

DOI: 10.12731/2227-930X-2020-1-81-93

УДК 629.331

## ХАРАКТЕРИСТИКИ БОКОВОЙ РЕАКЦИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АМОРТИЗАТОРА

*Тихов-Тинников Д.А., Федотов А.И., Алексеев А.В.*

*В статье представлено аналитическое исследование влияния технического состояния амортизатора на характеристики изменения боковой реакции в пятне контакта эластичной шины с опорной поверхностью. Исследуется процесс движения автомобиля по окружности с переездом единичной неровности. Предложено использовать зависимость боковой реакции от времени в качестве диагностического параметра для контроля технического состояния амортизатора. Выполнена оценка чувствительности и однозначности рассматриваемой зависимости.*

**Цель** – теоретическое обоснование метода диагностирования подвески автомобиля по изменению боковых реакций в пятне контакта колеса с дорогой.

**Методы проведения работы:** использованы численные методы решения дифференциальных уравнений, методы математического моделирования и математического анализа.

**Результаты:** разработан математический аппарат для аналитического исследования чувствительности и однозначности боковых реакций автомобиля при изменении параметров технического состояния амортизаторов.

**Область применения результатов:** результаты могут быть использованы организациями и учреждениями, занимающихся разработкой методов диагностирования автотранспортных средств.

**Ключевые слова:** автомобиль; амортизатор; боковая реакция; подвеска; диагностика; чувствительность; однозначность.

## CHARACTERISTICS OF LATERAL REACTION AT CHANGE OF TECHNICAL CONDITION OF SHOCK ABSORBER

*Tikhov-Tinnikov D.A., Fedotov A.I., Alekseev A.V.*

*The article presents an analytical study of the influence of the technical condition of the shock absorber on the characteristics of lateral reaction change in the spot of contact of the elastic tire with the support surface. The process of moving the car around a circle with passing along a single road ledge is the object of research. The change in lateral reaction over time is a diagnostic parameter for monitoring the technical condition of the damper. Sensitivity and unambiguity of diagnostic parameter are calculated.*

**Purpose.** *The theoretical justification for the method of diagnosing a car's suspension depending on changes in lateral reactions at the point of contact of the wheel with the road.*

**Methodology** *includes numerical methods for solving differential equations, methods of mathematical modeling and mathematical analysis.*

**Results:** *the mathematical apparatus for an analytical research of sensitivity and unambiguity of lateral reactions of the car at change of parameters of technical condition of shock absorbers.*

**Practical implications:** *organizations and institutions that develop vehicle diagnostic techniques can use the results.*

**Keywords:** *automobile; shock absorber; lateral reaction; suspension; diagnostics; sensitivity; unambiguity.*

Исследование изменений свойств устойчивости автомобилей является важной научно-технической задачей, решение которой осуществляется как аналитическими [1, 2, 12], так и экспериментальными методами [3–5, 13–15]. Данные свойства формируют способность транспортного средства противодействовать возникающим при движении воздействиям боковых сил. Указанная способность определяется процессами, происходящими в пятнах кон-

такта эластичных шин с дорогой, и характеризуется предельными и реализованными величинами боковых реакций.

Техническое состояние амортизаторов в значительной мере определяет величину и характер изменения боковых реакций. Снижение демпфирующих свойств подвески увеличивает амплитуду и время затухания колебаний подрессоренной и непрорессоренных масс, что приводит к нестабильности пятна контакта и как следствие к вариации боковых реакций в процессе движения автомобиля. Аналогичные зависимости можно установить и по другим элементам подвески: пружинам, рессорам, рычагам, шарнирам и сайлентблокам. Наличие представленной связи создает предпосылки для разработки метода диагностирования подвески на основе анализа изменения боковых реакций. Метод предусматривает проведение испытаний автотранспортного средства под действием боковой силы при возмущенном состоянии подвески. Непрерывное воздействие боковой силы обеспечивается движением автомобиля по криволинейной траектории [6] или по поперечному уклону [7]. В обоих случаях колебания подвески вызывает проезд колес автомобиля через единичную неровность.

Для выполнения исследований разработана математическая модель, описывающая движение автомобиля по окружности с переездом единичной неровности [11]. Математический аппарат модели включает уравнения динамического равновесия подрессоренной и непрорессоренных масс, а также взаимодействия эластичной шины и опорной поверхности дороги. При этом модель учитывает сглаживающую способность шины при переезде единичной неровности и изменения реакций в пятне контакта от проскальзывания и бокового увода [8]. Были рассчитаны характеристики процесса изменения боковых реакций на колесах автотранспортного средства категории М1 при его движении накатом со скорости 10 м/с, по окружности радиусом 15 м, с переездом единичной неровности квадратного профиля со стороной 0,05 м. Расчеты проводились по эмпирическим коэффициентам демпфирования, соответствующих работоспособному, промежу-

точному и неработоспособному техническому состоянию амортизаторов [9].

Результаты моделирования (рис. 1) позволяют выявить некоторые закономерности изменения значений боковых реакций в зависимости от технического состояния амортизаторов.

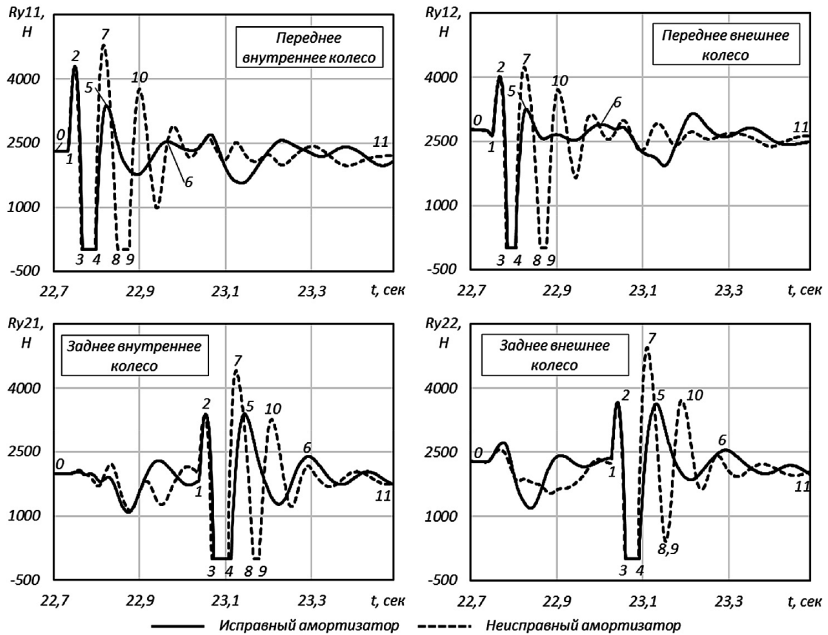


Рис. 1. Боковые реакции по колесам автомобиля (расчет)

Как видно из графиков начальные значения боковых реакций (точка 0) не равны между собой, что объясняется перераспределением нагрузки по колесам автомобиля, вследствие появления центробежной силы при движении автомобиля по окружности. Также имеются незначительные (менее 1%) отличия между начальными значениями боковых реакций для колес, демпфируемых исправными и неисправными амортизаторами.

Участок 0-1 характеризует изменение боковой реакции в пятне контакта до момента взаимодействия колеса с неровностью. Для

переднего внутреннего колеса, которое первым взаимодействует с препятствием, боковая реакция остается практически неизменной. При этом наезд данного колеса на неровность вызывает снижение боковой реакции на переднем внешнем колесе (рис. 1, точка 1). В рассматриваемых процессах не наблюдается значительных различий между боковыми реакциями передних колес, демпфируемыми исправными и неисправными амортизаторами. В свою очередь взаимодействие колес передней оси с препятствием приводит к изменениям боковых реакций колес задней оси (рис. 1, участок 0-1), по причине передачи динамического воздействия через подпрессоренную массу автомобиля. Характер изменения боковых реакций на данном участке различен для исправных и неисправных амортизаторов, при этом количественные значения изменений не имеют значительных отличий.

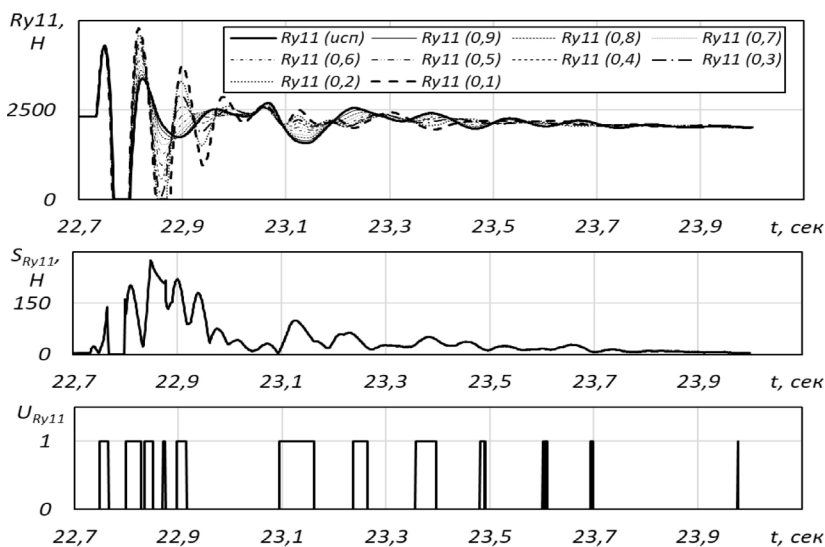
Участок 1-4 показывает изменение боковых реакций при непосредственном взаимодействии колес с неровностью. В данном случае нет значительных отличий по изменению боковых реакций для колес с исправными и неисправными амортизаторами. Для всех колес наблюдается увеличение боковой реакции при въезде на неровность (рис. 1, точка 2) и последующее ее снижение до нуля (рис. 1, точки 3, 4). Максимальное значение реакции при въезде изменяется в диапазоне от 140 до 211 процентов от начального значения, продолжительность отсутствия боковой реакции при съезде колеса с препятствия не превышает 0,04 сек.

Участки графиков от точки 4 до точки 11 характеризуют стабилизацию боковых реакций колес в после их взаимодействия с единичной неровностью. Характер протекания процессов при этом существенно отличается для исправных (участок 4-5-6-11) и неисправных амортизаторов (участок 4-7-8-9-10-11). При демпфировании колеса неисправным амортизатором стабилизация боковой реакции происходит с большей частотой и амплитудой по сравнению с исправным амортизатором. В трех случаях наблюдается снижение боковой реакции до нуля (участок 7-8). Указанные обстоятельства свидетельствуют о нестабильности пятна контакта, снижении

цепных свойств колеса с дорогой, что в конечном итоге приводит к ухудшению устойчивости и управляемости автомобиля.

Боковые реакции должны отвечать требованиям, предъявляемым к диагностическим параметрам: однозначности, чувствительности, стабильности и информативности [10]. Последние два свойства определяются на основе статистических исследований и в данной статье рассматриваться не будут. Чувствительность и однозначность возможно оценить аналитически на основе результатов математического моделирования процесса движения автомобиля.

Рассмотрим представленные на рис. 2 расчетные характеристики боковой реакции на переднем внутреннем колесе  $R_{y11}$  при изменении демпфирующих свойств амортизатора (где:  $R_{y11}(\text{исп})$  – характеристика боковой реакции при технически исправном амортизаторе;  $R_{y11}(0,9)$ ,  $R_{y11}(0,8)$ ,  $R_{y11}(0,7)$ ,  $R_{y11}(0,6)$ ,  $R_{y11}(0,5)$ ,  $R_{y11}(0,4)$ ,  $R_{y11}(0,3)$ ,  $R_{y11}(0,2)$  и  $R_{y11}(0,1)$  – характеристики боковых реакции при сниженных демпфирующих свойствах амортизатора до уровней 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20% и 10% соответственно).



**Рис. 2.** Чувствительность  $S_{R_{y11}}$  и показатель однозначности  $U_{R_{y11}}$  боковой реакции переднего внутреннего колеса  $R_{y11}$

Учитывая, что техническое состояние амортизаторов при моделировании задано через равные интервалы, оценку чувствительности можно получить, основываясь только на приращении величины боковой реакции. В этом случае она представляет собой среднюю величину модуля приращения боковой реакции:

$$S_{Ry} = \frac{\sum_{j=1}^n |Ry_j - Ry_{j+1}|}{n}. \quad (1)$$

Однозначность рассматривается как показатель, принимающий значение либо ноль (условие однозначности не выполняется), либо единица (условие однозначности выполняется), и определяемый по осредненному и нормированному по модулю значению приращения боковой реакции:

$$U_{Ry} = \begin{cases} U = \left( \sum_{j=1}^n \frac{(Ry_j - Ry_{j+1})}{|Ry_j - Ry_{j+1}|} \right) / n \\ 0 \rightarrow U < 1 \end{cases}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2):  $Ry_j$  и  $Ry_{j+1}$  – боковые реакции в момент времени  $t$ ;  $j$  – индекс, характеризующий техническое состояние амортизаторов по демпфирующим свойствам.

Расчеты, выполненные по (1), показывают, что наибольшая чувствительность боковых реакций к изменению технического состояния амортизаторов наблюдается в течении 0,1 секунды после взаимодействия колеса с единичной неровностью. Максимальное значение чувствительности  $S_{RyII}$  составляет более 250 Н на каждые 10% изменения демпфирующих свойств амортизатора. При этом результаты расчетов по условию (2) свидетельствуют о наличии в данном периоде четырех зон однозначности (отсутствия экстремумов) функции боковой реакции при изменении параметра технического состояния амортизаторов.

Последующий период времени характеризуется значительным снижением уровня чувствительности, что делает его неперспективным для использования в дальнейших исследованиях. Аналогичные закономерности также наблюдаются по другим колесам автомобиля.

Полученные результаты требуют проведения экспериментальной проверки, но при этом позволяют сделать заключение о наличии потенциальной возможности определения технического состояния амортизаторов по величине и характеру изменения боковых реакций, что создает предпосылки для разработки оперативного метода контроля систем поддрессоривания колесных транспортных средств в условиях эксплуатации.

**Информация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Информация о спонсорстве.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### *Список литературы*

1. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / Хачатуров А.А., Афанасьев В.Л., Васильев В.С., Гольдин Г.В., Додонов Б.М., Жигарев В.П., Кольцов В.И., Юрик В.С., Яковлев Е.И. Под ред. Хачатурова А.А. М: Машиностроение, 1976. 535 с.
2. Малюгин П.Н., Немчинов Д.В. Торможение колеса на косогоре // Сборник материалов II Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство». Омск: СибАДИ, 2019. С. 290–293.
3. Кузнецов Н.Ю., Лысенко А.В., Зедгенизов В.Г. Экспериментальное исследование процесса переезда автомобилем единичной неровности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11 (130). С. 191–198.
4. Кичигин Д.В., Зарщиков А.М. Стенд для испытания автомобильных шин в тормозном режиме // Сборник материалов II Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство». Омск: СибАДИ, 2019. С. 111–114.
5. Назарько О.А. Экспериментальное исследование устойчивости легкового автомобиля в тяговом режиме движения с помощью датчиков линейного ускорения // Ученые записки Крым-



- ского инженерно-педагогического университета. 2012. № 36. С. 26–29.
6. Федотов А.И., Лысенко А.В., Тихов-Тинников Д.А. Контроль технического состояния подвески автомобилей в условиях эксплуатации методом движения по окружности // Автомобиль для Сибири и Крайнего Севера. Конструкция, эксплуатация, экономика: материалы 90-й Международной научно-технической конференции. Иркутск: ИРНТУ, 2015. С. 232–237.
  7. Федотов А.И., Лысенко А.В., Тихов-Тинников Д.А. Контроль технического состояния подвески автомобилей в условиях эксплуатации методом движения по поперечному уклону // Журнал автомобильных инженеров. 2015. №6. С. 51–53.
  8. Кузнецов Н.Ю. Контроль технического состояния автомобильных амортизаторов на основе характеристик сцепления шин с опорной поверхностью: дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2019. 221 с.
  9. Лысенко А.В. Дорожный метод контроля технического состояния амортизаторов в условиях эксплуатации: дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2019. 293 с.
  10. Техническая эксплуатация автомобилей: Учебник для вузов / Кузнецов Е.С., Воронов В.П., Болдин А.П., Лукин В.П., Черненко В.А., Власов В.М., Фролов Ю.Н., Крамаренко Г.В., Янчевский В.А., Панкратов Н.П. Под ред. Кузнецова Е.С. 3 изд. М: Транспорт, 1991. 413 с.
  11. Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Ovchinnikova N.I., Lysenko A.V. Simulation of car movement along circular path // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. №87(8). doi:10.1088/1755-1315/87/8/082018
  12. Simniceanu L. The Study of the Car's Stability Using a Simplified Model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. №568(1). doi:10.1088/1757-899x/568/1/012053
  13. Prochowski L., Pusty T., Gidlewski M., Jemioł L. Experimental studies of the car-trailer system when passing by a suddenly appearing obstacle in the aspect of active safety of autonomous vehicles // IOP Con-

- ference Series: Materials Science and Engineering. 2018. №421(3). doi:10.1088/1757-899x/421/3/032024
14. Heerwan P.M., Asyraf S.M., Efistein A.N., Seah C.H., Zikri J.M., Syawahieda, J.N. Experimental study of the vehicle dynamics behavior during lane changing in different speeds // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. №257(1). doi:10.1088/1757-899x/257/1/012078.
15. Abdullah M.A., Jamil J.F., Salim M.A. Dynamic performances analysis of a real vehicle driving // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. №100(1). doi: 10.1088/1757-899X/100/1/012017

### References

1. Hachaturov A.A., Afanas'ev V.L., Vasil'ev V.S., Gol'din G.V., Dodonov B.M., Zhigarev V.P., Kol'cov V.I., Jurik V.S., Jakovlev E.I. *Dinamika sistemy doroga – shina – avtomobil' – voditel'* [Dynamics of a system road – tyre – car – driver]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 535 p.
2. Maljugin P.N., Nemchinov D.V. *Sbornik materialov II Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii "Obrazovanie. Transport. Innovacii. Stroitel'stvo"* [Compilation of materials of the II National Scientific and Practical Conference "Education. Transport. Innovations. Construction"]. Omsk, 2019. pp. 290-293.
3. Kuznecov N.Ju., Lysenko A.V., Zedgenizov V.G. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, no.11 (2017): 191–198.
4. Kichigin D.V., Zarshhikov A.M. *"Obrazovanie. Transport. Innovacii. Stroitel'stvo"* [Compilation of materials of the II National Scientific and Practical Conference "Education. Transport. Innovations. Construction"]. Omsk, 2019, pp. 111–114.
5. Nazar'ko O. A. *Uchenye zapiski Krymskogo inženerno-pedagogičeskogo universiteta*, no.36 (2012): 26–29.
6. Fedotov A.I., Lysenko A.V., Tihov-Tinnikov D.A. *Materialy 90-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoy konferencii "Avtomobil' dlja Sibii"*

- ri i Krajnego Seve-ra. Konstrukcija, jekspluatacija, jekonomika*” [Materials of the 90th International Scientific and Technical Conference “Car for Siberia and the Far North. Design, operation, economy”]. Irkutsk, 2015, pp. 232–237.
7. Fedotov A.I., Lysenko A.V., Tihov-Tinnikov D.A. *Zhurnal avtomobil’nyh inzhenerov*, no.6 (2015): 51–53.
  8. Kuznecov N.Ju. *Kontrol’ tehničeskogo sostojanija avtomobil’nyh amortizatorov na osnove harakteristik sčepenija shin s opornoj povrchnost’ju* [Monitoring the technical condition of automobile shock absorbers based on tire grip characteristics] Irkutsk: dis. ... cand. tech. sci., 2019. 221 p.
  9. Lysenko A.V. *Dorozhnyj metod kontrolja tehničeskogo sostojanija amortizatorov v uslovijah jekspluatacii* [Road method for monitoring the technical condition of shock absorbers under operating conditions] Irkutsk: dis. ... cand. tech. sci., 2019. 293 p.
  10. Kuznecov E.S., Voronov V.P., Boldin A.P., Lukin V.P., Chernenko V.A., Vlasov V.M., Frolov Ju.N., Kramarenko G.V., Jančevskij V.A., Pankratov N.P. *Tehničeskaja jekspluatacija avtomobilej: Učebnik dlja vuzov* [Technical Maintenance of Cars: Textbook for High Schools]. Moscow: Transport, 1991. 413 p.
  11. Fedotov A.I., Tihov-Tinnikov D.A., Ovčinnikova N.I., Lysenko A.V. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 87 (2018). doi:10.1088/1755-1315/87/8/082018
  12. Simniceanu L. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 568 (2019). doi:10.1088/1757-899x/568/1/012053
  13. Prochowski L., Pusty T., Gidlewski M., Jemioł L. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 421 (2018). doi:10.1088/1757-899x/421/3/032024
  14. Heerwan P.M., Asyraf S.M., Efistein A.N., Seah C.H., Zikri J.M., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257 (2017). doi:10.1088/1757-899x/257/1/012078.
  15. Abdullah M.A., Jamil J.F., Salim M.A. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 100 (2015). doi: 10.1088/1757-899X/100/1/012017

## ДАнные ОБ АВТОРАХ

**Тихов-Тинников Дмитрий Анатольевич**, старший научный сотрудник управления научных исследований, кандидат технических наук, доцент

*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления*

*ул. Ключевская, 40В, стр. 1, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, 670013, Российская Федерация*

*dm\_tt@mail.ru*

**Федотов Александр Иванович**, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, доктор технических наук, профессор  
*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

*ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Иркутская область, 664074, Российская Федерация*

*fai.abs@yandex.ru*

**Алексеев Алексей Васильевич**, доцент кафедры «Автомобили», кандидат технических наук

*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления*

*ул. Ключевская, 40В, стр. 1, г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, 670013, Российская Федерация*

*kafautoalexey@gmail.com*

## DATA ABOUT THE AUTHORS

**Tikhov-Tinnikov Dmitry Anatolyevich**, Senior Researcher at the Research Department, 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: 0000-0003-0912-4109*

**Fedotov Alexander Ivanovich**, Head of the Department of Road Transport, Doctor of Technical Sciences, Professor  
*Irkutsk National Research Technical University*  
*83, Lermontov Str., Irkutsk, Irkutsk region, 664074, Russian Federation*  
*fai.abs@yandex.ru*  
*Scopus Author ID: 56341065000*

**Alekseev Alexey Vasilyevich**, Associate Professor of the Department of Cars, Candidate of Technical Sciences  
*East Siberian State University of Technology and Management*  
*40B/1, Klyuchevskaya Str., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670013, Russian Federation*  
*kafautoalexey@gmail.com*  
*ORCID: 0000-0002-4279-0683*