

На правах рукописи

УДК 629.3.017

Морозов Михаил Владимирович

**МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ И ТОРМОЗНЫХ
СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЬНОГО КОЛЕСА С УЧЕТОМ
ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТАКТА ШИНЫ С ДОРОГОЙ**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Москва 2012

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

Научный руководитель - кандидат технических наук
Купреянов А.А.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Вольская Наталья Станиславовна
кандидат технических наук Вартанян Валерий Арамович

Ведущая организация: Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)

Защита диссертации состоится «15» октября 2012г. в 14:30 часов на
заседании диссертационного Совета Д 212.141.07 МГТУ им. Н.Э. Баумана по
адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана.

Автореферат разослан «10» сентября 2012г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2000593

Морозов М.В. Методы улучшения

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
доктор технических наук, профессор

Сарач Е.Б.

-594

2516

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В климатических условиях России особенно актуальна проблема недостаточного сцепления шин с загрязненными водой, грязью, снегом или льдом асфальтобетонными поверхностями, в частности, при преодолении автомобилем подъема или спуска. Необходимость преодоления подъемов и спусков возникает не только в холмистых местностях, но и при движении по мостам и эстакадам. К сожалению, случаи соскальзывания автомобилей с загрязненных или занесенных снегом уклонов встречаются достаточно часто. Это приводит не только к невозможности дальнейшего следования по маршруту, но и к дорожно-транспортным происшествиям. Частным случаем подъема является короткий подъем на выезде колеса из ямы.

Для военных колесных машин и других машин высокой проходимости реализация требований по преодолению уклона 50% и более даже на чистом асфальте полностью упирается в ограничение по сцепным свойствам шины, что можно показать несложным вычислением.

Цель и задачи. Целью работы является улучшение тягово-сцепных и тормозных свойств автомобильного колеса путем управления подводимым моментом с использованием комплексной математической модели движения колеса, учитывающей трибологические свойства контакта шины с дорогой.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи.

1. Определены закономерности трения элемента эластомера о загрязненные асфальтобетонные поверхности на основе известных моделей и экспериментальных данных. Разработана математическая модель трения элемента эластомера о загрязненные асфальтобетонные поверхности.
2. Сформулированные закономерности экспериментально проверены на трибологическом стенде.
3. Разработана математическая модель качения колесного движителя с учетом полученных закономерностей трения элемента эластомера, разработаны математические модели для определения вспомогательных величин, определяющих сцепные свойства эластомера – температуры общей массы шины, рабочего слоя и тонкого поверхностного слоя; степени загрязнения дорожной поверхности.
4. Разработаны методы улучшения сцепных свойств автомобильного колеса в различных режимах движения (тяговом и тормозном) на асфальтобетонных поверхностях с загрязнением различных видов.

Методы исследования. Предлагаемая математическая модель создается на основе составляемых из теоретических предпосылок дифференциальных уравнений и экспериментальных зависимостей, полученных на специальном трибологическом стенде, и реализуется в среде Matlab Simulink.

После проверки адекватности и получения численных зависимостей модель может быть использована для оценки эффективности различных способов управления режимом работы колесного движителя для улучшения сцепных свойств.

Научная новизна. Разработана новая комплексная математическая модель качения колеса с высоким коэффициентом скольжения. Комплексная математическая модель отличается сочетанием упрощенной модели качения деформируемого колеса, модели теплопередачи в катящейся шине, модели трибологических процессов в контакте и их взаимного влияния в качестве цельной системы.

Разработан новый метод использования переходных трибологических характеристик тонких поверхностных слоев шины для улучшения сцепных свойств колеса посредством импульсного воздействия на него со стороны трансмиссии и тормозной системы. Отличительной особенностью данного метода является сочетание периодического кратковременного скольжения в контакте шины с дорогой и создания условий для остывания тонкого поверхностного слоя элементов поверхности шины при их выходе из контакта.

Разработана математическая модель процесса очищения дорожной поверхности буксующим/скользящим колесом, которая может быть использована при разработке методов улучшения тягово-сцепных и тормозных свойств автомобильного колеса. В модели впервые учитывается увеличение коэффициента трения эластомера о загрязненную асфальтобетонную поверхность с ростом пройденного пути скольжения эластомера по данному участку поверхности.

Практическая ценность работы заключается, прежде всего, в указании возможных способов улучшения сцепных свойств на чистых и загрязненных асфальтобетонных поверхностях и формулировке рекомендаций по их использованию. Созданная программа может быть использована для расчетов и оптимизации новых систем управления режимом работы колесных движителей, реализующих предложенные способы улучшения сцепных свойств.

Кроме того, предложенные в работе законы трения эластомера и экспериментальные зависимости могут быть использованы (с определенными доработками) и при других расчетах в составе более сложных моделей, позволяя более достоверно отражать сцепные свойства колесного движителя при решении задач устойчивости, управляемости и других задач.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируется на накопленном опыте теоретических, расчетных и экспериментальных исследований динамики систем «автомобиль - колесо - дорожная поверхность», а также на применении апробированных методов теории трибологии и имитационного моделирования.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

- на научно-технических семинарах кафедры СМ-10 «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2009...2012 гг. (г. Москва);
- на международных конференциях ПГУПС «Трибология и надежность» в 2009 ... 2011 гг. (г. Санкт-Петербург);
- на научно-технической конференции с участием иностранных специалистов, посвященной 120-летию выдающегося триболога М.М. Хрушова «Трибология - машиностроению» ИМАШ РАН в 2010 г. (г. Москва).

Публикации. Тема и содержание диссертации отражены в 7 научных работах, из них в изданиях, рецензируемых ВАК – 3 работы.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, списка литературы и приложения. Общий объем работы - 217 страниц, в том числе 14 таблиц, 130 рисунков и приложений на 31 странице. Список литературы включает 133 наименования.

Структура работы. **Первая глава** посвящена обзору литературы и постановке задачи исследования. Рассмотрены различные математические модели качения эластичного колеса, используемые для описания стационарных и нестационарных режимов. Проведен анализ теоретических работ по трению эластомеров и приведены известные теоретические зависимости сцепных свойств шин от скорости скольжения, температуры и свойств опорной поверхности. Кратко описаны известные методы нахождения температурного поля шины и его влияние на сцепные свойства. Проанализированы многочисленные экспериментальные данные по сцепным свойствам шины в плохих дорожных условиях.

На сегодняшний день предложено большое множество моделей качения эластичного колеса, связывающих кинематические параметры качения колеса с продольными и поперечными силами в контакте. Эти модели можно разделить на эмпирические, такие как, например, модели Дика А.Б., Н. Расејка и С. Canudas-de-Wit и модели, основанные на механических аналогиях, такие как, например, в работах Левина М.А. и Попова С.Д. Недостаток эмпирических моделей заключается в том, что они позволяют описывать лишь отдельные явления и не обладают предсказательной способностью при рассмотрении новых методов воздействия на колесо, и, кроме того, обычно используют эмпирические параметры и коэффициенты, значения которых сложно определить на практике. Модели на механических аналогиях лишены этого недостатка. В предельном случае механическая аналогия переходит в точное моделирование механических свойств, например, в работах Белкина А.Е., Нарской Н. Л. и Одинцова О.А. используется метод конечных элементов для моделирования свойств многослойной армированной оболочки шины. При этом не требуется никаких эмпирических параметров, кроме стандартной технической документации на шину. Аналогичный подход применил J. Tanner. Эти модели позволяют точно моделировать связь кинематических и силовых параметров колеса при качении с малым скольжением. Сила трения отдельных элементов в контакте вычисляется по формуле Кулона. По мере увеличения скольжения в контакте кулоновское трение становится все менее адекватным представлением процессов, происходящих в контакте, и требуется использовать другие модели трения.

Теории трения эластомеров посвящены работы Бухиной М.Ф., Бартеньева Г.М. и других. Из зарубежных исследователей в теорию вязкоупругого трения большой вклад внесли D. Moore, M. Williams, R. Landel, J. Ferry и G. Palasantzasa. Автором наиболее полных и современных работ в этом направлении является P. Persson. В его работах учтены явления теплообразования при трении эластомера о твердую шероховатую поверхность и их влияние на переходные

процессы трения, а также изучено влияние вида спектральной плотности шероховатостей поверхности на силу трения.

Вопросам тепловой нагруженности колеса посвящены работы Качугина В.Е., Хромова М.К. и других. В данных работах рассмотрено влияние теплового поля шины на внутренние потери в эластомере применительно к сопротивлению качению колеса, при этом вопросы сцепных свойств шины не рассматриваются.

Обширные данные по экспериментальному исследованию свойств автотракторных колес приведены в работах Балабина И.В.

Таким образом, для создания математической модели качения колеса с большим коэффициентом скольжения требуется использовать вязкоупругую модель трения эластомеров. Модель переходных процессов трения, предложенная Р. Persson, должна быть доработана для учета изменения теплового поля шины в процессе качения колеса. Моделирование теплового состояния колеса может быть реализовано на основе упрощенной модели, аналогичной модели Качугина В.Е. Механические свойства оболочки шины могут быть приближенно учтены сильно упрощенной механической моделью с разбиением на конечные элементы, аналогичной модели Белкина А.Е., Нарской Н. Л. и Одинцова О.А.

На рис. 1 показана зависимость $\varphi(S)$ -диаграммы, используемой в теории антиблокировочных (АБС) и антипробуксовочных (АПС) систем, от скорости движения автомобиля в тормозном режиме. Из рис. 2 видно, что в тяговом режиме коэффициент продольной силы тяги φ_x падает значительно быстрее с ростом коэффициента скольжения. В реальном процессе торможения происходит одновременное изменение скорости и коэффициента скольжения (рис. 3). При этом при начале торможения имеются пиковые забросы величины силы трения.

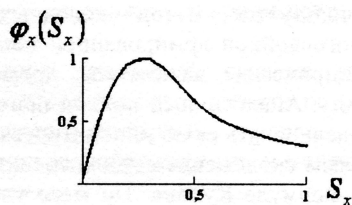
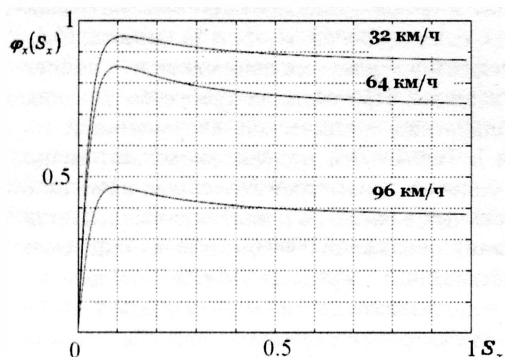


Рис. 2. $\varphi(S)$ -диаграмма в тяговом режиме

Рис. 1. Зависимость характера $\varphi(S)$ -диаграммы от скорости автомобиля (режим торможения)

В данной главе также кратко проанализированы принципы действия АБС, АПС и систем стабилизации.

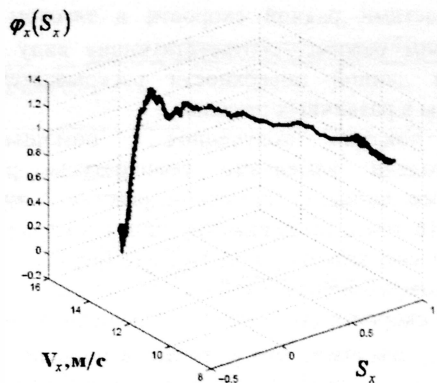


Рис. 3. Реальный процесс торможения в V-S координатах

Во второй главе проведена оценка влияния различных параметров на сцепные свойства эластомера и колеса как цельной системы. Показана взаимосвязь кинематических и тепловых параметров состояния колесного движителя. Изображенные на рис. 1-3 явления могут быть объяснены, если перейти от одного безразмерного коэффициента скольжения в координаты абсолютной скорости вращения колеса и скорости скольжения в контакте (рис. 4).

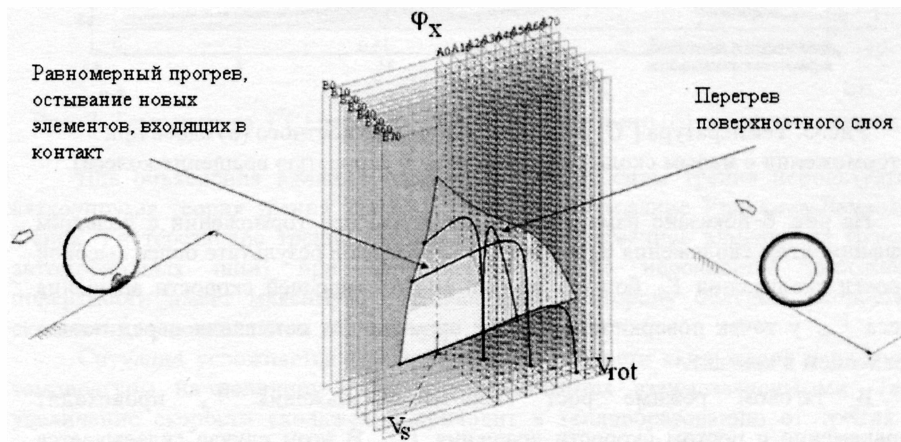


Рис. 4. Влияние тепловой картины в различных режимах работы колеса на сцепные свойства

Построив в этих координатах кривые $\varphi(s)$ для тормозного режима при различных скоростях, можно получить проходящую через них поверхность, являющуюся общей для тягового и тормозного режимов. Сечения этой

поверхности плоскостями равной скорости в тяговом режиме дают $\varphi(S)$ -диаграммы в тяговом режиме, соответствующие виду диаграмм на рис. 2. Физический смысл данной поверхности раскрывается при рассмотрении теплового поля шины в различных режимах.

На рис. 5 показано полученное с помощью описанной далее математической модели изменение температуры рабочего и тонкого поверхностного слоев шины в тормозном режиме с малым коэффициентом скольжения S (для 16 точек по периметру шины в процессе вращения колеса), определяющее, согласно вязкоупругой модели трения, величину силы трения.

При малом коэффициенте скольжения нагрев поверхностного слоя в результате меньшей скорости скольжения V_s невелик, однако большая скорость вращения колеса V_{rot} означает, что у точек, вышедших из контакта, меньше времени на остывание перед новым входением в контакт с дорогой.

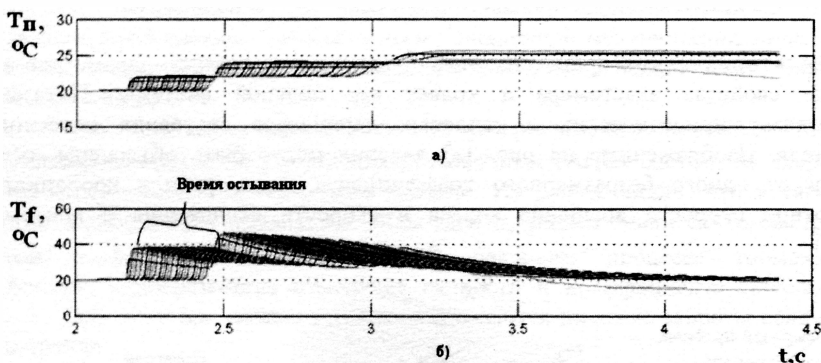


Рис. 5. Температура $^{\circ}\text{C}$ рабочего (а) и поверхностного (б) слоев при торможении с малым скольжением (большой скоростью вращения колеса)

На рис. 6 показано изменение температуры при торможении с большим коэффициентом скольжения S . В этом случае нагрев в результате более высокой скорости скольжения V_s больше, однако за счет меньшей скорости вращения колеса V_{rot} у точек поверхности больше времени для остывания перед новым входением в контакт.

В тяговом режиме рост скорости скольжения V_s происходит одновременно с ростом скорости вращения V_{rot} . В этом случае складывается гораздо менее благоприятная картина, поскольку у поверхностного слоя с ростом скорости большее тепловыделение и меньшее время остывания перед новым входением в контакт (рис. 7). Предельным случаем роста температуры является известное дымление сильно буксующего колеса.

В переходных режимах возможно кратковременное формирование неустановившихся тепловых полей, благоприятно сказывающихся на величине коэффициента продольной силы тяги (как, например, показано на рис. 3).

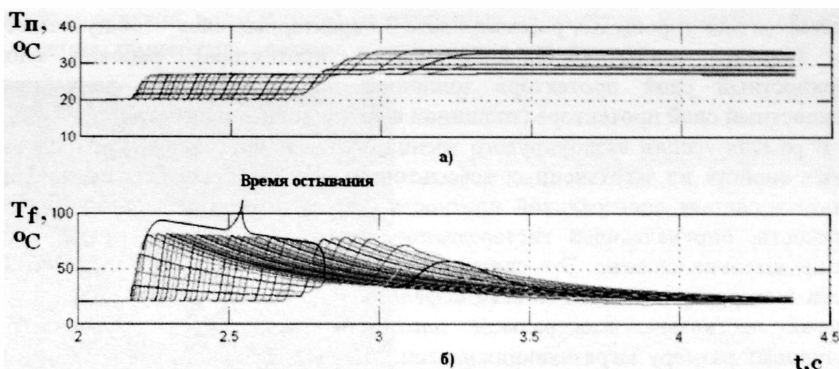


Рис. 6. Температура [$^{\circ}\text{C}$] рабочего (а) и поверхностного (б) слоев при торможении с большим скольжением (малой скоростью вращения колеса)

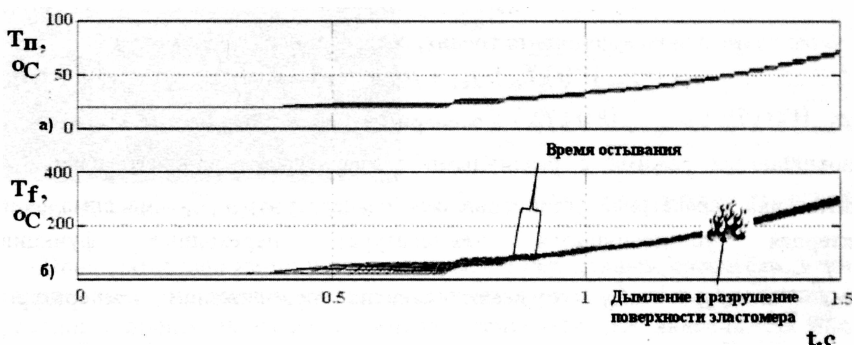


Рис. 7. Температура [$^{\circ}\text{C}$] рабочего (а) и поверхностного (б) слоев при разгоне

Для объяснения влияния тепла на величину силы трения используется вязкоупругая теория трения эластомеров и преобразование Уильямса-Ландела-Ферри. Гистерезисное трение (оказывающее существенное влияние на трение автомобильных шин) при определенной длине неровностей дорожной поверхности имеет максимум, смещающийся в сторону больших скоростей скольжения с повышением температуры.

Ситуация усложняется тем, что влияние скорости скольжения и влияние температуры на величину силы трения являются взаимозависимыми. Так, увеличение скорости скольжения приводит к теплообразованию от трения в контакте. В свою очередь, нагрев эластомера приводит к смещению максимума гистерезисной составляющей, и, как следствие, уменьшению трения. При этом, чем выше коэффициент трения, тем больше величина смещения и отклонение кривой от возрастания без учета теплообразования.

Кроме того, дорожная поверхность имеет шероховатости различной длины. Шероховатости различного размера вызывают нагрев различных слоев эластомера. В результате требуется рассматривать N слоев эластомера с построением кривой вязкоупругих потерь для каждого слоя. В работе

предлагается для упрощения рассматривать 3 характерных слоя - общую массу шины (каркаса шины с большей частью протектора), рабочий слой (поверхностный слой протектора толщиной порядка 1мм) и тончайший поверхностный слой протектора (толщиной в сотые доли миллиметра).

В рамках теории вязкоупругого трения получает объяснение уменьшение сцепных свойств на загрязненных асфальтовых поверхностях. Так, на мокром асфальте в составе спектральной плотности шероховатости асфальтобетонной поверхности, определяющей гистерезисное трение и тепловыделение, будут отрезаны высокие частоты. Это связано с тем, что вода заполняет (сглаживает) полости в шероховатой поверхности асфальта. В случае загрязнения асфальта твердыми частицами, спектральная плотность также будет отсечена по характерному размеру загрязняющих частиц.

Расчетную формулу для величины коэффициента трения для практических вычислений можно представить как сумму двух составляющих:

$$\mu_{\Sigma} = \mu_p + \mu_f. \quad (1)$$

Уравнение для коэффициента трения, создаваемого рабочим слоем:

$$\mu_p = \mu_{hot}(V(t), T_{02}) \cdot f_{n2} + \mu_{overheat}(V(t), T_{03}) \cdot f_{n1}, \quad (2)$$

где $\mu_{hot}(V(t), T_{02})$, $\mu_{overheat}(V(t), T_{03})$ - экспериментально получаемые кривые для установившегося режима с различными температурами рабочего слоя T_{02} (минимальная характерная установившаяся температура) и T_{03} (максимальная характерная установившаяся температура); переходные функции $f_{n1} = \frac{T_{\Pi} - T_{02}}{T_{03} - T_{02}}$, $f_{n2} = 1 - f_{n1}$ отражают степень приближения температуры рабочего слоя T_{Π} к соответствующим характерным температурам T_{02} и T_{03} .

Составляющая коэффициента трения от тонкого поверхностного слоя:

$$\mu_f = \mu_{cold}(V(t), T_{01}) \cdot f_{n2}, \quad (3)$$

где $\mu_{cold}(V(t), T_{01})$ - аппроксимированная кривая неуставившегося режима при непрогретом тонком поверхностном слое с температурой T_{01} , построенная по экспериментальным данным переходных процессов; переходные функции $f_{n1} = \frac{T_f - T_{01}}{T_{04} - T_{01}}$, $f_{n2} = 1 - f_{n1}$ отражают степень приближения температуры тонкого поверхностного слоя T_f к характерным температурам T_{01} и $T_{04} \approx 100^{\circ}\text{C}$.

В третьей главе приводятся: описания трибологического стенда, изображенного на рис. 8, и используемого измерительного оборудования; методика эксперимента и результаты экспериментального определения зависимости силы трения резинового образца об асфальтовую поверхность (с загрязняющими слоями песка, продуктов износа шин и других типичных

дорожных осадков, воды и льда) от различных параметров, а именно, скорости скольжения, температуры резины, и загрязнения поверхности.

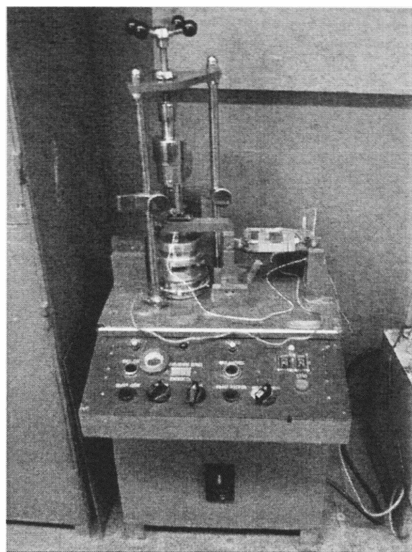


Рис. 8. Трибологический стенд

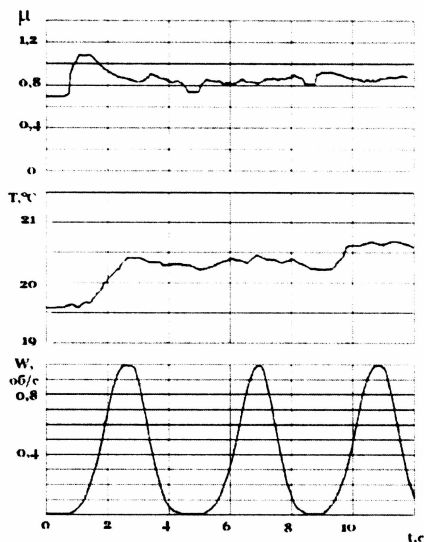


Рис. 9. Трение в переходном процессе

Приводятся данные по установившимся и переходным процессам, а также экспериментальные данные, свидетельствующие от том, что определяющими в переходных процессах являются именно температурные явления. На рис. 9 показан пример переходного процесса, в котором коэффициент трения образца эластомера об асфальтовую поверхность достигает величины 1,1.

В четвертой главе подробно изложены вопросы создания математической модели качения колеса с большим коэффициентом скольжения. Используется упрощенное представление механических свойств колесного движителя, в котором свойства резинокордной оболочки упрощенно моделируются ее разбиением на N элементов (в расчетной программе используется максимум 64 элемента), соединенных упруго-демпфирующими связями. Использование такой упрощенной механической части модели обусловлено рассматриваемыми режимами работы колеса, в которых в большинстве случаев вся область контакта является зоной скольжения, и тангенциальная деформация оболочки становится близкой к равномерной по области контакта. Дискретное разбиение необходимо для учета “истории” нагрева отдельных областей поверхности шины в переходных процессах, а радиальные упруго-демпфирующие связи позволяют учитывать распределение нормальной реакции по области контакта. Введение упруго-демпфирующих связей в окружном направлении позволяет учитывать явление «упругого скольжения», имеющее место как составляющая общего проскальзывания колеса даже при полном скольжении в области контакта.

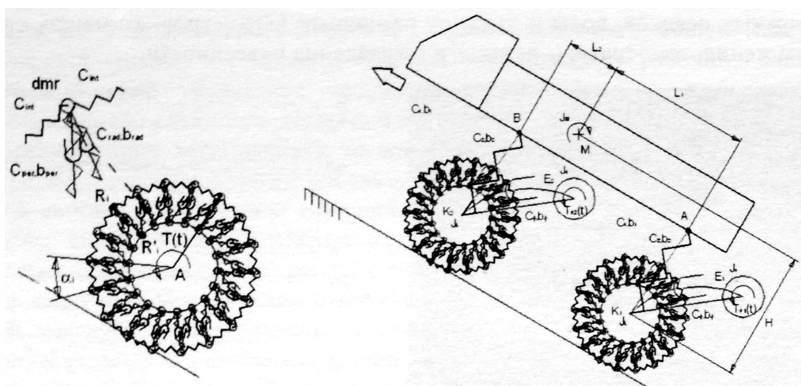


Рис. 10. Модель колесного движителя в составе колесной машины

Уравнения движения элементов протектора массой dm_R записываются как простые уравнения движения точек под действием пружин и демпферов.

В термодинамической части модели вычисляются температуры участков рабочего и тонкого поверхностного слоев шины, а также температура общей массы шины, необходимые для вычисления коэффициента трения.

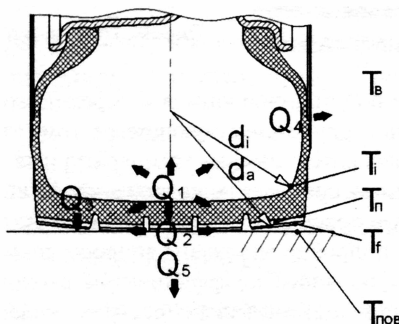


Рис. 11. Модель тепловых процессов в шине

Суммарное изменение температуры общей массы шины:

$$\frac{dT_i}{dt} = k1i \cdot \left[k2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} - k3 \cdot \sum_{j=1}^N (T_{ij} - T_{ij}) \right]. \quad (4)$$

Суммарное изменение температуры элементарного участка рабочего слоя шины:

$$\frac{dT_n}{dt} = k1n \cdot \left[k3 \cdot (T_i - T_n) - k3 \cdot (T_n - T_f) + k6 \cdot \frac{dx_{ck}}{dt} \right]. \quad (5)$$

Суммарное изменение температуры элементарного участка тонкого поверхностного слоя шины:

$$\frac{dT_f}{dt} = k1f \cdot \left[k3 \cdot (T_f - T_i) + k6f \cdot \frac{dx_{ck}}{dt} - k4 \cdot (T_f - T_B) - k5 \cdot (T_f - T_{он}) \right]. \quad (6)$$

Здесь T_b - температура воздуха, $T_{оп}$ - температура опорной поверхности, φ - угол поворота колеса, x_{κ} - пройденный путь скольжения элементов протектора. Коэффициенты пропорциональности k определяются экспериментально в различных режимах работы колеса.

Для определения влияния загрязнения на дорожную поверхность требуется ввести величину степени загрязнения дорожной поверхности C . Она имеет в предельных точках значение $C=1$ для поверхности, принятой за образец неблагоприятных сцепных свойств, такой как, например, мокрая грязная поверхность. Для поверхности, принятой за образец хороших сцепных свойств, такой как, например, мокрая асфальтобетонная поверхность, $C=0$. Тогда можно вычислять коэффициент трения на частично очищенных поверхностях по формуле

$$\mu = \mu_{\text{Эlow}} \cdot C + \mu_{\text{Эhigh}} \cdot (1 - C), \quad (7)$$

где $\mu_{\text{Эlow}}, \mu_{\text{Эhigh}}$ - коэффициенты трения на чистой и загрязненной поверхности, рассчитываемые по формуле (1).

При скольжении элементов протектора по загрязненной поверхности происходит ее очищение.

На трибологическом стенде было экспериментально установлено, что степень загрязнения экспоненциально падает с ростом суммарного пути скольжения элементов протектора по участку поверхности согласно формуле:

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{xs}{x_0}}, \quad (8)$$

где $0 < C_0 < 1$ - параметр начального загрязнения; параметр x_0 физически является суммарным путем скольжения шины по элементу поверхности, при котором величина C уменьшается в e раз.

В пятой главе изложены методы улучшения сцепных свойств колеса в различных условиях движения (качение колеса в тяговом и тормозном режимах; движение по дорожным поверхностям с загрязнением различных видов). Рассмотрены случаи экстренного торможения при спуске с уклона и тяговый режим при подъеме на уклон. В данных режимах скорости движения невелики, и задача удержания устойчивости движения при больших коэффициентах скольжения колес может быть решена применением системы стабилизации.

В тормозном режиме на слабозагрязненных поверхностях (чистый или мокрый асфальт) методы улучшения сцепных свойств могут быть сформулированы следующим образом.

1. Экспериментальное определение зависимости коэффициента трения эластомера о чистую (или мокрую) асфальтовую поверхность от скорости скольжения на трибологическом стенде. Требуется получение экспериментальных кривых при двух характерных предельных температурах в установившемся режиме и при минимальной температуре в переходном процессе.
2. Экспериментальное определение параметров теплообразования и теплопередачи в катящемся колесе в реальных условиях эксплуатации.

3. Моделирование качения колеса в тормозном режиме с помощью созданной математической модели, использующей вышеупомянутые зависимости и параметры, при различной частоте и амплитуде импульсного нагружения колеса тормозным моментом.

4. Выбор оптимальных параметров импульсного нагружения колеса тормозным моментом, обеспечивающих минимальный тормозной путь, которые могут быть реализованы на рассматриваемом автомобиле. Включение алгоритма управления тормозным моментом в общий алгоритм работы тормозной системы.

Распознавание системой управления необходимости включения данного режима работы может быть реализовано в простейшем случае посредством нажатия водителем соответствующей клавиши на панели приборов.

На рис. 12 изображены полученные с помощью расчетной программы результаты моделирования торможения на мокром спуске с блокировкой колеса (а), с использованием АБС (б) и при импульсном торможении (в). Для наглядности результаты даны в виде траектории движения характерной точки на поверхности шины. По виду отклонения траектории от циклоиды можно судить о наличии юза или буксования, а также о длине тормозного пути или пройденного пути в тяговом режиме.

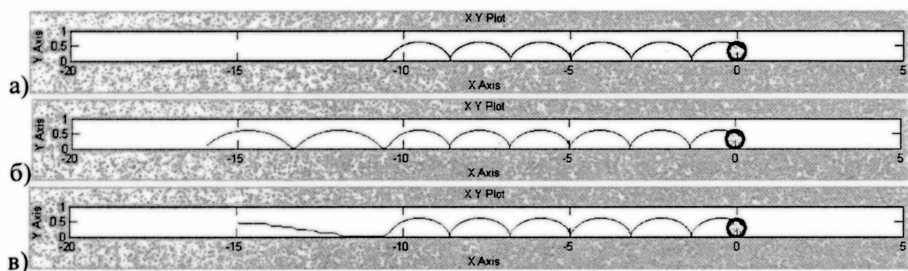


Рис. 12. Торможение на мокром спуске

В тормозном режиме на сильно загрязненной поверхности (асфальт, загрязненный мелкими частицами песка, продуктами износа шин и сгорания нефтепродуктов, воды или таящего снега) метод модифицируется следующим образом.

1-2. Аналогичны сформулированным для тормозного режима на слабо-загрязненных поверхностях.

3. Экспериментальное определение скорости очищения дорожной поверхности в результате скольжения колеса на специальном стенде.

4. Моделирование качения колеса в тормозном режиме с различными коэффициентами скольжения и длительностью процесса торможения.

5. Выбор оптимальных параметров торможения с высоким коэффициентом скольжения, обеспечивающих минимальный тормозной путь, которые могут быть реализованы на рассматриваемом автомобиле. Включение алгоритма управления тормозным моментом в общий алгоритм работы тормозной системы.

На рис. 13 изображены результаты моделирования торможения на загрязненном спуске при блокировке колеса (а) и с использованием АБС (б).

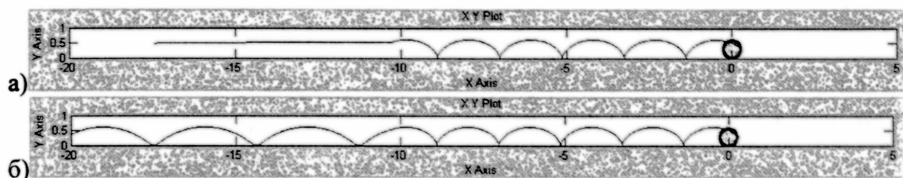


Рис. 13. Торможение на загрязненном спуске

В тяговом режиме на слабозагрязненных поверхностях может быть использован следующий метод.

1-2. Аналогичны методу, сформулированному для тормозного режима на слабозагрязненных поверхностях.

3. Моделирование качения колеса в тяговом режиме с различной величиной и продолжительностью приложения крутящего момента, подводимого к колесу, и различной периодичностью остановки колеса путем приложения тормозного момента для охлаждения тонкого поверхностного слоя шины.

4. Выбор оптимальных параметров приложения тормозных и тяговых усилий к колесу, обеспечивающих подъем автомобиля на уклон, которые возможно реализовать на рассматриваемом автомобиле. Включение алгоритма управления тормозным моментом в общий алгоритм работы трансмиссии и тормозной системы.

На рис. 14 изображены результаты моделирования разгона на мокром подъеме при постоянном крутящем моменте (а), использовании АПС (б) и с импульсным приложением крутящего момента (в).

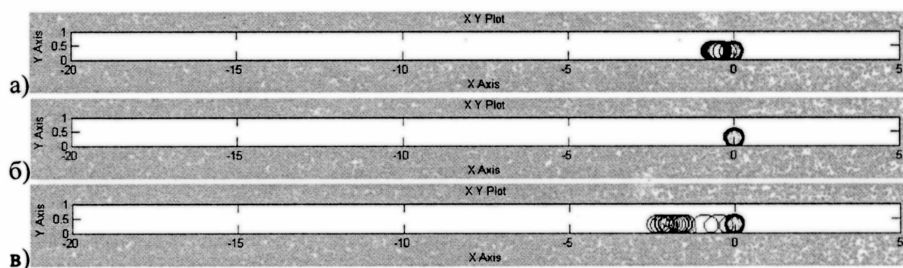


Рис. 14. Разгон на мокром подъеме

В тяговом режиме на сильнозагрязненных поверхностях метод модифицируется следующим образом.

1-3. Аналогичны методу, сформулированному для тормозного режима на сильнозагрязненных поверхностях.

4. Моделирование качения колеса в тяговом режиме с различными коэффициентами скольжения и длительностью процесса буксования.

5. Выбор оптимальных параметров приложения тяговых усилий к колесу, обеспечивающих подъем автомобиля на уклон за минимальное время, которые возможно реализовать на рассматриваемом автомобиле. Включение алгоритма

управления тормозным моментом в общий алгоритм работы трансмиссии и тормозной системы.

На рис. 15 изображены результаты моделирования разгона на загрязненном подъеме с проскальзыванием колеса (а) и с использованием АПС (б).

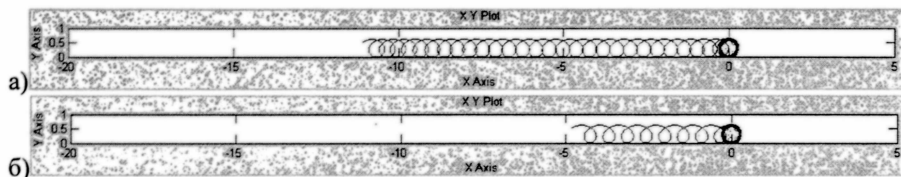


Рис. 15. Разгон на загрязненном подъеме

В приложение вынесены экспериментальные данные по переходным процессам трения на ледяных поверхностях, описание методики измерения тепловых параметров контакта шины с дорожной поверхностью, оценочные значения механических и термодинамических параметров модели, используемых в расчетах, а также методы реализации уравнений подсистем математической модели в пакете прикладных программ Matlab Simulink. На рис. 16 представлена экспериментально полученная зависимость коэффициента трения в контакте резинового образца с ледяной поверхностью от скорости приложения продольной нагрузки.

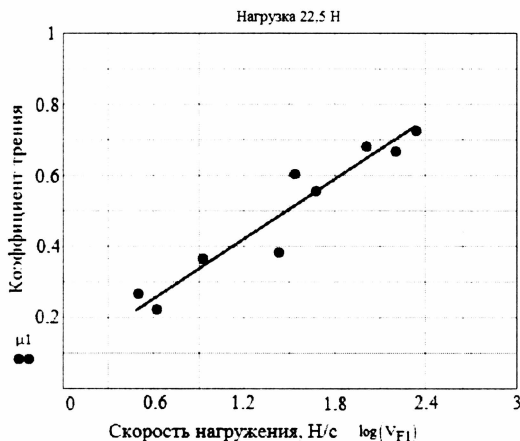


Рис. 16. Общая зависимость пикового значения коэффициента трения от логарифма скорости нагружения

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана новая комплексная математическая модель качения колеса с высоким коэффициентом скольжения, отличающаяся тем, что сочетает

упрощенную модель качения деформируемого колеса, модель теплопередачи в катящейся шине, модель трибологических процессов в контакте и их взаимное влияние в качестве цельной системы. Модель может быть использована для количественной оценки качества работы новых разрабатываемых систем улучшения тягово-сцепных и тормозных свойств автомобиля.

2. Доказана зависимость силы трения, реализуемой в контакте, от теплового поля шины. Доказано и объяснено различие $\varphi_x(S_x)$ -диаграмм в тяговом и тормозном режимах при высоком коэффициенте скольжения. Прогрев рабочего слоя шины приводит к небольшому повышению сцепных свойств. Использование зимних шин с меньшей температурой стеклования эквивалентно повышению температуры окружающей среды. В переходном процессе коэффициент трения растет со скоростью скольжения, но быстро падает с ростом температуры (достигающей 100-150°C) тонкого поверхностного слоя, увеличивающейся в результате теплообразования в контакте при скольжении. Импульсное нагружение обеспечивает высокую скорость скольжения при отсутствии перегрева и позволяет достигать величины коэффициенты трения в контакте 0,9-1,2.

3. Разработан новый метод использования переходных трибологических характеристик тонких поверхностных слоев шины для улучшения сцепных свойств колеса посредством импульсного воздействия на него со стороны трансмиссии и тормозной системы. Метод основан на циклическом удержании высоких коэффициентов скольжения колеса до перегрева тонкого поверхностного слоя шины и последующем уменьшении скольжения для остывания шины или входа новых участков поверхности шины в контакт с дорожной поверхностью. При торможении данный метод эффективен только при поочередном однократном последовательном торможении на всех элементах протектора. Сокращение пути торможения составляет при этом до 30% по сравнению с блокировкой колеса и 15% по сравнению с удержанием коэффициента скольжения в контакте равным 20%. После их перегрева скорости их охлаждения недостаточно для непрерывного режима торможения, и могут быть использованы традиционные алгоритмы. При подъеме на уклон после приложения одного или нескольких импульсов крутящего момента колесо может быть заторможено для охлаждения. Время охлаждения составляет порядка 1-2 секунд. Импульсное нагружение колеса позволяет преодолевать короткие подъемы с уклоном до 90% (например, на выезде из ямы).

4. Разработана математическая модель процесса очищения дорожной поверхности буксующим/скользящим колесом, которая может быть использована при разработке методов улучшения тягово-сцепных и тормозных свойств автомобильного колеса. Загрязнение дорожной поверхности приводит к отсечению в спектральной плотности ее шероховатостей частот с длиной волны меньшей, чем загрязняющие частицы. Таким образом, грязь или мокрый снег существенно снижают коэффициент гистерезисного трения, отсекая взаимодействие шины с малыми шероховатостями. Ввиду повышения сцепления шины с поверхностью при ее очищении в процессе скольжения/буксования колеса алгоритмы АБС и АПС, в методологии которых заложено удержание

величины скольжения не более 20-30%, оказываются принципиально неэффективными с точки зрения сокращения тормозного пути. На малых скоростях проблема потери устойчивости может быть решена применением систем стабилизации.

5. Разработан метод улучшения сцепных свойств колеса, основанный на очищении дорожной поверхности при преднамеренной блокировке или преднамеренном буксовании колеса при движении с малыми скоростями на уклонах. Данный метод оказывается эффективным на всем пути торможения или разгона (подъема на уклон). По сравнению с использованием АБС, предложенный метод сокращает тормозной путь на загрязненном типичным дорожным осадком (пылевидный песок, продукты износа шин и осадки выхлопных газов) асфальте на величину до 65%, а при подъеме на уклоне сокращает время подъема, по сравнению с использованием АПС, в 1,5–2 раза.

6. Экспериментально установлено, что на ледяной поверхности импульсное приложение тангенциальной нагрузки к образцу эластомера со скоростью 20 МПа/с приводит к повышению коэффициента трения в 3-4 раза. Это явление может быть использовано в адаптивных системах управления крутящим моментом колес для улучшения сцепных свойств на ледяной поверхности.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Морозов М.В. Мотор-колесо с асинхронным электродвигателем для магистрального автопоезда полной массой 40 тонн // Журнал ассоциации автомобильных инженеров. 2007. № 3. С. 24-26.
2. Влияние тепловых процессов на трибологические характеристики контакта шины с дорожной поверхностью и вид диаграммы $\phi(S)$ для различных режимов работы колеса // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 7. С. 42-51.
3. Купреянов А.А., Морозов М.В. Влияние частичного скольжения колес на динамические явления в трансмиссиях колесных машин // Тяжелое машиностроение. 2009. № 12. С. 28-31.
4. Купреянов А.А., Шеломков С.А., Морозов М.В. Разработка комплексной математической модели колесного движителя для прогнозирования эксплуатационных свойств проектируемых многоосных колесных машин // Трибология и надежность : Сб. тр. IX межд. конф./ Под ред. К.Н. Войнова. СПб., 2009г. С. 220-221.
5. Купреянов А.А., Морозов М.В. Повышение сцепных свойств автомобиля с электрической трансмиссией в тяжелых дорожных условиях // Трибология и надежность : Сб. тр. X межд. конф./ Под ред. К.Н. Войнова. СПб., 2010. С. 158-166.
6. Купреянов А.А., Морозов М.В. Разработка методов управления режимом работы колесного движителя, повышающих его тягово-сцепные свойства в составе колесной машины // Трибология и надежность : Сб. тр. XI межд. конф. / Под ред. К.Н. Войнова. СПб., 2011. С. 181-190.

7. Учет трибологических свойств эластомеров подсистемы «шина - опорная поверхность» - путь к улучшению тягово-сцепных свойств автомобильных шин / Б.Н. Белоусов [и др.] // Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике : Сб. тр./ Под ред. М.С. Высоцкого. Минск, 2011. С. 111-119.

2000 593

М Г Т
И.Н.Д.Б.
Белорусский