



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 629.113

Е.И. ТОРОПОВ

старший преподаватель кафедры «Автомобильный транспорт»¹
E-mail: evgeny.toropov@nntu.ru

А.С. ВАШУРИН, канд. техн. наук

доцент кафедры «Автомобили и тракторы»¹
E-mail: vashurin@nntu.ru

Д.А. БУТИН

старший преподаватель кафедры «Автомобили и тракторы»¹
E-mail: danila.butin@nntu.ru

Е.В. СТЕПАНОВ

старший преподаватель кафедры «Автомобили и тракторы»¹
E-mail: evgeniystepanov1991@nntu.ru.

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Поступила в редакцию 12.12.2022.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШИНЫ ДЛЯ ПОЛУНАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

В данной публикации представлен опыт специалистов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) в области исследования трения-качения автомобильного колеса по асфальтовому покрытию. Адекватное математическое воспроизведение силовых реакций, возникающих в пятне контакта, имеет значительную роль при моделировании динамики транспортного средства. Так как фундаментальное описание данного взаимодействия затруднительно, в инженерной практике популярность получил эмпирический метод, заключающийся в получении экспериментального массива данных с последующей его тригонометрической аппроксимацией и систематизацией. Специалистами НГТУ была разработана методика испытаний и проведены натурные тесты, используя специализированный дорожный шинный стенд-прицеп. Эксперимент проводился на сухом асфальтовом покрытии с коэффициентом сцепления порядка 0,4–0,8 при температуре окружающего воздуха 20 °С. Полученный массив экспериментальных данных был обработан и представлен в виде тригонометрической цифровой модели PAC 2002. Максимальное расхождение между теоретическими и экспериментальными данными по абсолютному значению не превысило 5 %.

Ключевые слова: шинный стенд, скольжение колеса, торможение, «магическая» формула, испытания, коэффициент сцепления, дорожное покрытие

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-39-46>

Введение. Изобретение первой пневматической шины датируется 1845 годом. За эти полтора столетия автомобильная шина претерпела значи-

тельные изменения: начиная от материалов, используемых при ее изготовлении, и заканчивая ее конструкцией [1]. Но несмотря на все тенденции и

технический прогресс остается неизменным понимание, что в системе «водитель — автомобиль — дорога» взаимодействие колеса с дорожным полотном играет одну из важнейших ролей. В связи с этим изучению данного вопроса еще с начала 50-х годов XX века уделялось значительное внимание как иностранных ученых, так и отечественных специалистов: Пасейка, Чудаков, Кнороз, Ракляр, Бромберг, Неймар, Фуфаев, Хачатуров [2–6].

Стоит отметить, что в современном автомобилестроении всплеск интереса к теории работы пневматической шины был вызван внедрением электронных систем, отвечающих за активную безопасность транспортного средства: антиблокировочная (АБС), противобуксовочная (ПБС), электронного контроля устойчивости (ЭКУ), алгоритм работы которых основан на оценке и прогнозировании кинематических параметров взаимодействия колеса с опорной поверхностью [2, 7–9].

Взаимосвязь между кинематическими параметрами колеса и реализацией толкающей или тормозной силами было изучено еще во второй половине XX века и графически представлена на рисунке 1 [4, 10–12]. Как видно, максимальная стабильная продольная и поперечная устойчивость обеспечиваются в небольшой области проскальзывания колеса (S_{cr}), на поддержании такого режима качения колеса и основана работа автомобильной антиблокировочной системы [9, 13].

Стоит отметить, что на рисунке 1 отображен принципиальный вид диаграммы $\varphi(S)$, качественный у разных шин будет отличаться. Это объяс-

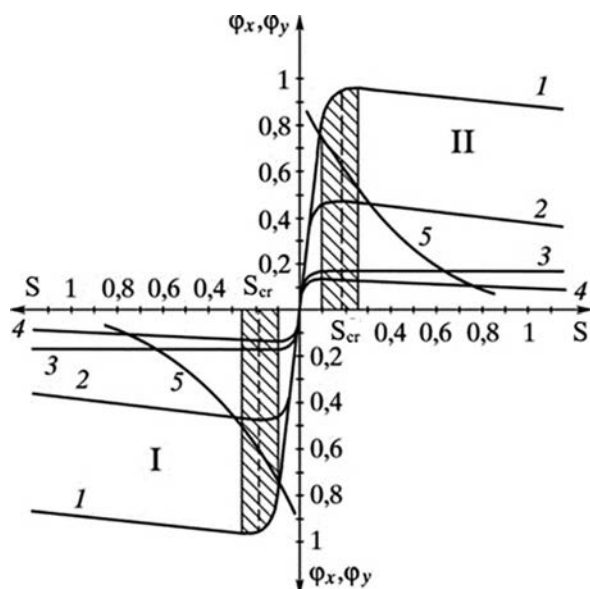


Рисунок 1 — Диаграммы зависимости коэффициента сцепления от скольжения колеса: I, II — тяговый и тормозный режимы соответственно; 1 — сухой асфальт; 2 — мокрый бетон; 3 — мокрая брусчатка; 4 — укатанный снег; 5 — поперечное направление для сухого асфальта [1]

Figure 1 — Diagrams of the dependence of the coefficient of adhesion on wheel slip: I, II — traction and braking modes, respectively; 1 — dry asphalt; 2 — wet concrete; 3 — wet paving stones; 4 — rolled snow; 5 — transverse direction for dry asphalt [1]

няется большим разнообразием на рынке производителей, используемых материалов, рисунков протектора.

При калибровочных работах систем АБС, ПБС, ЭКУ нет необходимости определения данных функциональных зависимостей. Адекватность работы системы настраивается на полигонных испытаниях, т. е. подбором опытным путем коэффициентов реагирования, но это не преуменьшает значимость подобных исследований. Тенденция современного автомобилестроения — это ускорение разработки автомобиля и его систем за счет использования технологии виртуального моделирования. Это может быть как оценка тягово-скоростных, тормозных, топливо-экономических свойств, управляемости и устойчивости, так и полунатурное (HIL) моделирование алгоритма работы электронных систем [9, 14]. Получение реальных данных о взаимодействии колеса с опорной поверхностью и их систематизация прямым образом скажется на результате моделирования, таким образом это одна из важнейших задач при подготовке к виртуальному испытанию цифрового двойника.

Методы исследования. За 70 лет изучения физики процесса трения-качения колеса по опорной поверхности было выделено два экспериментальных подхода: стендовый и дорожный.

Первый — это разработка и реализация платформенного шинного стенда (рисунок 2 а). Он обеспечивает качественное разделение и контроль влияющих факторов, что положительно сказывается на точности и стабильности получаемых результатов, но при этом в роли дорожного полотна обычно используется стальная лента или барабан, таким образом мы не можем обеспечить сходимость эксперимента с реальными условиями эксплуатации. Стационарные стенды обычно используются производителями автомобильных шин при проведении непосредственно научно-исследовательских, конструкторских и контрольных работ [5, 15–17]. В случае же когда перед инженерами стоит задача в стохастическом моделировании поведения сложного объекта в реальных условиях эксплуатации, прибегают к дорожным испытаниям с использованием стендов-тележек (см. рисунок 2 б). На выходе мы получаем данные о взаимодействии колеса с конкретной дорогой, на которой проводились испытания [18, 19].

Задача по получению сверифицированной модели шины решалась в рамках разработки, реализации, верификации и валидации стенда полунатурного моделирования динамики легкого коммерческого автомобиля, оборудованного системами АБС/ЭКУ. Учитывая все плюсы и минусы каждого из подходов, было решено остановиться на дорожных полигонных испытаниях, таким образом, при моделировании свойств активной безопасности планируется достичь максимальное

схождение с полигонными тестами электронных систем [20].

Дорожный шинный стенд. Разработке дорожных шинных стендов посвящено огромное количество исследований [1, 4, 18, 19].

В общем виде их можно разделить на два класса:

- на базе серийного автомобиля [18, 21–23];
- на базе прицепа [4, 19, 21].

Однозначным преимуществом первого способа является простота создания измерительной установки, т. е. на автомобиль устанавливается комплект измерительного оборудования (навигационная система, датчики скоростей колес и давлений в приводе тормозов). Проблемный момент — это определение изменения силовых параметров, действующих на колесо, что возможно только при помощи дорогостоящей тензоизмерительной ступицы или косвенным методом перерасчета распределения масс [20, 21], а также при проведении испытаний проблематично выдержать повторяемость измерений, что, в свою очередь, сказывается на конечном результате.

Второй метод более предпочтителен, но из-за значительного подготовительного этапа (разработка, проектирование, изготовление и отладка стенда-прицепа) является более трудоемким, од-

нако конечный результат исследования покрывает весь диапазон рабочих и эксплуатационных характеристик шины. Стоит отметить, что подобные шинные стенды разработки советских и российских ученых [1, 4, 7, 8] могли измерять только продольные характеристики автомобильного колеса, но с точки зрения управляемости и устойчивости нас интересует взаимосвязи между продольным скольжением и боковым коэффициентом сцепления. Таким образом в конструкции стенда необходимо реализовать измерение поперечных характеристик. С принципиальной схемой данных стендов можно ознакомиться в работах иностранных ученых [19, 21].

В отечественной науке отсутствует накопленный опыт по проведению подобных высокотехнологичных исследований, в связи с этим было решено ознакомиться с наработками иностранных коллег в этом вопросе. Стоит отметить, что большинство мировых центров по тестированию, сертификации и испытаниям автомобилей оснащены шинными трейлерами [24]: Dufournier (Франция), TASS International (Нидерланды), Maxtrax (Австралия), IDIADA (Испания), Thüringen (Германия).

Принципиальная схема дорожного стенда Defunier по испытаниям шин, используемая учеными НГТУ, представлена на рисунке 3. В техническом исполнении — это грузовой прицеп с модифицированной несущей рамой. Внесение изменений в конструкцию было вызвано необходимостью размещения установки для проведения динамических исследований качения шин внутри прицепа. Установка включает в себя следующие компоненты (см. рисунок 3): исследуемая шина (1); нижний и верхний рычаги (2 и 3 соответственно); электрогидравлические приводы угла увода (4) и вертикальной силы на колесе (5). Направляющий механизм установки позиционирует исследуемое колесо относительно прицепа. Нагружение и ориентация исследуемой шины производится с помощью гидроцилиндров и тормозных механизмов, управляемых автоматикой. Измерение силовых и кинематических параметров колеса производится при помощи тензометрической ступицы.

Проведение полигонных испытаний. В качестве объекта исследования была выбрана шина Cordiant 185/75R16 (в количестве трех штук), серийно устанавливаемая на легкий коммерческий автомобиль ГАЗель Next.

Исследование заключалось в измерении сил и моментов, передаваемых ступицей колеса при качении шины по дороге в определенных режимах, которые характеризуются такими параметрами как вертикальная сила, угол увода, поперечный угол увода и коэффициент продольного скольжения.

Кроме динамических характеристик были проведены статические исследования вертикальной жесткости шины и боковой силы. Целью этого



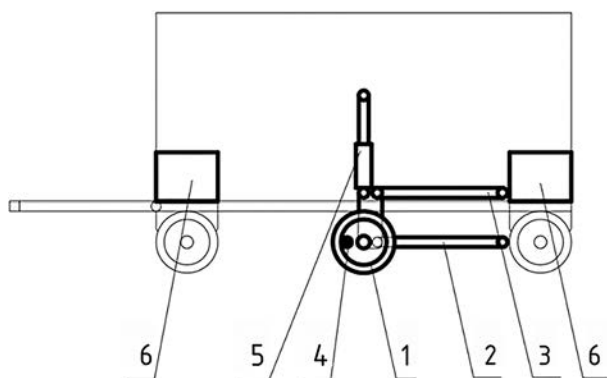
a



b

Рисунок 2 — Стенды для испытания шин: a — стационарный [17]; b — дорожный [19]; 1 — гидравлическая подвеска; 2 — ось; 3 — рама; 4 — поворотный актуатор; 5 — тестируемая шина с датчиком силы

Figure 2 — Tire test benches: a — stationary [17]; b — road [19]; 1 — hydraulic suspension; 2 — axle; 3 — frame; 4 — rotary actuator; 5 — tested tire with force sensor



а



б

Рисунок 3 — Схема дорожной лаборатории для исследования динамических характеристик шин: 1 — исследуемая шина; 2 — нижний рычаг; 3 — верхний рычаг; 4 — электрогидравлический привод угла увода; 5 — электрогидравлический привод вертикальной силы на колесе; 6 — балласт

Figure 3 — Scheme of the road laboratory for the study of the dynamic characteristics of tires: 1 — tire under study; 2 — lower lever; 3 — upper lever; 4 — electrohydraulic drive of the withdrawal angle; 5 — electrohydraulic drive of vertical force on the wheel; 6 — ballast

исследования было определение формы и длины переходных процессов между режимами качения.

Испытания проводились при температуре окружающего воздуха $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на сухом асфальтовом покрытии. Всего было осуществлено около 70 заездов со всеми тремя образцами шин. Основные проведенные испытания:

- качение с уводом;
- комбинированное качение с уводом и торможением;
- качение с уводом и различными поперечными углами наклона;
- комбинированное качение с уводом и торможением при различных углах поперечного наклона;
- определение продольной жесткости (заблокированную шину срагивают с места);

- определение пути нарастания силы (шину, установленную под углом увода с максимальным коэффициентом сцепления, тянут вперед, чтобы увидеть длину пути нарастания максимальной боковой силы);

- определение пути нарастания силы с различными поперечными углами наклона.

Перед тестированием проводился подготовительный этап — прогрев поверхности шины до эксплуатационного режима, который заключался в протаскивании по прямой около 1 км в режиме качения с уводом (-18° , $+18^{\circ}$). В результате шина прогревается с $+10$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стоит отметить, что во время всех исследований максимальная зафиксированная температура составляла около $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя температура — около $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Применялись следующие режимы нагружения:

- вертикальная нагрузка 4000, 6000, 8000 Н;
- углы увода -18° , $+18^{\circ}$;
- поперечные углы наклона -5° , 0° , $+5^{\circ}$;
- скорость проведения исследований от 70 до 80 км/ч.

С помощью измерительного оборудования производилась фиксация следующих данных: угол поперечного наклона колеса, угол увода, радиус качения, коэффициент продольного скольжения, продольная, поперечная, вертикальная силы, опрокидывающий, стабилизирующий моменты, продольная скорость, температуры поверхности протектора и покрытия, скорость вращения колеса.

Тензометрическая ступица использовалась для измерения силовых и кинематических характеристик, действующих на колесо, ГНСС-прибор Racelogic VBOX с комплектом бесконтактных температурных датчиков фиксировал линейные характеристики движения прицепа, температурные параметры рабочих поверхностей, а также выступал в роли динамической системы сбора данных.

В результате проведенных испытаний был получен массив экспериментальных данных, характеризующих взаимодействие колеса с опорной поверхностью.

Результаты. В процессе обработки измеренных данных было выявлено присутствие значений, выпадающих из общего характера течения физического процесса. В целях фильтрации в среде Visual Basic был разработан специальный алгоритм, основанный на «скользящем среднем», но с дополнительными условиями, обеспечивающими монотонность выходных данных по коэффициенту скольжения или углу увода.

В конечном итоге отфильтрованные данные были загружены в специальную утилиту Tire Tools программного обеспечения MSC Adams car, после чего был получен специализированный файл модели шины PAC2002, содержащий в себе полупирическое описание режимов работы шины во всех эксплуатационных режимах разгона/торможения.

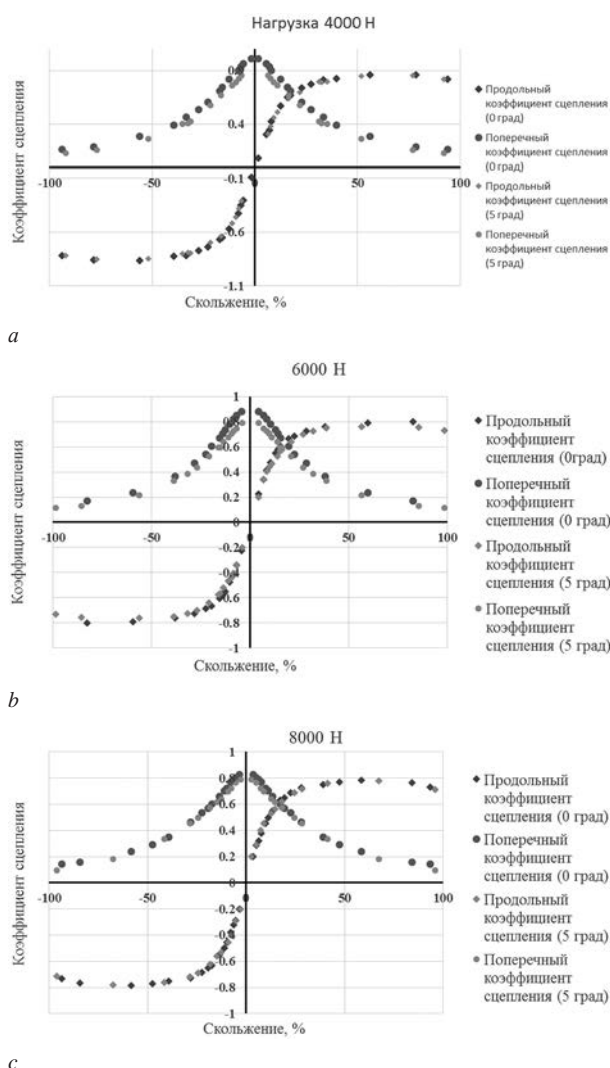


Рисунок 4 — Экспериментальные графики изменения коэффициентов сцепления от скольжения
 Figure 4 — Experimental graphs of the change in the coefficients of adhesion from sliding

На рисунке 4 показана некоторая часть графиков экспериментальных данных (при различных вертикальных нагрузках и углах увода колеса), представляющих наибольший интерес с точки зрения управляемости и устойчивости при торможении.

Таблица — Экспериментальные и аппроксимирующие Пасежка данные
 Table — Experimental and approximating Pasejka data

4000 Н				6000 Н				8000 Н			
A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
0,85	1,5	0,00006	1	0,8	1	0,0003	4	0,8	1	0,0002	6
S	φ_x (экс.)	φ_x (апр.)	Расх. %	S	φ_x (экс.)	φ_x (апр.)	Расх. %	S	φ_x (экс.)	φ_x (апр.)	Расх. %
-93,8	-0,82	-0,803	-2	-82,6	-0,8	-0,787	-1,59	-84,3	-0,766	-0,788	2,926
-56	-0,86	-0,848	-1,59	-38,1	-0,76	-0,746	-1,71	-58,45	-0,78	-0,775	-1,01
-22,9	-0,735	-0,716	-2,68	-10,4	-0,477	-0,461	-3,4	-19,36	-0,651	-0,636	-2,231
27,3	0,77	0,769	-0,34	14	0,579	0,552	-4,745	17,29	0,63	0,608	-3,494
39,6	0,825	0,838	1,62	28,3	0,727	0,71	-2,364	39,14	0,752	0,748	-0,411
78,4	0,86	0,823	-4,34	59,5	0,793	0,776	-2,124	47,42	0,771	0,764	-0,91

Косвенным подтверждением правильности полученных данных является физический смысл работы антиблокировочной системы автомобиля, который гласит, что управляемость и устойчивость автомобильной шины обеспечивается при продольном скольжении колеса 10–40 % [7, 8]. Как видно из графиков, при уходе продольного скольжения в зону больше 50 %, физика качения колеса принимает «неустойчивый» характер, таким образом повышается вероятность бокового заноса.

Согласно работам голландского ученого Пасейки зависимость коэффициента сцепления от скольжения можно описать следующим тригонометрическим полиномом, называемым «магическая» формула [2, 6]:

$$Y = D \cdot \sin \{ C \cdot \arctan [B \cdot x - E \cdot (B \cdot x - \arctan Bx)] \},$$

где Y может быть продольным и поперечным коэффициентом сцепления соответственно; D , C , B , E — некоторые константы, получаемые экспериментальным путем; x — параметр скольжения в зависимости от различных условий.

Представим некоторую часть результатов обработки данных в продольном направлении (таблица) при угле увода 0° и ее оценку в расхождении с экспериментальными. Как видно по данным таблицы, теоретическая аппроксимирующая функция обеспечивает сходимость с результатом эксперимента в пределах 5 %.

Графики полученных аппроксимирующих функций представлены на рисунке 5.

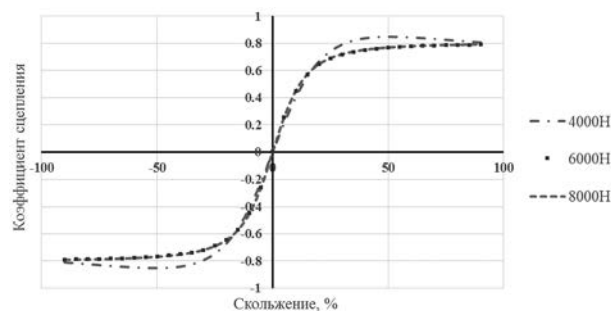


Рисунок 5 — Графики аппроксимирующей функций Пасежка $\varphi_x(S)$
 Figure 5 — Graphs of approximating Pasejka functions $\varphi_x(S)$

Полученные функциональные зависимости используются при моделировании динамики движения транспортного средства. Грамотно собранный аппроксимированный файл-модель шины положительно скажется на сходимости эксперимента динамики движения с моделированием [25].

Заключение. Представленные выше результаты были получены при тестировании шины на асфальтовом покрытии с высоким коэффициентом сцепления (0,6–0,8), что является необходимым условием при проведении исследовательских и сертификационных работ по оценке управляемости и устойчивости транспортного средства, а также работы системы электронного контроля устойчивости и других «электронных помощников». Таким образом в случае проведения научных изысканий в сфере антиблокировочных систем, а также оценке противозаносных свойств на дорогах с низким коэффициентом сцепления, необходимо провести подобные исследования на различных типах поверхностей (лед, мокрый асфальт, укатанный снег, базальтовое покрытие).

Первые публикации Пасейки, которые содержали описание представленной формулы, были опубликованы в 1987 и 1989 годах, и она быстро набрала популярность для расчета установившихся сил и моментов, возникающих при различных условиях скольжения. Типичная область применения — исследования управления транспортными средствами. Данная модель понятна и очень проста в реализации. Но при всех плюсах присутствуют и отрицательные моменты — при моделировании она неоднозначно определена на низких скоростях, что ограничивает круг численных расчетов. Это объясняется отсутствием производной в нуле, что приводит к возникновению «зон застоя» и потере единственных решений. В связи с этим исследователи продолжают искать иные математические аппараты. Перспективным направлением являются «щеточные» модели шин.

Цель данной работы — провести экспериментальные исследования взаимодействия колеса с опорной поверхностью, по результатам которых определить тригонометрические коэффициенты, используемые в файле PAC2002, что и было в итоге успешно выполнено. Значения силовых характеристик, получаемых при помощи аппроксимирующих функций Пасейки, обеспечивают расхождение с натурным экспериментом не более чем на 5 %, что является приемлемым в инженерной практике.

Стоит отметить, что данное исследование выполнялось в рамках более крупного — полунатурного (hardware-in-the-loop) моделирования динамики легкого коммерческого автомобиля, оборудованного системами активной безопасности. Так как подобные виртуальные исследования заключаются в проведении высокоскоростных маневров на сухом асфальтовом покрытии, то при

моделировании встает острый вопрос в адекватности воспроизводства силовых реакций между колесом и дорогой. Полученный файл PAC2002 с параметрами был интегрирован в модель криволинейного движения транспортного средства, благодаря чему была успешно повышена сходимость общего моделирования динамики. Более подробно о данной научной работе можно ознакомиться в других публикациях авторов [20, 26].

Список литературы

1. Кнороз, В.И. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз. — М.: Транспорт, 1976. — 238 с.
2. Pacejka, H. Tyre and vehicle dynamics / H. Pacejka. — 2nd ed. — Amsterdam: Elsevier, 2005. — 642 p.
3. Жилейкин, М.М. Математическая модель качения эластичного колеса по неровностям недеформируемого опорного основания / М.М. Жилейкин, Б.В. Падалкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2016. — № 3. — С. 24–29. — DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-3-24-29>.
4. Ракляр, А.М. Исследование диаграмм дорог автополигона: дис. ... канд. техн. наук / А.М. Ракляр. — М., 1978. — 254 с.
5. Ковригин, В.А. Повышение безопасности автомобилей в условиях эксплуатации на основе анализа характеристик сцепления их шин со льдом: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Ковригин. — Омск, 2014. — 203 с.
6. Pacejka, H.B. Tyre and vehicle dynamics / H.B. Pacejka. — 3rd ed. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. — 672 с.
7. Определение сцепных характеристик шипованных шин с уводом / А.М. Иванов [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. — 2017. — № 6. — С. 14–20.
8. Сцепные характеристики шипованных шин с уводом / А.М. Иванов [и др.] // Автомобильная промышленность. — 2018. — № 10. — С. 34–39.
9. A new linear tire model with varying parameters / M. Kissai [et al.] // 2017 2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), Sep. 2017. — Pp. 108–115. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITE.2017.8056891>.
10. Немчинов, М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобиля / М.В. Немчинов. — М.: Транспорт, 1985. — 231 с.
11. Mitschke A. Aufbau und Wirkung des Antiblockiersystems ABS für Nutzfahrzeuge / A. Mitschke // Automobiltechnische Zeitschrift. — 1981. — Vol. 83, iss. 9. — Pp. 439–446.
12. Petersen, E. Anti-Lock Braking System (ABS) with Integrated Drive Slip Control (ASR) for Commercial Vehicles / E. Petersen, E. Reinecke, P. Liermann // SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition. — 1986. — DOI: <https://doi.org/10.4271/861961>.
13. On-board road friction estimation technique for autonomous driving vehicle following maneuvers / S. Santini [et al.] // Appl. Sci. — 2021. — Vol. 11, iss. 5. — DOI: <https://doi.org/10.3390/app11052197>.
14. Ružinskas, A. Magic formula tyre model application for a tyre-ice interaction / A. Ružinskas, H. Sivilevičius // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 187. — Pp. 335–341. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.383>.
15. Шинный тестер для исследования характеристик эластичных шин при движении колеса с уводом / А.И. Федотов // Вестник ИргТУ. — 2016. — № 2(109). — С. 123–127.
16. Influence of tire tread pattern wear on characteristics of its longitudinal adhesion with bearing surface / A.I. Fedotov [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 632. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012026>.
17. The experimental measurement of the tyre casing defects for the freight vehicles at the dynamic loading / J. Vavro [et al.] // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 157. — DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815705022>.
18. Принцип создания шинного тестера на базе серийного легкового автомобиля / С.Р. Кристальный [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. — 2013. — № 5(82). — С. 38–45.
19. Harsh, D. Tire model with temperature effects for formula SAE vehicle / D. Harsh, B. Shyrokau // Appl. Sci. — 2019. — Vol. 9, iss. 24. — DOI: <https://doi.org/10.3390/app9245328>.

20. The application of hardware-in-the-loop (HIL) simulation for evaluation of active safety of vehicles equipped with electronic stability control (ESC) systems / A.V. Tumasov [et al.] // *Procedia computer science*. — 2019. — Vol. 150. — Pp. 309–315. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.057>.
21. Evaluation of vehicle-based tyre testing methods / A. Albinsson [et al.] // *Proc IMechE Part D: J Automobile Engineering*. — 2019. — Vol. 233, iss. 1. — Pp. 4–17. — DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018760953>.
22. Легковой автомобиль — шинный тестер / С.Р. Кристалльный [и др.] // *Автомобильная промышленность*. — 2014. — № 1. — С. 34–36.
23. Experimental study of winter tyre usage according to tread depth and temperature in vehicle braking performance / V. Zuraulis [et al.] // *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng*. — 2020. — Vol. 44, iss. 1. — Pp. 83–91. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0243-0>.
24. Measuring friction of patterned and textured pavements: a comparative study / C. Holzschuher [et al.] // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. — 2010. — Vol. 2155, iss. 1. — Pp. 91–98. — DOI: <https://doi.org/10.3141/2155-10>.
25. Zhang, K. An Algorithm for Parameter Identification of Semi-Empirical Tire Model / K. Zhang, Y. Zhang, P. Xu // *SAE Int. J. Veh. Dyn., Stab., and NVH*. — 2021. — Vol. 5, iss. 3. — Pp. 379–396. — DOI: <https://doi.org/10.4271/10-05-03-0026>.
26. Верификация методики виртуально-физических исследований динамики криволинейного движения автомобилей по результатам дорожных испытаний / Е.И. Торопов [и др.] // *Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. — 2019. — № 2(125). — С. 210–216.

TOROPOV Evgenii I.

Senior Lecturer of the Department “Automotive Transport”¹
E-mail: evgeny.toropov@nntu.ru

VASHURIN Andrei S., Ph. D. in Eng.

Associate Professor of the Department “Automobiles and Tractors”¹
E-mail: vashurin@nntu.ru

BUTIN Danila A.

Senior Lecturer of the Department “Automobiles and Tractors”¹
E-mail: danila.butin@nntu.ru

STEPANOV Evgenii V.

Senior Lecturer of the Department “Automobiles and Tractors”¹
E-mail: evgeniystepanov1991@nntu.ru

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Received 12 December 2022.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF DYNAMIC PARAMETERS OF A TIRE FOR HIL-TESTING OF VEHICLE ACTIVE SAFETY SYSTEMS

This publication presents the specialists' experience of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU) in the field of studying the friction-rolling of an automobile wheel on an asphalt surface. Adequate mathematical reproduction of force reactions that occur in the contact patch plays a significant role in modeling vehicle dynamics. Since the fundamental description of this interaction is difficult, in engineering practice the empirical method has become popular, which consists in obtaining an experimental data array with its subsequent trigonometric approximation and systematization. NNSTU specialists have developed a test methodology and carried out full-scale tests using a specialized road tire trailer bench. The experiment was carried out on a dry asphalt pavement with a coefficient of adhesion of about 0.4–0.8 at an ambient temperature of 20 °C. The resulting array of experimental data is processed and presented in the form of a trigonometric digital model PAC 2002. The maximum discrepancy between theoretical and experimental data in absolute value doesn't exceed 5 %.

Keywords: *tire test bench, wheel slip, braking, magic formula, tests, friction coefficient, road surface*

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-1-62-39-46>

References

1. Knoroz V.I. *Rabota avtomobilnoy shiny* [The work of a car tire]. Moscow, Transport Publ., 1976. 238 p. (in Russ.).
2. Pacejka H. *Tyre and vehicle dynamics*. Amsterdam, Elsevier, 2005. 642 p.
3. Zhileykin M.M., Padalkin B.V. *Matematicheskaya model kacheniya elastichnogo koleasa po nerovnostyam nedeformiruemogo opornogo osnovaniya* [A mathematical model of rolling an elastic wheel on a rough rigid support base]. *BMSTU jour-*

- nal of mechanical engineering*, 2016, no. 3, pp. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-3-24-29> (in Russ.).
4. Raklyar A.M. *Issledovanie diagramm dorog avtopoligona*. Diss. kand. tekhn. nauk [Investigation of road diagrams of the motor-car proving ground. Ph. D. Thesis]. Moscow, 1978. 254 p. (in Russ.).
 5. Kovrigin V.A. *Povyshenie bezopasnosti avtomobiley v usloviyakh ekspluatatsii na osnove analiza kharakteristik stsepleniya ikh shin so ldom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the safety of cars under operating conditions based on the analysis of the adhesion characteristics of their tires with ice. Ph. D. Thesis]. Omsk, 2014. 203 p. (in Russ.).
 6. Pacejka H.B. *Tyre and vehicle dynamics*. Oxford, Butterworth Heinemann, 2006. 672 p.
 7. Ivanov A.M., Kristalnyi S.R., Popov N.V., Fomichev V.A. Opre-delenie stsepykh kharakteristik shipovannykh shin s uvodom [Determination of the friction characteristics of studded tires with withdrawal]. *Zurnal AAI*, 2017, no. 6, pp. 14–20 (in Russ.).
 8. Ivanov A.M., Borisevich V.B., Kristalnyi S.R., Popov N.V., Fomichev V.A. Stsepye kharakteristiki shipovannykh shin s uvodom [The friction characteristics for studded tires with the lateral skid]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2018, no. 10, pp. 34–39 (in Russ.).
 9. Kissai M., Monsuez B., Tapus A., Martinez D. A new linear tire model with varying parameters. *2017 2nd IEEE International conference on intelligent transportation engineering (ICITE)*. Singapore, 2017, pp. 108–115. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITE.2017.8056891>.
 10. Nemchinov M.V. *Stsepye kachestva dorozhnykh pokrytiy i bezopasnost dvizheniya avtomobilya* [Coupling qualities of road coatings and vehicle traffic safety]. Moscow, Transport Publ., 1985. 231 p. (in Russ.).
 11. Mitschke A. Aufbau und Wirkung des Antiblockiersystems ABS für Nutzfahrzeuge. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 1981, vol. 83, iss. 9, pp. 439–446.
 12. Petersen E., Reinecke E., Liermann P. *Anti-lock braking system (ABS) with integrated drive slip control (ASR) for commercial vehicles*. SAE Technical Paper, no. 861961, 1986. DOI: <https://doi.org/10.4271/861961>.
 13. Santini S., Albarella N., Arricale V.M., Brancati R., Sakhnevych A. On-board road friction estimation technique for autonomous driving vehicle following maneuvers. *Applied sciences*, 2021, vol. 11, iss. 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11052197>.
 14. Ružinskas A., Sivilevičius H. Magic formula tyre model application for a tyre-ice interaction. *Procedia engineering*, 2017, vol. 187, pp. 335–341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.383>.
 15. Fedotov A.I., Kuznetsov N.Yu., Lysenko A.V., Tikhov-Tin-nikov D.A. Shinny tester dlya issledovaniya kharakteristik elastichnykh shin pri dvizhenii koleasa s uvodom [Tire tester to study elastic tire characteristics when a wheel rolls with a skid]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2016, no. 2, pp. 123–127 (in Russ.).
 16. Fedotov A.I., Markov A.S., Makhno D.E., Vikulov M.A. Influence of tire tread pattern wear on characteristics of its longitudinal adhesion with bearing surface. *IOP conference series: Materials science and engineering*, 2019, vol. 632. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012026>.
 17. Vavro J., Vavro J. Jr., Kováčiková P., Hřeš J. The experimental measurement of the tyre casing defects for the freight vehicles at the dynamic loading. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 157. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815705022>.
 18. Kristalnyi S.R., Popov N.V., Fomichev V.A., Zadvornov V.N. Printsip sozdaniya shinnogo testera na baze seriynogo legkovogo avtomobilya [The principle of creating a tire tester based on a serial passenger car]. *Zurnal AAI*, 2013, no. 5(82), pp. 38–45 (in Russ.).
 19. Harsh D., Shyrokau B. Tire model with temperature effects for formula SAE vehicle. *Applied sciences*, 2019, vol. 9, iss. 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9245328>.
 20. Tumasov A.V., et al. The application of hardware-in-the-loop (HIL) simulation for evaluation of active safety of vehicles equipped with electronic stability control (ESC) systems. *Procedia computer science*, 2019, vol. 150, pp. 309–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.057>.
 21. Albinsson A., Bruzelius F., Jacobson B., Bakker E. Evaluation of vehicle-based tire testing methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: journal of automobile engineering*, 2019, vol. 233, iss. 1, pp. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018760953>.
 22. Kristalnyi S.R., Zadvornov V.N., Popov N.V., Fomichev V.A. Legkovoy avtomobil — shinny tester [Passenger car — tire tester]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2014, no. 1, pp. 34–36 (in Russ.).
 23. Žuraulis V., Garbinčius G., Skačkauskas P., Prentkovskis O. Experimental study of winter tyre usage according to tread depth and temperature in vehicle braking performance. *Iranian journal of science and technology, transactions of mechanical engineering*, 2020, vol. 44, iss. 1, pp. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0243-0>.
 24. Holzschuher C., Choubane B., Lee H.S., Jackson N.M. Measuring friction of patterned and textured pavements: a comparative study. *Transportation research record: Journal of the transportation research board*, 2010, vol. 1255, iss. 1, pp. 91–98. DOI: <https://doi.org/10.3141/2155-10>.
 25. Zhang K., Zhang Y., Xu P. An algorithm for parameter identification of semi-empirical tire model. *SAE international journal of vehicle dynamics, stability, and NVH*, 2021, vol. 5, iss. 3, pp. 379–396. DOI: <https://doi.org/10.4271/10-05-03-0026>.
 26. Toropov E.I., Vashurin A.S., Tumasov A.V., Vasiliev A.A. Verifikatsiya metodiki virtualno-fizicheskikh issledovaniy dinamiki krivolineynogo dvizheniya avtomobiley po rezultatam dorozhnykh ispytaniy [Verification of the virtual physical testing methodology of the vehicles dynamics by results of road tests]. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2019, no. 2(125), pp. 210–216 (in Russ.).