

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 629.3.032

Экспериментальное исследование тепловой нагруженности безопасных колес*

Г.П. Еремин, А.Б. Карташов, А.А. Смирнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Experimental research of run flat tire thermal load

G.P. Yeremin, A.B. Kartashov, A.A. Smirnov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: eremin@bmstu.ru, kartashov@bmstu.ru, smr_a@mail.ru



Колесо с пневматической шиной, оснащенное внутренним колесным упором, является одной из наиболее эффективных систем, предназначенных для предотвращения аварии после резкого падения давления воздуха в шине, а также для сохранения подвижности автомобиля с целью последующего передвижения к месту стоянки и ремонта. Наиболее востребованы такие конструкции на военной технике, где существует вероятность поражения шины пулями, осколками снарядов или брони, что резко снижает подвижность боевой колесной машины (КМ). Длительное движение на поврежденной шине с колесным упором при сохранении таких характеристик как скорость, управляемость и проходимость КМ невозможно из-за влияния комплекса факторов, приводящих к разрушению шины и упора. В литературе практически отсутствует описание экспериментов по определению степени влияния различных факторов на разрушение колесного упора для построения теории, позволяющей прогнозировать долговечность конструкции при различных режимах ее работы. Выполнена экспериментальная оценка тепловой нагруженности шины, оборудованной внутренним колесным упором (вставкой безопасности, внутренней опорой) и работающей без избыточного давления в ведущем режиме качения колеса. Испытания проведены на опытном образце штурмового бронированного специального автомобиля «Ансырь» полной массой 4 т до разрушения одной из конструкций. В процессе исследования определено температурное поле безопасного колеса, оценен ресурс вставки безопасности при движении в заданном режиме. Установлено, что при данных условиях движения спущенной шины со вставкой безопасности наиболее нагруженным элементом ее конструкции является боковина, в которой вследствие интенсивных деформаций наблюдаются самые высокие значения температуры. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о характере нагружения безопасного колеса в ведущем режиме качения. Полученные результаты могут быть использованы для усовершенствования конструкции.

Ключевые слова: шина, вставка безопасности, внутренний колесный упор.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

i A pneumatic tire wheel equipped with a run flat unit is one of the most effective systems designed to prevent accidents after an instant depressurization, as well as to keep the mobility of the vehicle in order to move to a parking lot or repair station. Such designs are demanded in military vehicles, where a probability of tire destruction by bullets or shrapnel exists. This problem drastically reduces the mobility of Tactical Wheeled Vehicles. Sustained movement with a damaged tire equipped with a run flat system while maintaining such characteristics as speed, controllability and passability is impossible due to a number of factors leading to the destruction of the tire and the run flat system. At present, the number of experiments aimed at determining the level of influence of various factors on the destruction of the wheel is insufficient. There is no theory that can predict durability of the structure. In this study, an experimental assessment of thermal load of tire equipped with a run flat system working in master rolling mode is made. Tests were conducted until the destruction of one run flat system on «Ansyр» — prototype of special armored assault vehicle with full weight of 4 tons. Determination of temperature field of the tire and run flat system was made. The study evaluated durability of the given run flat and tire system. According to the test results it can be concluded that the most loaded element of the tire is the sidewall, which experiences the maximum temperature due to the intense deformations. The analysis of the data leads to the conclusion about the run flat wheel loading in master rolling mode. The results can be used to improve the design of run flat systems.

Keywords: tire, safety tire insert, run flat system.

Современная пневматическая шина — сложная многослойная композиционная конструкция, основным недостатком которой является низкая надежность, обусловленная высокой вероятностью нарушения герметичности газонаполненной оболочки в процессе эксплуатации автомобиля [1]. Для предотвращения аварии после резкого падения давления воздуха в шине, а также сохранения подвижности автомобиля для последующего передвижения к месту стоянки и ремонта, как правило, совместно с пневматической шиной применяют специальные внутренние опоры (внутренние упоры, или вставки безопасности). Большинство конструкций внутренних колесных упоров предназначены для монтажа внутри шины и обеспечивают частичное или полное сохранение подвижности колесной машины (КМ) при повреждении газонаполненной оболочки [2–4]. Наиболее востребованы такие конструкции на военной технике, где существует вероятность поражения шины пулями, осколками снарядов или брони, что резко снижает подвижность боевой КМ [5].

Длительное движение на поврежденной шине с колесным упором при сохранении таких характеристик как скорость, управляемость и проходимость КМ невозможно из-за влияния комплекса факторов (высокое тепловыделение после начала работы вставки, фрикционные явления в контакте шины и вставки, высокие динамические нагрузки и др. [6]), приводящих к разрушению шины и упора. Оценка степени влияния каждого из факторов на работоспособность шины при разных режимах качения

колеса представляет сложную задачу, решение которой необходимо для разработки расчетного метода прогнозирования безотказности и долговечности конструкции [7]. В настоящее время в литературе практически отсутствует описание экспериментов по определению степени влияния различных факторов на разрушение колесного упора для построения теории, прогнозирующей долговечность конструкции при разных режимах ее работы.

Важной характеристикой боевой КМ также является ее инфракрасная заметность [8]. Исследование особенностей разогрева колеса в сборе со вставкой безопасности, работающего без избыточного давления воздуха в шине, позволит определить способы понижения тепловой заметности КМ.

Цель работы — экспериментальная оценка тепловой нагруженности шины, оборудованной вставкой безопасности и работающей без избыточного давления в ведущем режиме качения колеса, для последующего совершенствования математической модели данного процесса и разработки предложений по совершенствованию конструкции.

Объектом натурных испытаний является шина Michelin 11.00 R16 XZL TL 135K MI.

Характеристики испытываемой шины

Обозначение Michelin 11.00 R 16 XZL TL 135K MI
 Тип Радиальная цельнометаллокордная шина
 Нагрузка на ось при одинарной ошиновке, кг 2 037
 Давление (при одинарной ошиновке), бар 4
 Ширина сечения, мм 287

Свободный диаметр, мм	984
Ширина сечения под нагрузкой, мм	319
Глубина рисунка протектора, мм	17,5

Шина оснащена вставкой безопасности (внутренней опорой), разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Колесные машины» (рис. 1). Вставка безопасности предназначена для установки на продольно разборный обод и для удобства монтажа в колесе состоит из трех одинаковых сегментов, соединяемых между собой болтами. Вставка имеет кольцевые упоры, надежно прижимающие борта шины к бортовым закраинам обода в процессе сборки колеса. Такая конструкция обеспечивает передачу момента шиной даже при отсутствии в ней избыточного давления.

Испытания проводились на опытном образце штурмового бронированного специального автомобиля «Ансырь» полной массой 4 т. Нагрузка на заднюю ось автомобиля составила 2 037 кг. Условия испытаний представлены далее.

Условия испытаний

Объект испытаний	Безопасное колесо с шиной 11.00 R16 и внутренней опорой
Тип покрытия	Асфальт
Максимальная температура воздуха в тени, °С ...	+26,8
Максимальная влажность воздуха, %	43
Максимальное атмосферное давление, мм рт. ст. . .	756

Температурное поле шин определялось с помощью тепловизора Fluke Ti27, предназначенного для регистрации распределения температуры на поверхности объектов в реальном времени (рис. 2).

Основные характеристики тепловизора Fluke Ti27 [9]

ИК-разрешение (размер FPA)	160×120 FPA, неохлаждаемый микроболометр
Спектральный диапазон, мкм	7,5–14 (длинноволновый)
Частота кадров, Гц	9
NETD (тепловая чувствительность) при температуре объекта 30 °С (50 мК), °С	≤ 0,05

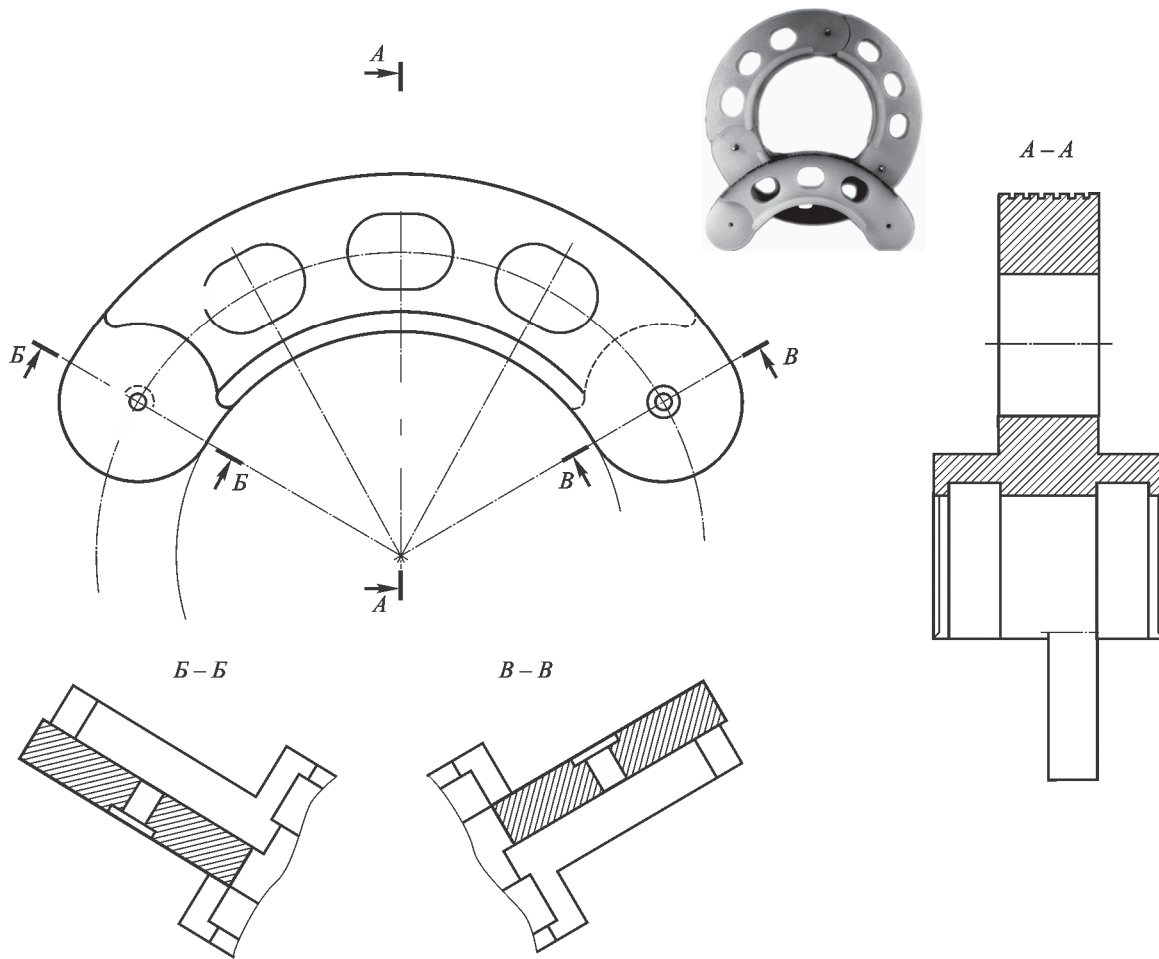


Рис. 1. Вставка безопасности, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана



Рис. 2. Тепловизор Fluke Ti27

Поле зрения (FOV), град 23 (Г)×17 (В)
 Пространственное разрешение (IFOV), мрад 1,67
 Диапазон измеряемых температур, °С -20–+600
 Погрешность измерения температуры. ±2 °С (2 %)

Для обработки данных, получаемых в ходе испытаний, использовали программу Fluke Smart View 3.5, которая предназначена для качественного и количественного анализа термограмм объектов, пастоенных с помощью различных тепловизионных систем.

Результаты измерений анализировали по следующим данным:

- цветная термограмма;
- статистика по выбранной области (максимум, минимум, среднее значение).

Для проведения испытаний была разработана методика оценки тепловой нагруженности боестойких шин с внутренней опорой. Основные пункты методики испытаний включают предварительный прогрев испытуемых шин при номинальном давлении, метод определения температурного поля шины с помощью тепловизора из автомобиля, движущегося совместно с испытуемым, а также описание режимов движения. Испытания боестойких шин с внутренней опорой проводили в соответствии с данной методикой.

Перед испытаниями в шинах колес задней оси КМ были смонтированы вставки безопасности из материалов на основе полиуретанов [10]: из менее упругого полиуретана в левом колесе и из более упругого полиуретана в правом колесе.

Для снижения интенсивности износа и разрушения внутренней поверхности шины при взаимодействии со вставкой в зону контакта был нанесен лубрикант. Для оценки влияния лубриканта на работоспособность конструкции к левому и правому колесам в сборе со вставкой использовали смазку, нанесенную по разным схемам. В правом колесе была смазана только

беговая дорожка вставки, а в левом — вся поверхность шины. Для снижения трения между вставками и шинами наносили синтетическую пластичную смазку Huskey™ Lube-O-Seal [11].

Испытания проводили до разрушения вставки безопасности. В ходе обработки термограмм оценивали температуру нагрева поверхности следующих элементов шины: протектора, плечевой зоны, боковины, борта. Температуру колес замеряли во время движения из автомобиля, передвигающегося рядом с испытуемой КМ.

Температурный режим шин определяли при начальном номинальном давлении воздуха в них $p_b = 4$ атм. Шины прогревали при скорости движения 30...40 км/ч в течение 10 мин. После прогрева и остановки автомобиля давление в шинах задней оси снижалось до атмосферного. Статический прогиб шин при этом составил 117 мм.

Тепловую нагруженность шин боестойких колес исследовали при движении КМ по асфальтовому покрытию со средней скоростью 35 км/ч без избыточного давления воздуха в шинах заднего моста и номинальном давлении $p_b = 4$ атм в шинах переднего моста (рис. 3).

В результате проведения испытаний установлено, что в первые минуты движения автомобиля происходит интенсивный разогрев шин. Постепенно скорость разогрева шин уменьшается по мере достижения их поверхности состояния термодинамического равновесия с окружающей средой. Максимальная температура по окончании движения наблюдалась в зоне боковины и достигала 91 °С перед разрушением левой вставки. Средние температуры поверхности шины при этом составляли: 55,4 °С в области протектора; 68 °С в плечевой зоне; 82 °С в зоне боковины и 66 °С в зоне борта. После разрушения вставки температура шины стремительно увеличивалась, наблюдалось дымление. Максимальная температура поверхности колеса достигала 116 °С уже через 11 мин

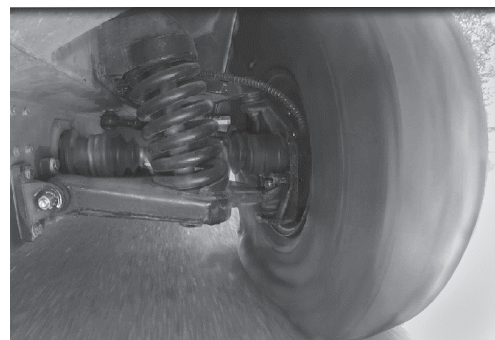


Рис. 3. Деформация безопасного колеса с колесным упором

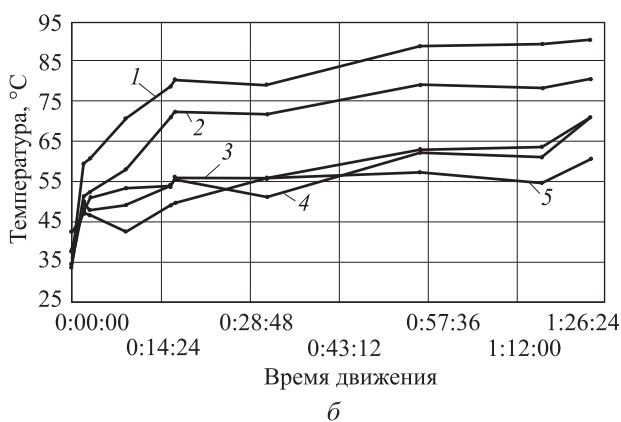
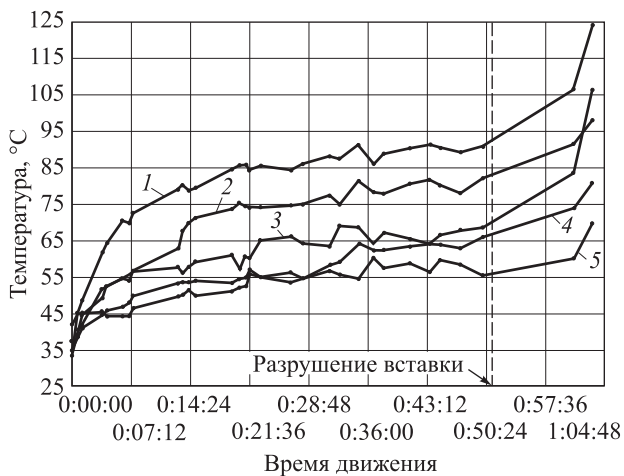


Рис. 4. Изменение температуры поверхности:
 а — левая шина; б — правая шина; 1 — температура максимальная; 2 — средняя температура боковины; 3 — средняя температура плечевой зоны; 4 — средняя температура борта; 5 — средняя температура протектора

после выхода вставки из строя, в связи с чем было принято решение остановить испытания. Автомобиль преодолел расстояние 46 390 м

перед заменой левого колеса. Для определения пути, пройденного КМ в процессе испытания, использовали GPS регистратор. Перед остановкой максимальная температура поверхности правой шины (89 °С) достигалась в зоне боковины. Средние температуры поверхности шины при этом составили: 55 °С в области протектора; 64 °С в плечевой зоне; 78 °С в зоне боковины и 61 °С в зоне борта.

Полученные при проведении испытаний термограммы, а также значения температур в различных условных зонах шины в зависимости от времени движения представлены на рис. 4 и в таблице. На рисунке видно, что при движении по асфальтовому покрытию тепловая нагруженность боковины шины значительно выше, чем температура других ее областей.

После разрушения левой вставки испытания проводили при отсутствии избыточного давления только в правой шине и без замеров температуры. Движение продолжалось в течение 30 мин со скоростью 60 км/ч с ускорениями до 90 км/ч. Дополнительный пробег правой вставки из менее упругого и более прочного полиуретана составил 37 900 м. Разрушения вставки безопасности правого колеса не произошло.

По окончании испытаний оба испытуемых колеса были разобраны, вставки демонтированы. Повреждений на внешней поверхности шин не обнаружено. На внутренней поверхности обеих шин имелись значительные повреждения, однако обугливания их внутренней поверхности и поверхности опор не было. Фотографии шин после испытаний приведены на рис. 5.

**Динамика разогрева шин
 в зависимости от времени движения**

Шина	Время движения				
	1 мин	8 мин	16 мин	30 мин	55 мин
Левая					
Правая					

(полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

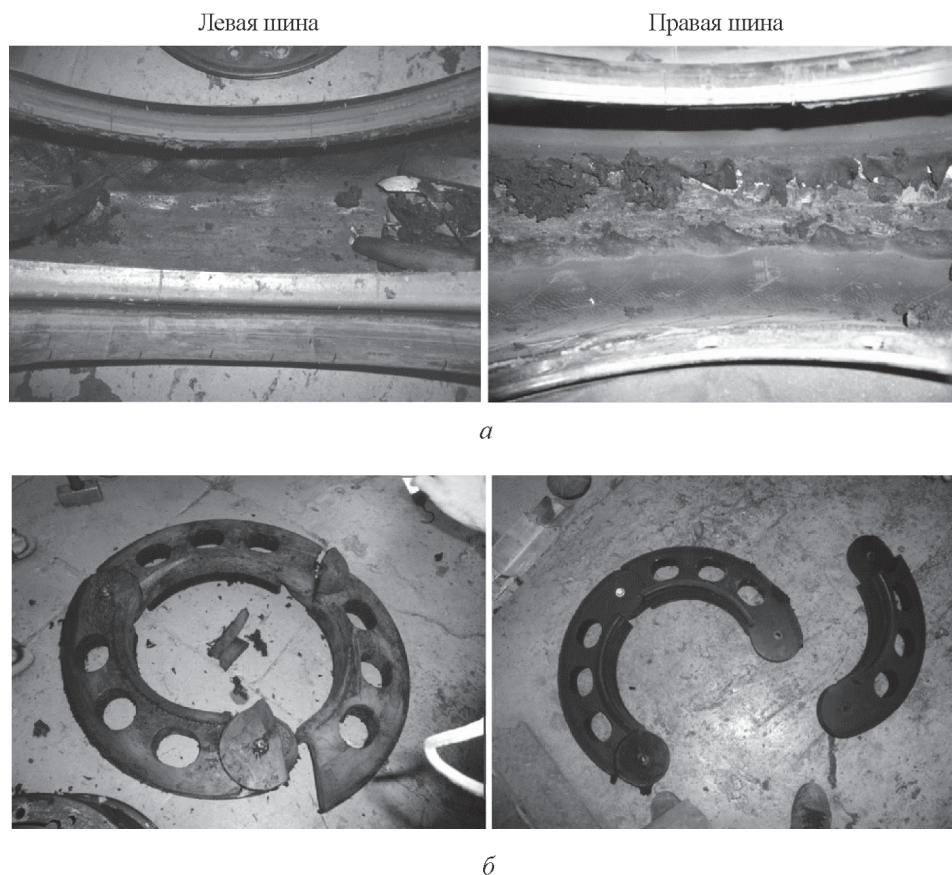


Рис. 5. Фотографии после испытаний:
а — внутренняя поверхность шин; б — вставки

Из результатов испытаний можно сделать вывод, что при данных условиях движения спущенной шины со вставкой безопасности наиболее нагруженным элементом ее конструкции является боковина, в которой из-за интенсивных деформаций наблюдаются самые высокие значения температуры. В то же время необходима корректировка результатов натурных испытаний с учетом внешних воздействующих факторов, которые неизбежно приводят к неточностям при определении вклада конструктивных и эксплуатационных параметров в тепловую нагруженность боестойкой шины и внутренней опоры.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что шины в области боковины нагреваются значительно интенсивнее, чем в области протектора при движении без избыточного давления. Полученные результаты свидетельствуют о том, что деформации в контакте с опорной поверхностью оказывают меньшее влияние на тепловую нагруженность шины, чем изгибные деформации, возникающие в элементах боковины, а наиболее теплонагруженным элементом шин является плечевая зона, особенно боковина. Приращение

температуры в этой области на 100...120 % выше, чем по протектору, что свидетельствует о ее бóльшей силовой нагруженности. Значения температуры шины до выхода из строя вставки соответствуют требованиям нормативных документов Министерства обороны РФ (температура колеса не должна превышать 110 °С).

Левая вставка разрушилась в областях соединения ее сегментов, где конструкция имеет наименьшую толщину и концентраторы напряжений, создаваемые болтовым соединением. Поскольку обугливания беговой дорожки вставки и внутренней поверхности шины не произошло, можно сделать вывод, что разрушение шин было вызвано не температурой разогрева, а в результате износа в контакте между вставкой безопасности и внутренней поверхностью шины. Внутренняя поверхность левой шины, полностью смазанная лубрикантом, была повреждена значительно сильнее, чем внутренняя поверхность правой шины. Можно предположить, что это произошло в результате воздействия на нее обломков разрушенной вставки.

Выводы

1. При движении спущенной шины со вставкой безопасности наиболее нагруженным элементом ее конструкции является боковина.

2. Разрушение вставки наблюдается в областях соединения ее сегментов, где конструкция имеет наименьшую толщину и концентраторы напряжений, создаваемые болтовым соединением.

Литература

- [1] Евзович В.Е., Райбман П.Г. *Автомобильные шины, диски и ободья*. Москва, Автополис-плюс, 2010. 144 с.
- [2] William W. Gardetto. *Run-flat support assembly for a pneumatic tired wheel and method of use of same*. Patent US20100071824, 2009.
- [3] Richard A. Steinke, Theodore M. Love, James G. Moore. *Run flat tire insert system*. Patent US7398809, B60C 17/04, 2007.
- [4] Rick Tabor, Jimenez Patricio, Wayne Wilkomm, Priester Ralph, Martin Cornell, Chris Christenson, Kimberly Bennett, Peder Danielsen, Jeffery Zawisza. *Run flat tire support and reinforcement member therefor*. Patent US20020157752, B60C 17/00, 2001.
- [5] Полонский В.А., ред. *Тенденции развития зарубежной военной автомобильной техники*. Москва, Редакционно-издательский центр Министерства обороны РФ, 2005. 176 с.
- [6] *All terrain runflat (ATR)* (2010). URL: <http://www.tyron.com/tyron-products-extended-runflat.htm> (дата обращения 09 декабря 2014).
- [7] Абрамов В.Н., Аипов Т.А. Модель расчетной оценки параметров проходимости армейского автомобиля при повреждении колесного движителя. *Сб. докл. 22 симп. Проблемы шин и резинокордных композитов*. Москва, ООО «Научно-технический центр «НИИШП», 2011, с. 49–57.
- [8] Бабакин А.Н. Повышение живучести военной автомобильной техники применением современных боестойких автомобильных шин. *Матер. Междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ»*. Кн. 1. Москва, МГТУ «МАМИ», 2010, с. 22–28.
- [9] *Ti32, TiR32, Ti29, TiR29, Ti27, TiR27 Thermal Imagers* (2015). URL: http://assets.fluke.com/manuals/Ti32___umrus0100.pdf (дата обращения 22 декабря 2014).
- [10] Белкин А.Е., Даштиев И.З., Хоминич Д.С. Анализ статического нагружения амортизатора специального назначения из полиуретана. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, спец. вып. № 6, 2012, с. 13–26.
- [11] *Product information Huskey™ Lube-O-Seal Pure-Synthetic PTFE Grease* (2015). URL: http://www.huskey.ru/TPI/HUSKEY%20LUBE-O-SEAL%20PTFE%20Grease_Rus.pdf (дата обращения 21 января 2015).

References

- [1] Evzovich V.E., Raibman P.G. *Avtomobil'nye shiny, diski i obod'ia* [Car tires, wheels and rims]. Moscow, Avtopolis-plus publ., 2010. 144 p.
- [2] William W. Gardetto. *Run-flat support assembly for a pneumatic tired wheel and method of use of same*. Patent US20100071824, 2009.
- [3] Richard A. Steinke, Theodore M. Love, James G. Moore. *Run flat tire insert system*. Patent US7398809, B60C 17/04, 2007.
- [4] Rick Tabor, Jimenez Patricio, Wayne Wilkomm, Priester Ralph, Martin Cornell, Chris Christenson, Kimberly Bennett, Peder Danielsen, Jeffery Zawisza. *Run flat tire support and reinforcement member therefor*. Patent US20020157752, B60C 17/00, 2001.
- [5] *Tendentsii razvitiia zarubezhnoi voennoi avtomobil'noi tekhniki* [Trends in the development of foreign military vehicles]. Ed. Polonskii V.A. Moscow, Redaktsionno-izdatel'skii tsentr Ministerstva Oborony RF publ., 2005. 176 p.
- [6] *All terrain runflat (ATR)* (2010). Available at: <http://www.tyron.com/tyron-products-extended-runflat.htm> (accessed 09 December 2014).

- [7] Abramov V.N., Aipov T.A. Model' raschetnoi otsenki parametrov prokhodimosti armeiskogo avtomobilia pri povrezhdenii kolesnogo dvizhitelia [The model estimates the estimated parameters cross army car is damaged the wheel propulsion]. *Sbornik dokladov 22 Simpoziuma «Problemy shin i rezinokordnykh kompozitov»* [Collection of reports 22 Symposium «Problems of tires and rubber-cord composites»]. Moscow, OOO «Nauchno-tehnicheskii tsentr «NIIShP» publ., 2011, pp. 49–57.
- [8] Babakin A.N. Povyshenie zhivuchesti voennoi avtomobil'noi tekhniki primeneniem sovremennykh boestoykikh avtomobil'nykh shin [Increase the survivability of military vehicles using modern boestoykikh tires]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii Assotsiatsii avtomobil'nykh inzhenerov (AAI) «Avtomobile- i traktorostroenie v rossii: priority razvitiia i podgotovka kadrov», posviashchennoi 145-letiiu MGTU «MAMI»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of the Association of Automotive Engineers (AAI) «Automobile and Tractor in Russia: Development Priorities and training», dedicated to the 145th anniversary of Moscow State Technical University «MAMI»]. Moscow, MSTU (MAMI) publ., book 1, 2010, pp. 22–28.
- [9] *Ti32, TiR32, Ti29, TiR29, Ti27, TiR27 Thermal Imagers* (2015). Available at: http://assets.fluke.com/manuals/Ti32_____umrus0100.pdf (accessed 22 December 2014).
- [10] Belkin A.E., Dashtiev I.Z., Khominich D.S. Analiz staticheskogo nagruzheniia amortizatora spetsial'nogo naznachenii iz poliuretana [Analysis of static loading damper special purpose polyurethane]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State State Technical University. Mechanical Engineering]. 2012, special iss. no. 6, pp. 13–26.
- [11] *Product information Huskey™ Lube-O-Seal Pure-Synthetic PTFE Grease* (2015). Available at: http://www.huskey.ru/TPI/HUSKEY%20LUBE-O-SEAL%20PTFE%20Grease_Rus.pdf (accessed 21 January 2015).

Статья поступила в редакцию 12.02.2015

Информация об авторах

ЕРЕМИН Георгий Петрович (Москва) — аспирант кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: eremin@bmstu.ru).

КАРТАШОВ Александр Борисович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kartashov@bmstu.ru).

СМИРНОВ Александр Анатольевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: smr_a@mail.ru).

Information about the authors

YEREMIN Georgy Petrovich (Moscow) – Postgraduate, Department of Wheel Vehicles. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: eremin@bmstu.ru).

KARTASHOV Alexander Borisovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Wheel Vehicles. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kartashov@bmstu.ru).

SMIRNOV Alexander Anatolievich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Wheel Vehicles. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: smr_a@mail.ru).