

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-60-74

УДК 629.331



Научная статья | Эксплуатация автомобильного транспорта

ВЛИЯНИЯ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПОДВЕСКИ НА БОКОВУЮ РЕАКЦИЮ ШИНЫ

Д.А. Тихов-Тинников

В статье рассматривается влияние демпфирующих свойств подвески автомобиля на процесс формирования боковой реакции в пятне контакта шины и опорной поверхности. В исследовании использовались: математическая модель четверти автомобиля, модель шины типа «натянутая струна» и генератор микропрофиля дорожного покрытия. Получены зависимости нормальных и боковых реакций от пройденного пути для трех классов дорог при изменении параметра, характеризующего демпфирующие свойства подвески автомобиля. Для анализа зависимостей использовались методы математической статистики. Установлено, что среднее значение нормальной нагрузки мало изменяется при снижении демпфирующих свойств подвески, а стандартное отклонение увеличивается. Среднее значение боковой силы снижается на 22 %, при этом стандартное отклонение увеличивается в 1,6 раза. Использование критерия Колмогорова-Смирнова для анализа реализации боковых усилий позволяет определить допустимый диапазон номинальных значений параметров технического состояния амортизаторов подвески транспортных средств.

Цель – получение и анализ закономерностей, описывающих изменения боковой реакции автомобильной шины при ее движении под действием боковой силы и возмущенном состоянии подвески, а также при изменении демпфирующих свойств амортизатора.

Метод или методология проведения работы. В статье использовались методы математического моделирования и статистические методы анализа.

Результаты. Получены зависимости, характеризующие влияние демпфирующих свойств подвески на величину боковой реакции, при движении колеса по дороге с неровностями и под действием боковой силы.

Область применения результатов. Полученные результаты целесообразно применять организациями и учреждениями, занимающимися разработкой методов и средств диагностирования автомобилей.

Ключевые слова: автотранспортные средства; амортизатор; подвеска; микропрофиль, математическая модель

Для цитирования. Тихов-Тинников Д.А. Влияния демпфирующих свойств подвески на боковую реакцию шины // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 2. С. 60-74. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-60-74

Original article | Operation of Road Transport

INFLUENCE OF SHOCK ABSORBER PROPERTIES ON TIRE LATERAL FORCE

D.A. Tikhov-Tinnikov

The article examines how the damping properties of the suspension system of a vehicle affect the process of forming a lateral reaction in the contact patch of a tire and the supporting surface. A mathematical model of a car quarter, a tire stretched string model, and a road surface microprofile generator were used in the study. The dependences of normal and lateral reactions along the distance traveled for three classes of roads were obtained with a change in the parameter characterizing the damping properties of the vehicle suspension. Mathematical statis-

tics methods were used to analyze the dependences. It was found that the average value of the normal load changes little with a decrease in the damping properties of the suspension, while the standard deviation increases. The average value of the lateral force is reduced by 22%, with the standard deviation increasing by 1.6 times. The use of the Kolmogorov-Smirnov criterion for the analysis of implementations of lateral forces makes it possible to determine the permissible range of nominal values of the parameters of the technical condition of vehicle suspension shock absorbers.

Purpose. *Obtaining and analyzing patterns that describe the change in the lateral reaction of a car tire when it moves under the action of a lateral force and suspension vibrations, as well as when changing the damping properties of a shock absorber.*

Methodology. *In the article were used the methods of mathematical modeling and also statistical methods of the analysis.*

Results. *Dependences have been obtained that characterize the influence of the damping properties of the suspension on the magnitude of the lateral reaction when the wheel moves along a road with bumps and under the action of a lateral force.*

Practical implications. *It is expedient to apply the received results by the organizations and institutions involved in the development of methods and means of diagnosing vehicles.*

Keywords: *vehicles; shock absorber; suspension; microprofile, mathematical model*

For citation. *Tikhov-Tinnikov D.A. Influence of Shock Absorber Properties on Tire Lateral Force. International Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 60-74. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-60-74*

Введение

В условиях эксплуатации автотранспортные средства осуществляют движение по дорогам с неровной поверхностью. Неровности вызывают колебания подрессоренной и неподрес-

соренных частей автомобиля, что приводит к изменениям нормальных реакций в пятнах контакта эластичной шины с опорной поверхностью. При этом характер изменения будет зависеть как от характера микропрофиля опорной поверхности, так и от технического состояния подвески, в частности от состояния амортизаторов. В свою очередь боковые реакции, формируемые шиной, в значительной степени зависят от величины и скорости изменения нормальной нагрузки.

Процессы протекания нормальных реакций при движении автотранспортного средства по дороге с неровностями хорошо изучены как отечественными [7, 9, 6], так и зарубежными [11, 12, 13] учеными. В результате имеется большое количество математических моделей различной сложности, позволяющих решать задачи плавности хода автомобилей.

Для описания боковых реакций, возникающих в пятне контакта шины с дорогой, также имеется достаточное количество математических моделей [1, 5, 10]. Все они прямо или косвенно представляют функционалы боковой реакции, одним из аргументов которых является величина нормальной нагрузки на колесо. При этом большинство моделей имеют ограничение скорости изменения нормальной нагрузки и не представляют интереса для данного исследования. Существующие подходы [2, 4, 8, 14, 15, 16], описывающие формирование боковых реакций при динамическом изменении нагрузки, используются для описания свойств устойчивости движения и управляемости автомобилей, при этом вопросы влияния демпфирующих свойств системы поддресорирования на данные свойства остаются мало изученными.

Цель работы

Получение и анализ закономерностей, описывающих изменения боковой реакции автомобильной шины при ее движении под действием боковой силы и возмущенном состоянии подвески, а также при изменении демпфирующих свойств амортизатора, яв-

ляется целью настоящего исследования, для достижения которой необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель процесса функционирования системы «Микропрофиль дороги – Шина – Неподрессоренная масса – Подвеска – Поддрессоренная масса» на основе признанных математических описаний составляющих элементов рассматриваемой системы.

2. Получить при помощи разработанной математической модели зависимости боковых реакций при изменении демпфирующих свойств подвески, углов увода, а также параметров микропрофиля в диапазонах, характерных для условий эксплуатации автотранспортных средств.

3. Выполнить с использованием методов математической статистики обработку полученных зависимостей для установления закономерностей изменения боковых реакций от демпфирующих свойств подвески при характерных для условий эксплуатации параметров микропрофиля дороги и углов увода шины.

Методы и материалы

Математическая модель исследуемой системы состоит из трех составляющих: первая описывает взаимодействие поддрессоренной и неподрессоренной частей через упругие и демпфирующие связи; вторая включает в себя математическое описание микропрофиля дороги; третья характеризует работу эластичной шины в боковом направлении при изменении воздействующий на нее нормальной нагрузки. Входными параметрами модели являются: скорость качения центра колеса V ; уровень неровностей микропрофиля S_0 ; коэффициент, характеризующий изменение демпфирующих свойств подвески k_d ; угол увода δ . Результатами расчета являются зависимости изменения нормальной и боковой реакции в пятне контакта в зависимости от пути или времени.

Для описания взаимодействия поддрессоренной и неподрессоренной частей рассматриваемой системы, используется классическая двухмассовая модель четверти автомобиля:

$$\begin{cases} m_b(\ddot{z}_{mb} + g) = c_s(z_{mt} - z_{mb}) + k_s(\dot{z}_{mt} - \dot{z}_{mb}) \\ m_t(\ddot{z}_{mt} + g) = c_t(q(t) - z_{mt}) + k_t(\dot{q}(t) - \dot{z}_{mt}) - \\ - c_s(z_{mt} - z_{mb}) - k_s(\dot{z}_{mt} - \dot{z}_{mb}) \end{cases} \quad (1)$$

где: m_b и m_t – массы подрессоренной и неподрессоренной частей; g – ускорение свободного падения; c_s и c_t – жесткость подвески и шины; k_s и k_t – коэффициенты демпфирования подвески и шины; z_{mb} , \dot{z}_{mb} и \ddot{z}_{mb} – вертикальная координата, скорость и ускорение подрессоренной части; z_{mt} , \dot{z}_{mt} и \ddot{z}_{mt} – вертикальная координата, скорость и ускорение неподрессоренной части; $q(t)$ и $\dot{q}(t)$ – вертикальная координата опорной поверхности и скорость ее изменения по времени.

Параметры двухмассовой системы определяются соотношениями согласно рекомендациям [3]. Основным аргументом, в данном случае, является масса подрессоренной части автомобиля, которой задаемся. Остальные параметры модели, такие как масса неподрессоренной части, жесткости подвески и шины, а также коэффициенты демпфирования определяются через их отношение к подрессоренной массе. Значения указанных отношений: $m_t/m_b = 0,15$; $c_t/m_b = 653 \text{ с}^{-2}$; $c_s/m_b = 63,3 \text{ с}^{-2}$; $k_s/m_b = 6 \text{ с}^{-1}$; $k_t = 0$.

Значение коэффициента демпфирования k_s подвески изменялось от 10 до 120 процентов от номинала, что учитывалось введенным коэффициентом изменения демпфирующих свойств подвески k_d с соответствующим диапазоном от 0,1 до 1,2.

Микропрофиль опорной поверхности определяет характер протекания возмущающих воздействий. Для расчета ординат микропрофиля используется генератор неровностей (2) – (4), основанный на разложении функции по алгоритму Райса-Пирсона.

$$z(s_k) = \sum_{i=0}^N (2S(n_i)2\pi\Delta n)^{0,5} \cos(2\pi n_i s_k + \varphi_i) \quad (2)$$

в зависимости (2): $s_k = k\Delta s$; $n_i = n_{min} + i\Delta n$; Δs – шаг неровностей, м; N – число гармоник; $S(n_i)$ – спектральная плотность неровностей пути, м³/цикл; Δn – шаг по частоте, цикл/м; n_{min} – минимальная

частота; φ_i – случайная фаза, распределенная равномерно в интервале.

Аргументом функции является спектральная плотность (3) микропрофиля, определяемая по методике стандарта ISO 8608 в зависимости от класса дороги:

$$S(n) = \begin{cases} S_0(n/n_0)^{w_1} \rightarrow n \geq n_0 \\ S_0(n/n_0)^{w_2} \rightarrow n < n_0 \end{cases} \quad (3)$$

где: n – частота спектра случайной функции микропрофиля, Гц; S_0 – уровень неровностей в зависимости от класса дороги, м³/цикл; $n_0=1/2\pi$, $w_1=-2$, $w_2=-1,5$ – параметры, определяющие зависимость спектральной плотности неровностей от частоты n .

Методика позволяет моделировать дороги в широком эксплуатационном диапазоне. Класс дороги определяется значением уровня неровностей S_0 : класс А (очень хорошая дорога) ≤ 8 м³/цикл; класс В (хорошая) – $8 \div 32$ м³/цикл; класс С (средняя) – $32 \div 128$ м³/цикл; класс D (плохая) – $128 \div 256$ м³/цикл; класс Е (очень плохая) ≥ 256 м³/цикл.

Расчет боковой реакции шины при переменной нормальной нагрузке выполняем с использованием классической струнной модели шины предложенной Темпле и Фон Шлиппе (Temple and von Schlippe), и впоследствии доработанной Х. Б. Пасейка (Hans В. Pасейка).

Основу модели составляет дифференциальное уравнение (4), связывающее отклонения струны v на передней кромке пятна контакта с ее производной по пути s , углом увода δ и длиной пересечения L_{oy}^* , которая учитывает работу протектора в боковом направлении:

$$\frac{dv}{ds} = \delta - \frac{v}{L_{oy}^*} \quad (4)$$

Численно интегрируя дифференциальное уравнение (4) находим боковое отклонения струны v на передней кромке пятна контакта. Далее определяем эквивалентный угол увода:

$$\delta' = \frac{v}{L_{oy}^*} \quad (5)$$

Определение величины боковой реакции R_y шины при переменной нормальной нагрузке F_z выполняется с использованием функций боковых реакции $R_{y,ss}$ (6), полученных экспериментально при дискретном изменении угла увода δ_{ss} и нормальной нагрузки $F_{z,ss}$:

$$R_{y,ss} = f(\delta_{ss}, F_{z,ss}) \quad (6)$$

Заменяя в зависимости (6) угол увода δ_{ss} на эквивалентный угол увода δ' и постоянную нагрузку $F_{z,ss}$ на динамическую F_z определяем величину боковой реакции R_y шины при динамическом изменении нормальной нагрузки F_z .

Длину пересечения L_{oy}^* определяем по формуле:

$$L_{oy}^* = \frac{L_{oy}(F_z)}{C_{f\delta}(F_z)} \frac{R_y}{\delta'} \quad (7)$$

где: $L_{oy}(F_z)$ – функция изменения длины релаксации; $C_{f\delta}(F_z)$ – жесткость боковой силы по углу увода. Обе функции имеют аргумент в виде нормальной нагрузки F_z на колесо и определяются экспериментально.

Результаты

Используя разработанную математическую модель получены зависимости нормальных R_z и боковых R_y реакций по пройденному пути для дорог классов А, В и С при изменении коэффициента k_d с шагом 0,1. В качестве примера на рис 1 показаны реализации реакций при функционировании модели на дороге класса С, скорости движения 30 км/ч, угле увода 6 градусов, при номинальном значении демпфирующих свойств подвески ($k_d=1$).

Для полученных реализаций были рассчитаны точечные оценки, характеризующие вариацию рассматриваемого процесса, а именно средние значения реакций и стандартные отклонения (Рис. 2) нормальной реакции .

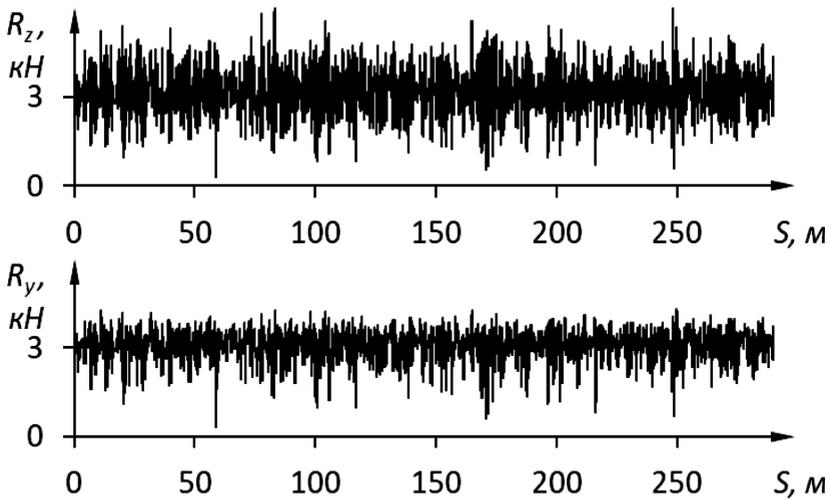


Рис. 1. Реализации нормальной R_z и боковой R_y реакций

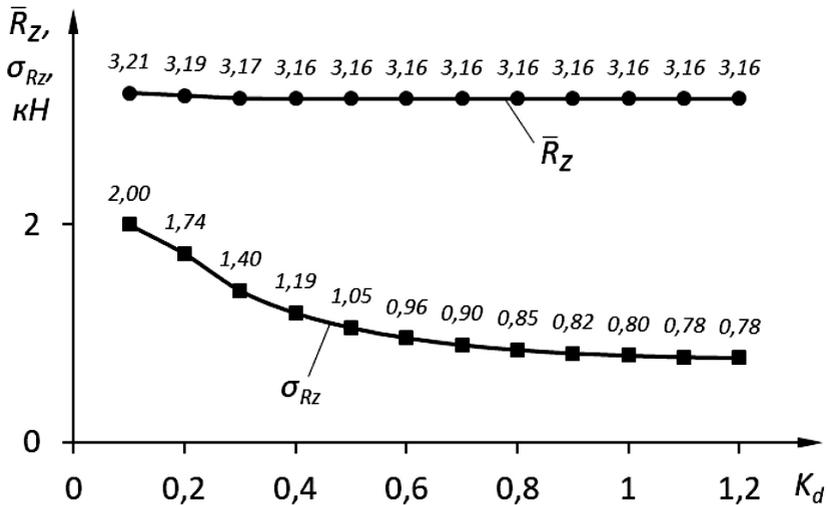


Рис. 2. Среднее значение и стандартное отклонение реакции R_z от демпфирующих свойств k_d

Аналогичные зависимости были получены и для реализации боковой реакции R_y (рис. 4).

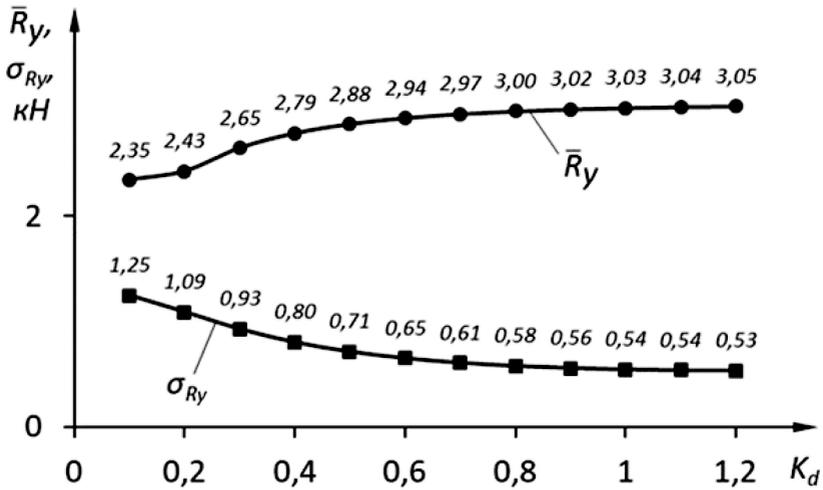


Рис. 3. Среднее значение и стандартное отклонение реакции R_y от демпфирующих свойств k_d

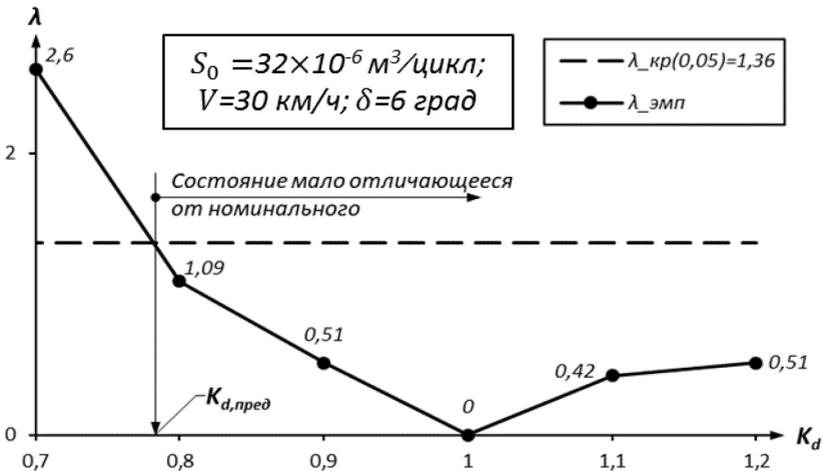


Рис. 4. Критерий Колмогорова-Смирнова λ от изменения демпфирующих свойств k_d

Также реализации боковых реакций R_y были подвергнуты статистической обработке, получены частоты попадания значений

в заданные интервалы. Каждый частотный ряд сравнивался по критерию λ Колмогорова-Смирнова с рядом, полученным при коэффициенте $k_d=1,0$. Результатом этапа являются зависимости критерия λ от коэффициента k_d , характеризующие степень отличия реализаций боковых реакций от реализации, полученной при номинальном значении демпфирующих свойств подвески (рис. 4).

Обсуждение и заключение

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, показывает, что среднее значение \bar{R}_z нормальной реакции мало меняется при изменении демпфирующих свойств подвески. Стандартное отклонение σ_z увеличивается при снижении демпфирующих свойств подвески увеличивается в 2,5 раза.

Среднее значение боковой реакции \bar{R}_y (рис. 3) снижается с 3,03 кН до 2,35 кН (22%), что естественно сказывается на способности подрессоренного колеса двигаться под заданной траектории при действии на него боковой силы. Стандартное отклонение σ_y увеличивается в 1,6 раза.

Анализ изменения критерия λ Колмогорова-Смирнова от демпфирующих свойств подвески k_d (рис. 4) показывает, что боковые реакции мало отличаются от номинальных в диапазоне коэффициента демпфирования k_d от 0,8 до 1,2.

Исходя из изложенного сформулированы выводы по проделанной работе. Разработана математическая модель системы «Микропрофиль дороги – Шина – Неподдресоренная масса – Подвеска – Поддресоренная масса», которая позволяет выполнять аналитические исследования процесса формирования шиной боковых реакций колеса, движущегося с уводом, при возмущенном состоянии подвески. Модель учитывает влияние на исследуемый процесс, сцепных свойств шины, технического состояния амортизаторов, колебаний подрессоренных и неподдресоренных масс, а также микропрофиля опорной поверхности.

В результате теоретических исследований, выполненных с использованием разработанной модели при уровне неровностей $S_0=32 \times 10^{-6}$ м³/цикл, скорости $V=30$ км/ч, угле увода $\delta=6$ град, установлено наличие качественных и количественных различий в протекании нормальной и боковой реакций при изменении демпфирующих свойств подвески по среднему значению и по стандартному отклонению. Выявленные говорят о том, что существующие методы диагностирования амортизаторов по параметрам, связанным с нормальной нагрузкой, такие как EUSAMA и BOGE/МАНА, не позволяют в полной мере оценить влияние амортизаторов на свойства устойчивости движения автомобиля. Малые отличия боковой реакции по критерия λ Колмогорова-Смирнова при изменении демпфирующих свойств системы поддрессоривания ($0,8 \leq k_d \leq 1,2$) позволяют определять диапазон номинальных значений параметров технического состояния амортизаторов подвески автотранспортных средств.

Таким образом, разработанная модель позволяет оценить влияние сцепных свойств шины, технического состояния амортизаторов и микропрофиля опорной поверхности на формирование шиной боковых реакций при возмущенном состоянии подвески. Оценка параметров технического состояния амортизаторов и диагностика свойств устойчивости движения автомобиля может быть качественно улучшена с использованием предложенной модели.

Информация о спонсорстве. Исследование финансировалось Восточно-Сибирским государственным университетом технологий и управления и выполнено в рамках гранта «Молодые ученые ВСГУТУ – 2022»

Список литературы

1. Вонг Д. Я. Теория наземных транспортных средств М.: Машиностроение, 1982. 284 с
2. Гергенов С. М. Нестационарные характеристики бокового увода легковых фрикционных шин на зимней дороге, покрытой пес-

- чано-соляной смесью // International Journal of Advanced Studies, 11(4), 31-42. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-4-31-42>
3. ГОСТ 31507-2012. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2013. – 51 с.
 4. Дик А. Б. Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом: дис. ... канд. тех. наук. Омск, 1988. 228 с.
 5. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля М.: Машиностроение, 1971.
 6. Литвинов А. С., Фаробин Я. Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
 7. Певзнер Я. М., Гридасов Г. Г., Конев А. Д. и др. Колебания автомобиля. Испытания и исследования. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.
 8. Федотов А. И. Повышение эффективности работы антиблокировочных систем при колебаниях нормальной нагрузки на колесах автомобиля: дис. ... канд. тех. наук. Москва, 1986. 187 с.
 9. Хачатуров А. А., Афанасьев В. Л., Васильев В. С. и др. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель. М: Машиностроение, 1976. 535 с.
 10. Эллис Д. Р. Управляемость автомобиля М.: Машиностроение, 1975. - 216 с.
 11. Dixon J C. Tires, Suspension and Handling. 2nd ed., Society of Automotive Engineers ; Arnold, 1996.
 12. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, 1992.
 13. Milliken W. F. Douglas L. M. Race Car Vehicle Dynamics. Great Britain: Society of Automotive Engineers Inc., 1996.
 14. Pacejka, H. B. Tyre and Vehicle Dynamics. Butterworth-Heinemann, 2002.
 15. Takahashi T. The Influence of Tire Transient Property on Vehicle Behavior // Advanced Vehicle Control AVEC'16, 2016, pp. 553–558, <https://doi.org/10.1201/9781315265285-88>

16. Theodorus V P J. Optimal Control of Vehicle Suspensions. 1994. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:131a9d5b-9250-43bd-867e-4c15b137e787>

References

1. Vong D. Ya. Teoriya nazemnykh transportnykh sredstv M.: Mashinostroenie, 1982. 284 s
2. Gergenov S. M. Nestatsionarnye kharakteristiki bokovogo uvoda legkovykh friktsionnykh shin na zimney doroge, pokrytoy peschano-solyanoy smes'yu. International Journal of Advanced Studies, 11(4), 31-42. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2021-11-4-31-42>
3. GOST 31507-2012. Avtotransportnye sredstva. Upravlyaemost' i ustoychivost'. Tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy. – M.: Standartinform, 2013. – 51 s.
4. Dik A. B. Raschet statsionarnykh i nestatsionarnykh kharakteristik tormozyashchego koleasa pri dvizhenii s uvodom: dis. ... kand. tekhn. nauk. Omsk, 1988. 228 s.
5. Litvinov A. S. Upravlyaemost' i ustoychivost' avtomobilya M.: Mashinostroenie, 1971.
6. Litvinov A. S., Farobin Ya. E. Avtomobil': Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv: Uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti «Avtomobili i avtomobil'noe khozyaystvo». M.: Mashinostroenie, 1989. 240 s.
7. Pevzner Ya. M., Gridasov G. G., Konev A. D. i dr. Kolebaniya avtomobilya. Ispytaniya i issledovaniya. M.: Mashinostroenie, 1979. 208 s.
8. Fedotov A. I. Povyshenie effektivnosti raboty antiblokirovochnykh sistem pri kolebaniyakh normal'noy nagruzki na kolesakh avtomobilya: dis. ... kand. tekhn. nauk. Moskva, 1986. 187 s.
9. Khachaturov A. A., Afanas'ev V. L., Vasil'ev V. S. i dr. Dinamika sistemy doroga – shina – avtomobil' – voditel'. M.: Mashinostroenie, 1976. 535 s.
10. Ellis D. R. Upravlyaemost' avtomobilya M.: Mashinostroenie, 1975. - 216 s.
11. Dixon J C. Tires, Suspension and Handling. 2nd ed., Society of Automotive Engineers; Arnold, 1996.

12. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, 1992.
13. Milliken W. F. Douglas L. M. Race Car Vehicle Dynamics. Great Britain: Society of Automotive Engineers Inc., 1996.
14. Pacejka, H. B. Tyre and Vehicle Dynamics. Butterworth-Heinemann, 2002.
15. Takahashi T. The Influence of Tire Transient Property on Vehicle Behavior. Advanced Vehicle Control AVEC'16, 2016, pp. 553–558. <https://doi.org/10.1201/9781315265285-88>
16. Theodorus V P J. Optimal Control of Vehicle Suspensions. 1994. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:131a9d5b-9250-43bd-867e-4c15b137e787>

ДАнные ОБ АВТОРЕ

Тихов-Тинников Дмитрий Анатольевич, заведующий кафедрой «Автомобили», кандидат технических наук, доцент
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
ул. Ключевская, 40В, строение 1, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, 670013, Российская Федерация
dm_tt@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Dmitry A. Tikhov-Tinnikov, Head of the Department «Automobiles», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
East Siberian State University of Technology and Management
40B/1, Klyuchevskaya Str., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670013, Russian Federation
dm_tt@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0912-4109>
Scopus Author ID: 57196258857

Поступила 13.03.2023

После рецензирования 20.03.2023

Принята 30.03.2023

Received 13.03.2023

Revised 20.03.2023

Accepted 30.03.2023