

УДК (UDC) 62-254

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ БЕЗВОЗДУШНЫХ ШИН ИЗ ЭЛАСТИЧНЫХ
ПОЛИУРЕТАНОВMODELING AND CALCULATION OF AIRLESS TIRES FROM ELASTIC
POLYURETHANESМазур В.В.
Mazur V.V.Братский государственный университет (Братск, Россия)
Bratsk State University (Bratsk, Russian Federation)

Аннотация. Известный недостаток пневматических шин, заключающийся в потере их работоспособности при сквозных механических повреждениях, определяет необходимость поиска принципиально новых конструктивных решений автомобильных колёс для повышения безопасности автомобилей и живучести специальной колёсной техники, одним из которых является применение безвоздушных шин из эластичных полимерных материалов. На кафедре машиностроения и транспорта Братского государственного университета созданы экспериментальные образцы колёс с безвоздушными шинами из эластичных полиуретанов отечественного производства для легкового автомобиля малого класса. Теоретическая оценка упругих свойств, несущей способности и силовой неоднородности экспериментальных образцов осуществлялась методом конечных элементов с использованием созданных электронных твёрдотельных геометрических моделей безвоздушных шин, атрибуты которых соответствуют номинальным параметрам физических моделей автомобильных колёс. Для нелинейного статического анализа были приняты нелинейные упругие изотропные модели полиуретановых эластомеров. Результатами расчёта являются характеристики нормальной жёсткости безвоздушных шин и графики колебаний нормальной силы при постоянном нормальном прогибе в разных положениях колёс относительно своих центральных поперечных плоскостей. Результаты теоретических исследований могут быть востребованы изготовителями колёсной техники и тракторов, строительных и дорожных машин, спецавтотранспорта и колёсных планетоходов.

Ключевые слова: непневматические шины, метод конечных элементов, полиуретановые эластомеры, жёсткость, механическая характеристика, нелинейный анализ.

Дата принятия к публикации: 24.12.2019
Дата публикации: 25.03.2020

Abstract. A well-known disadvantage of pneumatic tires is the cessation of the ability to work with mechanical damage through and determines the need to search for fundamentally new design solutions for automobile wheels to increase the safety of automobiles and the survivability of wheeled vehicles. One such solution is the use of airless tires made of elastic polymeric materials. The Department of Mechanical Engineering and Transport of the Bratsk State University has developed full-scale models of wheels with airless tires made of elastic polyurethanes of Russian production for a car. The theoretical evaluation of the resilientible properties, load capacity and force heterogeneity of the experimental models was carried out by the finite element method. Electronic solid-state geometric models of airless tires have been created. Attributes of electronic models correspond to the nominal parameters of the physical models of automobile wheels. Nonlinear elastic isotropic models of polyurethane elastomers were adopted for nonlinear static analysis. The characteristics of the normal suppleness of airless tires and the graphs of oscillations of normal force with constant normal deflection in different positions of the wheels relative to their central transverse planes are the results of finite element modeling and calculation. Theoretical research results may be claimed by manufacturers of wheeled vehicles and tractors, construction and road vehicles, special motor vehicles and wheeled planetary rovers.

Keywords: non-pneumatic tires, finite element method, polyurethane elastomers, normal suppleness, mechanical characteristic, nonlinear analysis.

Date of acceptance for publication: 24.12.2019
Date of publication: 25.03.2020

Сведения об авторе:

Мазур Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент по кафедре «Автомобильный транспорт», доцент кафедры «Машиностроение и транспорт», Братский государственный университет, e-mail: mazurvv@yandex.ru.

ORCID: 0000-0001-9487-3280

**Author information:**

Vladimir V. Mazur – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of Department of mechanical engineering and transport, Bratsk State University, e-mail: mazurvv@yandex.ru.

ORCID: 0000-0001-9487-3280

1. Введение

Появление автомобильных безвоздушных шин, по своим эксплуатационным показателям не уступающим традиционным пневматическим, является важным шагом в направлении повышения безопасности автомобилей и живучести специальной автомобильной техники. Однако к моменту качественного скачка в развитии их конструкции не было накоплено достаточного количества опубликованных научных работ, содержащих теоретические обобщения и позволяющих судить об оптимальности конструкций. Несмотря на это, безвоздушные шины известных компаний, таких как «Юнироял», «Мишлен», «Ресилиент Технолоджис», «Поларис», «Йокогама», «Бриджстоун», «Ханкук», «Тойо», «Боинг», «Америтайр», «Сумитомо» и «Гудьир», имеют научно обоснованные технические решения, полученные в результате теоретических исследований на этапе проектирования.

Значительный вклад в исследование и разработку безвоздушных шин внесли учёные Университета Клемсона (США), работающие совместно с компаниями «Мишлен», «Ошкош», «Гиббс спортс амфибианс», учёными Университета Северного Техаса, Университета Северной Каролины в Шарлотте и Сент-Луисского университета. В их научных работах широко применяется метод конечных элементов для численного моделирования безвоздушных шин.

Так, в работе [1] приведены результаты теоретических исследований гистерезисных потерь и сопротивления качению безвоздушной шины с гибкими спицами, опорное кольцо которой имеет эластичный слой с осевыми полостями гексагональной формы, работающий на сдвиг и изготовленный из материала с низким модулем сдвига.

В работе [2] моделируется динамическое взаимодействие колеса Michelin Lunar Wheel

с песчаным грунтом и каменными препятствиями. Разработанная модель позволяет оценить деформации и локальные напряжения конструктивных элементов безвоздушной шины, прогиб шины и деформацию опорной поверхности, продольные реакции и характер распределения нормального давления в пятне контакта шины с грунтом, вертикальные ускорения ступицы колеса при проезде препятствий с разными скоростями.

Совместная научная работа учёных Университета Клемсона, Университета Северного Техаса и компании «Гиббс спортс амфибианс» [3] направлена на исследование сопротивления качению безвоздушной шины с гибкими радиальными спицами и характера распределения давления в пятне её контакта с опорной поверхностью. По результатам теоретических исследований с помощью разработанной вязкоупругой конечно-элементной математической модели установлено, что для уменьшения сопротивления качению и давления в контакте безвоздушной шины с опорной поверхностью необходимо увеличивать толщину опорного кольца и модуль сдвига эластичного полиуретана, из которого это опорное кольцо изготовлено.

Работа учёных Университета Клемсона и Университета Северной Каролины в Шарлотте [4] посвящена исследованию силовой неоднородности безвоздушной шины, а также вибраций и шума при её качении.

В совместной работе учёных Университета Клемсона и Университета Северного Техаса [5] моделируется безвоздушная шина с гибкими спицами, опорное кольцо которой имеет работающий на сдвиг эластичный слой из пористого материала, армированного углеродистым волокном, и приводятся результаты теоретических исследований её упругих свойств и сопротивления качению.

В работе [6] предлагается модель безвоздушной шины с гибкими спицами, опорное кольцо которой с осевыми полостями рабо-

тает на сдвиг и изготовлено из алюминиевого сплава AL7075-T6.

Не менее значительный вклад в методологию расчёта и проектирования безвоздушных шин внесли учёные Корейского аэрокосмического университета, работающие совместно с учёными компании «Ханкук», Корейского авиационного университета, Университета Северного Техаса и Шанхайского университета транспорта. Например, в их научной работе [7] был применён метод конечных элементов для численного моделирования безвоздушных шин с осевыми полостями гексагональной формы, а в работе [8] – с осевыми полостями трапециидальной формы.

2. Конструктивная схема колеса с безвоздушной шиной

Успехи зарубежных компаний и накопленный опыт создания нетрадиционных колёс [9-14] послужили толчком для изобретательской деятельности, направленной на создание новых конструкций безвоздушных шин. По результатам патентных исследований [15] были предложены новые научно обоснованные технические решения, защищённые патентами на изобретения и группы изобретений [16-25] и реализованные в оригинальной конструкции колеса с безвоздушной шиной, схема которого приведена на рис.1.

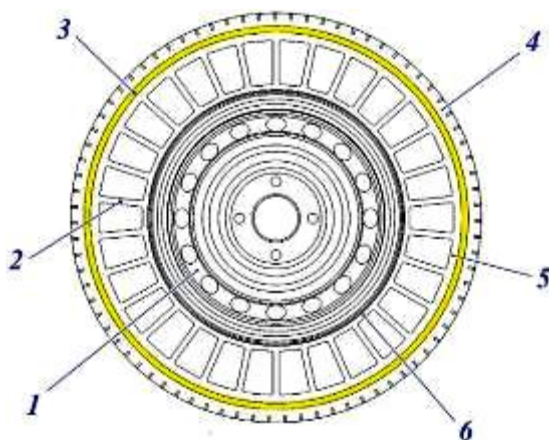


Рис.1. Конструктивная схема колеса с безвоздушной шиной: 1 – колесо дисковое; 2 – гибкие спицы; 3 – опорное кольцо; 4 – протектор; 5 – соединительное кольцо; 6 – посадочное кольцо

Упругое сопротивление и несущая способность безвоздушной шины обеспечиваются гибкими радиальными спицами и опорным кольцом. При этом гибкие полиуретановые спицы под воздействием весовой нагрузки в зоне контакта колеса с опорной поверхностью испытывают продольный изгиб, а в верхней полуокружности безвоздушной шины – находятся в напряжённом состоянии под воздействием растягивающих сил.

Известно, что уменьшение суммарной нормальной жёсткости гибких спиц позволяет снизить силовую неоднородность безвоздушной шины, обусловленную её циклической симметрией, но в ответ это снижает и несущую способность колеса [26].

Предполагается, что компенсировать недостаточное для обеспечения требуемой несущей способности упругое сопротивление гибких спиц в зоне контакта безвоздушной шины с опорной поверхностью и снизить силовую неоднородность колеса при качении возможно применением опорного кольца из полиуретанового эластомера с высоким модулем упругости в сравнении с материалом гибких спиц.

3. Электронные модели колёс с безвоздушными шинами

Для научного обоснования принятого технического решения и оценки влияния геометрических параметров конструктивных элементов безвоздушной шины и физико-механических свойств эластичных полиуретанов на упругие свойства, несущую способность и силовую неоднородность новой конструкции были созданы электронные твердотельные геометрические модели [27] колёс с безвоздушными шинами, представленные на рис. 2.

Модель мономатериальной безвоздушной шины (рис.2, а) описывает изделие из эластичного полиуретана одной марки. Электронная модель трёхматериальной безвоздушной шины (рис. 2, б) позволяет использовать для её конструктивных элементов до трёх марок полиуретановых эластомеров.

Основные атрибуты электронных моделей приведены в табл. 1.

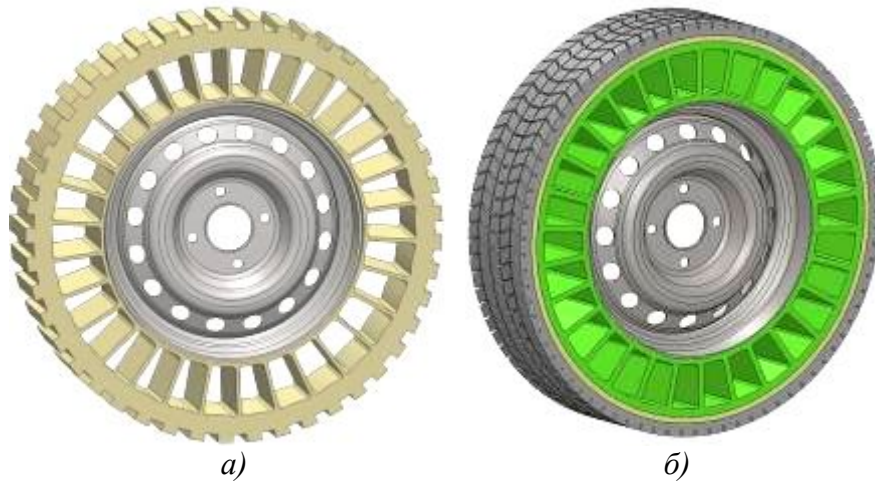


Рис. 2. Электронные модели колёс: а – с мономатериальной безвоздушной шиной; б – с трёхматериальной безвоздушной шиной

Таблица 1

Основные геометрические параметры безвоздушных шин

Наименование параметра	Набор атрибутов электронной модели			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Вид электронной модели	Мономатериальная	Трёхматериальная		
Количество гибких спиц	30			
Толщина гибких спиц, мм	5	8		
Длина гибких спиц, мм	57			
Ширина профиля шины, мм	120			
Высота профиля шины, мм	100			
Габаритный диаметр шины, мм	530			
Посадочный диаметр шины, мм	330			
Толщина опорного кольца, мм	–	8		
Высота рисунка протектора, мм	10	8		

Геометрические параметры электронных моделей соответствуют номинальным параметрам изготовленных натуральных образцов безвоздушных шин [28], результаты испытаний которых [29] позволили уточнить параметры моделирования для нелинейного статического анализа и расчёта выходных характеристик шин методом конечных элементов.

4. Теоретические исследования и оценка упругих свойств, несущей способности и силовой неоднородности безвоздушных шин

В соответствии с ГОСТ 17697-72 [30], одним из параметров, характеризующим

упругие свойства автомобильной шины, является коэффициент её нормальной жёсткости C_z , который определяется как производная действующей на колесо нормальной нагрузки P_z по нормальному прогибу шины h_z :

$$C_z = \frac{\partial P_z}{\partial h_z}. \quad (1)$$

В свою очередь, для определения коэффициента нормальной жёсткости автомобильной шины как одного из параметров, влияющего на плавность хода, в соответствии с ОСТ 37.001.252-82 [31] необходимо построение характеристики радиальной жёсткости. Характеристика радиальной или,

иначе, нормальной жёсткости может быть получена экспериментально в процессе силового нагружения автомобильной шины в направлении нормали к опорной поверхности и условию совпадения плоскости нагружения и плоскости вращения колеса.

Коэффициент нормальной жёсткости C_z определяется по известной методике [30] с учётом масштабов по координатным осям как тангенс угла наклона касательной к средней линии или, иначе, идеальной характеристике нормальной жёсткости автомобильной шины, характеризуемой отсутствием гистерезисного и других видов трения.

Характеристика нормальной жёсткости также позволяет оценить и несущую способность автомобильной шины, используя в качестве оценочного параметра статическую жёсткость:

$$C_g = \frac{P_{z \max}}{h_g}, \quad (2)$$

где $P_{z \max}$ – максимальная весовая нагрузка; h_g – статический прогиб.

Статический анализ и построение характеристик нормальной жёсткости безвоздушных шин были выполнены в программной системе Ansys, использующей технологии численного моделирования, в частности, метод конечных элементов.

Для расчётов выходных характеристик безвоздушных шин методом конечных элементов были использованы характеристики механических свойств полиуретановых эластомеров отечественного производства. Перечень эластичных полиуретанов, по физико-механическим свойствам наиболее подходящих для изготовления безвоздушных шин, ограничен и приведён в табл. 2.

Таблица 2

Перечень эластичных преполимеров для изготовления безвоздушных шин

Конструктивные элементы безвоздушной шины	Набор атрибутов электронной модели			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Гибкие спицы и посадочное кольцо	СКУ-ПФЛ-100, марка В	СУРЭЛ ТФ-235	СУРЭЛ ТФ-235	СУРЭЛ ТФ-228
Опорное кольцо		СУРЭЛ ТФ-228	СУРЭЛ ТФ-682	СУРЭЛ ТФ-682
Протектор				СУРЭЛ ТФ-228

Характеристики механических свойств эластичных полиуретанов определены для одноосного растяжения по ГОСТ 270-75 [32] и для сжатия по ГОСТ ISO 7743-2013 [33]. На рис. 3 приведены механические характеристики, перестроенные для расчётов в системе Ansys таким образом, что зависимость напряжения σ от относительной деформации ε при растяжении имеет отрицательные значения, а при сжатии – положительные.

Для нелинейного статического анализа, характеризуемого большими перемещениями и прогибами конструктивных элементов, были приняты нелинейные упругие изотропные модели материалов безвоздушных шин и линейная упругая изотропная модель материала опорной плиты.

В процессе определения характеристик нормальной жёсткости безвоздушные шины нагружаются только нормальной к опорной поверхности нагрузкой и их боковой деформацией можно пренебречь. Поэтому стереометрические электронные модели (рис. 2) были преобразованы средствами системы Ansys в упрощённые с шириной профиля безвоздушных шин 12 мм.

Дисковые колеса были удалены из электронных моделей и статического анализа, а поверхности безвоздушных шин, взаимодействующие с ободьями этих колёс, неподвижно зафиксированы.

Принятые упрощения позволяют уменьшить число конечных элементов и узлов, а также значительно сократить время расчёта.

Было задано ограничительное условие, при котором стальная опорная плита имеет возможность перемещаться только в направлении вертикальной оси z [30] (y в системе

Ansys) под воздействием на её нижнюю поверхность нормальной нагрузки P_z .

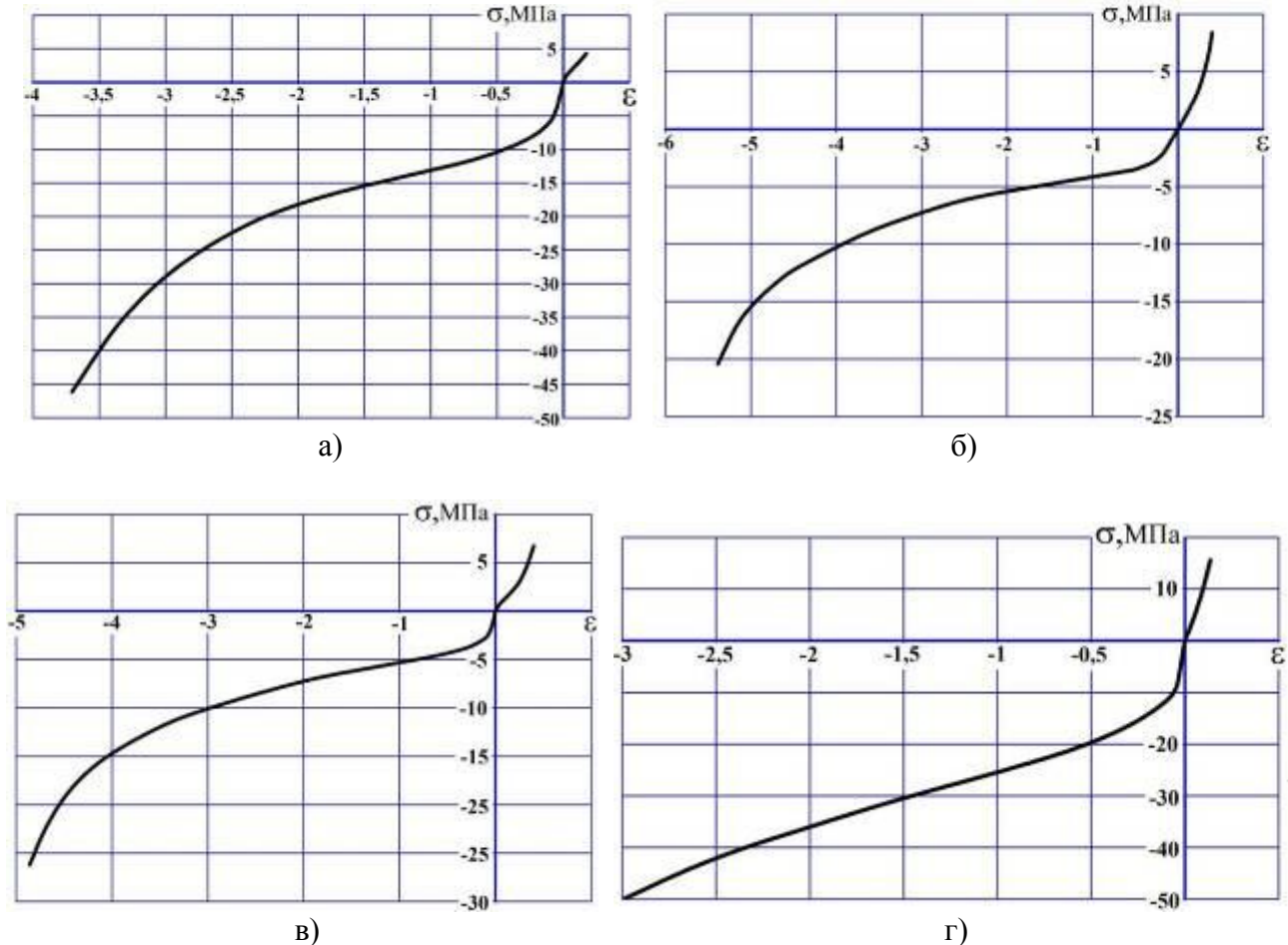


Рис. 3. Механические характеристики эластичных полиуретанов:

а – СКУ-ПФЛ-100; б – СУРЭЛ ТФ-228 с отвердителем МОСА;

в – СУРЭЛ ТФ-235 с отвердителем МОСА; г – СУРЭЛ ТФ-682 с отвердителем Урелинк-107

Исключено взаимное проникновение верхней поверхности опорной плиты и беговой дорожкой протектора, а также других поверхностей конструктивных элементов безвоздушной шины. Для трёхматериальных электронных моделей опорное кольцо, протектор и спицы безвоздушной шины были объединены в единое целое, что позволило использовать общую для них конечно-элементную сетку.

На рис. 4 и 5 приведены упрощённые электронные модели безвоздушных шин, а в табл. 3 – параметры их конечно-элементных сеток. Комбинированные сетки конечных элементов были сгенерированы системой

Ansys автоматически в зависимости от формы и размеров конструктивных элементов.

Исследования выполнялись при заданном максимальном значении вертикального перемещения опорной плиты $h_{z\ max} = 40$ мм. Однако расчёт автоматически прекращался при вертикальном перемещении плиты до 35 мм, так как системой Ansys не предусмотрено ограничение взаимного проникновения частей одной и той же поверхности, в частности, верхней и нижней частей внутренней поверхности гибкой спицы при её большом прогибе.

Общее время нагружения, которое при принятых упругих изотропных моделях мате-

риалов является условным, $t = 1$ секунда. Расчёт осуществлялся итерационным методом Ньютона-Рафсона как с постоянным ($\Delta t = 0,01$

с), так и автоматическим ($\Delta t = 1 \times 10^{-8} \dots 0,1$ с) псевдвременными интервалами.

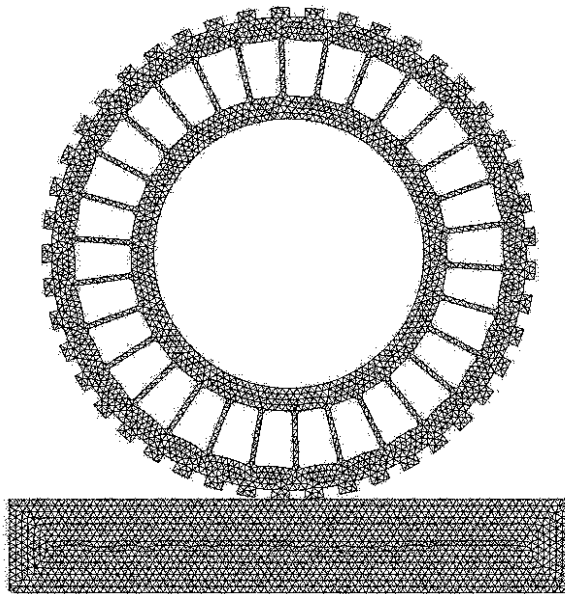


Рис. 4. Плоская электронная модель мономатериальной безвоздушной шины

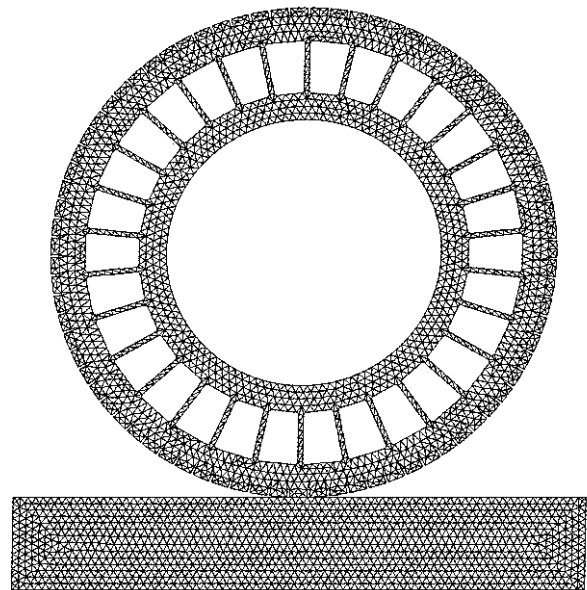


Рис. 5. Плоская электронная модель трёхматериальной безвоздушной шины

Таблица 3

Параметры конечно-элементных сеток электронных моделей безвоздушных шин

Параметры	Набор атрибутов электронной модели			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Количество элементов	6151	5753	5586	
Количество узлов	13676	12950	12521	
Количество степеней свободы	40486	38328	37049	

Нагружение безвоздушной шины нормальной нагрузкой осуществлялось при разных её положениях относительно центральной поперечной плоскости. Эти положения задавались величиной угла между центральной поперечной плоскостью и продольной осью одной из гибких спиц. Угловой диапазон – $\alpha_k = 0 \dots 360^\circ / N$, где число гибких спиц безвоздушной шины $N = 30$.

Для примера на рис. 6 приведена деформированная форма безвоздушной шины, полученная в процессе статического анализа при $\alpha_k = 0^\circ$, что соответствует вертикальному положению выбранной гибкой спицы. В соответствии с задачами исследования результатами расчёта являются характеристики нормальной жёсткости безвоздушных шин и графики колебаний нормальной силы при

постоянном нормальном прогибе в разных положениях колёс относительно своих центральных поперечных плоскостей. Угловой шаг $\Delta\alpha_k = 2^\circ$.



Рис. 6. Безвоздушная шина

Расчётные характеристики нормальной жёсткости безвоздушных шин представляют собой кривые зависимости нормальной нагрузки от нормального прогиба в процессе нагружения, что обусловлено характером взятых для расчёта механических характеристик эластичных полиуретанов. Кривые зависимости нагрузки от прогиба при разгрузке не рассчитываются.

При построении графиков колебаний нормальной нагрузки прогиб безвоздушной шины определяется начальной величиной этой нагрузки $P_z = 3$ кН, соответствующей угловому положению колеса $\alpha_k = 0^\circ$.

На рис. 9 приведены расчётные характеристики нормальной жёсткости безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 1, а на рис. 10 и 11 – соответствующие

этим характеристикам графики колебаний нормальной нагрузки.

При нормальной нагрузке $P_z = 4$ кН, приблизительно соответствующей весу, приходящемуся на колесо легкового автомобиля малого класса, нормальный статический прогиб безвоздушной шины из эластичного полиуретана СКУ-ПФЛ-100 $h_g = 22,2...24,3$ мм (рис. 9). При этом статическая жёсткость $C_g = 171,7...180,2$ кН/м. Для сравнения: нормальный прогиб пневматической шины БЛ-85 175/70R13 при указанной весовой нагрузке и номинальном давлении воздуха составляет $h_g = 34$ мм, а статическая жёсткость $C_g = 117,6$ кН/м.

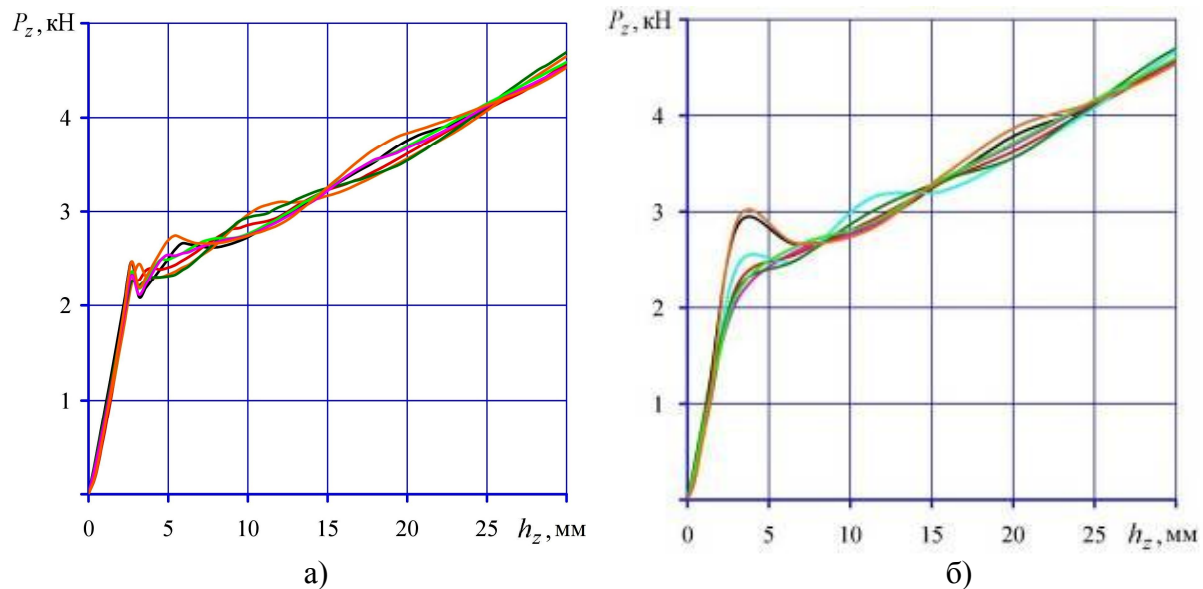


Рис. 9. Расчётные характеристики нормальной жёсткости безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 1:
а – временной интервал $\Delta t = 0,01$ с; б – автоматический временной интервал

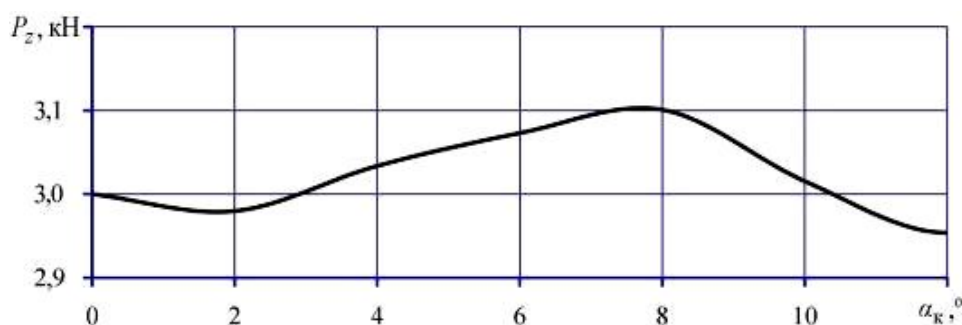


Рис. 10. Колебания нормальной нагрузки на безвоздушную шину с набором атрибутов электронной модели № 1 (временной интервал $\Delta t = 0,01$ с)

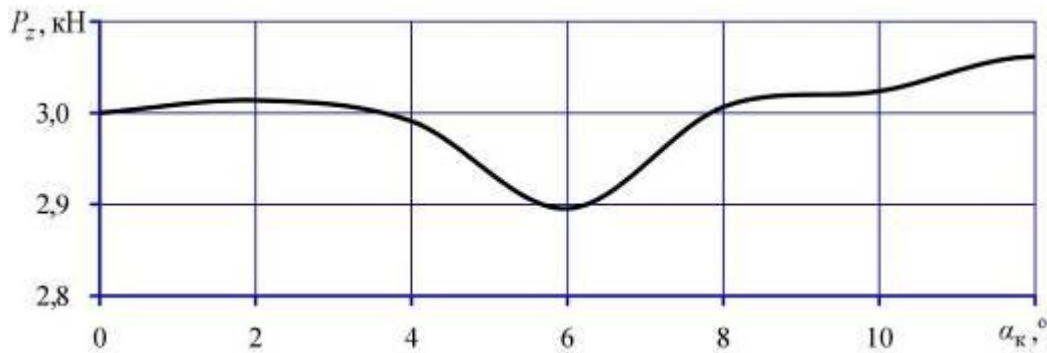


Рис. 11. Колебания нормальной нагрузки на безвоздушную шину с набором атрибутов электронной модели № 1 (автоматический временной интервал)

Оценка силовой неоднородности безвоздушных шин выполнялась по графикам колебаний нормальной нагрузки с помощью коэффициента неоднородности (коэффициента вариации):

$$K_B = \frac{100}{\bar{P}_z} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_z(\alpha_{ki}) - \bar{P}_z)^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где $P_z(\alpha_{ki})$ – нормальная нагрузка на безвоздушную шину в i -й точке кривой колебаний, Н; \bar{P}_z – среднее арифметическое значение нормальной нагрузки, Н; n – количество точек кривой колебаний нормальной нагрузки.

Коэффициент силовой неоднородности безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 1 при постоянном временном интервале $K_B = 4,18\%$ и при автоматическом временном интервале – $K_B = 4,23\%$. Для сравнения: нормальная жесткость пневматической шины в разных сечениях может колебаться пределах 6 %, а в некоторых случаях это различие достигает 10 % [34]. Однако испытания натуральных образцов безвоздушных шин показали, что эластичный полиуретан СКУ-ПФЛ-100 обладает высоким гистерезисным трением и не предназначен для изготовления автомобильных шин.

В свою очередь, низкогистерезисные полиуретаны СУРЭЛ ТФ-228 и СУРЭЛ ТФ-235, которые применяются для изготовления массивных шин колёсных машин, а также колёс роллеров и скейтбордов, как по отдельности, так и в сочетании друг с другом не могут обеспечить требуемую несущую способность безвоздушной шины, что под-

тверждается характеристиками её нормальной жёсткости с набором атрибутов электронной модели № 2, рассчитанными при угловых положениях колеса $\alpha_k = 0^\circ$ и $\alpha_k = 6^\circ$ и приведёнными на рис. 12.

Одним из способов повышения несущей способности безвоздушных шин является применение в качестве конструкционных материалов эластичных полиуретанов со сравнительно высокими значениями модуля упругости, например, СУРЭЛ ТФ-682.

Расчётные характеристики нормальной жёсткости безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 3 приведены на рис. 13.

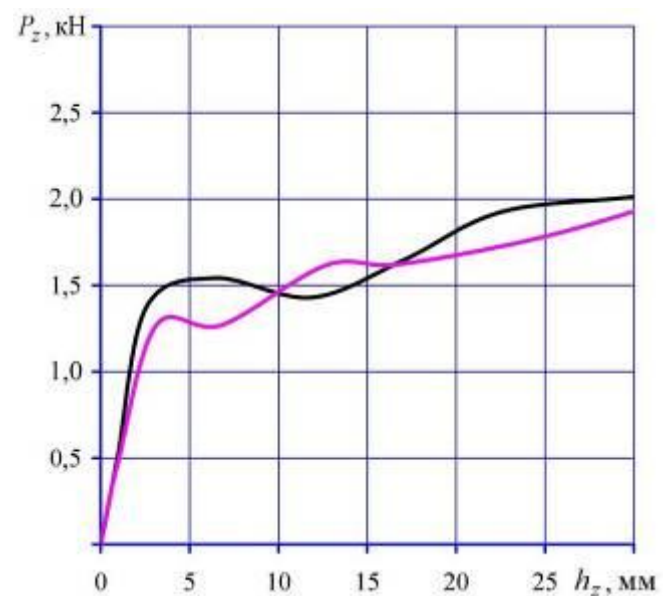


Рис. 12. Расчётные характеристики нормальной жёсткости безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 2

При нормальной нагрузке $P_z = 4$ кН статический прогиб безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 3 $h_g = 3,7$ мм (рис. 13, а) и $h_g = 4,4...5,0$ мм (рис. 13, б). При этом статическая жёсткость для шины легкового автомобиля слишком высокая – $C_g = 800...1081$ кН/м, что ведёт к ухудшению показателей плавности его хода.

Кроме этого, жёсткий и твёрдый протектор, как показали испытания натуральных образцов безвоздушных шин, сильно повышает шум при качении колёс по дорогам с твёрдыми покрытиями. Однако колебания нормальной нагрузки в исследуемом диапазоне незначительные, что подтверждает обоснованность принятых технических решений.

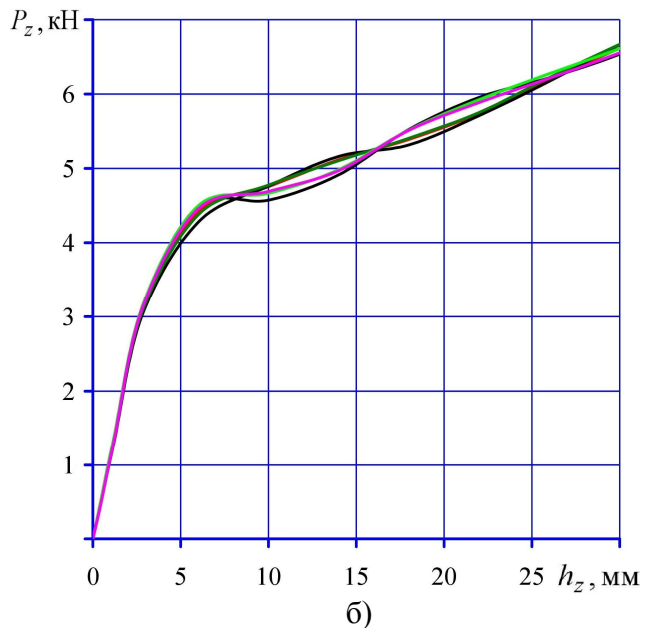
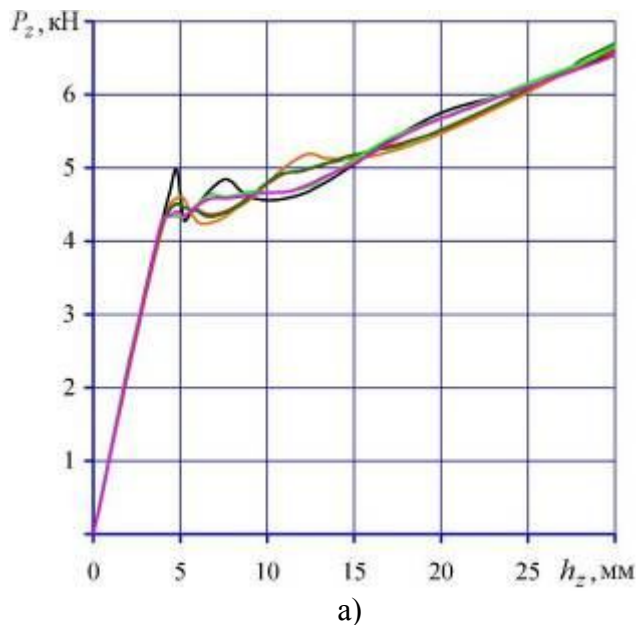


Рисунок 13. Расчётные характеристики нормальной жёсткости безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 3:
 а – временной интервал $\Delta t = 0,01$ с; б – автоматический временной интервал

На рис. 14 и 15 приведены расчётные характеристики нормальной жёсткости безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 4 и соответствующий этим характеристикам график колебаний нормальной нагрузки.

При нагрузке $P_z = 4$ кН статический прогиб безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 4 $h_g = 28,6...29,2$ мм. Статическая жёсткость $C_g = 136,9...139,8$ кН/м. Коэффициент силовой неоднородности $K_B = 3,65\%$. Упругие свойства и несущая способность безвоздушной шины наиболее близки к пневматической шине легкового автомобиля малого класса.

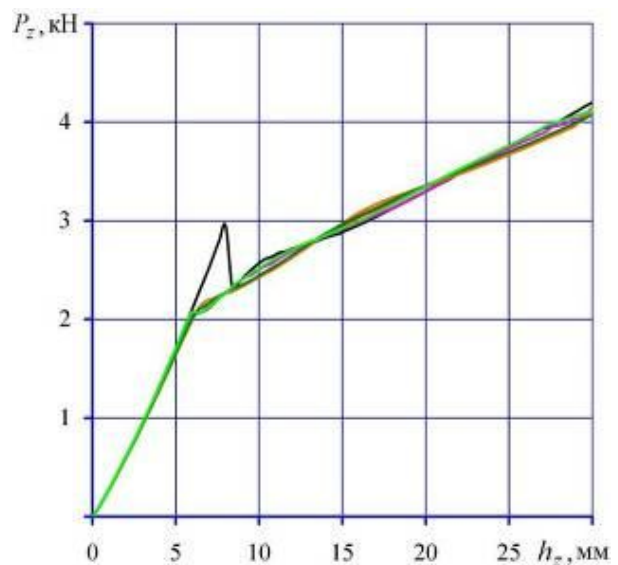


Рис. 14. Расчётные характеристики нормальной жёсткости безвоздушной шины с набором атрибутов электронной модели № 4 (временной интервал $\Delta t = 0,01$ с)

Несмотря на уточнённые в процессе испытаний экспериментальных образцов безвоздушных шин параметры моделирования, использование метода конечных элементов позволило получить приближённые решения, зависящие от размеров и числа элементов сетки, погрешности определения механических характеристик эластичных полиуретанов, временного шага и других факторов. Однако метод конечных элементов – это единственный математический инструмент, позволяющий дать научное обоснование принятым техническим решениям на стадии расчё-

та безвоздушных шин с учётом значительных физической и геометрической нелинейностей.

Характер кривых колебаний нормальной нагрузки и их асимметричность относительно положения, при котором центральная поперечная плоскость совпадает с биссектрисой угла между спицами безвоздушной шины ($\alpha_k = 6^\circ$), обусловлены направлением поперечного прогиба гибких спиц при продольно-поперечном изгибе, а также разными характерами их циклической симметрии и циклической симметрии протектора.

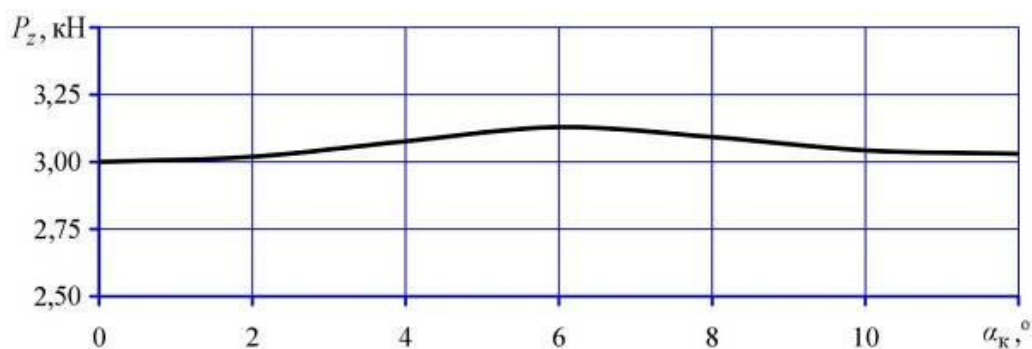


Рис. 15. Колебания нормальной нагрузки на безвоздушную шину с набором атрибутов электронной модели № 4 (временной интервал $\Delta t = 0,01$ с)

5. Основные результаты и выводы

1. Предложена оригинальная конструктивная схема колеса с безвоздушной шиной из эластичных полиуретанов, состоящей из посадочного и опорного с протектором колец, соединённых гибкими радиальными спицами, отличающаяся тем, что для уменьшения силовой неоднородности колеса при качении его несущая способность в значительной степени обеспечивается опорным кольцом из полиуретанового эластомера с высоким модулем упругости в сравнении с материалом гибких спиц.

2. Создана новая электронная твёрдотельная геометрическая модель безвоздушной шины, соответствующая предложенной конструктивной схеме и позволяющая на этапе проектирования выполнить расчёт методом конечных элементов и построить характеристики нормальной жёсткости в разных положениях колеса относительно центральной поперечной плоскости и графики колебаний нормальной нагрузки для оценки

влияния геометрических параметров конструктивных элементов и физико-механических свойств эластичных полиуретанов на упругие свойства, несущую способность и силовую неоднородность колеса.

3. По результатам теоретических исследований установлено, что принятая конструктивная схема колеса с безвоздушной шиной при обоснованных геометрических параметрах её конструктивных элементов и параметрах физико-механических свойств полиуретановых эластомеров позволяет обеспечить приемлемую силовую неоднородность и требуемую для конкретной модели автотранспортного средства несущую способность. Например, для легкового автомобиля малого класса ВАЗ-2115 статическая жёсткость, как оценочный показатель несущей способности безвоздушной шины из эластичных полиуретанов, выпускаемых отечественной химической промышленностью, составляет 136,9... 139,8 кН/м, а силовая неоднородность не превышает 3,65 %.

Список литературы

1. Ju J., Summers J.D., Ziegert J.C., Fadel G. Design of honeycomb meta-materials for high shear flexure // Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009. San Diego, California, USA. DOI: 10.1115/DETC2009-87730.
2. Ma J., Summers J., Joseph P. Dynamic Impact Simulation of Interaction between Non-Pneumatic Tire and Sand with Obstacle // SAE Technical Paper. 2011. DOI: 10.4271/2011-01-0184.
3. Veeramurthy M., Ju J., Thompson L.L., Summers J.D. Optimisation of geometry and material properties of a non-pneumatic tyre for reducing rolling resistance // International Journal of Vehicle Design. 2014. Vol. 66. No.2. P. 193-216. DOI: 10.1504/IJVD.2014.064567.
4. Narasimhan A., Ziegert J.C., Thompson L.L. Effects of Material Properties on Static Load-Deflection and Vibration of a Non-Pneumatic Tire During High-Speed Rolling // SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems. 2011. Vol. 4. No. 1. p. 59-72. DOI: 10.4271/2011-01-0101.
5. Ju J., Veeramurthy M., Summers J. D., Thompson, L. Rolling Resistance of a Nonpneumatic Tire Having a Porous Elastomer Composite Shear Band // Tire Science and Technology. 2013. Vol. 41. No. 3. P. 154-173.
6. Ma J., Summers J. D. Numerical Simulation of Tread Effects on the Interaction Between Cellular Shear Band Based Non-Pneumatic Tire and Sand // Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011. Washington, DC, USA. DOI: 10.1115/DETC2011-47044. –
7. Lee C., Ju J., Kim D.-M. Vibration Analysis of Non-Pneumatic Tires With Hexagonal Lattice Spokes // Proceedings of the ASME 2012 International Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2012. Chicago, Il., USA. DOI: 10.1115/DETC2012-70538.

References

1. Ju J., Summers J.D., Ziegert J.C., Fadel G. Design of honeycomb meta-materials for high shear flexure. *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009*, San Diego, California, USA. Doi: 10.1115/DETC2009-87730.
2. Ma J., Summers J., Joseph P. Dynamic Impact Simulation of Interaction between Non-Pneumatic Tire and Sand with Obstacle. *SAE Technical Paper*, 2011. Doi: 10.4271/2011-01-0184.
3. Veeramurthy M., Ju J., Thompson L.L., Summers J.D. Optimisation of geometry and material properties of a non-pneumatic tyre for reducing rolling resistance. *International Journal of Vehicle Design*, 2014, Vol.66, No.2. Doi: 10.1504/IJVD.2014.064567.
4. Narasimhan A., Ziegert J.C., Thompson L.L. Effects of Material Properties on Static Load-Deflection and Vibration of a Non-Pneumatic Tire During High-Speed Rolling. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems.*, 2011, Vol. 4, No. 1. Doi: 10.4271/2011-01-0101.
5. Ju J., Veeramurthy M., Summers J. D., Thompson, L. Rolling Resistance of a Nonpneumatic Tire Having a Porous Elastomer Composite Shear Band. *Tire Science and Technology*, 2013, Vol. 41, No. 3.
6. Ma J., Summers J. D. Numerical Simulation of Tread Effects on the Interaction Between Cellular Shear Band Based Non-Pneumatic Tire and Sand. *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011*, Washington, DC, USA. Doi: 10.1115/DETC2011-47044.
7. Lee C., Ju J., Kim D.-M. Vibration Analysis of Non-Pneumatic Tires With Hexagonal Lattice Spokes. *Proceedings of the ASME 2012 International Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2012*, Chicago, Il., USA. Doi: 10.1115/DETC2012-70538.
8. Kim K., Heo H., Uddin M. S., Ju J.,

8. Kim K., Heo H., Uddin M. S., Ju J., Kim D.-M. Optimization of Non-pneumatic Tire with Hexagonal Lattice Spokes for Reducing Rolling Resistance // SAE Technical Paper. 2015. DOI: 10.4271/2015-01-1515.

9. Мазур В.В. Повышение плавности хода автотранспортных средств внутренним подпрессориванием колёс: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Братский гос. техн. ун-т. – Братск, 2004. – 151 с.

10. Пат. 2133675 Российская Федерация, МПК В60В 9/04. Колесо с внутренним подпрессориванием / Енаев А.А., Мазур В.В., Яценко Н.Н.; заявитель и патентообладатель Братский индустриальный ин-т. – № 97102469/28; заявл. 17.02.97; опубл. 27.07.99, Бюл. № 21. – 6 с.

11. Пат. 2180290 Российская Федерация, МПК В60В 9/04. Колесо транспортного средства повышенной эластичности / Енаев А.А., Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. техн. ун-т. – № 2000111344/28, заявл. 06.05.2000; опубл. 10.03.2002, Бюл. № 7. – 6 с.

12. Пат. 2184658 Российская Федерация, МПК В60В 9/00. Колесо транспортного средства / Енаев А.А., Мазур В.В., Яценко Н.Н.; заявитель и патентообладатель Братский индустриальный ин-т. – № 99110534/28; заявл. 19.05.1999; опубл. 10.07.2002, Бюл. № 19.

13. Пат. 2221703 Российская Федерация, МПК В60В 9/18. Колесо транспортного средства / Енаев А.А., Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. техн. ун-т. – № 2001131965/11, заявл. 26.11.2001; опубл. 20.01.2004, Бюл. № 2.

14. Пат. 2228273 Российская Федерация, МПК В60В 9/04, В60В 9/14. Колесо с внутренним подпрессориванием транспортного средства повышенной проходимости / Енаев А.А., Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. техн. ун-т. – № 2002113483/11; заявл. 23.05.2002; опубл. 10.05.2004, Бюл. № 13. – 6 с.

15. ГОСТ Р 15.011-96 Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения. – М.: Стандартинформ, 2010. 16 с.

16. Пат. 2335409 Российская Федерация,

Kim D.-M. Optimization of Non-pneumatic Tire with Hexagonal Lattice Spokes for Reducing Rolling Resistance. SAE Technical Paper, 2015. Doi: 10.4271/2015-01-1515.

9. Mazur V.V. Increase smooth running of motor vehicles with internal spring-loaded wheels. Diss. Cand. Sci. (Eng.). Bratsk. 2004. 151 p. (In Russian).

10. Patent RU 2133675. *Koleso s vnutrennim podressorivaniyem* [Inner spring wheel]. Enaev A.A., Mazur V.V., Yatsenko N.N. Declared 17.02.97. Published 27.07.99 (In Russian).

11. Patent RU 2180290. *Koleso transportnogo sredstva povyshennoy elastichnosti* [Vehicle wheel of increased elasticity]. Enaev A.A., Mazur V.V. Declared 06.05.2000. Published 10.03.2002 (In Russian).

12. Patent RU 2184658. *Koleso transportnogo sredstva* [Vehicle wheel]. Enaev A.A., Mazur V.V., Yatsenko N.N. Declared 19.05.1999. Published 10.07.2002 (In Russian).

13. Patent RU 2221703. *Koleso transportnogo sredstva* [Vehicle wheel]. Enaev A.A., Mazur V.V. Declared 26.11.2001. Published 20.01.2004 (In Russian).

14. Patent RU 2228273. *Koleso s vnutrennim podressorivaniyem transportnogo sredstva povyshennoy prokhodimosti* [Internal spring wheel of off-road vehicle]. Enaev A.A., Mazur V.V. Declared 23.05.2002. Published 10.05.2004 (In Russian).

15. GOST R 15.011-96 *System of products development and launching into manufacture. Patent investigations. Procedure and scope.* Moscow, Standartinform, 2010. 16 p. (In Russian).

16. Patent RU 2335409. *Uprugoye koleso transportnogo sredstva* [Vehicle flexible wheel]. Enaev A.A., Mazur V.V. Declared 27.12.2006. Published 10.10.2008 (In Russian).

17. Patent RU 2336178. *Koleso transportnogo sredstva s uprugimi spitsami* [Resilient Wheel Vehicle Wheel]. Mazur V.V. Declared 27.02.2007. Published 20.10.2008 (In Russian).

18. Patent RU 2357861. *Sposob armirovaniya kolyos s uprugimi deformiruemymi spicami i press-forma dlya izgotovleniya kolyos* [Method

МПК В60В 5/02. Упругое колесо транспортного средства / Енаев А.А., Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2006147016/11; заявл. 27.12.2006; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 28. – 5 с.

17. Пат. 2336178 Российская Федерация, МПК В60В 9/00. Колесо транспортного средства с упругими спицами / Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2007107423/11; заявл. 27.02.2007; опубл. 20.10.2008, Бюл. № 29. – 8 с.

18. Пат. 2357861 Российская Федерация, МПК В29С 43/00. Способ армирования колёс с упругими деформируемыми спицами и пресс-форма для изготовления колёс / Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2007145141/12; заявл. 04.12.2007; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16. – 5 с.

19. Пат. 2391219 Российская Федерация, МПК В60В 25/02. Запасное колесо автомобиля / Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2009102435/11; заявл. 26.01.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 16. – 6 с.

20. Пат. 2397877 Российская Федерация, МПК В60В 9/26. Автомобильная шина из эластичного полиуретана с упругими деформируемыми спицами / Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2009126282/11; заявл. 08.07.2009; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24. – 6 с.

21. Пат. 2483936 Российская Федерация, МПК В60В 9/26. Автомобильная шина с упругими спицами / Мазур В.В., Гайлиш А.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2012100517/11; заявл. 10.01.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16. – 4 с.

22. Пат. 2495758 Российская Федерация, МПК В60С 7/22. Способ армирования автомобильных безвоздушных шин / Мазур В.В., Гайлиш А.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2012111571/11; заявл. 26.03.2012; опубл. 20.10.2013, Бюл. № 29. – 6 с.

23. Пат. 2495759 Российская Федерация, МПК В60С 7/22. Способ армирования автомобильных безвоздушных шин / Мазур В.В., Гайлиш А.В.; заявитель и патентооб-

† for reinforcement of wheels with spring de-
† formable spokes and die mold for production of
† wheels]. Mazur V.V. Declared 04.12.2007. Pub-
† lished 10.06.2009 (In Russian).

† 19. Patent RU 2391219. *Zapasnoye koleso*
† *avtomobilya* [Car spare wheel]. Mazur V.V.
† Declared 26.01.2009. Published 10.06.2010
† (In Russian).

† 20. Patent RU 2397877. *Avtomobil'naya*
† *shina iz ehlastichnogo poliuretana s uprugimi*
† *deformiruemymi spicami* [Car tyre of elastic
† polyurethane with spring deformable spokes].
† Mazur V.V. Declared 08.07.2009. Published
† 27.08.2010 (In Russian).

† 21. Patent RU 2483936. *Avtomobil'naya*
† *shina s uprugimi spicami* [Auto-tire with resil-
† ient spokes]. Mazur V.V., Gajlish A.V. De-
† clared 10.01.2012. Published 10.06.2013 (In
† Russian).

† 22. Patent RU 2495758. *Sposob armiro-*
† *vaniya avtomobil'nyh bezvozdushnyh shin*
† [Method of automotive airless tire reinforce-
† ment]. Mazur V.V., Gajlish A.V. Declared
† 26.03.2012. Published 20.10.2013 (In Rus-
† sian).

† 23. Patent RU 2495759. *Sposob armirovani-*
† *ya avtomobil'nyh bezvozdushnyh shin* [Method
† of automotive airless tire reinforcement]. Mazur
† V.V., Gajlish A.V. Declared 26.03.2012. Pub-
† lished 20.10.2013 (In Russian).

† 24. Patent RU 2505398. *Sposob armirovani-*
† *ya avtomobil'nyh shin s uprugimi spicami i mat-*
† *rica dlya izgotovleniya kolyos* [Method of rein-
† forcing automotive tires with resilient spokes
† and female die for wheel production]. Mazur
† V.V., Gajlish A.V. Declared 07.12.2011. Pub-
† lished 27.01.2014 (In Russian).

† 25. Patent RU 2538472. *Avtomobilnoe*
† *koleso s bezvozdushnoj shinoj* [Airless tire].
† Mazur V.V. Declared 30.04.2013. Published
† 10.01.2015 (In Russian).

† 26. Tychina K.A. *Development of a nu-*
† *merical method for calculating and designing*
† *metal-elastic wheels*. Diss. Cand. Sci. (Engi-
† neering). Moscow. 2001. 120 p. (In Russian).

† 27. GOST 2.052-2015 *Unified system for*
† *design documentation. Electronic geometrical*
† *model of product. General principles*. Mos-
† cow, Standartinform, 2016. 14 p. (In Russian).

† 28. Mazur V.V. Technology of manufac-

ладатель Братский гос. ун-т. – № 2012111574/11; заявл. 26.03.2012; опубл. 20.10.2013, Бюл. № 29. – 6 с.

24. Пат. 2505398 Российская Федерация, МПК В29С 43/28, В29D 30/34. Способ армирования автомобильных шин с упругими спицами и матрица для изготовления колёс / Мазур В.В., Гайлиш А.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2011149925/05; заявл. 07.12.2011; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 3. – 9 с.

25. Пат. 2538472 Российская Федерация, МПК 60С 7/12, В60С 7/00, В60В 9/00 Автомобильное колесо с безвоздушной шиной / Мазур В.В.; заявитель и патентообладатель Братский гос. ун-т. – № 2013120165/11; заявл. 30.04.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 10 с.

26. Тычина К.А. Разработка численной методики расчёта и проектирования металлоэластичных колёс: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. М., 2001. 120 с.

27. ГОСТ 2.052-2015 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2016. 14 с.

28. Мазур В.В. Технология изготовления экспериментальных автомобильных колёс с безвоздушными шинами из эластичных полиуретанов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 2. С. 231-242. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-231-242.

29. Мазур В.В. Автомобильные колёса с безвоздушными шинами. Результаты стендовых испытаний // Транспорт: наука, техника, управление. 2016. № 2. С. 41-47.

30. ГОСТ 17697-72 Автомобили. Качение колеса. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1972. 24 с.

31. ОСТ 37.001.252-82 Автотранспортные средства. Методы определения основных параметров, влияющих на плавность хода. М.: НАМИ, 1984. 60 с.

32. ГОСТ 270-75 Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. М.: Издательство стандартов, 2008. 11 с.

33. ГОСТ ISO 7743-2013 Резина и тер-

ting experimental automobile wheels with airless tires from elastic polyurethanes. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No 2 (16), pp. 231-242. Doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-231-242 (In Russian).

29. Mazur V.V. Car wheels with airless tires. The results of bench tests. *Transport: nauka. tekhnika. upravleniye*, 2016, No 2, pp. 41-47 (In Russian).

30. GOST 17697-72 *Vehicles. Rolling wheel. Terms and definitions*. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1972. 24 p. (In Russian).

31. OST 37.001.252-82 *Motor vehicles. Methods for determining the basic parameters affecting smooth running*. Moscow, NAMI, 1984. 60 p. (In Russian).

32. GOST 270-75 *Rubber. Method of the determination elastic and tensile stress-strain properties*. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2008. 11 p. (In Russian).

33. GOST ISO 7743-2013 *Rubber or thermoplastic. Determination of compression stress-strain properties*. Moscow, Standartinform, 2014. 24 p. (In Russian).

34. Knoroz V.I., Klennikov E.B., Petrov I.P., Shelukhin A.S., Yuriev Y.M. *Rabota avtomobilnoy shiny* [Car tire run]. Moscow, Transport, 1976. 238 p. (In Russian).

моэластопласты. Определение упругопроч- †
ностных свойств при сжатии. М.: Стандар- †
тинформ, 2014. 24 с. †

34. Кнороз В.И., Кленников Е.Б., Петров †
И.П., Шелухин А.С., Юрьев Ю.М. Работа †
автомобильной шины. М.: Транспорт, 1976. †
238 с. †