

Проектный расчет боковой жесткости шины при наклоне плоскости вращения колеса*

Балакина Е.В., Кочетов М.В., Сарбаев Д.С.

Волгоградский государственный технический университет

г. Волгоград, Российская Федерация

fahrgestell2011@yandex.ru

Аннотация. Коэффициент боковой жесткости шины определяет ее боковую деформацию и величину бокового увода колеса. От явления бокового увода зависит устойчивость движения автомобиля. Однако при наклоне плоскости вращения колеса жесткость шины изменяется. Это изменение разное в зависимости от направления наклона. Поэтому на этапе проектного моделирования важно учитывать изменения упругих свойств эластичного колеса при наклоне его плоскости вращения.

Цель работы: определение изменений упругих свойств колеса в боковом направлении при его наклоне.

Авторами разработана принципиальная схема влияния жесткостей наклоненного колеса на эксплуатационные свойства автомобиля. Проведены экспериментальные исследования упругих свойств шины на специально созданной установке. Разработана методика и получены расчетно-экспериментальные зависимости для определения коэффициента боковой жесткости шины наклоненного колеса.

Полученная зависимость позволит рассчитывать коэффициент боковой жесткости шины при разных углах наклона колеса по известным значениям боковой жесткости вертикального колеса.

Ключевые слова: эластичное колесо, наклон плоскости вращения, коэффициент боковой жесткости, методика расчета, поправочный коэффициент

ВВЕДЕНИЕ

Коэффициент боковой жесткости, согласно ГОСТ 17697-72 "Автомобили. Качение колеса. Термины и определения", есть первая производная от боковой силы колеса по боковому упругому смещению колеса. Под боковым упругим смещением колеса понимается линейное смещение центра колеса относительно площадки контакта за счет упругих свойств шины под действием боковой силы, измеренное в центральной плоскости, параллельной опорной.

Коэффициент боковой жесткости – важная характеристика шины, определяющая ее боковую деформацию, от которой зависит величина угла бокового увода колеса [1-4]. Согласно упомянутому нормативному документу, боковой увод колеса – явление перемещения в поперечной плоскости центра колеса, катящегося без бокового скольжения.

Угол бокового увода колеса – угол между вектором поступательной скорости колеса и его центральной продольной осью при качении без бокового скольжения. Боковой увод определяет отклонения автомобиля от заданной траектории движения [2-4]. Т.е. коэффициент боковой жесткости существенно влияет на устойчивость движения транспортного средства. В связи с этим, на этапе проек-

ного моделирования движения автомобиля необходимо моделировать и коэффициент боковой жесткости (боковую жесткость) шины [5].

Ранее с участием авторов получены универсальные выражения [5] для расчета боковой жесткости, приведенные в табл. 1. Зависимости табл. 1 справедливы при вертикальном расположении плоскости вращения колеса.

Таблица 1

Полученные универсальные зависимости $C_{ty} = f(P_z)$

для расчета коэффициентов боковой жесткости шины

№	Вид полученной зависимости $C_{ty} = f(P_z)$	Значение постоянных коэффициентов			Средняя относительная погрешность, %
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
1	Степенная $C_{ty} = a \cdot P_z^b$	1,12	0,73	–	12
2	Квадратичная $C_{ty} = a \cdot P_z + b \cdot P_z^2$	0,2	-2,4745·10 ⁻⁵	–	26
3	Функция Харриса $C_{ty} = \frac{1}{a + b \cdot P_z^c}$	0,08755	-0,0595	0,0448	15

В табл. 1 P_z в кГ (или в 10⁻¹Н); C_{ty} в Н/мм; *a, b, c* – постоянные безразмерные коэффициенты

Однако в последнее время все активнее ведутся исследования эксплуатационных свойств автомобиля с наклоненными колесами [6-9]. Проводились исследования параметров движения трехколесного транспортного средства с наклоняемым передним колесом [10].

Есть и другие исследования [11-18].

Для удобства данных исследований предлагаются некоторые термины по наклону колеса. Они приведены ниже.

Наклон колеса – неперпендикулярность плоскости вращения колеса опорной плоскости.

Наружный наклон колес оси автомобиля – наклон колес, при котором оси их вращения пересекаются выше оси автомобиля, в пределах колеи автомобиля.

Внутренний наклон колес оси автомобиля – наклон колес, при котором оси их вращения пересекаются ниже оси автомобиля, в пределах колеи автомобиля.

Разнонаправленный наклон колес оси автомобиля – наклон колес, при котором оси их вращения пересекаются выше или ниже оси автомобиля, за пределами колеи автомобиля или не пересекаются.

* «Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00004, <https://rscf.ru/project/23-21-00004/>»

Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

Одиночный наклон колес оси автомобиля – наклон одного из колес оси автомобиля.

Конструктивный наклон колеса – наклон колеса, заложенный в конструкцию автомобиля.

Эксплуатационный наклон колеса – дополнительный наклон колеса, появляющийся в процессе эксплуатации автомобиля (при движении поддрессоренного колеса по неровности опорной поверхности; при крене поддрессоренного кузова от действия боковой силы; при повороте управляемого колеса (УК) вокруг оси, наклоненной в поперечной вертикальной плоскости; при принудительном бортовом автоматическом регулировании наклона колеса).

Угол наклона колеса – угол между плоскостью вращения и продольной плоскостью колеса.

Угол конструктивного наклона колеса – угол наклона колеса, предусмотренный конструкторской документацией.

Угол эксплуатационного наклона колеса – дополнительный угол наклона колеса, появляющийся в процессе эксплуатации автомобиля.

Разработана принципиальная схема влияния коэффициента жесткостей наклоненного колеса на эксплуатационные свойства автомобиля. Она показана на рис. 1.

На схеме буквенными обозначениями C_{tz} , C_{tx} , C_{ty} указаны коэффициенты нормальной, продольной и боковой жесткостей соответственно; Z , X , Y – нормальная, продольная и боковая деформации; \ddot{j}_z – вертикальное виброускорение кузова; f_k – коэффициент сопротивления качению; l_o – плечо обкатки; M_x, M_z, M_y – возмущающие моменты на колесах; δ – увод колеса.

Анализ результатов экспериментальных исследований упругих свойств эластичного колеса в боковом направлении, а также результатов в продольном и вертикальном направлениях, полученных ранее авторами, позволил про-

следить логику влияния наклонной установки колес на изменения боковой, нормальной и продольной жесткостей шины. Эти изменения сопровождаются изменением соответствующих им деформаций. Боковая деформация Y определяет плечо обкатки l_o и возмущающие моменты M_x, M_z на УК. Нормальная деформация Z определяет вертикальное виброускорение кузова \ddot{j}_z и коэффициент сопротивления качению f_k . Они влияют на плавность хода и топливную экономичность автомобиля соответственно. Боковая и нормальная деформации в совокупности определяют увод колеса δ . Продольная деформация X определяет возмущающий момент M_y . Оценочные показатели δ , l_o , M_x, M_z и M_y влияют на устойчивость движения автомобиля.

Проведенные ранее с участием авторов исследования показали, что нормальная и продольная жесткости шины существенно изменяются при наклоне колес [19,20]. Так, например, нормальная жесткость шины уменьшается до 15% при максимально возможном угле наклона $3,5^\circ$, ограниченном условиями долговечности шин.

Целью данного исследования является определение изменений упругих свойств колеса в боковом направлении при его наклоне.

Методы и подходы

В данной работе определены изменения боковой жесткости шины при наклоне колеса в поперечной вертикальной плоскости. Для этого были проведены экспериментальные исследования шины 3.50-5 на специально созданной для этой цели установке. Схема и фотографии установки для измерения боковой деформации шины наклоненного колеса показаны на рис. 2 и 3. На рис. 2: 1 – ступица; 2 – обод колеса; 3 – колесо; 4 – неподвижная рама; 5

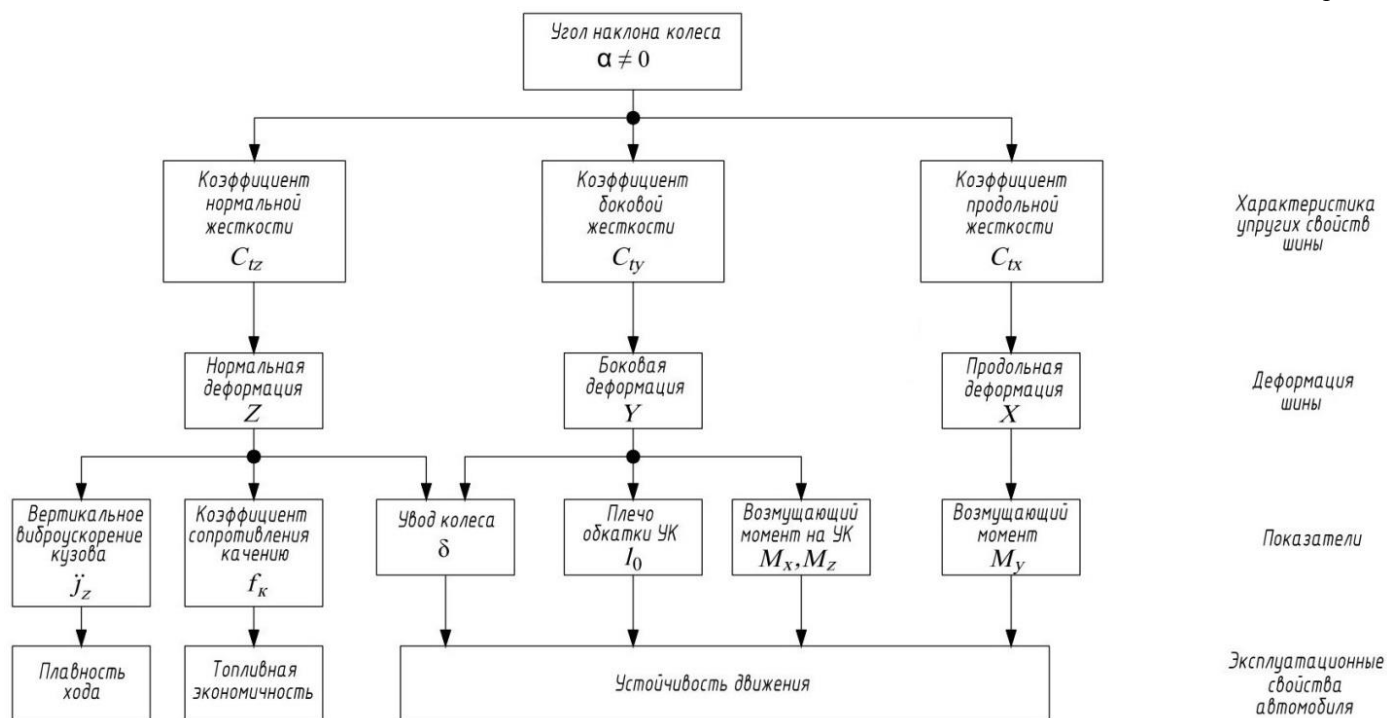


Рис. 1. Принципиальная схема влияния коэффициентов жесткостей наклоненного колеса на эксплуатационные свойства автомобиля

– измерительная опорная площадка; 6 – направляющая; 7 – шина; 8 – геометрический центр колеса; 9 – устройство радиального нагружения; 10 – динамометр нормальной (радиальной) нагрузки; 11 – индикатор нормальной (радиальной) деформации шины; 12 – ось колеса; 19 – горизонтальная шарнирно-поворотная втулка; 20 – устройство бокового нагружения; 21 – динамометр боковой нагрузки; 22 – индикатор боковой деформации шины.

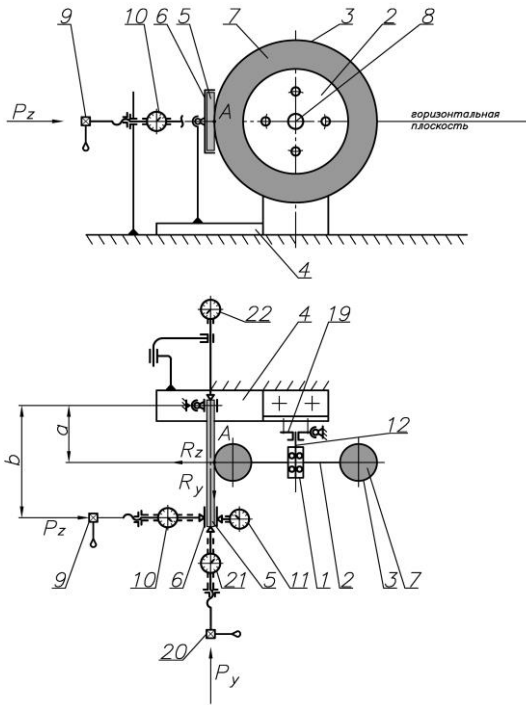


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения боковой деформации шины наклоненного колеса



Рис. 3. Фотография экспериментальной установки для измерения боковой деформации шины наклоненного колеса

В ходе экспериментов были получены боковые нагрузочные характеристики $Y = f(R_y)$: зависимости значений боковой деформации в центре пятна контакта Y наклоненного колеса от приложенной в той же точке нагрузки R_y при различных углах наклона колеса α . Результаты занесены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента по определению боковых нагрузочных характеристик

$R_y, \text{ Н}$	$Y, \text{ мм}$				
	при $\alpha = -10,4^\circ$	при $\alpha = -4,9^\circ$	при $\alpha = 0^\circ$	при $\alpha = 5,4^\circ$	при $\alpha = 10,7^\circ$
0	0	0	0	0	0
10	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06
40	0,08	0,08	0,09	0,1	0,1
70	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15
100	0,18	0,18	0,19	0,19	0,24
130	0,23	0,23	0,25	0,25	0,46
160	0,3	0,3	0,45	0,7	0,88
190	0,9	0,9	1,04	1,33	1,45
220	1,5	1,6	1,59	2,06	2,08
250	2,2	2,3	2,41	2,82	2,92
280	2,63	2,98	3,17	3,7	4,32
310			3,91	5,4	8,33
340				10	10,37

Полученные экспериментальные зависимости $R_y = f(Y)$ были аппроксимированы при каждом угле наклона α показательными функциями вида

$$R_y = a \cdot Y^b, \quad (1)$$

где a, b – коэффициенты аппроксимации.

Полученные коэффициенты a, b приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты аппроксимации функций $R_y = a \cdot Y^b$

Угол наклона колеса $\alpha, \text{ град}$	Коэффициенты аппроксимации		
	a	b	$d = a \cdot b$
-11,4	190,189	0,405	77,02
-4,9	186,425	0,391	72,87
0	180,117	0,404	72,70
5,4	165,978	0,350	58,07
10,7	156,842	0,351	55,07

Для упрощения принято $b = \text{const} \approx 0,4$.

По определению, коэффициент боковой жесткости шины

$$C_{ty} = \frac{\partial(a \cdot Y^b)}{\partial Y} = a \cdot b \cdot Y^{b-1} = d \cdot Y^{b-1}, \quad (2)$$

где C_{ty} – коэффициент боковой жесткости шины; a, b – коэффициенты аппроксимации.

Были аппроксимированы зависимости коэффициента d от угла наклона α вида $d = f(\alpha)$:

$$d = 69,06 - 1,0939 \cdot \alpha - 0,0329 \cdot \alpha^2. \quad (3)$$

В итоге получено промежуточное выражение для расчета коэффициента боковой жесткости шины:

$$C_{ty} = f(\alpha) \cdot Y^{b-1}; \quad (4)$$

$$C_{ty} = (69,06 - 1,0939 \cdot \alpha - 0,0329 \cdot \alpha^2) \cdot Y^{-0,6}, \quad (5)$$

где C_{ty} – коэффициент боковой жесткости шины в Н/мм; Y – боковая деформация шины в мм; α – угол наклона колеса в градусах.

При $\alpha = 0^\circ$ полученное выражение (5) имеет вид:

$$C_{ty} = 69,06 \cdot Y^{-0,6}. \quad (6)$$

Обозначим через $K_{\alpha y}$ отношение коэффициента боковой жесткости наклоненного колеса к коэффициенту боковой жесткости вертикального колеса:

$$K_{\alpha y} = \frac{C_{t_{y\alpha \neq 0}}}{C_{t_{y\alpha = 0}}}. \quad (7)$$

После математических преобразований получено итоговое соотношение:

$$K_{\alpha y} = 1 - 0,0158\alpha + 0,00048\alpha^2. \quad (8)$$

Зависимость (8) в графическом виде представлена на рис. 4.1

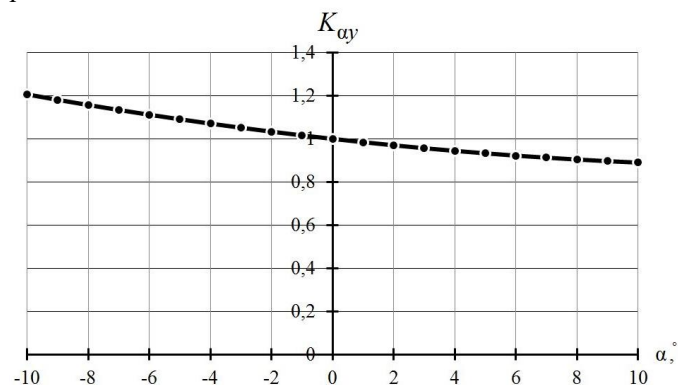


Рис. 4. Зависимость коэффициента коррекции $K_{\alpha y}$ боковой жесткости шины от угла наклона колеса

Таким образом, получен поправочный коэффициент $K_{\alpha y}$ для перерасчета боковой жесткости вертикального колеса в боковую жесткость наклоненного колеса при любом угле наклона α . Т.е. по известному значению боковой жесткости шины (экспериментальному или полученному расчетом по известным универсальным зависимостям) можно определить по формуле (8) его новое значение при наклоне колеса на угол α . При выборе угла наклона α необходимо учитывать его общий возможный диапазон значений: от 0 до $3,5^\circ$. Его максимальное значение ограничивается условиями долговечности шин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1. Определена схема влияния коэффициентов жесткостей наклоненного колеса на эксплуатационные свойства автомобиля.

2. В результате теоретических и экспериментальных исследований получен поправочный коэффициент для расчета коэффициента боковой жесткости шины наклоненного колеса $K_{\alpha y} = 1 - 0,0158\alpha + 0,00048\alpha^2$.

3. При анализе экспериментальных данных установлено, что наклон плоскости вращения колеса автомобиля оказывает влияние на его коэффициент боковой жесткости. При допустимых углах наклона колеса ($3,5^\circ$) он изменяется приблизительно на 5%. В зависимости от направления этого наклона коэффициент жесткости шины будет увеличиваться (при внутреннем наклоне колес автомобиля) или уменьшаться (при наружном наклоне колес автомобиля). Его увеличение приведет к уменьшению боковой деформации шины и, как следствие, к уменьшению бокового увода колеса и возмущающих моментов на УК. Все это положительно скажется на устойчивости движения автомобиля – она увеличится. При уменьшении коэффициента боковой жесткости шины наблюдается совершенно противоположная картина: боковая деформация шины увеличивается, соответственно, увод колеса и возмущающие моменты на УК возрастают, в результате устойчивость движения автомобиля снижается.

Таким образом, результаты исследования показывают на эффективность наружного наклона колес автомобиля по критерию улучшения его устойчивости движения.

Эти результаты будут полезны при проектном расчете устойчивости движения транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pacejka H.B. Tire and Vehicle Dynamics. – USA: Published by Elsevier Ltd, 2012. – 672 p.
2. Балабин И.В. Колеса и шины для мобильных машин / И.В. Балабин, И.С. Чабунин. – М.: Издательство «Спутник +», 2019. – 948 с.
3. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
4. Reza N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Application. – USA: Springer Science + Business Media, LLC, 2008 – 1015 p.
5. Балакина Е.В. Исследование коэффициентов жёсткости шин. Коэффициент боковой жёсткости / Е.В. Балакина, В.Н. Задворнов, М.С. Березовский, А.С. Юсупкина // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 9. – С. 18-20.
6. Балабин И.В. Повышение устойчивости мобильной машины путем применения отрицательного развала колес / И.В. Балабин, И.С. Чабунин // Автомобильная промышленность. – 2020. – №7. – С. 8-9.
7. Балабин И.В. Углы установки управляемых колес и их количественное влияние на сопротивление движению автомобиля // Автомобильная промышленность. – 2016. – №9. – С. 21-24.
8. Балакина Е.В. Углы наклона колес. Анализ их взаимосвязей со свойствами шин и эксплуатационными свойствами автомобиля / Е.В. Балакина, М.С. Кочетов, Д.С. Сарбаев, И.В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2021. – № 9. – С. 9-13.
9. Балакина Е.В. Углы наклона колес. Оценка влияния на устойчивость автомобиля по поперечному скольжению

и поперечному опрокидыванию / Е.В. Балакина, М.С. Кочетов, Д.С. Сарбаев, И.В. Сергиенко // Автомобильная промышленность. – 2021. – № 10. – С. 13-17.

10. Berote J. Lateral Dynamics Simulation of a Three-Wheeled Tilting Vehicle / J. Berote, J. Darling, A. Plummer // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering. – 2015. – Vol. 229, is. 3. – P. 342-356.

11. M+P.DVS.12.08.3 Influence of road surface type on rolling resistance – Results of the measurements 2013. Revision 4, 20-11-2013.

12. M+P.PGEL.17.06.1 Enhancements of texture vs rolling resistance model. M+P consulting engineers, Vught (NL) June 12th, 2017.

13. Parviz Tomaraee Relationships among the contact patch length and width, the tire deflection and the rolling resistance of a free-running wheel in a soil bin facility / Parviz Tomaraee et al. // Spanish Journal of Agricultural Research. – 2015. – Vol. 13, No 2. – 7 p.

14. Ivanov V. Analysis of tire contact parameters using visual processing // Advances in Tribology. – 2010. – P. 11. DOI:10.1155/2010/491723

15. Jimenez E. Experimental Investigation of the Tractive Performance of Pneumatic Tires on Ice / E. Jimenez, C. Sandu // Tire Science and Technology (USA). – 2020. – Vol. 48, No. 1. – P. 22-45.

16. Sarkisov P. Physical Understanding of Transient Generation of Tire Lateral Force and Aligning Torque / P. Sarkisov, G. Prokop, J. Kubenz, S. Popov // Tire Science and Technology (USA). – 2019. – Vol. 47, No. 4. – P. 308-333.

17. Viehweger M. Vehicle state and tyre force estimation: demonstrations and guidelines / M. Viehweger, C. Vasseur, V. Ivanov et al. // Vehicle System Dynamics. – 2020. – Vol. 59, Is. 6. – P. 1-28. DOI:10.1080/00423114.2020.1714672

18. Xueliang Gao Modeling and experimental study of tire deformation characteristics under high-speed rolling condition / Gao Xueliang, Yi Xiong, Weiping Liu, Ye Zhuang // Polymer Testing (UK). – 2021. – Vol. 99, 107052. – P. 1-13.

19. Балакина Е.В. Упругие свойства наклоненного колеса. Коэффициент нормальной жёсткости / Е.В. Балакина, М.С. Кочетов // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 7. – С. 8-11.

DOI: 10.24892/RIJIE/20230308

Design Calculation of the Lateral Tire Stiffness when the Wheel Rotation Plane is Inclined

Balakina E.V., Kochetov M.S., Sarbaev D.S.

Volgograd state technical university

Volgograd, Russian Federation

fahrgestell2011@yandex.ru

Abstract. The coefficient of lateral tire stiffness is determined by its lateral deformation, on which the side slip of the wheel depends, and the vehicle movement stability. However, when the rotation plane of the wheel is inclined, the tire stiffness changes in depending on the incline direction in different ways. Therefore, at the stage of design modeling, it is important to take into account changes in the elastic wheel properties when its rotation plane is inclined. The aim of the work is to determine the change in the lateral wheel stiffness when the rotation plane of the elastic wheel is inclined.

The authors have developed a schematic diagram of the influence of the stiffness coefficient of the inclined wheel on the opera-

tional vehicle properties. Experimental studies of the elastic tire properties were carried out on a specially designed installation. A method has been developed and calculation-experimental dependences have been obtained for determining the lateral stiffness coefficient of an inclined wheel tire.

The obtained dependence will allow us to determine the lateral stiffness coefficient of the tire at different values of the inclination wheel angle, having the values of the lateral stiffness coefficient of the vertical wheel tire (experimental or obtained by calculation according to known universal dependencies).

Keywords: elastic wheel, incline of the rotation plane, lateral stiffness coefficient, calculation method, correction coefficient.

Библиографическое описание статьи

Балакина Е.В. Проектный расчет боковой жесткости шины при наклоне плоскости вращения колеса / Е.В. Балакина, М.С. Кочетов, Д.С. Сарбаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, №3. – С. 39-43. DOI: 10.24892/RIJIE/20230308

Reference to article

Balakina E.V., Kochetov M.S., Sarbaev D.S. Design calculation of the lateral tire stiffness when the wheel rotation plane is inclined, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.3, pp. 39-43. DOI: 10.24892/RIJIE/20230308