

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-280225>

Оригинальное исследование



Экспериментальное определение боковой жёсткости пневматического колеса трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС»

В.В. Новиков, А.В. Поздеев, В.В. Еронтаев, Д.А. Чумаков, Н.М. Колесов, Н.В. Тимошин, Т.А. Кагочкин

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Возникающие при движении чрезмерные вертикальные и угловые колебания бесподвесочных машин, применяемых в сельском хозяйстве и дорожном строительстве, приводят к тому, что скорости их передвижения ограничиваются и, в условиях постоянного потока автотранспорта, снижается пропускная способность автодорог. Поэтому, поиск путей повышения виброзащитных свойств колесных бесподвесочных машин является актуальной задачей, от решения которой зависит не только безопасность движения и комфорт управления, но и средняя скорость движения, и топливная экономичность.

Цель работы — определение в рамках стендовых испытаний боковой жёсткости пневматического колеса от задней оси трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС» при разных давлениях в шине.

Материалы и методы. На базе стенда-гидропульсатора кафедры «Автоматические установки» ВолгГТУ было разработано и собрано специальное подвижное опорно-измерительное устройство, особенностью которого является то, что сверху датчика силы гидропульсатора установлены 4 ролика с ребордами, на которые опирается плоская опорная плита прямоугольной формы, соединенная через силоизмерительное устройство с вертикальной рамой стенда посредством винтового механизма. На опорную плиту устанавливается испытуемое колесо, ось которого закрепляется на подвижной в вертикальном направлении траверсе, сверху которой закреплены грузы, создающие необходимую силу вертикального нагружения. Методика испытаний заключалась в измерении боковой силы и бокового перемещения опорной плиты до момента возникновения проскальзывания шины при следующих избыточных давлениях: при рекомендуемом давлении – 0,16 МПа и при пониженных давлениях, равных 0,12, 0,08 и 0,04 МПа.

Результаты. По результатам испытаний были построены упругие характеристики боковой жесткости испытуемого колеса, которые имеют регрессивный вид, а их наклон при значительном снижении избыточного давления заметно уменьшается. Так при снижении избыточного давления в шине с 0,16 до 0,12 МПа разницы в полученных значениях боковой жесткости практически не наблюдается, боковая жёсткость достигает 112,5 кН/м. При снижении избыточного давления в 2 раза боковая жёсткость уменьшается на 7%, а при снижении в 4 раза – на 28%. При этом статический прогиб шины увеличивается с 22 до 32 мм, что существенно увеличивает пятно контакта шины с опорной поверхностью.

Заключение. Проведенными испытаниями установлено, что понижение избыточного давления в шине на 25–50% от рекомендуемого значения не оказывает существенного влияния на потерю боковой жёсткости пневматического колеса от задней оси трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС», что важно использовать для повышения опорной проходимости и улучшения плавности хода колесных тракторов.

Ключевые слова: пневматическое колесо; боковая жёсткость; статический прогиб шины; подвижное опорно-измерительное устройство; стендовые испытания.

Как цитировать:

Новиков В.В., Поздеев А.В., Еронтаев В.В., Чумаков Д.А., Колесов Н.М., Тимошин Н.В., Кагочкин Т.А. Экспериментальное определение боковой жёсткости пневматического колеса трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС» // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 2. С. 123–132.

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-280225>

Рукопись получена: 08.11.2022

Рукопись одобрена: 01.03.2023

Опубликована: 15.05.2023

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-280225>

Original Study Article

Experimental definition of lateral stiffness of a pneumatic wheel of the MTZ-82 “Belarus” tractor

Vyacheslav V. Novikov, Alexey V. Pozdeev, Vitaly V. Erontaev, Dmitry A. Chumakov, Nikolay M. Kolesov, Nikolay V. Timoshin, Timofey A. Kagochkin

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Due to the excessive vertical and angular vibrations of suspensionless vehicles used in agriculture and road construction that occur during movement, the velocity of their motion is limited, which, in the conditions of a constant traffic flow, reduces the road capacity. Therefore, the search for ways to improve the vibration-isolating properties of wheeled suspensionless vehicles is a relevant issue, the solution of which affects not only on traffic safety and driving comfort, but also on average speed and fuel efficiency.

AIMS: To determine the lateral stiffness of the pneumatic wheel from the rear axle of the MTZ-82 “Belarus” tractor at different tire pressures, basing on bench tests.

METHODS: On the basis of the hydraulic pulsation test rig of the Automatic Units department of the VolgGTU, a special-purpose movable supporting and measuring device was developed and assembled, the feature of which is that 4 rollers with flanges are installed on top of the hydraulic actuator force sensor, a flat rectangular base plate is supported on these rollers and connected with a vertical frame of the rig through a force-measuring device by means of a screw mechanism. The tested wheel is mounted on the base plate, the wheel’s axle is fixed on a vertically-moving traverse, on top of which weights creating the necessary vertical force are fixed. The test procedure consisted in measuring the lateral force and lateral displacement of the base plate until the tire slip occurred at the following tire pressures: at the recommended pressure of 0.16 MPa and at reduced pressures of 0.12, 0.08 and 0.04 MPa.

RESULTS: Based on the test results, the elastic characteristic curves of the lateral stiffness of the tested wheel were obtained. These characteristic curves have a regressive form, as their slope significantly decreases with a significant reduce in tire pressure. Thus, when the tire pressure is reduced from 0.16 to 0.12 MPa, there is practically no difference in the obtained values of lateral stiffness, which reaches 112.5 kN/m. After a 2-fold tire pressure reduction, the lateral stiffness decreases by 7%, and after a 4-fold reduction, by 28%. At the same time, the static tire deflection increases from 22 to 32 mm, which significantly increases the contact patch of the tire with the ground.

CONCLUSIONS: By means of the tests carried out, it is established that tire pressure reduction by 25–50% of the recommended value does not have a significant effect on the loss of lateral stiffness of the pneumatic wheel of the rear axle of the MTZ-82 “Belarus” tractor, which is important to use in order to increase traction and improve ride comfort of wheeled tractors.

Keywords: *pneumatic wheel; lateral stiffness; static tire deflection; movable supporting and measuring device; bench tests.*

To cite this article:

Novikov VV, Pozdeev AV, Erontaev VV, Chumakov DA, Kolesov NM, Timoshin NV, Kagochkin TA. Experimental definition of lateral stiffness of a pneumatic wheel of the MTZ-82 “Belarus” tractor. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(2):123–132. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-280225>

Received: 08.11.2022

Accepted: 01.03.2023

Published: 15.05.2023

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в сельском хозяйстве и дорожном строительстве применяется большое количество колесных тракторов, комбайнов и дорожно-строительных машин, не имеющих системы поддрессирования их остова. В результате чего, основным элементом, сглаживающим неровности дороги и существенно влияющим на колебания данного класса техники, являются пневматические колеса, которые обеспечивают необходимую опорную проходимость и требуемые тягово-сцепные свойства машины. При этом производители шин в зависимости от выполнения тех или иных технологических и транспортных работ, рекомендуют оптимальное давление в шинах, не обращая внимания на виброзащитные свойства колес, что при транспортных работах приводит к возникновению чрезмерных вертикальных и угловых колебаний машин, вследствие чего, водители вынуждены ограничивать скорости движения.

Согласно паспорту [1] скорость движения трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС» при выполнении сельскохозяйственных работ варьируется в диапазоне от наименьшей рабочей – 1,94...2,09 км/ч до наибольшей рабочей – 15,0...15,6 км/ч (в зависимости от модификации модели). Соответственно, при таких скоростях не возникнет больших ускорений кузова, приводящих к дискомфорту оператора машины. Однако, транспортная скорость указанного трактора [1] составляет 34,3...36,9 км/ч, при этом, отсутствие подвески существенно сказывается на ускорениях кабины трактора и кресла оператора при наезде на неровности дорожного полотна. В работах [2–6] приведены оценки виброускорений кабин оператора тракторов и зерноуборочных комбайнов. Исследуемые образцы техники способны развивать скорость до 40–50 км/ч, однако из-за существенных виброускорений, возникающих при движении, скорости передвижения ограничены, что в условиях постоянного потока автотранспорта снижает пропускную способность автодорог. Поэтому, поиск путей повышения виброзащитных свойств колесных бесподвесочных машин является актуальной задачей, от решения которой зависит не только безопасность движения и комфорт управления, но и средняя скорость движения, а также топливная экономичность.

В связи с этим, постоянно ведутся работы по совершенствованию колес с целью придания им повышенных демпфирующих свойств и снижения их радиальной жесткости [7–17]. Однако, последнее может привести к существенному уменьшению их боковой жесткости, что может повлиять на безопасность движения. Для исследования боковой жесткости шин требуется специальное стендовое оборудование.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью работы является экспериментальное определение упругих характеристик шины при боковом уводе, боковой жесткости, максимального бокового увода шины до начала ее проскальзывания и статического прогиба пневматического колеса от задней оси трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС» при разных избыточных давлениях в шине 400–965/15.5–38.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Перед началом работ по проектированию экспериментальной установки были проанализированы существующие аналоги. Так, например, в работе [18] приводится обзор стендов для испытания шин. В частности, известна установка для определения боковой жесткости пневматической шины, в основе которой заложен принцип смещения опорной поверхности шины перпендикулярно плоскости вращения пневматического колеса для создания боковой силы. В конструкции установки для воздействия по нормали к колесу применяется трос, перекинутый через блок, на одном конце троса закреплен груз массой M , другим концом трос крепится к опорной плите колеса, имеющей опорные ролики, опирающиеся, например, на твердое покрытие дороги. В результате чего, боковая нагрузка осуществляется под действием силы тяжести груза. Однако, при смещении опорной плиты происходит перераспределение вертикальных реакций опорных роликов относительно вертикальной плоскости колеса, что может повлиять на точность получаемых результатов.

Известна установка для определения коэффициента сопротивления бокового увода колеса (зависимость боковой силы от угла увода колеса) при его качении [19]. В данной установке боковая нагрузка возникает в результате поворота колеса на заданный угол относительно плоскости беговой дорожки, которая и придает колесу вращение. Боковую силу измеряют с помощью тензодатчиков, наклеенных на рычагах механизма нагружения и крепления диска колеса к раме стенда. Однако, данная установка не позволяет определять боковую жесткость шины.

Существует динамометрический диск, позволяющий с высокой точностью определять продольные и поперечные силы и моменты, действующие на колесо. Тем не менее, данный диск не предназначен для испытания разных диаметров колес и имеет очень высокую стоимость [20].

В работах [21, 22] описываемые стенды имеют схожие конструкции. В работе [22] исследуются сцепные свойства колеса, которое устанавливается на тензометрическую площадку и нагружается продольными

и поперечными силами с помощью специальных приводов. В работе [21] приводится оценка жесткостных и поглощающих свойств пневматических шин при комплексном нагружении нормальной и боковой силами колеса, установленного на динамометрическую плиту. Указанные варианты стендов хоть и позволяют получать данные с высокой степенью точности, вместе с тем, не предназначены для исследования колес больших диаметров. В работе [23] представлен способ определения боковой деформации шины путем нагружения трактора МТЗ-80 боковым усилием, при этом, влияние на деформацию шины упругих свойств второго колеса исключалось путем установки под него платформы с опорами качения.

На кафедре «Автоматические установки» ВолгГТУ имеется стенд-гидропульсатор, разработанный индийской фирмой BISS [24]. Устройство стенда (рис. 1) представляет собой основание 1, на котором установлена вертикальная станина 2 с закрепленными на ней рельсовыми направляющими 3. Имитация подрессоренной массы осуществляется с помощью подвижной плиты 4 и закрепленной на ней траверсой 5 с грузами. Под силовым воздействием гидропульсатора 6 плита 4 с помощью линейных роликовых подшипниковых опор имеет возможность перемещаться вдоль направляющих 3

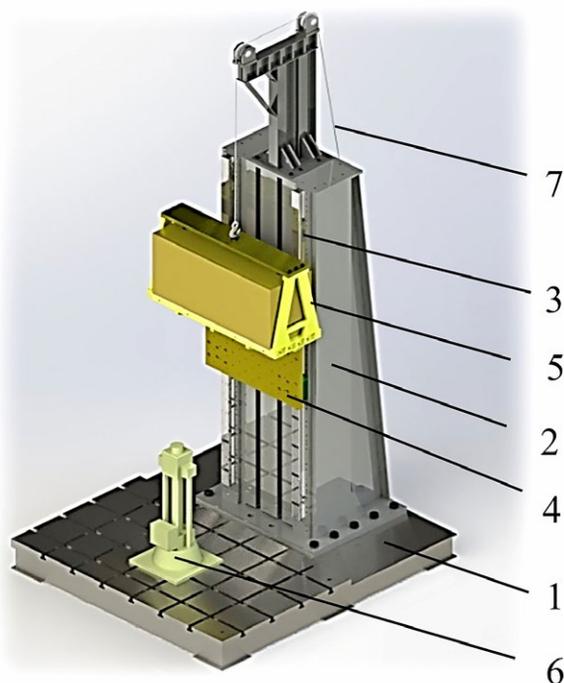


Рис. 1. Общий вид стенда-гидропульсатора: 1 – основание; 2 – вертикальная станина; 3 – рельсовые направляющие; 4 – подвижная плита; 5 – траверса с грузами; 6 – гидропульсатор; 7 – трос лебедки.

Fig. 1. Main view on the hydraulic pulsation test rig: 1 – a base; 2 – a vertical supporting structure; 3 – rail guides; 4 – a movable flat base; 5 – a traverse with weights; 6 – a hydraulic pulsating actuator; 7 – a winding rope.

в вертикальной плоскости. С помощью троса 7, связанного с лебедкой, подвижная плита 4 устанавливается на необходимую высоту в зависимости от размеров испытываемых элементов.

На этом стенде можно проводить статические и динамические испытания как отдельных элементов подвески (амортизаторов, рессор и т.д.) или колес автотранспортных средств различных диаметров, так и блока подвески вместе с колесом, но без его качения.

С целью возможности проведения стендовых испытаний пневматических колес при их качении по неровностям дороги с учетом задания бокового увода шины в ВолгГТУ разработано несколько вариантов модернизации данного стенда с разными конструкциями толкателя [25–30]. Для измерения боковой силы во всех конструкциях предлагается устанавливать горизонтальный датчик силы на ось ролика, фиксирующего поперечное смещение гусеничного обвода, по которому катится испытываемое колесо с боковым уводом. Однако, точность такого измерения из-за высокой поперечной жесткости гусеничного обвода будет невысокой.

Для устранения этого недостатка авторами статьи была разработана универсальная установка (рис. 2), которая на базе стенда-гидропульсатора позволяет определять боковую жесткость пневматических шин больших диаметров с высокой точностью.

Установка представляет собой раму 1, по краям которой на подшипниках установлены четыре ролика 2, между ребрами которых сверху установлена опорная плита 3. Рама 1 своей средней частью крепится к торцу штока гидропульсатора, а опорная плита соединяется через образцовый динамометр системы Токаря 4, винт 5, упорную планку 6 и натяжную гайку 7 с вертикальной станиной стенда-гидропульсатора, с помощью которого и проводились представленные ниже результаты испытаний пневматического колеса на боковую жесткость.

Общий вид стенда в начальном и конечном положениях испытываемого колеса 1 и датчик силы 5 для измерения боковой силы показан на рис. 3 и 4, соответственно.

Методика предварительной подготовки и проведения исследования боковой жесткости пневматического колеса трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС» заключается в следующем:

1. Установка для исследования боковой жесткости монтируется на датчик силы 6 (рис. 3), который закреплен на верхнем торце штока гидропульсатора по вертикальной оси испытываемого колеса (см. рис. 2 и 3).
2. Испытуемое колесо 1 устанавливается на креплении 4, жестко связанном с подвижной плитой 3, которая соединена с расположенными на траверсе грузами, имитирующими подрессоренную массу.

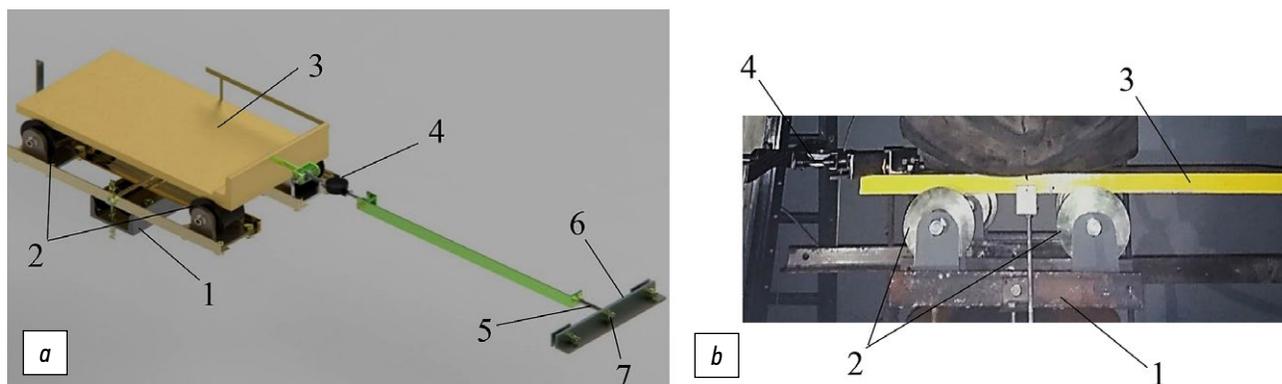


Рис. 2. Универсальная установка для измерения боковой жёсткости шины колеса: *a* – модель установки; *b* – макет опытной установки; 1 – рама установки; 2 – ролики с ребордами; 3 – опорная плита; 4 – образцовый динамометр Токаря; 5 – винт; 6 – упорная планка; 7 – натяжная гайка.

Fig. 2. The universal unit for lateral tire stiffness measuring: *a* – the CAD-model of the unit; *b* – the unit prototype; 1 – a unit's frame; 2 – rollers with flanges; 3 – a base plate; 4 – a Tokar reference dynamometer; 5 – a screw; 6 – a retaining bar; 7 – a tension nut.

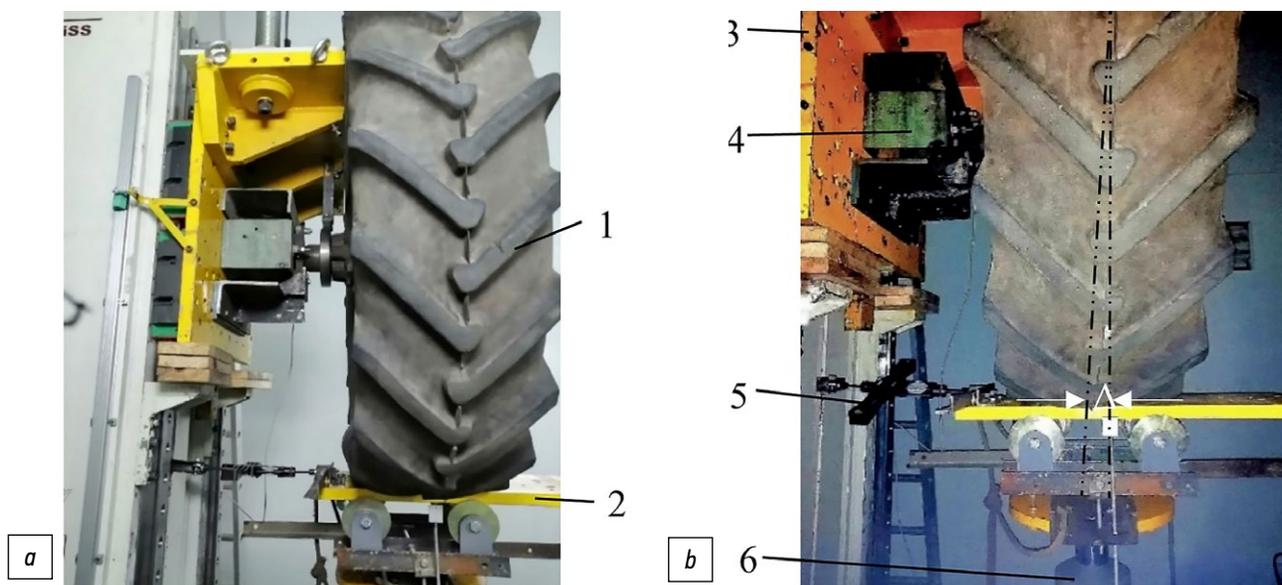


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования боковой жёсткости пневматического колеса: *a* и *b* – начальное и конечное положения шины испытуемого колеса 1; 2 – опорная плита; 3 – подвижная плита с грузами; 4 – крепление колеса; 5 и 6 – датчики сил горизонтального и вертикального нагружения; Δ – величина бокового увода шины колеса.

Fig. 3. The experimental unit for research of pneumatic wheel lateral stiffness: *a* and *b* – initial and final positions of tire of the tested wheel 1; 2 – a base plate; 3 – a movable plate with weights; 4 – wheel mounting; 5, 6 – lateral and vertical force sensors; Δ – value of tire lateral slip.

При этом, плита 3 опирается снизу на упоры, закрепленные на вертикальных направляющих стенда на необходимой высоте (см. рис. 3).

3. Шток гидропульсатора 6 поднимается вверх до касания испытуемой шиной 1 опорной плиты 2 и полного ее нагружения весом колеса 1, подвижной плиты 4 и траверсы 5 с грузами (см. рис. 3).
4. Шина 1 накачивается воздухом до необходимого избыточного давления с помощью компрессора. При этом фиксируется ее статический прогиб.
5. Между опорной плитой 2 (см. рис. 3) и вертикальной станиной 2 (см. рис. 2) стенда устанавливается

- образцовый динамометр 5 системы Токаря (см. рис. 3). При этом с помощью винта 5, упорной планки 6 и натяжной гайки 7 (см. рис. 2) задается небольшой предварительный натяг, обеспечивающий выбор зазоров в элементах крепления динамометра 3 (см. рис. 4).
6. Далее с помощью поворотов натяжной гайки 7 (см. рис. 2) осуществляется горизонтальное перемещение опорной плиты 2 (см. рис. 3) на опорных роликах 2 (см. рис. 2) поперек плоскости колеса. При этом по микрометру динамометра Токаря (см. рис. 4) фиксируется боковая сила, а по числу полных оборотов натяжной гайки 7 – перемещение опорной плиты.



Рис. 4. Установка на стенд-гидропульсатор датчика боковой силы (вид сверху): 1 – крепление к вертикальной станине; 2 – крепление к опорной плите; 3 – динамометр Токаря.

Fig. 4. Lateral force sensor setup at the hydraulic pulsation rig (top view): 1 – mounting to the vertical supporting structure; 2 – mounting to the base plate; 3 – a Tokar dynamometer.

7. При испытаниях замеры боковой силы осуществлялись через каждые 5 полных оборотов гайки, что при шаге резьбы 1,5 мм соответствовало горизонтальному перемещению опорной плиты на 7,5 мм. Перемещение опорной плиты осуществлялось до момента начала проскальзывания шины по опорной

плите. Испытания проводились при избыточных давлениях воздуха в шине, равных 0,16, 0,12, 0,08 и 0,04 МПа. Для повышения точности испытания при одинаковых параметрах повторялись 4 раза и потом регистрировались средние значения.

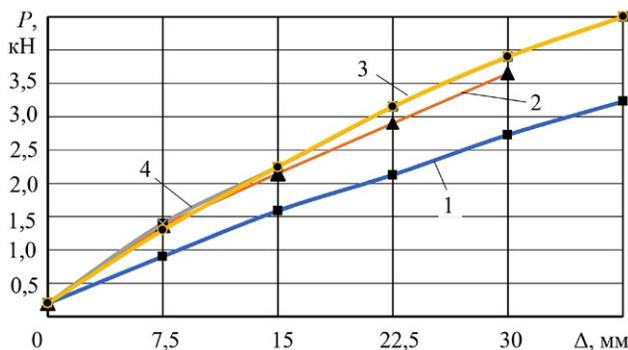


Рис. 5. Зависимость боковой силы от бокового увода шины 400-965/15.5-38 колеса МТЗ-82 при разных избыточных давлениях: 1 – 0,04 МПа; 2 – 0,08 МПа; 3 – 0,12 МПа; 4 – 0,16 МПа.

Fig. 5. Lateral force depending on lateral slip of the 400-965/15.5-38 tire of the MTZ-82's wheel at various tire pressure: 1 – 0.04 MPa; 2 – 0.08 MPa; 3 – 0.12 MPa; 4 – 0.16 MPa.

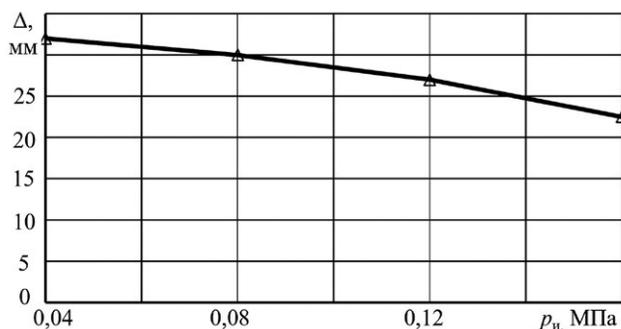


Рис. 6. Зависимость максимального бокового увода шины 400-965/15.5-38 до начала ее проскальзывания под вертикальной нагрузкой 6 кН от внутреннего избыточного давления воздуха.

Fig. 6. Maximal lateral slip of the 400-965/15.5-38 tire before losing grip under the vertical load of 6 kN depending on tire pressure.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам испытаний построены графики зависимостей боковой силы от бокового увода (рис. 5), максимального бокового увода до начала проскальзывания (рис. 6) и статического прогиба под нагрузкой 6 кН при разных избыточных давлениях воздуха в шине (рис. 7).

Из рис. 5 видно, что упругие характеристики при боковом нагружении колеса имеют регрессивный вид и их наклон при значительном снижении избыточного давления заметно уменьшается. При этом установлено, что при снижении избыточного давления воздуха в шине с 0,16 до 0,12 МПа разницы в полученных значениях боковой жёсткости практически не наблюдается, и она достигает 112,5 кН/м. При снижении избыточного давления в 2 раза боковая жёсткость шины уменьшается на 7%, а при снижении в 4 раза – на 28%.

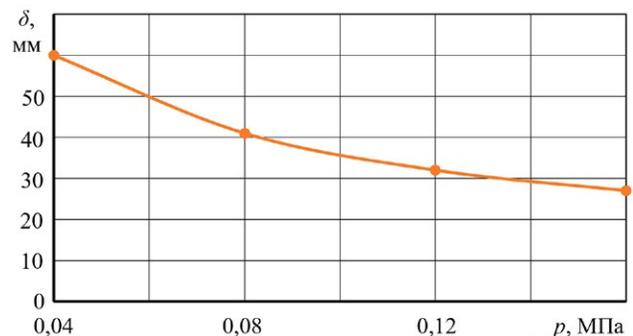


Рис. 7. Зависимость статического прогиба шины 400-965/15.5-38 под вертикальной нагрузкой 6 кН от внутреннего избыточного давления воздуха.

Fig. 7. Static deflection of the 400-965/15.5-38 tire under the vertical load of 6 kN depending on tire pressure.

Из рис. 6 видно, что при снижении избыточного давления воздуха с 0,16 до 0,04 МПа максимальный боковой увод шины до начала ее проскальзывания по опорной поверхности увеличивается от 22 до 32 мм, т.е. на 45%.

Из рис. 7 видно, что при снижении избыточного давления воздуха в шине в 4 раза ее статический прогиб увеличивается с 28 до 60 мм, что приводит к существенному увеличению площади пятна контакта шины с опорной поверхностью.

ВЫВОДЫ

1. Разработана универсальная установка для определения боковой жесткости пневматических шин большого номенклатурного ряда, особенностью которой является то, что сверху штока гидропульсатора установлены 4 ролика с ребордами, на которые опирается опорная плита прямоугольной формы, соединенная через горизонтальное силоизмерительное устройство с вертикальной рамой стенда посредством винтового механизма. На опорную плиту устанавливается испытуемое пневматическое колесо, ось которого закрепляется на подвижной в вертикальном направлении траверсе с грузами, создающими необходимую силу вертикального нагружения.
2. Стендовые испытания шины 400-965/15.5-38 при боковом нагружении показали, что при снижении избыточного давления воздуха с 0,16 до 0,8 МПа боковая жесткость пневматического колеса уменьшается всего на 7 % и достигает 112,5 кН/м. При этом ее статический прогиб увеличивается с 28 до 60 мм, т.е. более 2 раз, что существенно увеличивает пятно контакта шины с опорной поверхностью. Однако понижение избыточного давления воздуха в шине на 50 % от рекомендуемого значения не оказывает существенного влияния на уменьшение боковой жесткости пневматического колеса от задней оси трактора МТЗ-82 «БЕЛАРУС», что важно применять для повышения опорной проходимости и улучшения плавности хода колесных тракторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паспорт 80-00000010 ПС. Минск: РУП «Минский тракторный завод», 2008. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://beltrakt.ru/images/documents/pasport/pasport_belarus82.pdf
2. Сазонов И.С., Ким В.А., Амельченко Н.П., и др. Гашение низкочастотных колебаний на сиденье водителя колесного трактора // Вестник Белорусско-Российского университета. 2014. № 4(45). С. 60–70.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. В.В. Новиков — написание текста рукописи, экспертная оценка; А.В. Поздеев — разработка методики испытаний, экспертная оценка, утверждение финальной версии; В.В. Еронтаев — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Д.А. Чумаков — редактирование текста рукописи, проведение испытаний; Н.М. Колесов — изготовление и сборка экспериментальной установки, проведение испытаний; Н.В. Тимошин — изготовление и сборка экспериментальной установки, обработка результатов; Т.А. Кагочкин — редактирование текста рукописи, создание изображений. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. V.V. Novikov — writing the text of the manuscript, expert opinion; A.V. Pozdeev — development of a test procedure, expert opinion, approval of the final version; V.V. Erontaev — search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript; D.A. Chumakov — editing the text of the manuscript, conducting tests; N.M. Kolesov — fabrication and assembly of the experimental setup, testing; N.V. Timoshin — fabrication and assembly of the experimental setup, processing of results; T.A. Kagochkin — editing the text of the manuscript, creating images. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

3. Сиротин П.В., Лебединский И.Ю. Обоснование и анализ применения гибридных динамических моделей для исследования систем поддрессирования кабин зерно- и кормоуборочных комбайнов // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 2(42). С. 39–47.
4. Сиротин П.В., Лебединский И.Ю., Кравченко В.В. Анализ виброакустической нагруженности рабочего места операторов зерноуборочных комбайнов // Современные наукоём-

- кие технологии. Региональное приложение. 2018. № 1(53). С. 113–121.
5. Кожушко А.П. Экспериментальные исследования эргономических свойств колесных тракторов с агрегатами переменной массы // Автомобильный транспорт (Харьков). 2019. № 45. С. 38–45.
6. Подрубалов М.В., Клубничкин Е.Е. Обзор исследований низкочастотных случайных колебаний и плавности хода колесных машин // Научный журнал КубГАУ. 2021. № 173(09). С. 249–257.
7. Патент РФ № 2108240 / 10.04.1998. Рябов И.М. Колесо транспортного средства. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2108240&TypeFile=html
8. Патент РФ № 2144862 / 27.01.2000. Бюл. № 3. Рябов И.М. Колесо транспортного средства. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2144862&TypeFile=html
9. Патент РФ № 2178742 / 27.01.2002. Бюл. № 3. Рябов И.М. Колесо транспортного средства. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2178742&TypeFile=html
10. Рябов И.М., Чернышов К.В., Соколов А.Ю. Математическая модель колеса с пневматической демпфирующей системой для бесподвесочных машин // Изв. ВолгГТУ. Серия «Наземные транспортные системы»: межвуз. сб. науч. ст. Волгоград: ВолгГТУ, 2007. Вып. 2, № 8. С. 51–53.
11. Шило И.Н., Чигарев Ю.В., Романюк Н.Н., и др. Снижение уплотнения почвы управлением демпфирующими свойствами пневмоколесных движителей // Вестник Белорусско-Российского университета. 2008. № 1(18). С. 57–62.
12. Грушников В.А., Калининский В.С. Безопасные шины // Автомобильная промышленность. 2010. № 3. С. 18–21.
13. Яровой В.Г., Шарапов А.П. Шина как упругодемпфирующее звено сельскохозяйственного трактора // Вестник аграрной науки Дона. 2010. № 3. С. 25–30.
14. Рыков С.П., Сницарев А.В., Тетерин С.Н. Конструкция, расчет и результаты испытаний колесного движителя для тихоходного транспорта // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 3(19). С. 84–89.
15. Aldhufairi H., Essa K., Olatunbosun O. Multi-chamber tire concept for low rolling-resistance // SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems. 2019. Vol. 12, N 2. P. 111–126. doi: 10.4271/06-12-02-0009
16. Aldhufairi H.S., Olatunbosun O.A., Essa K. Multi-chamber tyre designing for fuel economy // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2020;234(2–3):522–535. doi: 10.1177/0954407019857026 .
17. Новиков В.В., Поздеев А.В., Чернышов К.В. и др. Основные направления развития конструкций колес с пневматическими шинами // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2021. № 4 (37). С. 38–44.
18. Новиков В.В., Рябов И.М. Техника эксперимента (при стендовых испытаниях подвесок и колес АТС): учеб. пособ. Волгоград: ВолгГТУ, 1999.
19. Патент РФ № 161103 / 10.04.2016. Бюл. № 10. Кондаков А.Е., Огороднов С.М. Стенд для статических испытаний шин. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=161103&TypeFile=html
20. Датчик сил и крутящего момента колеса WFT-CX. Москва: СЕНСОРИКА-М, 2022. [internet] Дата обращения: 27.10.2022. Режим доступа: <http://www.sensorika.com/ru/ispytanie-transportnyh-sredstv/datchik-sily/>
21. Рыков С. П. Оценка жесткостных и поглощающих свойств пневматических шин при комплексном нагружении колеса на примере действия нормальной и боковой сил // Механики XXI века. 2020. № 19. С. 225–233.
22. Черепанов Л.А., Елизаров А.А. Стенд для испытаний сцепных свойств колес легковых автомобилей // Транспортные системы. 2018. № 4(10). С. 22–26.
23. Поздеев А.В. Устройство и принцип работы одноопорного гидропульсаторного вибростенда: учеб. пособие. Волгоград: ВолгГТУ, 2020.
24. Щиголев С. В. Исследование поперечной устойчивости самоходных сельскохозяйственных машин : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018.
25. Патент РФ № 2765194 / 26.01.2022. Бюл. № 3. Рябов И.М., Поздеев А.В., Новиков В.В., и др. Стенд для испытания пневматических шин и упругих элементов подвесок транспортных средств. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765194&TypeFile=html
26. Патент РФ № 2765315 / 28.01.2022, Бюл. № 4. Рябов И.М., Поздеев А.В., Новиков В.В., и др. Стенд для испытания пневматических шин и упругих элементов подвесок транспортных средств. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765315&TypeFile=html
27. Патент РФ № 2765318 / 28.01.2022. Бюл. № 4. Новиков В.В., Поздеев А.В., Рябов И.М., и др. Стенд для испытания пневматических шин и упругих элементов подвесок транспортных средств. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765318&TypeFile=html
28. Патент РФ № 2765510 / 31.01.2022. Бюл. № 4. Рябов И.М., Поздеев А.В., Новиков В.В., и др. Стенд для испытания пневматических шин и упругих элементов подвесок транспортных средств. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765510&TypeFile=html
29. Патент РФ № 2765583 / 01.02.2022. Бюл. № 4. Поздеев А.В., Рябов И.М., Новиков В.В., и др. Стенд для испытания пневматических шин и упругих элементов подвесок транспортных средств. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765583&TypeFile=html
30. Патент РФ № 2767459 / 17.03.2022. Бюл. № 8. Новиков В.В., Поздеев А.В., Рябов И.М., и др. Стенд для испытания пневматических шин и упругих элементов подвесок транспортных средств. Дата обращения: 08.11.2022. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2767459&TypeFile=html

REFERENCES

1. Pasport 80-0000010 PS. Minsk: RUP «Minskiy traktorny zavod»; 2008. (in Russ). Accessed: 08.11.2022. Available from: https://beltrakt.ru/images/documents/pasport/pasport_belarus82.pdf
2. Sazonov IS, Kim VA, Amelchenko NP, et al. Damping of low-frequency vibrations on the driver's seat of a wheeled tractor. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2014;4(45):60–70. (in Russ).
3. Sirotin PV, Lebedinsky IYu. Justification and analysis of the use of hybrid dynamic models for the study of suspension systems for the cabins of grain and forage harvesters. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2018;2(42):39–47. (in Russ).
4. Sirotin PV, Lebedinsky IYu, Kravchenko VV. Analysis of vibroacoustic loading of the workplace of operators of combine harvesters. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie*. 2018;1(53):113–121. (in Russ).
5. Kozhushko AP. Experimental studies of the ergonomic properties of wheeled tractors with units of variable mass. *Avtomobilnyy transport (Kharkov)*. 2019;45:38–45. (in Russ).
6. Podrubalov MV, Klubnichkin EE. Review of studies of low-frequency random oscillations and smooth running of wheeled vehicles. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2021;173(09):249–257. (in Russ).
7. Patent RUS № 2108240 / 10.04.1998. Ryabov IM. Koleso transportnogo sredstva. (in Russ). Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2108240&TypeFile=html
8. Patent RUS № 2144862 / 27.01.2000. Byul. № 3. Ryabov IM. Koleso transportnogo sredstva. (in Russ). Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2144862&TypeFile=html
9. Patent RUS № 2178742 / 27.01.2002. Byul. № 3. Ryabov IM. Koleso transportnogo sredstva. (in Russ). Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2178742&TypeFile=html
10. Ryabov IM, Chernyshov KV, Sokolov AYU. Mathematical model of a wheel with a pneumatic damping system for non-suspension machines. *Izv. VolgGTU. Seriya «Nazemnye transportnye sistemy»: mezhvuz. sb. nauch. st.* Volgograd: VolgGTU; 2007;2(8):51–53. (in Russ).
11. Shilo IN, Chigarev YuV, Romanyuk NN, Volsky AL. Decreasing soil compaction by controlling the damping properties of pneumatic wheel propellers. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*. 2008;1(18):57–62. (in Russ).
12. Grushnikov VA, Kalinkovsky VS. Safe tires. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 2010;3:18–21. (in Russ).
13. Yarovoy VG, Sharapov AP. Tire as an elastic damping link of an agricultural tractor. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2010;3: 25–30. (in Russ).
14. Rykov SP, Snitsarev AV, Teterin SN. Design, calculation and test results of a wheel mover for low-speed transport. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2013;3(19):84–89. (in Russ).
15. Aldhufairi H, Essa K, Olatunbosun O. Multi-chamber tire concept for low rolling-resistance. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*. 2019;12(2):111–126. doi: 10.4271/06-12-02-0009
16. Aldhufairi HS, Olatunbosun OA, Essa K. Multi-chamber tyre designing for fuel economy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2020;234(2–3):522–535. doi: 10.1177/0954407019857026 .
17. Novikov VV, Pozdeev AV, Chernyshov KV, et al. The main directions of development of wheel structures with pneumatic tires. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost i transport*. 2021;4(37):38–44. (in Russ).
18. Novikov VV, Ryabov IM. Experimental technique (with bench tests of suspensions and wheels of ATS): textbook. Volgograd: VolgGTU; 1999. (in Russ).
19. Patent RUS № 161103 / 10.04.2016. Byul. № 10. Kondakov A.E., Ogorodnov S.M. Stend dlya staticheskikh ispytaniy shin. (in Russ). Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=161103&TypeFile=html
20. WFT-CX wheel force and torque sensor. Moscow: SENSORIKA-M; 2022. [internet] (in Russ). Accessed: 27.10.2022. Available from: <http://www.sensorika.com/ru/ispytanie-transportnyh-sredstv/datchik-sily/>
21. Rykov SP. Evaluation of stiffness and absorbing properties of pneumatic tires under complex wheel loading on the example of the action of normal and lateral forces. *Mekhaniki XXI veku*. 2020;19:225–233.
22. Cherepanov LA, Elizarov AA. Stand for testing the grip properties of wheels of passenger cars. *Transportnye sistemy*. 2018. № 4(10). C. 22–26.
23. Pozdeev AV. The device and principle of operation of a single-support hydropulsator vibro-stand: textbook. Volgograd: VolgGTU; 2020.
24. Shchigolev SV. Issledovanie poperechnoy ustoychivosti samokhodnykh selskokhozyaystvennykh mashin [dissertation] Moscow; 2018.
25. Patent RUS № 2765194 / 26.01.2022. Byul. № 3. Ryabov IM, Pozdeev AV, Novikov VV, et al. Stend dlya ispytaniya pnevmaticheskikh shin i uprugikh elementov podvesok transportnykh sredstv. Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765194&TypeFile=html
26. Patent RUS № 2765315 / 28.01.2022, Byul. № 4. Ryabov IM, Pozdeev AV, Novikov VV, et al. Stend dlya ispytaniya pnevmaticheskikh shin i uprugikh elementov podvesok transportnykh sredstv. Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765315&TypeFile=html
27. Patent RUS № 2765318 / 28.01.2022. Byul. № 4. Novikov VV, Pozdeev AV, Ryabov IM, et al. Stend dlya ispytaniya pnevmaticheskikh shin i uprugikh elementov podvesok transportnykh sredstv. Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765318&TypeFile=html
28. Patent RUS № 2765510 / 31.01.2022. Byul. № 4. Ryabov IM, Pozdeev AV, Novikov VV, et al. Stend dlya ispytaniya

пневматических шин и упругих элементов подвесок транспортных средств. Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765510&TypeFile=html

29. Patent RUS № 2765583 / 01.02.2022. Byul. № 4. Pozdeev AV, Ryabov IM, Novikov VV, et al. Stend dlya ispytaniya pnevmaticheskikh shin i uprugikh elementov podvesok transportnykh sredstv. Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2767459&TypeFile=html

ОБ АВТОРАХ

* Поздеев Алексей Владимирович,

канд. техн. наук,
доцент кафедры «Автоматические установки»;
адрес: Российская Федерация, 400005, Волгоград,
пр-т им. Ленина, д. 28;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3144-3619>;
eLibrary SPIN: 5559-5294;
e-mail: pozdeev.vstu@gmail.com

Новиков Вячеслав Владимирович,

профессор, д-р техн. наук,
профессор кафедры «Автоматические установки»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0917-781X>;
eLibrary SPIN: 5698-1330;
e-mail: nvv_60@mail.ru

Еронтаев Виталий Викторович,

старший преподаватель кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей»;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5822-1062>;
eLibrary SPIN: 6082-2040;
e-mail: akademia.avt@yandex.ru

Чумаков Дмитрий Андреевич,

канд. техн. наук,
инженер кафедры «Автоматические установки»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3958-128X>;
eLibrary SPIN: 4856-4448;
e-mail: chda1991@yandex.ru

Колесов Николай Михайлович,

аспирант кафедры «Автоматические установки»;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2377-5863>;
eLibrary SPIN: 3653-6177;
e-mail: kolesov.nikolay2017@yandex.ru

Тимошин Николай Валерьевич,

аспирант кафедры «Автоматические установки»;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6890-2854>;
eLibrary SPIN: 2327-9267;
e-mail: titan_34rus@mail.ru

Кагочкин Тимофей Александрович,

студент кафедры «Автоматические установки»;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8944-1175>;
eLibrary SPIN: 2758-8598;
e-mail: tkagochkin@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку

[fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765583&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2765583&TypeFile=html)

30. Patent RUS № 2767459 / 17.03.2022. Byul. № 8. Novikov VV, Pozdeev AV, Ryabov IM, et al. Stend dlya ispytaniya pnevmaticheskikh shin i uprugikh elementov podvesok transportnykh sredstv. Accessed: 08.11.2022. Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2767459&TypeFile=html

AUTHORS' INFO

* Alexey V. Pozdeev,

Cand. Sci. (Tech.),
Associate Professor of the Automatic Units Department;
address: 28 Lenina avenue, 400005 Volgograd,
Russian Federation;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3144-3619>;
eLibrary SPIN: 5559-5294;
e-mail: pozdeev.vstu@gmail.com

Vyacheslav V. Novikov,

Professor, Dr. Sci. (Tech.),
Professor of the Automatic Units Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0917-781X>;
eLibrary SPIN: 5698-1330;
e-mail: nvv_60@mail.ru

Vitaly V. Erontaev,

Senior Lecturer of the Technical Operation and Repair of Vehicles Department;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5822-1062>;
eLibrary SPIN: 6082-2040;
e-mail: akademia.avt@yandex.ru

Dmitry A. Chumakov,

Cand. Sci. (Tech.),
Engineer of the Automatic Units Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3958-128X>;
eLibrary SPIN: 4856-4448;
e-mail: chda1991@yandex.ru

Nikolay M. Kolesov,

Postgraduate of the Automatic Units Department;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2377-5863>;
eLibrary SPIN: 3653-6177;
e-mail: kolesov.nikolay2017@yandex.ru

Nikolay V. Timoshin,

Postgraduate of the Automatic Units Department;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6890-2854>;
eLibrary SPIN: 2327-9267;
e-mail: titan_34rus@mail.ru

Timofey A. Kagochkin,

Student of the Automatic Units Department;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8944-1175>;
eLibrary SPIN: 2758-8598;
e-mail: tkagochkin@mail.ru

* Corresponding author