

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ УЧАСТКА ПОНИЖЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ НА УПРУГОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ШИНЫ

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING A SECTION OF REDUCED STIFFNESS ON THE ELASTIC CHARACTERISTIC OF A VEHICLE TIRE

И.М. РЯБОВ, д.т.н.
А.В. ПОЗДЕЕВ, к.т.н.
В.В. ЕРОНТАЕВ
Е.В. ЖДАМИРОВА

Волгоградский государственный технический
университет, Волгоград, Россия, pozdeev.vstu@gmail.com

I.M. RYABOV, DSc in Engineering
A.V. POZDEEV, PhD in Engineering
V.V. ERONTAEV
E.V. ZHDAMIROVA

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia,
pozdeev.vstu@gmail.com

Статья посвящена разработке метода получения участка пониженной жесткости на упругой характеристике пневматической шины колесной машины. Предложен путь снижения радиальной жесткости шины за счет получения участка с пониженной жесткостью на упругой характеристике пневматических шин, который, в отличие от известных ранее, позволяет значительно снизить радиальную жесткость пневматической шины без увеличения ее статической радиальной деформации и потерь на качение. Сущность метода получения участка с пониженной жесткостью заключается в снижении давления воздуха в пневматической шине при увеличении ее радиальной деформации с помощью оригинальных внутренних устройств, размещенных внутри шины. Разработан алгоритм, включающий четыре этапа, получена упругая характеристика пневматической шины 8.40-15 с участком с пониженной в 4 раза жесткостью. Это обеспечивает уменьшение собственной частоты вертикальных колебаний поддрессоренной массы на шине почти в 2 раза: с 3,5 до 1,8 Гц. На основе разработанного метода определены зависимости длины участка пониженной жесткости и изменения силы на этом участке от реализуемой частоты собственных колебаний поддрессоренной массы на шине. Для шины 8.40-15 определена зависимость изменения силы на участке с заданной пониженной жесткостью от его длины, которая показала, что с ростом длины этого участка происходит прогрессивное изменение нагрузки на шину на этом же участке. Кроме того, получены зависимости изменения давления в шине от ее радиальной деформации на участках пониженной жесткости для различной заданной частоты собственных колебаний массы груза на шине. Представлены конструктивные схемы колес транспортных средств, у которых шина содержит внутренние структурные элементы, реализующие предложенный метод снижения радиальной жесткости автомобильной шины и, кроме того, обладающие внутренним гидравлическим или воздушным демпфированием вертикальных колебаний колеса.

Ключевые слова: колесная машина, пневматическая шина, упругая характеристика, радиальная деформация, участок пониженной жесткости, заправочное давление, частота колебаний.

This article is devoted to the development of a method for obtaining a section of reduced stiffness on the elastic characteristic of a pneumatic tire of a wheeled vehicle. A way is proposed to reduce the radial stiffness of a tire by obtaining a section with reduced stiffness on the elastic characteristic of pneumatic tires, which, unlike the known ways, can significantly reduce the radial stiffness of a pneumatic tire without increasing its static radial deformation and rolling losses. The essence of the method for obtaining a section with reduced stiffness is to reduce the air pressure in the pneumatic tire while increasing its radial deformation using original internal devices located inside the tire. An algorithm has been developed that includes four stages; the elastic characteristic of the pneumatic tire 8.40-15 with a section with reduced rigidity by 4 times is obtained. This ensures a decrease in the natural frequency of vertical oscillations of the sprung mass on the bus by almost 2 times from 3.5 to 1.8 Hz. On the basis of the developed method, the dependences of the length of the reduced stiffness section and the force change in this section on the natural frequency of the sprung masses on the tire realized in this section are determined. For the tire 8.40-15, the dependence of the change in force in the section with a given reduced stiffness on its length was determined, which showed that with increasing length of this section there is a progressive change in the load on the tire in the same section. In addition, the dependences of the pressure change in the tire on its radial deformation in areas of reduced stiffness were obtained for various given frequencies of natural oscillations of the mass of the load on the tire. Structural diagrams of vehicle wheels are presented, in which the tire contains internal structural elements that implement the proposed method for reducing the radial stiffness of a vehicle tire and, in addition, possessing internal hydraulic or air damping of the vertical vibrations of the wheel.

Keywords: wheeled vehicle, pneumatic tire, elastic characteristic, radial deformation, reduced stiffness section, filling pressure, oscillation frequency.

Введение

Производительность, сохранность грузов и другие показатели экономической эффективности колесных машин в значительной степени определяются плавностью их движения. В последнее время производится и эксплуатируется большое количество бесподвесочных машин (БМ): тракторов, комбайнов и других сельскохозяйственных, строительно-дорожных и специальных колесных машин, у которых защиту остова от вибрации, возникающей в результате взаимодействия колес с неровностями дороги, осуществляют только пневматические шины.

Проведенные исследования показывают, что эти машины имеют недостаточную плавность движения, поскольку не обеспечивают соблюдение норм вибронагруженности оператора даже при эксплуатации на дорогах с усовершенствованным покрытием. Они не могут двигаться со скоростями, установленными правилами дорожного движения для автомобилей, и тормозят транспортный поток. Таким образом, в настоящее время существует проблема эксплуатации БМ.

Причиной этого являются низкие виброзащитные свойства пневматических шин, вследствие их высокой радиальной жесткости и слабого демпфирования вертикальных колебаний кузова. Причем установлено, что при увеличении скорости движения демпфирование вертикальных колебаний колеса за счет потерь в материале шины уменьшается в несколько раз. Оператор для уменьшения действующей на него вибрации, а также для обеспечения безопасности движения вынужден снижать скорость движения машины, что снижает топливную экономичность, производительность и эффективность использования БМ. Колебания сельскохозяйственных машин на полях увеличивают уплотнение почвы, что снижает урожайность. При длительном воздействии колебаний у операторов машин возникают профессиональные заболевания, что негативно сказывается на престижности их профессии. Из-за малой скорости и больших габаритов бесподвесочных машин часто создаются заторы на дорогах, повышается аварийность, снижаются пропускная способность дорог. Все это снижает социально-экономическую эффективность функционирования автомобильного транспорта. С ростом числа БМ проблема их эксплуатации будет только усугубляться.

Многие ученые (Ротенберг Р.В., Хачатуров А.А., Яценко Н.Н. и др.), которые занимались исследованием плавности хода колесных машин (как бесподвесочных, так и с подвеской), пришли к выводу, что для повышения их комфортности и безопасности движения необходимо снижать радиальную жесткость и увеличивать демпфирующие свойства шин [1–5]. У исследователей сформировалось мнение, что снизить радиальную жесткость пневматических шин можно только двумя известными способами:

- 1) снижением заправочного давления;
- 2) изменением конструкции шины, в частности формы профиля.

Однако анализ известных способов снижения радиальной жесткости пневматических шин показывает, что они недостаточно эффективны. При применении первого способа в случае использования шин с нерегулируемым давлением радиальная статическая жесткость шин снижается незначительно (до 1,3 раза) [5–9, 11–13]. В случае использования шин с регулируемым давлением при снижении жесткости до 3 раз ограничивается максимальная скорость, также очень значительно (в 58 раз) сокращается максимальный пробег в течение гарантийного срока службы шины (с 35000 до 600 км) [10, 14]. При применении второго способа – снижения радиальной жесткости пневматических шин изменением их конструкции – рассмотрена замена сдвоенных шин одной широкопрофильной шиной. Такая замена позволяет снизить радиальную статическую жесткость до 1,7 раза для шин грузовых автомобилей, а желательно снизить в 3–4 раза. Кроме того, такая замена нарушает взаимозаменяемость шин передних и задних колес, вследствие чего не нашла распространения [2].

Следует отметить, что радиальная статическая деформация шины является очень важной ее характеристикой, поскольку обуславливает величину напряжений в материалах шины, от которых зависит ее работоспособность. Оптимальная величина радиальной статической деформации шин, установленная в результате длительного опыта их эксплуатации, составляет 10–12 % от высоты профиля для шин с нерегулируемым давлением и 12–15 % для шин с регулируемым давлением [2].

Таким образом, доказано, что известные способы снижения радиальной жесткости пневматических шин недостаточно эффектив-

ны и приводят к увеличению ее радиальной статической деформации и сопротивления качению.

Цель исследования

Предложить свой способ снижения радиальной жесткости шины путем получения участка с пониженной жесткостью на упругой характеристике пневматических шин. Данный путь, в отличие от известных ранее, позволяет значительно (в 4 и более раз) снизить жесткость шины без увеличения, и даже с некоторым уменьшением, ее статической радиальной деформации, что позволит снизить потери на качение шины. Для практической реализации этого метода разработаны и запатентованы варианты конструкций колес транспортных средств [15, 16].

Материалы и методы

Разработка метода получения участка с пониженной жесткостью на упругой характеристике автомобильной шины

Сущность метода заключается в снижении давления воздуха в шине при увеличении ее радиальной деформации с помощью оригинальных внутренних устройств, размещенных внутри шины.

Для реализации этого метода разработан алгоритм, включающий четыре этапа (рис. 1).

На первом этапе определялись экспериментальные упругие характеристики пневматической шины при различном заправочном давлении, в том числе при давлении в шине выше нормативного значения, а также находились экспериментальные зависимости давления и изменения объема шины от ее радиальной деформации.

Экспериментальные упругие характеристики шины определялись авторами статьи на стенде кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ [17–19]. Вид колеса с пневматической шиной на стенде на рис. 2.



Рис. 2. Вид колеса автомобиля УАЗ-450Д на стенде для испытаний подвесок и шин кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ

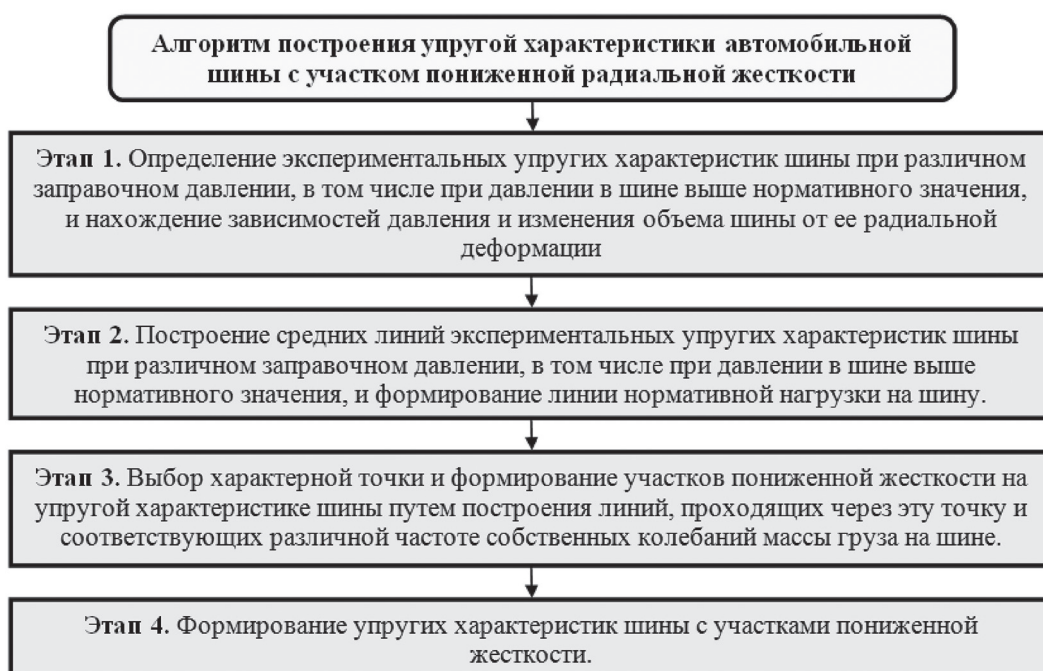


Рис. 1. Алгоритм построения упругой характеристики автомобильной шины с участком пониженной радиальной жесткости

В качестве объекта испытаний использовалась пневматическая шина 8.40-15 автомобиля УАЗ-450Д, имеющая 6 слоев корда (рис. 3, а). В настоящее время эта шина имеет обозначение 215/90-15С согласно ГОСТ 4754-97 [11].

Эксперименты проводились при постоянной температуре окружающего воздуха $t_0 = 19\text{ }^{\circ}\text{C} = \text{const}$ и при следующих значениях статического давления в шине $p_0 = 0,1; 0,15; 0,2$ и $0,27\text{ МПа}$. Упругие характеристики шины снимались на динамическом стенде медленным сжатием шины гидравлическим домкратом. Усилие измерялось образцовым динамометром системы Токаря с ценой деления 30 Н , деформация шины определялась штангенциркулем с ценой деления $0,1\text{ мм}$.

Экспериментальные статические упругие характеристики пневматической шины 8.40-15 автомобиля УАЗ-450Д, полученные на стенде при медленном сжатии, приведены на рис. 3, б. Поскольку температура окружающего воздуха при испытаниях постоянна, и экспериментальные упругие характеристики шины получены при медленном сжатии на стенде, то процесс деформации шины можно считать изотермическим.

Анализ кривых, приведенных на рис. 3, б, позволяет сделать следующие выводы:

– упругие характеристики шины в зоне ее статической деформации при различном давлении практически линейны (заметные отклонения от линейности наблюдаются только на начальных участках упругих характеристик);

– жесткость шины при снижении в ней давления с $0,27$ до $0,1\text{ МПа}$ изменяется в $2,7$ раза: с 400 до 150 кН/м .

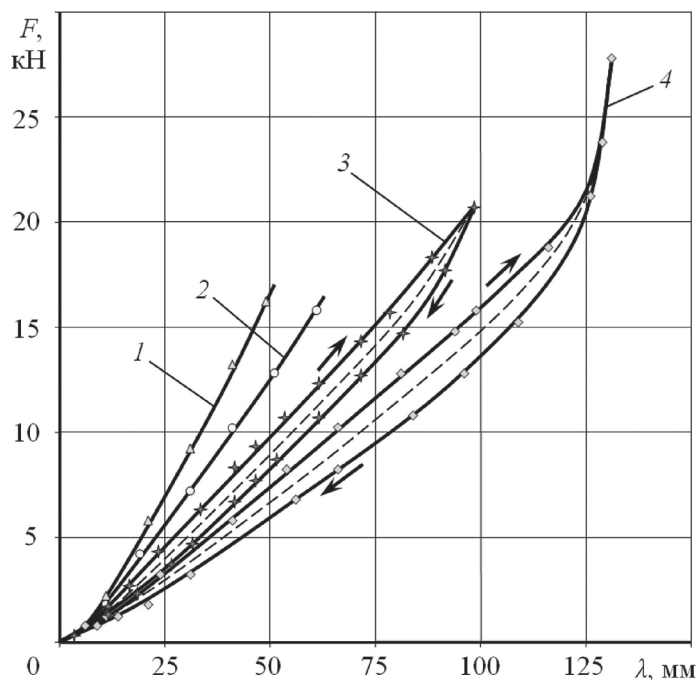
Помимо экспериментальных статических упругих характеристик шины авторами статьи также определялась зависимость изменения давления в шине от деформации при ее медленном радиальном сжатии на стенде. Давление измерялось образцовым манометром с ценой деления $0,002\text{ МПа}$.

На рис. 4, а приведена экспериментальная зависимость давления шины от ее радиальной деформации при заправочном давлении $p_0 = 0,1\text{ МПа}$. Как видно из рис. 4, а, при деформациях шины, не превышающих $20\text{--}25\text{ мм}$, давление в ней увеличивается незначительно, заметный рост давления наблюдается при деформациях, превышающих 25 мм .

Далее, по полученной зависимости (рис. 4, а) с использованием закона Бойля – Мариотта строится зависимость изменения объема в шине от ее деформации (рис. 4, б) по формуле:



а



б

Рис. 3. Общий вид пневматической шины 8.40-15 автомобиля УАЗ-450Д (а) и ее экспериментальные статические упругие характеристики при различном заправочном давлении p_0 (б):

1 — $p_0 = 0,27\text{ МПа}$; 2 — $p_0 = 0,2\text{ МПа}$; 3 — $p_0 = 0,15\text{ МПа}$; 4 — $p_0 = 0,1\text{ МПа}$

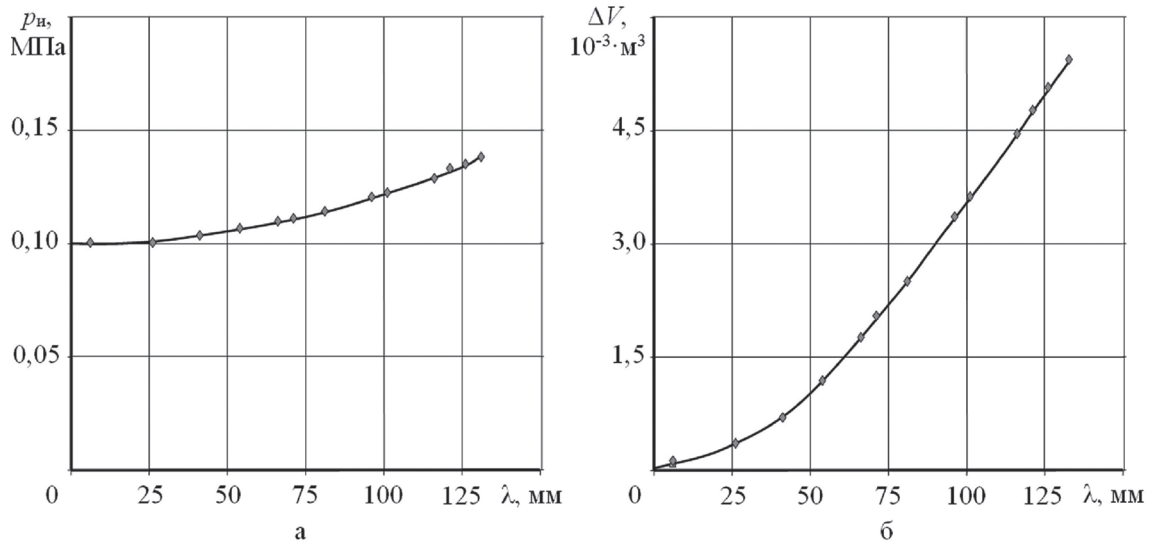


Рис. 4. Зависимости давления (а) и изменения объема (б) шины от ее радиальной деформации при заправочном давлении $p_0 = 0,1$ МПа

$$\Delta V = V_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_1} \right), \quad (2)$$

где V_0 и p_0 – начальный объем и начальное (заправочное) давление в шине; p_1 – давление в шине при ее радиальной деформации.

Как видно на рис. 4, б, зависимость изменения объема в шине от ее радиальной деформации на начальном участке прогрессивная, а начиная с деформации 50 мм линейная. Она очень похожа на аналогичные зависимости для шины 9.00-20, полученные Бидерманом В.Л. экспериментально на специальной установке [14].

На втором этапе строились средние линии экспериментальных упругих характеристик шины при различном заправочном давлении, в том числе при давлении в шине выше нормативного значения, а также формировались линии нормативной нагрузки на шину.

На основе кривых, изображенных на рис. 3, б, строятся средние линии экспериментальных упругих характеристик (рис. 5). Кривые 1 и 2 на рис. 7, б можно считать средними линиями, поскольку гистерезис в экспериментах при давлении $p_0 = 0,27$ МПа и $p_0 = 0,2$ МПа не был выявлен. Далее, на полученные средние линии упругих характеристик (кривые 1–4) наносятся точки A_i (A_1, A_2, A_3, A_4), соответствующие (согласно приложению А ГОСТ 4754-97) нормативному давлению и статической деформации шины при нормативной нагрузке [11]. Совокупность точек A_i (A_1, A_2, A_3, A_4) на рис. 5 позволяет построить линию нормативной нагрузки на шину, кото-

рая может быть использована для выбора нормативного заправочного давления по заданной нагрузке на шину (кривая 5). Анализ кривой 5 показывает, что при уменьшении нагрузки на шину необходимо снижать в ней давление, и при этом ее радиальная статическая деформация увеличивается, что обеспечивает равномерность износа протектора шины.

На третьем этапе из совокупности точек A_i (рис. 5) выбирается характерная точка, через которую должны проходить участки пониженной жесткости на упругой характеристике шины, соответствующие различной частоте собственных колебаний массы груза на шине.

В качестве характерной точки A_i (рис. 6), следует выбрать точку на кривой 5 (рис. 5) расположенную недалеко от точки A_1 , например точку A_2 , чтобы мягкий участок начинался при нагрузке на шину меньшей статической. Для точки A_2 нормативная нагрузка при заправочном давлении $p_0 = 0,2$ МПа равна $F_{ст} = 6,47$ кН. Статическая деформация шины $\lambda_{ст}$ соответствует отрезку OB_i на оси абсцисс (рис. 6).

Через характерную точку A_2 проводятся несколько штрихпунктирных линий, соответствующих различной частоте собственных колебаний массы груза на шине в диапазоне от 0,7 до 2,8 Гц. Значение 0,7 Гц является минимальным значением транспортного частотного диапазона, а значение 2,8 Гц обусловлено необходимостью прохождения этой штрихпунктирной линии через последние точки средних линий (кривые 3 и 4) экспериментальных упругих характеристик шины, соответствующих давлению в ней 0,15 и 0,1 МПа, соответственно.

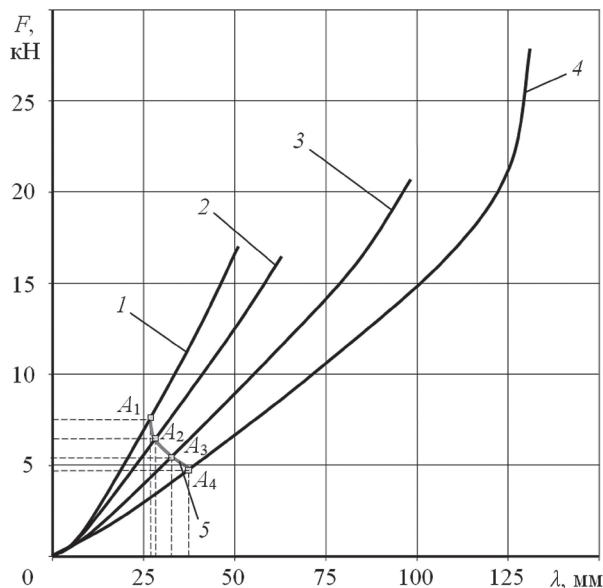


Рис. 5. Средние линии экспериментальных статических упругих характеристик пневматической шины автомобиля УАЗ-450Д при различном заправочном давлении p_0 :

1 – $p_0 = 0,27$ МПа; 2 – $p_0 = 0,2$ МПа;
3 – $p_0 = 0,15$ МПа; 4 – $p_0 = 0,1$ МПа; 5 – линия нормативной нагрузки на шину для выбора режима ее работы; A_1, A_2, A_3, A_4 – точки, соответствующие нормативному давлению и статической деформации шины при нормативной нагрузке

Известно, что частота собственных колебаний линейной колебательной системы определяется по формуле:

$$v_i = \sqrt{\frac{c_i}{m}}, \quad (3)$$

где c_i – жесткость шины; m – масса груза. Тогда с учетом формулы (3) угол наклона штрихпунктирной линии, соответствующей частоте собственных колебаний v_i , можно определить по выражению

$$\alpha_i = \arctg(mv_i^2). \quad (4)$$

Построенные штрихпунктирные линии пересекают ось абсцисс в точках O_i . Отрезки $O_i B_i$ соответствуют приведенным статическим прогибам шины на соответствующих мягких участках упругой характеристики. Построенные штрихпунктирные линии пересекают также крайние средние линии экспериментальных упругих характеристик – в точках C_i и D_i , соответственно. Получившиеся отрезки $C_i D_i$ определяют участки с пониженной жесткостью.

На четвертом этапе формируются упругие характеристики шины с участками пониженной жесткости.

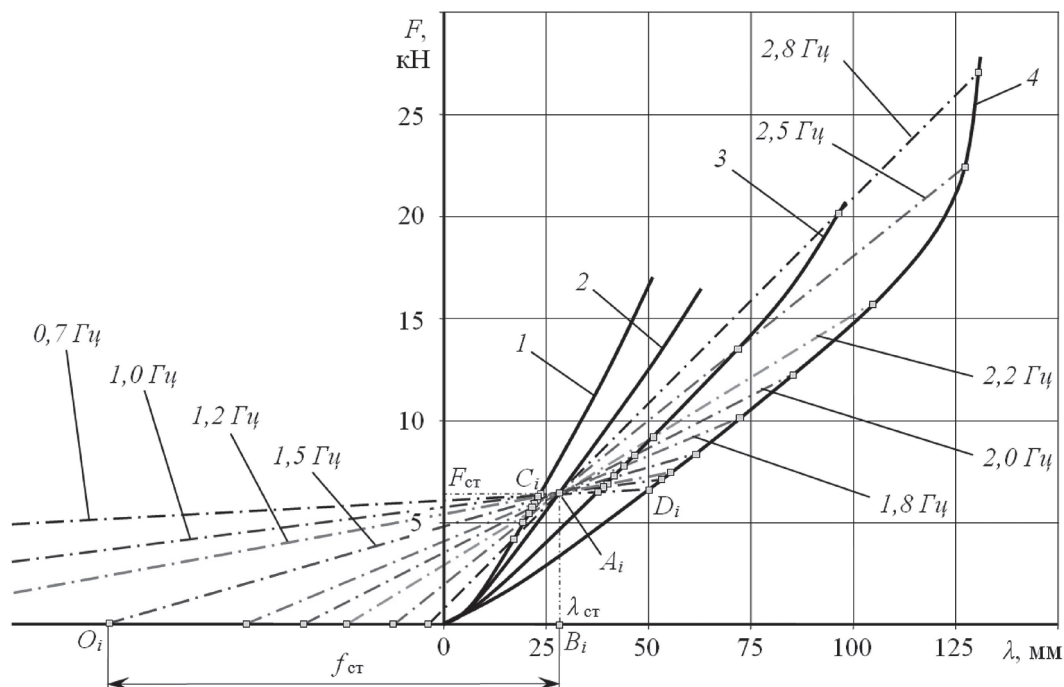


Рис. 6. Построение проходящих через характерную точку A штрихпунктирных линий, соответствующих различной частоте собственных колебаний массы груза v_c на пневматической шине автомобиля УАЗ-450Д и пересекающих средние линии (кривые 1–4) ее экспериментальных статических упругих характеристик $F(\lambda)$ при различном заправочном давлении p_0 :

1 – $p_0 = 0,27$ МПа; 2 – $p_0 = 0,2$ МПа; 3 – $p_0 = 0,15$ МПа; 4 – $p_0 = 0,1$ МПа; A_i – точка, соответствующая нормативному давлению и статической деформации шины при расчетной нагрузке;
 B_i, C_i – точки пересечения кривых 1–4 со штрихпунктирными линиями

На рис. 7 приведены зависимости граничных собственных частот подвески транспортного средства, удовлетворяющих норме ИСО (снижение производительности от усталости) для 8 ч движения, от скорости при движении по различным дорогам [20]. Анализ этих зависимостей показывает, что при регулировании демпфирующей характеристики подвески или шины транспортное средство может двигаться 8 часов по асфальтированному шоссе с разрешенной в городах скоростью 60 км/ч с соблюдением нормы вибронагруженности человека. Поэтому для формирования S-образной упругой характеристики шины, имеющей участок пониженной жесткости (рис. 8), на рис. 6 рекомендуется выбрать частоту собственных колебаний груза на шине 1,8 Гц.

Полученная S-образная упругая характеристика шины (рис. 8) состоит из следующих трех участков:

– начальный участок $0C_i$ (участок I), который определяется кривой 1, выходящей из начала координат, до пересечения с соответствующей штрихпунктирной линией (точки C_i);

– участок с заданной пониженной жесткостью $C_i D_i$ (участок II), который проходит по соответствующей штрихпунктирной линии от точки C_i до точки пересечения этой линии со средней линией упругой характеристики с пониженным давлением (точки D_i);

– конечный участок (участок III), который проходит вверх от точки D_i по средней линии упругой характеристики с пониженным давлением (кривой 4).

Расстояние между крайними точками пересечения штрихпунктирных линий с упругими характеристиками C_i и D_i определяют длину соответствующего участка с заданной пониженной жесткостью.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных упругих характеристик с участками пониженной жесткости

Для разработки дальнейших рекомендаций по применению данного метода графическим путем (с использованием рис. 6 и 8) были опре-

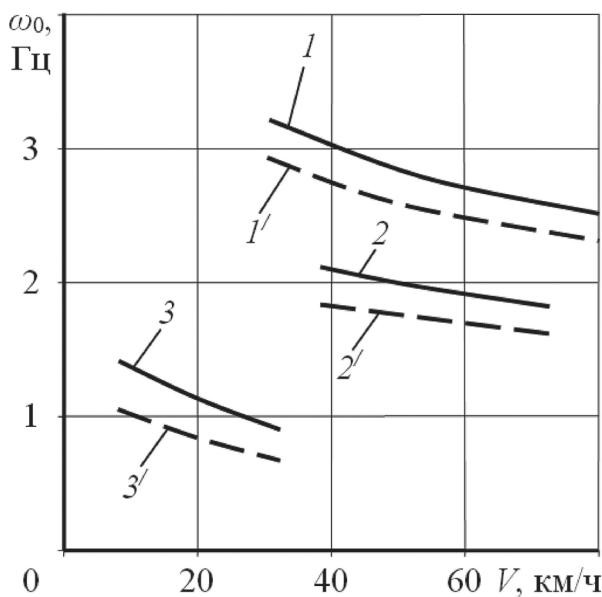


Рис. 7. Зависимости граничных собственных частот подвески АТС, удовлетворяющих норме ИСО (снижение производительности от усталости) для 8 ч движения, от скорости при движении по различным дорогам:

1 и 1' — цементобетонное шоссе;
2 и 2' — асфальтированное шоссе; 3 и 3' — разбитая грунтовая дорога; 1, 2 и 3 — при регулировании демпфирующей характеристики;
1', 2' и 3' — при нерегулируемой демпфирующей характеристике

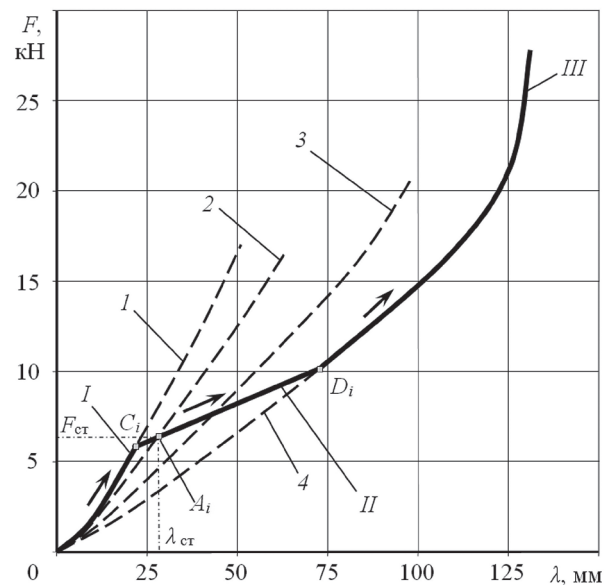


Рис. 8. Полученная упругая характеристика пневматической шины 8.40-15 с участком с пониженной жесткостью с собственной частотой вертикальных колебаний $\nu_c = 1,8$ Гц:

1 — $p_0 = 0,27$ МПа; 2 — $p_0 = 0,2$ МПа;
3 — $p_0 = 0,15$ МПа; 4 — $p_0 = 0,1$ МПа; I — начальный участок; II — участок с заданной пониженной жесткостью при $\nu_c = 1,8$ Гц; III — конечный участок;
 A_i — точка, соответствующая нормативному давлению и статической деформации шины при расчетной нагрузке; C_i , D_i — точки пересечения кривых 1 и 4 с линией, соответствующей собственной частоте вертикальных колебаний $\nu_c = 1,8$ Гц

делены зависимости длины участка с заданной пониженной жесткостью Δh , а также величины изменения силы на этом участке ΔF , от выбранной частоты собственных колебаний ν_c подрессоренной массы на шине.

Для этого из точек C_i и D_i сначала опускаем вертикальные линии на ось абсцисс и определяем длину соответствующего участка, а затем проводим из этих же точек горизонтальные линии на ось ординат и определяем изменение силы в шине на соответствующем участке $C_i D_i$. Полученные зависимости представлены на рис. 9.

Из рис. 9 следует, что длина участка $C_i D_i$ упругой характеристики и изменение силы в шине на нем (кривые 1 и 2) имеют прогрессивный характер и резко увеличиваются после частоты собственных колебаний подрессоренной массы на шине $\nu_c = 1,5$ Гц. С ростом частоты собственных колебаний груза на шине длина участка пониженной жесткости увеличивается в 4,2 раза с 26 мм при частоте 0,7 Гц до 107 мм при частоте 2,5 Гц. На частоте 1,5 Гц она достигает 40 мм, а при частоте 1,8 Гц становится больше 50 мм, что значительно превышает среднеквадратическую высоту неровностей на городских дорогах, поэтому позволит

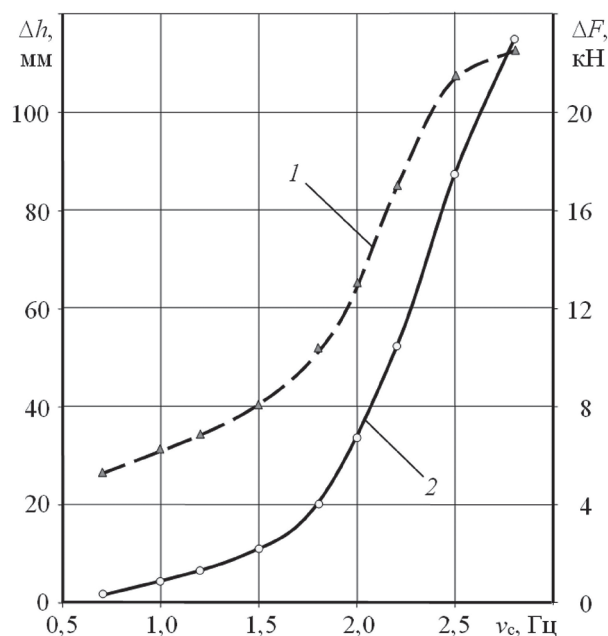


Рис. 9. Зависимости длины участка с заданной пониженной жесткостью Δh (кривая 1) и изменения силы на участке с заданной пониженной жесткостью ΔF (кривая 2) шины автомобиля УАЗ-450Д от частоты собственных колебаний массы на шине ν_c (с уменьшением давления p_0 при радиальной деформации шины λ с 0,27 до 0,1 МПа)

развивать большую скорость движения бесподвесочной колесной машине.

На рис. 10 показана зависимость изменения силы ΔF на участке упругой характеристики шины с заданной пониженной жесткостью от его длины Δh . Как видно из графика, с ростом длины участка с заданной пониженной жесткостью Δh происходит прогрессивное изменение силы в шине ΔF на этом же участке.

По данным графика, изображенного на рис. 6, можно построить график зависимостей изменения давления $p_{упж}$ в шине от ее деформации λ на участках пониженной жесткости. Для этого на рис. 6 из точек A_i , C_i и D_i на каждой средней линии экспериментальных статических упругих характеристик пневматической шины автомобиля УАЗ-450Д, соответствующих различным значениям заправочного давления p_0 , опускаем вниз вертикальные линии до пересечения с осью абсцисс и определяем соответствующие значения деформации шины. Далее по полученным данным строим серию зависимостей $p_{упж}(\lambda)$ (рис. 11).

Как видно из рис. 11, с ростом деформации пневматической шины автомобиля УАЗ-450Д на участках пониженной жесткости давление в шине снижается. При этом с повышением частоты собственных колебаний массы груза на шине с 0,7 до 2,8 Гц рост деформации шины на участках пониженной жесткости увеличива-

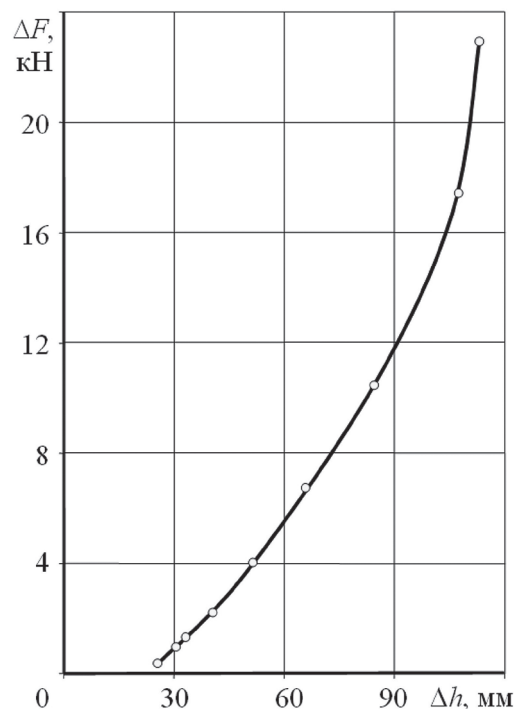


Рис. 10. Зависимость изменения силы ΔF на участке с заданной пониженной жесткостью от его длины Δh

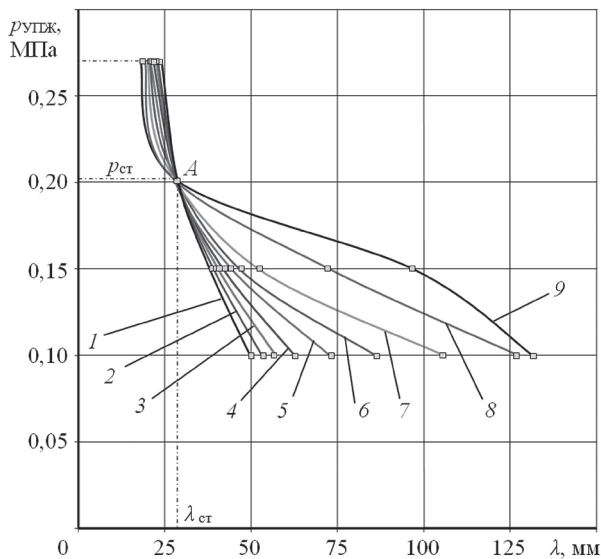


Рис. 11. Зависимости изменения давления $p_{упж}$ в шине автомобиля УАЗ-450Д от ее деформации на участках пониженной жесткости с различной частотой собственных колебаний массы груза на шине ν_c :

1 – $\nu_c = 0,7$ Гц; 2 – $\nu_c = 1,0$ Гц; 3 – $\nu_c = 1,2$ Гц;
4 – $\nu_c = 1,5$ Гц; 5 – $\nu_c = 1,8$ Гц; 6 – $\nu_c = 2,0$ Гц;
7 – $\nu_c = 2,2$ Гц; 8 – $\nu_c = 2,5$ Гц; 9 – $\nu_c = 2,8$ Гц;
А – точка, соответствующая нормативному давлению и статической деформации шины при расчетной нагрузке

ется. Исключение составляет только кривая 9, которая при давлении 0,1 МПа практически пересекается с кривой 8. Связано это с резко прогрессивным участком экспериментальной упругой характеристики шины при данном давлении (кривая 4 на рис. 3), который соответствует радиальной статической деформации шины $\lambda > 125$ мм.

Также следует отметить, что кривые 1–9 пересекаются в характерной точке А, соответствующей статической деформации шины $\lambda_{ст}$ при статическом давлении $p_{ст} = 0,2$ МПа. При снижении давления с 0,27 до 0,2 МПа (участок до точки А) деформации шины меняется незначительно при всех рассмотренных частотах собственных колебаний массы груза на шине.

Полученные зависимости изменения давления в пневматической шине от ее деформации на участках пониженной жесткости упругих характеристик являются основой для расчета основных элементов разработанных конструкций колес [15, 16], реализующих предложенный метод снижения жесткости шины и обладающих гидравлическим и воздушным демпфированием (рис. 12).

Примеры конструктивной реализации метода получения участка с пониженной жесткостью на упругой характеристике автомобильной шины

В первом примере (рис. 12, а), конструкция колеса содержит три полости – А, Б и В, причем кольцевая рабочая полость А и дополнительная эластичная камера В, заполненные жидкостью, образуют гидравлическую демпфирующую систему колеса, а эластичная оболочка Б и дополнительная эластичная камера В армированы стальной проволокой или кольцевыми пластинами для придания необходимой жесткости.

При нагружении колеса статической нагрузкой шина деформируется, объем кольцевой рабочей полости А уменьшается на некоторую величину, а объем В дополнительной эластичной камеры увеличивается на ту же величину вследствие перетекания жидкости через клапаны. Подбором жесткости арматуры и начальной формы дополнительной эластичной камеры В можно корректировать упругую характеристику шины путем необходимого (расчетного) уменьшения давления в полости А при увеличении радиальной деформации шины.

Во втором варианте (рис. 12, б) конструкция колеса также имеет три полости – А, Б и В, причем полость В представляет собой совокупность полостей (пневмобаллонов), внутренние и наружные торцевые поверхности которых представляют собой жесткие пластины, соединенные гибкими связями, с регулирующими звеньями в виде валиков, установленных на внутренней поверхности эластичной оболочки параллельно оси колеса.

Кольцевая рабочая полость шины А заполнена жидкостью, которая передает давление пневмобаллонам. Совокупность пневмобаллонов образует компенсирующий объем сжатия, воспринимающий изменение объема кольцевой рабочей полости шины при ее деформации и обеспечивающий снижение радиальной жесткости колеса.

Для этого центральный и крайние цилиндрические кулачки регулирующих звеньев, передающие и преобразующие усилие пружин растяжения, спрофилированы таким образом, что обеспечивают увеличение сил натяжения гибких связей, закрепленных на наружных жестких пластинах пневмобаллонов по мере их сжатия по заданному закону. Сначала

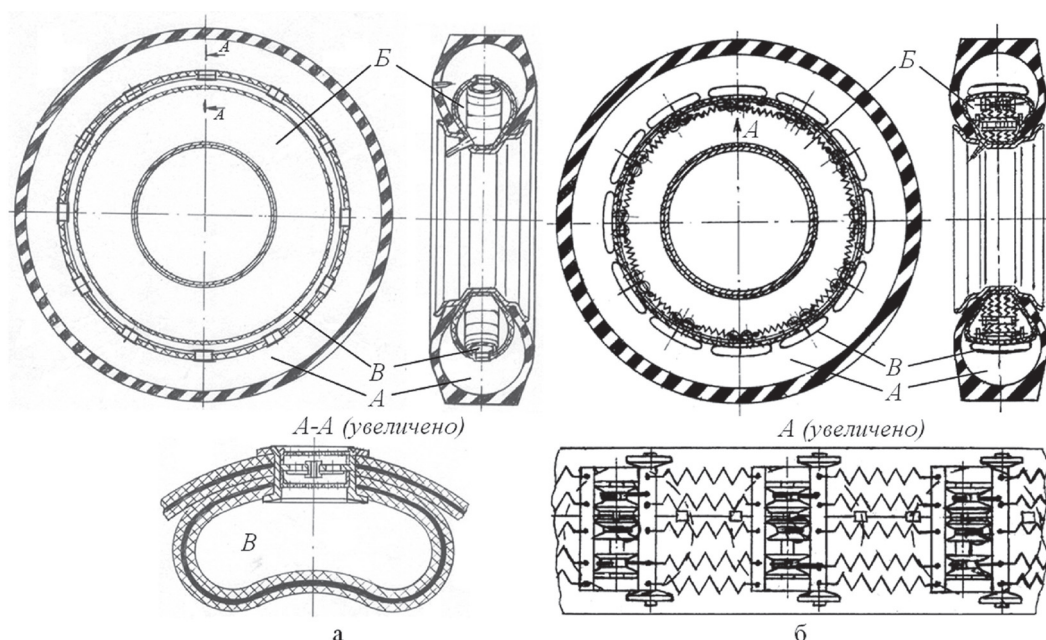


Рис. 12. Примеры конструктивной реализации метода получения участка с пониженной жесткостью на упругой характеристике автомобильной шины по патентам РФ № 2144862 (а) и № 2178742 (б):

A – кольцевая рабочая полость шины; *B* – внутренняя полость эластичной оболочки в виде полого тора; *B* – (а) полость дополнительной эластичной камеры в виде полого тора и (б) полости пневмобаллонов

по мере сжатия шины на 10–15 мм объем и давление жидкости в кольцевой рабочей полости шины *A* постоянные, поскольку шина меняет форму без изменения объема. При дальнейшей радиальной деформации шины объемы полости *A* и полостей *B* пневмобаллонов уменьшаются, давление в полости *A* также снижается за счет действия регулирующих звеньев, чем достигается наличие участка с пониженной жесткостью на упругой характеристике колеса. Перетекание воздуха из полости *B* дополнительной эластичной камеры в виде полого тора в полости пневмобаллонов *B* через дроссели, а также сухое трение в регулирующих звеньях обеспечивают демпфирование вертикальных колебаний колеса.

Заключение

Таким образом, разработан метод получения участка пониженной жесткости на упругой характеристике автомобильной шины и алгоритм его реализации. Сущность метода заключается в получении зависимости снижения давления воздуха в шине при увеличении ее радиальной деформации на мягком участке упругой характеристики шины и реализации этой зависимости с помощью оригинальных внутренних устройств, размещенных внутри шины.

Получена упругая характеристика пневматической шины 8.40-15, имеющая участок с по-

ниженной жесткостью, который обеспечивает собственную частоту вертикальных колебаний массы на шине 1,8 Гц вместо 3,5 Гц при отсутствии такого участка. На основе разработанного метода определены зависимости длины участка пониженной жесткости от частоты собственных колебаний массы груза на шине, а также зависимости изменения давления в шине от ее деформации на участках пониженной жесткости с различной частотой собственных колебаний груза на шине. Представлены две запатентованные конструкции колес, реализующих предложенный метод снижения радиальной жесткости шины, одна из которых обладает воздушным, а вторая гидравлическим демпфированием вертикальных колебаний колеса.

Литература

1. Яценко Н.Н., Прутчиков О.К. Плавность хода грузовых автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. 219 с.
2. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. М.: Машиностроение, 1972. 392 с.
3. 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. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / под ред. А.А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.

4. Яценко Н.Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин. М.: Машиностроение, 1978. 133 с.
5. Кнороз В.И., Кленников Е.В., Петров И.П., Шелухин А.С., Юрьев Ю.М. Работа автомобильной шины / под ред. В.И. Кнороза. М.: Транспорт, 1976. 238 с.
6. Балабин И.В., Чабунин И.С., Груздев А.С. Влияние внутреннего давления воздуха в шинах на их нагрузочный режим // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 2 (85). С. 32–35.
7. Евзович В.Е., Райбман П.Г. Автомобильные шины, диски и ободья. М.: Автополис-плюс, 2010. 144 с.
8. Кленников Е.В. Шины легковых автомобилей. М.: Транспорт. 1979. 48 с.
9. ГОСТ 5513-97. Шины пневматические для грузовых автомобилей, прицепов к ним, автобусов и троллейбусов. Технические условия (с изменением № 1). М.: Изд-во стандартов, 1998. 30 с.
10. ГОСТ 13298-90. Шины с регулируемым давлением. Технические условия (с изменением № 1). М.: Изд-во стандартов, 1990. 22 с.
11. ГОСТ 4754-97. Шины пневматические для легковых автомобилей, прицепов к ним, легких грузовых автомобилей и автобусов особо малой вместимости. Технические условия (с изменением № 1). М.: Изд-во стандартов, 1998. 38 с.
12. ГОСТ 7463-2003. Шины пневматические для тракторов и сельскохозяйственных машин. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2004. 26 с.
13. Дамзен В.А. Повышение безопасности и ресурса автомобильных шин: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Саратов. гос. техн. ун-т. Саратов, 2009. 152 с.
14. Бидерман В.Л., Гуслицер Р.Л. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытания, эксплуатация). М.: Госхимиздат, 1963. 384 с.
15. Рябов И.М. Колесо транспортного средства: патент на изобретение № 2144862, Российская Федерация; опубл. 27.01.2000, Бюл. № 3.
16. Рябов И.М. Колесо транспортного средства: патент на изобретение № 2178742 Российская Федерация; опубл. 27.01.2002, Бюл. № 3.
17. Рябов И.М., Новиков В.В., Чернышов К.В., Васильев А.В., Бурякова М.В. Стенд для испытания пневматических шин и упругих элементов транспортных средств: патент на изобретение № 2133459, Российская Федерация; опубл. 20.07.1999, Бюл. № 20.
18. Новиков В.В., Рябов И.М., Колмаков В.И., Чернышов К.В. Универсальный стенд для испытания подвесок и шин автотранспортных средств // Сборка в машиностроении, приборостроении. М.: Машиностроение, 2008. № 3. С. 45–50.
19. Новиков В.В., Рябов И.М., Дьяков А.С., Поздеев А.В., Похлебин А.В. Стенды для испытания подвесок наземных транспортных средств : учеб. пособ. ВолгГТУ. Волгоград, 2013. 114 с.
20. Новиков В.В., Рябов И.М., Чернышов К.В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств. Волгоград, 2009. 338 с.

References

1. YAcenko N.N., Prutchikov O.K. Plavnost' hoda gruzovyh avtomobilej [Truck running smoothness]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 219 p.
2. Rotenberg R.V. Podveska avtomobilya [Vehicle suspension]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 392 p.
3. Hachaturov A.A., Afanas'ev V.L., Vasil'ev B.C., Gol'din G.V., Dodonov B.M., ZHigarev V.P., Kol'cov V.I., YUrik V.S., YAKovlev E.I. Dinamika sistemy doroga – shina – avtomobil' – voditel' [Dynamics of the road-bus-vehicle-driver system]. Pod red. A.A. Hachaturova. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 535 p.
4. YAcenko N.N. Pogloshchayushchaya i sglazhivayushchaya sposobnost' shin [Absorbing and smoothing ability of tires]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 133 p.
5. Knoroz V.I., Klennikov E.V., Petrov I.P., SHeluhin A.S., YUr'ev YU.M. Rabota avtomobil'noj shiny [Vehicle tire operation]. Pod red. V.I. Knoroza. Moscow: Transport Publ., 1976. 238 p.
6. Balabin I.V., CHabunin I.S., Gruzdev A.S. The influence of the internal air pressure in the tires on their load mode. ZHurnal avtomobil'nyh inzhenerov. 2014. No 2(85), pp. 32–35 (in Russ.).
7. Evzovich V.E., Rajbman P.G. Avtomobil'nye shiny, diski i obod'ya [Vehicle tires and rims]. Moscow: Avtopolisplyus Publ., 2010. 144 p.
8. Klennikov E.V. SHiny legkovykh avtomobilej [Passenger vehicle tires]. Moscow: Transport Publ., 1979. 48 p.
9. GOST 5513-97. Pneumatic tires for trucks, trailers for them, buses and trolleybuses. Technical specifications (with Amendment No. 1). Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1998. 30 p.
10. GOST 13298-90. Tires with adjustable pressure. Technical specifications (with Amendment No. 1). Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1990. 22 p.
11. GOST 4754-97. Pneumatic tires for automobiles, trailers for them, light trucks and buses of especially small capacity. Technical specifications (with

- Amendment No. 1). Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1998. 38 p.
12. GOST 7463-2003. Pneumatic tires for tractors and agricultural machines. Technical specifications. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 2004. 26 p.
13. Damzen V.A. Povyshenie bezopasnosti i resursa avtomobil'nyh shin: dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk [Improving the safety and life cycle of vehicle tires: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]: 05.22.10 / Sarat. gos. tekhn. un-t. Saratov, 2009. 152 p.
14. Biderman V.L., Guslicer R.L. Avtomobil'nye shiny (konstrukciya, raschet, ispytaniya, ekspluatatsiya) [Vehicle tires (design, calculation, testing, operation)]. Moscow: Goskhimizdat Publ., 1963. 384 p.
15. Ryabov I.M. Koleso transportnogo sredstva [Vehicle wheel]: patent na izobretenie No 2144862, Rossijskaya Federaciya. Opublikovano 27.01.2000. Byul. No 3.
16. Ryabov I.M. Koleso transportnogo sredstva [Vehicle wheel]: patent na izobretenie No 2178742 Rossijskaya Federaciya. Opublikovano 27.01.2002. Byul. No 3.
17. Ryabov I.M., Novikov V.V., CHernyshov K.V., Vasil'ev A.V., Buryakova M.V. Stend dlya ispytaniya pnevmatich-eskih shin i uprugih elementov transportnyh sredstv [Test bench for pneumatic tires and elastic elements of vehicles]: patent na izobretenie No 2133459, Rossijskaya Federaciya. Opublikovano 20.07.1999. Byul. No 20.
18. Novikov V.V., Ryabov I.M., Kolmakov V.I., CHernyshov K.V. Universal test bench for testing vehicle suspensions and tires. Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008. No 3, pp. 45–50 (in Russ.).
19. Novikov V.V., Ryabov I.M., D'yakov A.S., Pozdeev A.V., Pohlebin A.V. Stendy dlya ispytaniya podvesok nazemnyh transportnyh sredstv [Ground vehicle suspension test bench]: ucheb. posob. (grif). Dop. UMO vuzov po universitetskemu politekhnicheskomu obrazovaniyu; VolgGTU Publ.. Volgograd, 2013. 114 p.
20. Novikov V.V., Ryabov I.M., CHernyshov K.V. Vibrozashchitnye svoystva podvesok avtotransportnyh sredstv [Vibration protection properties of vehicle suspensions]. Volgograd, 2009. 338 p.