 страницу текста, включающего 36 рисунков, и список литературы из 141 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимости, описана методология диссертационного исследования. Определены цели и задачи исследований. Изложено краткое содержание диссертационной работы. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **обзоре литературы** изложено развитие представлений о взаимодействии тел при качении, начиная с работ Ш. Кулона; описаны составляющие задачи контактного взаимодействия деформируемых тел и даны ссылки на соответствующие работы для различных моделей трения; описаны методы теоретической механики при описании движения колеса, а также феноменологический подход к изучению данной проблемы; рассмотрены модели деформируемого колеса на основе простого физического аналога, щеточные модели, а также сложные физические модели, для которых применяются методы механики сплошной среды.

В **первой главе** диссертации решается задача о равновесии колеса со стержневым протектором под действием различных видов статических нагрузок. Дается описание модели колеса, формулируется постановка задачи. Считается, что колесо расположено вертикально, задача решается в двумерной постановке. Рассматривается два способа закрепления стержней: жесткое закрепление и закрепление с пружиной в основании. Контакт с дорогой описывается законом сухого трения Кулона. Деформации стержней описываются в рамках линейной теории продольных и изгибных деформаций Эйлера-Бернулли.

Заданы геометрические и упругие характеристики колеса: радиус диска r , длина недеформированного стержня протектора h , продольная и поперечная

жесткости стержня N и T . Задается безразмерная величина x для вертикального смещения центра колеса вследствие приложения нагрузки. Из принципа возможных перемещений выводится система уравнений равновесия точек стержня, состоящая из двух обыкновенных дифференциальных уравнений с шестью граничными условиями, учитывающими способ прикрепления стержня к диску и силовое воздействие со стороны дороги. Эта система уравнений решается аналитически. Соответствующие решения определяют форму стержней. Выводятся формулы для нормальной и касательной компонент реакции, действующей на концах стержня, характеризуемого углом φ , в точке контакта с дорогой.

Зона контакта находится из геометрических соображений. В соответствии с моделью сухого трения Кулона выводится неравенство, определяющее возможные положения равновесия конца стержня, когда отсутствует проскальзывание. Далее находятся зоны проскальзывания и прилипания в зоне контакта. Показано, что в центре зоны контакта всегда существует область, в которой отсутствует проскальзывание.

В пунктах 1.5, 1.6 первой главы исследуется изменение деформаций протектора на цикле последовательного увеличения-уменьшения вертикального смещения центра колеса. Показано, что при наличии проскальзывания процесс нагрузки и разгрузки стержня обладает гистерезисом и сопровождается потерей энергии.

В пункте 1.7 вычисляется суммарная нормальная реакция, действующая на нагруженное колесо. Для дискретной модели протектора описан алгоритм вычисления нормальной реакции для стержней, находящихся в зоне контакта, но не проскальзывающих, а также для стержней, находящихся в зоне контакта и проскальзывающих. Осуществлен переход к непрерывной модели протектора. Найдена величина восстанавливающей силы P , действующей со стороны дороги на колесо, путем интегрирования нормальной составляющей реакции по области контакта. Проведен анализ величины P в случае отсутствия проскальзывания между протектором и дорогой, в случае

отсутствия трения между протектором и дорогой, при частичном проскальзывании в зоне контакта. Показано, что результаты разработанной теории контактного взаимодействия согласуются с выводами классической теории Герца. Построены графики суммарной силы на цикле нагрузки-разгрузки колеса для дискретной и непрерывной моделей.

В пункте 1.8 изучается равновесие колеса перед началом движения. Колесо, помимо веса, статически нагружено также крутящим моментом. Описывается равновесное состояние деформированного протектора при наличии небольшого поворота колеса вокруг оси. Получены уравнения, определяющие угол поворота $\Delta\varphi$, необходимый для того, чтобы стержень с координатой φ сместился с одной границы области возможных положений равновесия на другую при данном вертикальном смещении колеса. Для различных значений параметров задачи построены графики зависимости угла поворота $\Delta\varphi$, необходимого для перехода стержня с начальной координатой φ к проскальзыванию. Проведен сравнительный анализ для распределения нормальной реакции стержней в области контакта для колеса, находящегося под действием только вертикальной нагрузки и находящегося под действием вертикальной нагрузки и крутящего момента. Показано, что внешний крутящий момент кроме увеличения «просадки» приводит к смещению равнодействующей силы вертикальной реакции в переднюю часть зоны контакта, из-за чего в системе появляется внутренний крутящий момент, препятствующий повороту колеса.

Во второй главе диссертации развиваются идеи главы 1 и рассматривается задача о нахождении реакции со стороны дороги для статически нагруженной колесной пары. Колесная пара представляется в виде системы, состоящей из двух абсолютно твердых дисков, жестко закрепленных на общей оси, по периметру которых расположены деформируемые стержни. Наклон диска каждого колеса к общей оси характеризуется «углом развала» α , $\alpha \neq 0$. При приложении нагрузки к системе стержни протектора изгибаются и выходят из плоскости диска.

Уравнения равновесия точек деформированного стержня выводятся из принципа возможных перемещений. Направление горизонтальной составляющей силы реакции в точке контакта стержня находится из условия минимума функционала потенциальной энергии деформированного стержня. Показано, что в плоскости дороги конец стержня будет смещаться вдоль прямой, проходящей через конец стержня и проекцию центра колеса. Получены формулы для нормальной и касательной компонент силы реакции. Показано, что в трехмерном случае область «прилипания» в центре зоны контакта появляется не при любых условиях, а зависит от угла α . Границы области проскальзывания также зависят от α . Получены выражения для суммарной нормальной и касательной реакции, действующей на протектор со стороны плоскости в случае отсутствия проскальзывания, а также приближенные формулы при малых значениях вертикального смещения x . Проводится анализ по влиянию развала и жесткости протектора на направление реакций.

В третьей главе диссертации исследуется динамика колеса со стержневым протектором под действием вертикальной силы P , горизонтальной силы Q и момента M , приложенных к центру диска. Качение колеса происходит в вертикальной плоскости. Для описания деформаций стержней используется квазистатическая теория малых деформаций, кинетическая энергия колебаний стержней не учитывается. Выводится система уравнений движения колеса виде системы трех дифференциальных уравнений относительно декартовых координат x, y центра диска колеса, угла поворота колеса ψ и относительно величин u_h, v_h , определяющих продольное и поперечное смещение конца стержня с координатой φ . Эти уравнения дополняются геометрическим условием в зоне контакта и законом сухого трения. Алгоритм нахождения областей проскальзывания основан на анализе неравенства, соответствующего закону сухого трения.

Подробно рассмотрен случай, когда параметр ζ , характеризующий отношение жесткостей протектора в продольном и поперечном направлениях,

равен 1. При этом значении параметра задачи отсутствует проскальзывание в статическом решении. Построены примеры (подобраны соотношения линейной и угловой скоростей), когда проскальзывание отсутствует во всей зоне контакта, когда имеется участок проскальзывания в задней части зоны контакта, и когда осуществляется движение юзом.

Проведено исследование зависимости силы трения от относительного проскальзывания колеса и дороги при стационарном движении. Показано, что моделирование упругого слоя посредством стержневого протектора для определенного круга задач хорошо согласуется с теоретическими моделями Герца и Картера.

В заключении сформулированы основные результаты работы, а также определены возможные направления дальнейших исследований.

Достоверность результатов и обоснованность выводов работы.

Все результаты в диссертации получены на основе сформулированных в ней гипотез методами классической механики, теории упругости, асимптотических методов, строгих математических методов. Достоверность результатов диссертации подтверждается соответствием полученных выводов результатам классических исследований в указанной области.

Научная новизна.

Все результаты, полученные соискателем, являются новыми и оригинальными. Предложена новая модель колеса с деформируемой периферией, которая может быть отнесена к классу щеточных моделей. Построена теория взаимодействия протектора с жесткой дорогой. Границы области контакта, участков сцепления и проскальзывания внутри нее считаются заранее неизвестными и определяются в ходе исследования в зависимости от геометрических и жесткостных характеристик, а также сил и момента, приложенных к диску колеса.

Проведено исследование равновесного состояния колеса под действием различных видов статических нагрузок: только вертикальной силой и при наличии крутящего момента.

Вычислены компоненты силы реакции, действующей на элемент протектора, сформулированы условия возникновения проскальзывания, определены границы областей проскальзывания и прилипания в зоне контакта, получено условие, при котором для любого значения коэффициента трения отсутствует проскальзывание в зоне контакта. Найдена суммарная реакция, действующая на колесо, нагруженное вертикальной силой.

Проведен анализ изменения деформированной формы стержня протектора и найдена работа сил трения на цикле последовательной нагрузки-разгрузки. Показано, что при наличии проскальзывания процесс нагрузки и разгрузки стержня обладает гистерезисом и сопровождается потерей энергии.

Показано, что наличие крутящего момента увеличивает вертикальную просадку колеса и вызывает смещение равнодействующей нормальной реакции в переднюю часть зоны контакта.

Проведено исследование по влиянию развала в колесной паре на проскальзывание в зоне контакта и величину реакции со стороны дороги. Показано, что в случае отклонения плоскости колеса от вертикали область прилипания в центре зоны контакта появляется не всегда, а границы области проскальзывания зависят от угла развала. Получено значение безразмерного параметра, характеризующего жесткость протектора, при котором проскальзывание будет отсутствовать в точках контакта при любом коэффициенте трения. Найдена нагрузка на ось, возникающая в колесной паре за счет деформации периферии колес.

Получены уравнения движения колеса при наличии сил и моментов, приложенных к центру диска. Предложен алгоритм нахождения областей проскальзывания для движущегося колеса. Проведено исследование стационарного режима движения колеса. Получена зависимость силы трения от относительного проскальзывания колеса и дороги, проведен сравнительный анализ с теорией качения Картера.

Диссертационная работа Гусак Г.В. прошла **апробацию** в ходе обсуждения ее результатов на научных семинарах и конференциях. Основные

результаты работы опубликованы в 8 работах, в том числе в 3 статьи в рецензируемых журналах и 5 статей в сборниках трудов конференций.

Аннотация полностью отражает содержание и выводы диссертации.

Диссертация Гусак Г.В. производит очень хорошее впечатление. Автором проделан большой объем работы с использованием методов аналитической механики, асимптотических методов, методов математического анализа и получен целый ряд новых и значительных результатов. Диссертация Гусак Г.В. представляет собой законченное исследование, обладающее внутренним единством, выполненное на высоком научном уровне.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертация оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Гусак Галина Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,

профессор кафедры высшей математики

Института кибернетики Федерального

государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования «МИРЭА –

Российского технологического университета»

Шатина Любовь Викторовна

Шатина Альбина Викторовна

28.04.2021

Контактные данные:

тел.: +7-499-215-65-65, e-mail: shatina@mirea.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.02.01 – Теоретическая механика

Адрес места работы:

119454, ЦФО г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78,
«МИРЭА – Российский технологический университет»,
Институт кибернетики, кафедра высшей математики
Тел.: +7-499-215-65-65; e-mail: rector@mirea.ru

