

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

А.В. Михеев, В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, З.А. Кострова

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕСА, ОСНАЩЕННОГО НЕПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНОЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Приведены результаты компьютерного моделирования вертикального статического нагружения само-несущей непневматической шины взаимодействующей с твердым, ровным основанием. Были созданы компьютерные 3d-модель и конечно-элементная модель непневматической шины и стального диска.

Получены значения деформаций и эквивалентных напряжений возникающих в модели колеса при данном виде нагружения. Определен характер деформации упругих элементов шины. Построена зависимость вертикальной нагрузки на колесе от вертикального перемещения. Определена вертикальная жесткость колеса.

Ключевые слова: колесный движитель, непневматическая шина, моделирование статического нагружения шины, деформации, эквивалентные напряжения.

Для приведения транспортного средства в движение необходим движитель, который, в свою очередь, преобразует подведенную к нему мощность двигателя в работу по передвижению. Одной из важных возможностей движителя является его проходимость, которая обеспечивается за счет оптимальной конструкции.

Наиболее распространенным и приемлемым движителем является колесо, за счет простоты конструкции, надежности и приспособляемости к условиям движения. Как правило, на колесе используется пневматическая шина, она и является самым слабым звеном в его конструкции. При неправильном давлении или при его полном отсутствии такой движитель практически полностью лишает транспортное средство возможности движения или значительно затрудняет его. Особенно это очень важно для военной техники в боевых условиях, обездвиживание транспортного средства может привести к весьма трагичным последствиям. Другими недостатками пневматической шины являются сложность технологических процессов ее изготовления и большие расходы на их утилизацию.

Таким образом, становится разумным применение колес с упругими элементами из эластомерного материала, таких как натурального или синтетического каучука, полиуретана, вспененного каучука и вспененного полиуретана, сегментированных сополиэфиров и блок-сополимеров, нейлона. Упругость шины определяет сечение и конструкции упругих элементов.

Компания Bridgestone представила конструкцию непневматической шины [16] (рис. 1, д) и назвала ее *AirFree*. Колесо состоит из металлического диска, на котором находится шина. Шина, в свою очередь, представляет собой два кольца, соединенных упругими элементами. Они состоят из двух разнонаправленных рядов спиц, которые находятся по определенным углом к нормали контактируемой поверхности, что и обеспечивает деформацию шины под нагрузкой. Главной проблемой этой конструкции является то, что она рассчитана только на скорости до 60 км/ч и для автомобилей с малым весом.

Параллельно компании *Bridgestone* компания *Michelin* разработала иную конструкцию

непневматической шины под названием *TWEEL* (рис. 1, в, з). Конструкция шины *TWEEL* [16] состоит из жесткой ступицы, соединенной с протектором посредством гибких деформируемых спиц из полиуретана, и функционирует как единое целое. Шина разработана на базе традиционной радиальной технологии. Так как потеря давления исключена, сокращается время простоя техники из-за спуска шин, что имеет место при использовании классических шин.



а



б



в



з



д



е

Рис. 1. Конструкции непневматических шин

Ранее для исключения этого недостатка многие компании, эксплуатирующие спецтехнику, вынуждены прибегать к альтернативным беспрокольным технологиям, которые приводят к уменьшению тяги, экономичности и ухудшению управляемости, комфорта. Так как в новинке *Michelin X Tweel* не используется сжатый воздух, она не боится проколов и порезов, которые иногда возникают в процессе работ в сферах благоустройства территории, строительства, переработки отходов и сельского хозяйства. Также не требуется постоянный контроль давления воздуха, эта шина просто монтируется, она стойкая к повреждениям, обеспечивает повышенный комфорт для водителя-оператора спецтехники, и имеет значительно больший ресурс в сравнении с пневматическими шинами.

В одном ряду с описанными конструкциями стоит шина (рис. 1 *е*), разработанная **Resilient Technologies**, именуемая NTP [16]. Данная шина разработана специально для военных автомобилей. Она способна выдерживать статическую нагрузку до 1746 кг и не лишает автомобиль возможности двигаться даже при 30%-ном разрушении. Упругие элементы в данной конструкции выполнены в виде пчелиных сот, что обеспечивает хорошую несущую способность шины.

Совершенно другой формат шин (рис. 1 *а, б*) представила корейская компания *Hankook* [17]. Шина и обод данной модели – это одно целое. *I-Flex* на 95% состоит из вторично переработанного материала. Представленные на Франкфуртской выставке безвоздушные шины имели радиус в 14 дюймов и оригинальный дизайн. Многим понравился дизайн моделей, выполненный в оранжевых и синих оттенках. Компания уже планирует установить такие колеса на малолитражные автомобили *Volkswagen Up*.

Создание вспомогательной геометрии непневматической шины производилось в *AutoCAD*, все внешние габаритные размеры и присоединительные размеры шины близки к традиционным резино-кордовым пневматическим шинам. Полученная геометрия импортировалась в препроцессор для создания конечно-элементной модели, задания материала и граничных условий моделирования. В результате была построена конечно-элементная модель (рис. 2, *б, з*) которая насчитывает 54 000 элементов. Геометрия упругого элемента (рис. 2, *а, в*) выполнена в виде шестиугольника соединяющего внешнее кольцо шины с внутренним. Данная модель состоит из 16 таких секторов, распределенных по круговому массиву и работающих как единое целое. Данная форма была выбрана, так как она обеспечивает требуемую грузоподъемность и достаточные демпфирующие свойства шины по сравнению с пневматической. Данная модель имеет следующие размеры: толщина внутреннего кольца 24 мм, толщина тонкостенных перегородок 4 мм, толщина наружного кольца 31 мм, радиус колеса в свободном состоянии равняется 370 мм; толщина диска колеса 5 мм. Диск выполнен из стали и имеет следующие характеристики: $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\rho = 7850$ кг/м³, $\nu = 0,3$. Материал шины имеет близкие характеристики с резиной: $E = 100$ МПа, $\rho = 1200$ кг/м³, $\nu = 0,4$. Исходя из выбранного материала и геометрии модели, масса диска равна 16,5 кг, масса шины 34,8 кг. Полная масса колеса в сборе составляет 51,3 кг.

Для оценки несущей способности шины была приложена вертикальная статическая нагрузка, равная приходящейся нагрузки на одно колесо транспортного средства снаряженной массой 1600 кг нагрузка при этом составляет 400 кг (3924 Н). Задав все необходимые параметры и свойства для расчета, модель экспортируется в файл необходимый для процессора (LS - Duana). После расчета и отладки модели импортируем файл обратно в препроцессор для просмотра результатов.

При нагружении статический радиус колеса (рис. 3, *б*) равен 354 мм, что на 16 мм меньше свободного радиуса. Произошло значительное деформирование упругих элементов в зоне пятна контакта (рис. 3, *а*) с опорной поверхностью, в остальной части шины совершенно не изменили своей формы. Так мы видим, что даже при сильной деформации тонкостенные перегородки, изменив свою форму, не соприкасаются с соседними перегородками, что является значительным плюсом данной конструкции шины. Максимальные напряжения в шине (рис. 3, *в, з*) составляют 8 МПа, что является допустимым при данном виде нагруже-

ния. Самые нагруженные элементы шины – это две перегородки соединяющие шестиугольник с внешним кольцом шины, они также имеют наибольшую деформацию по сравнению с другими элементами.

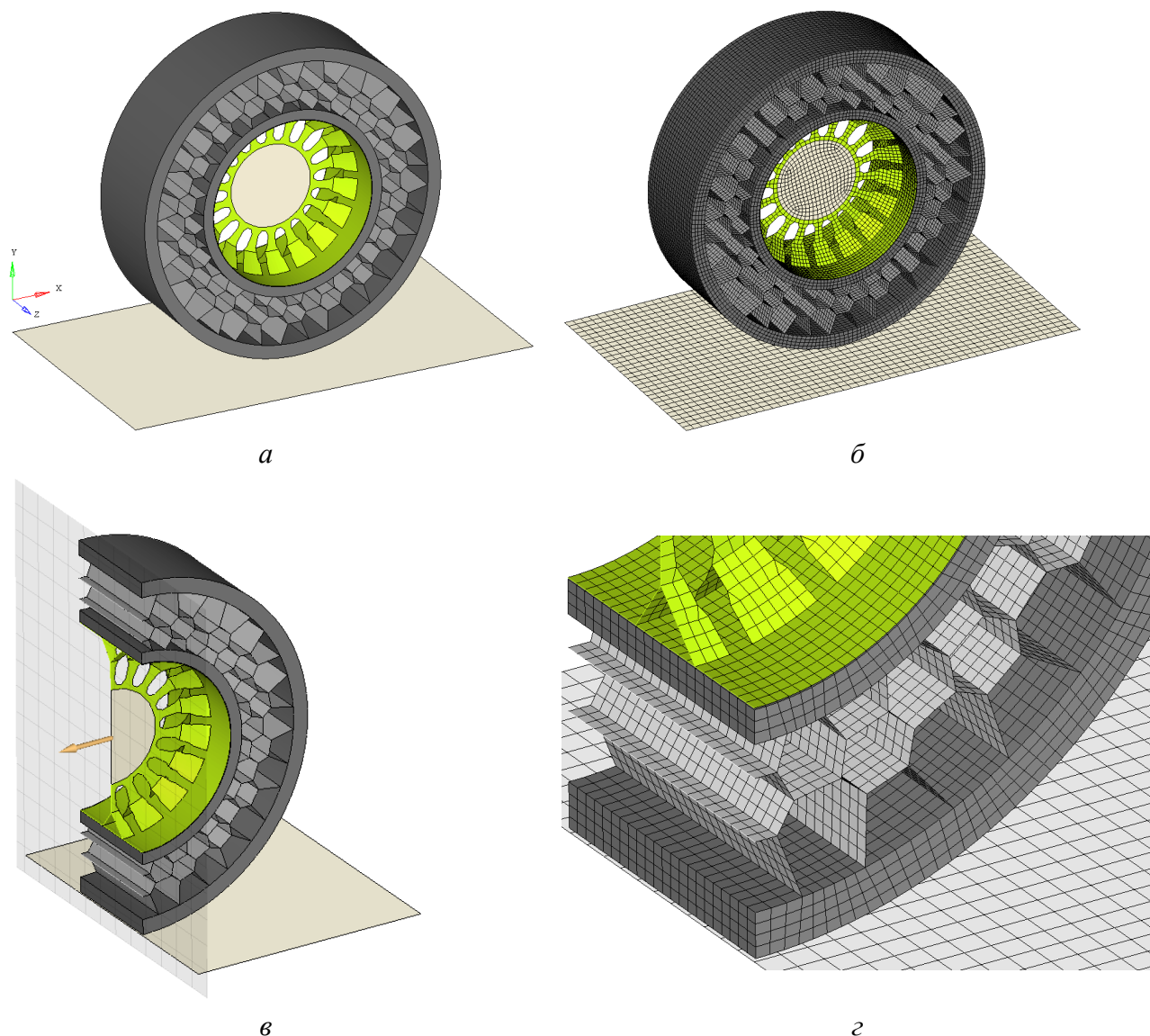


Рис. 2. Геометрическая и конечно-элементная модель колеса в сборе

Были определены геометрические размеры пятна контакта шины (рис. 4). Статическая жесткость шины [1] определяется по нагрузочной или упругой характеристике. Она равна углу наклона касательной к кривой средней линии упругой характеристики. Значения радиальной жесткости шины в каждой точке упругой характеристики можно определить по формуле

$$C_{\text{ш}} = P_{\text{н}}/L_{\text{пр}}, \quad (1.1)$$

где $L_{\text{пр}}$ - приведенный статический прогиб (прогиб линейного упругого элемента с жесткостью $C_{\text{ш}}$ под нагрузкой $P_{\text{н}}$). Так был получен график, изображенный на рис. 5.

Из проведенного компьютерного моделирования становится явным, что изменение размеров пятна контакта можно добиться путем изменения толщины стенок перегородок, и в течение срока службы оно должно оставаться неизменным. Поэтому возможно задать необходимые толщины перегородок для получения конкретной жесткости, несущей способности и размера пятна контакта, которые не будут изменяться в течение срока службы, что облег-

чает обслуживание транспортного средства. Изменяя форму упругих элементов можем также варьировать поперечную жесткость шины.

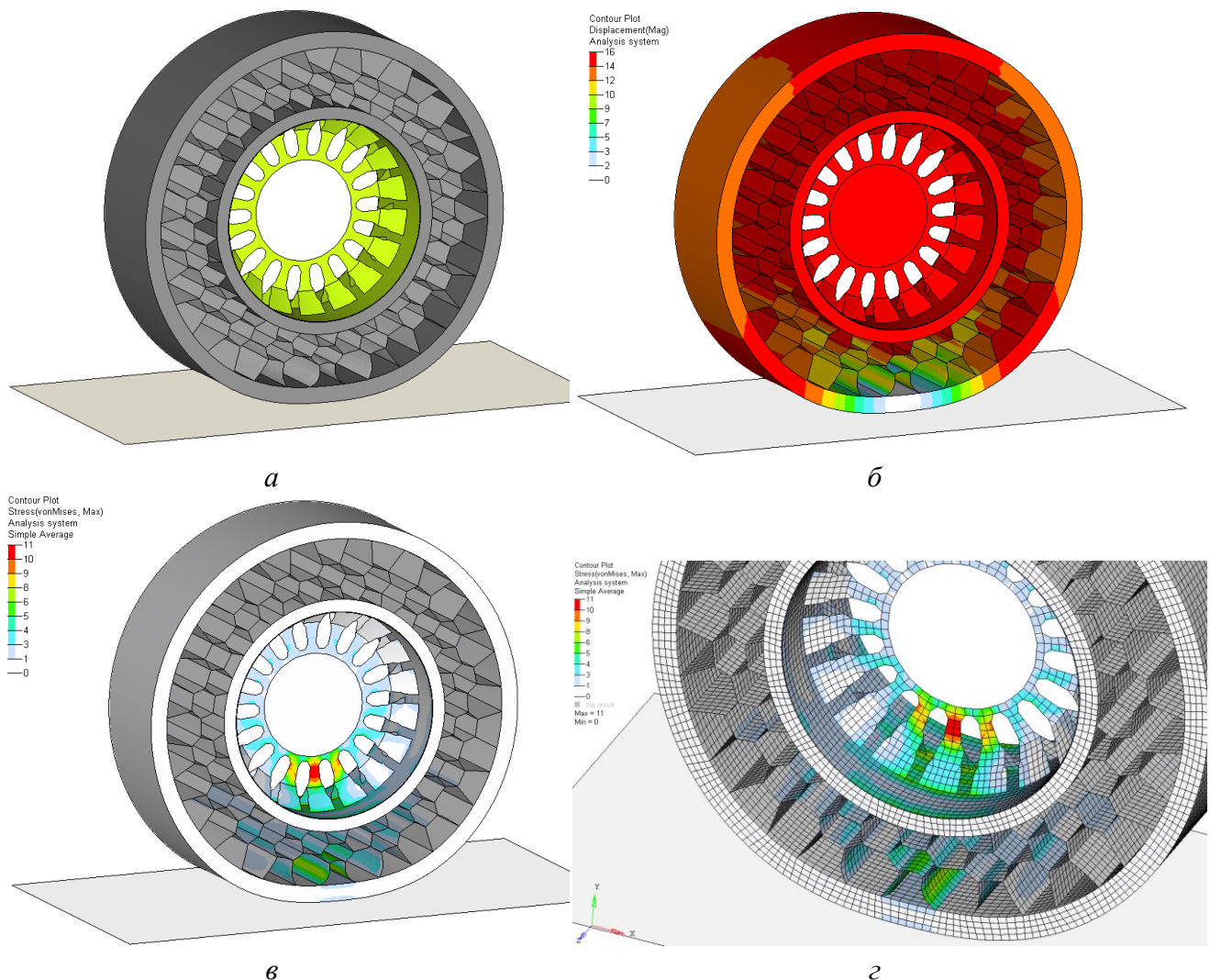


Рис. 3. Характер деформаций и распределение эквивалентных напряжений в модели

В данной работе масса шины составляет 34,8 кг, а масса пневматического аналога составляет не больше 25 кг, что, в свою очередь, негативно скажется на разгоне и управляемости автомобиля. Для облегчения массы шину необходимо армировать. Мазур В. В. разработал способ армирования непневматических самонесущих шин [2]. Это значительно снижает массу конечного изделия и увеличивает кольцевую жесткость внешнего кольца шины [3]. Технический результат по способу армирования автомобильных шин с упругими спицами достигается тем, что армирование каркаса шины осуществляется намоткой тонких металлических нитей в окружном направлении на поверхность предварительно изготовленной армированной и помещенной в матрицу основы шины с упругими спицами, а брекета - намоткой нитей вокруг предварительно изготовленного полиуретанового кольца в радиальном направлении.

Для лучшей работы следует увеличивать жесткость внешнего кольца, так как несущую способность шины в данной конструкции обеспечивает сжатие упругого элемента, находящегося между пятном контакта и диском, а улучшенные эксплуатационные характеристики от шины можно получить если спицы упругого элемента будут работать не на сжатие, а на растяжение. Вследствие будет задействована та часть шины которая находится выше центра колеса, и обеспечение несущей способности будет происходить за счет растяжения спиц. Предпочтительно, чтобы спицы имели высокую эффективную радиальную жесткость

при растяжении и низкую эффективную радиальную жесткость при сжатии. Низкая жесткость при сжатии позволит спицам, прикрепленным к контактирующей с грунтом части кольцевой полосы, согнуться для поглощения толчков от неровностей дороги.

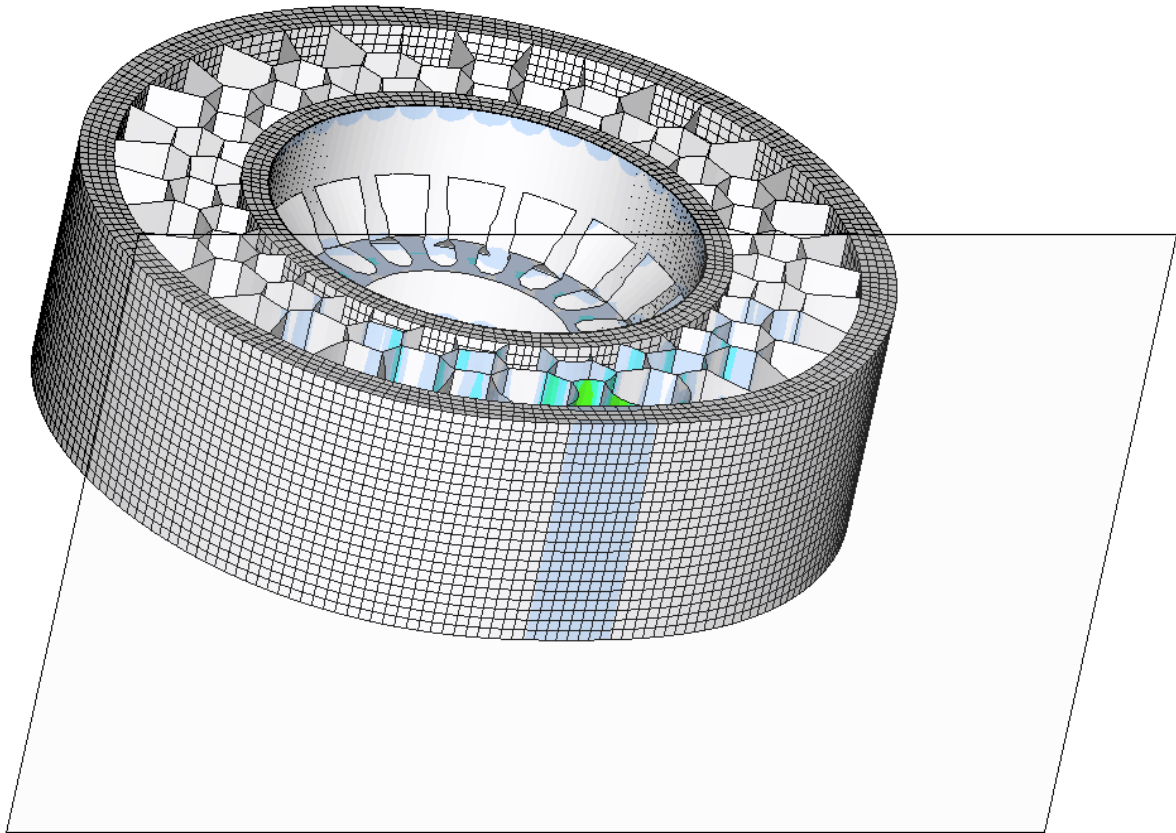


Рис. 4. Пятно контакта колеса с опорной поверхностью

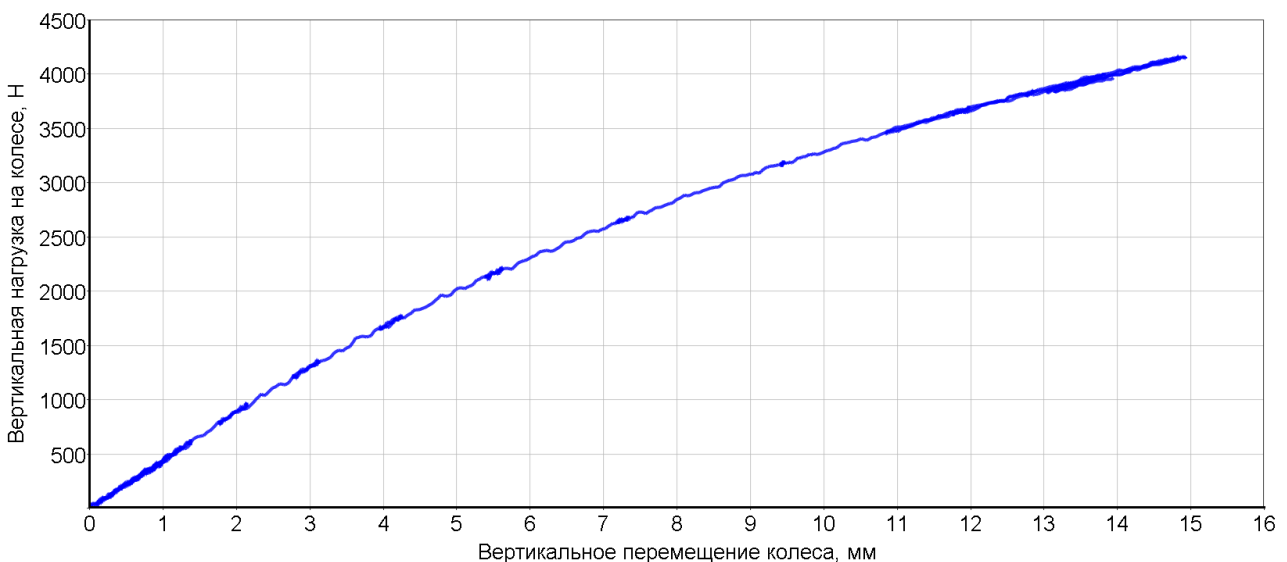


Рис. 5. График зависимости вертикальной нагрузки на колесе (Н) от вертикальных перемещений (мм). Вертикальная жесткость колеса составляет 285Н/мм

Спицы также передают силы, необходимые для ускорения, остановки и поворота. Расположение и ориентация спиц может быть выбрана так, чтобы получить требуемые характеристики [4]. Например, в тех случаях, когда возникают относительно низкие окружные

силы, спицы могут быть расположены в радиальном направлении и параллельно с осью вращения шины. Для обеспечения жесткости в направлении по окружности спиц, перпендикулярной оси вращения могут быть добавлены, чередующихся с осью продольные спицы. Другой альтернативой является организация косых спиц, чтобы обеспечить жесткость в обоих окружных и осевых направлениях. Для облегчения изгиба спиц в местах контактирующей части протектора, спицы могут быть изогнутыми.

В дальнейшем в модель будут введены дополнительные элементы такие как армирующий слой, беговая дорожка и упругий элемент будут иметь различный по своим свойствам материал, это обусловлено тем, что полиуретан имеет недостаточное сцепление с поверхностью дороги. Предполагается математическое моделирование движения непневматической шины в условиях пересеченной местности с учетом разработанных моделей местности и полотна пути представленных в работах [5–16].

Библиографический список

1. **Кнороз, В. И.** Работа автомобильной шины / В. И. Кнороз [и др.]. – М.: Транспорт, 1967. – 237 с.
2. **Гайлиш А. В. Мазур В. В.** Способ армирования автомобильных шин с упругими спицами и матрица для изготовления колес. / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Братский государственный университет. // Патент РФ № 2505398. 2012 г.
3. **Мазур, В.В.** Автомобильные колеса с безвоздушными шинами / В.В. Мазур, А.В. Гайлишин // Журнал Автотранспортное предприятие. 2012. С. 36.
4. Пат. РФ № 2269425. Непневматическая шина / Райн Тимоти, Томпсон Рональд, Крон Стивен, Демино Кеннет // Сосьете Де Текнолоджи Мишлен (fr), Мишлен Решерш э Текник с.а. (ch). 2006.
5. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145–174.
6. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72–77.
7. **Макаров, В.С.** Многоуровневая модель снега как полотна пути для транспортно-технологических машин на примере территории Российской Федерации // В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-2. С. 270–276.
8. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 151.
9. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 82–88.
10. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 113.
11. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 33.
12. **Гончаров, К.О.** Проведение замеров микропрофиля поверхности движения типа ровное поле / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 29–30.
13. **Беляков, В.В.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 1 (102). С. 136–141
14. **Макаров, В.С.** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 4. С. 21–24.
15. **Редкозубов, А.В.** О целесообразности моделирования дорог при помощи фрактального ис-

- числения / А.В. Редкозубов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 87–88.
- 16.«Авто Мото Спец»; URL: <http://avtomotospec.ru/poleznoe/что-такое-bezvozdushnye-shiny.html> (дата обращения: 11.02.2015).
- 17.Авто Mail.Ru URL: [https://auto.mail.ru/article/43453 shiny_hankook_teper_i_bez_vozduha/#feedback](https://auto.mail.ru/article/43453_shiny_hankook_teper_i_bez_vozduha/#feedback) (дата обращения: 11.02.2015).

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2015*

A. V. Miheev, V.V. Belyakov, D.V. Zezyulin, V.S. Makarov, Z. A. Kostrova

**ESTIMATING THE STRAIN OF WHEELS FITTED NON-PNEUMATIC TYRE
BY COMPUTER SIMULATION OF VERTICAL STATIC LOADING**

The Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Subject/topic/purpose: Estimating the strain of wheels fitted non-pneumatic tyre by computer simulation of vertical static loading

Methodology of work: Treated with the experimental data. Creating a computer model.

Results/application: The paper presents the results of computer simulation of the vertical static load of self-supporting non-pneumatic tire interacting with a firm, level base. Were created by computer 3d-model and finite element model of non-pneumatic tires and steel disc.

The values of strain and equivalent stresses arising in the wheel model in this type of loading. The character of the elastic deformation of the tire. A plot of the vertical load on the wheel from the vertical displacement. Determine the vertical stiffness of the wheel.

Findings: Requires the introduction of additional elements of the tire model such as a reinforcing layer. Necessary to carry out other types of loading to determine the behavior of the tire.

Key words: paddle wheels, non-pneumatic tire, statistical modeling of loading tire deformation, equivalent stresses.