



# ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 539.3

**А.В. ХОТЬКО**

начальник отдела расчетных исследований механики шин управления проектирования и конструирования шин инженерно-технического центра<sup>1</sup>

E-mail: hotkoav2017@gmail.com

**С.В. ШИЛЬКО**, канд. техн. наук, доц.

заведующий лабораторией механики композитов и биополимеров<sup>2</sup>

E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

<sup>1</sup>ОАО «Белшина», г. Бобруйск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 09.08.2019.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СЕТЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН ДИАГОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Рассмотрены уравнения теории сетчатых оболочек и методы решения краевых задач по определению профиля диагональных и радиальных шин требуемой ширины, проходящего через заданную точку обода и точку на экваторе. Реализованы алгоритмы проектного и поверочного расчета шин. Определены усилия в нитях корда каркаса. Результаты расчетов по теории сетчатых оболочек сопоставлены с результатами конечно-элементного моделирования в программном комплексе MSC.Marc.*

**Ключевые слова:** эластомерные композиты, автомобильные шины, равновесная конфигурация, теория сетчатых оболочек, конечно-элементное моделирование

**Введение.** Пневматическая шина является ключевым элементом автомобильной техники. С позиций механики деформируемого твердого тела автомобильная пневматическая шина является многослойной композитной оболочкой из физически нелинейного и существенно анизотропного вязкоупругого материала. Усилия от давления закачиваемого воздуха воспринимаются в основном нитями корда, модуль упругости материала которых на 3–4 порядка выше модуля упругости резины.

Весьма важен выбор геометрического профиля шины, смонтированной на ободе и нагруженной внутренним давлением, исходя из габаритных размеров, обозначенных в международных стандартах ETRTO и TRA. При достижении рабочего давления габаритные размеры (диаметр и ширина профиля) шины в процессе дальнейшого накачивания существенно не изменяются. Нити корда занимают такое положение, при котором нагрузка от внутреннего давления компенсируется реакциями нитей. Такое равновесное состояние (равно-

весная конфигурация) не зависит от внутреннего давления, а определяется только геометрическими габаритными размерами шины и обода. В статье рассматривается метод расчета параметров равновесного напряженно-деформированного состояния шины на основе безмоментной теории сетчатых оболочек, разработанной в трудах [1–4].

**Расчет равновесной конфигурации и напряженного состояния каркаса шины.** В качестве расчетного примера рассматривалась шина диагональной конструкции с каркасом, закрепленным на жестких бортовых кольцах и состоящим из четного числа слоев обрешиненного корда, в котором армирующие нити скрещиваются под одинаковым углом, формируя сетчатую структуру. Так как толщина каркаса шины обычно существенно меньше радиуса кривизны ее внутреннего профиля, трехмерное представление элемента боковой стенки можно упростить и свести к двумерной оболочечной модели, отнесенной к срединной поверхности каркаса, что позволяет считать распределение

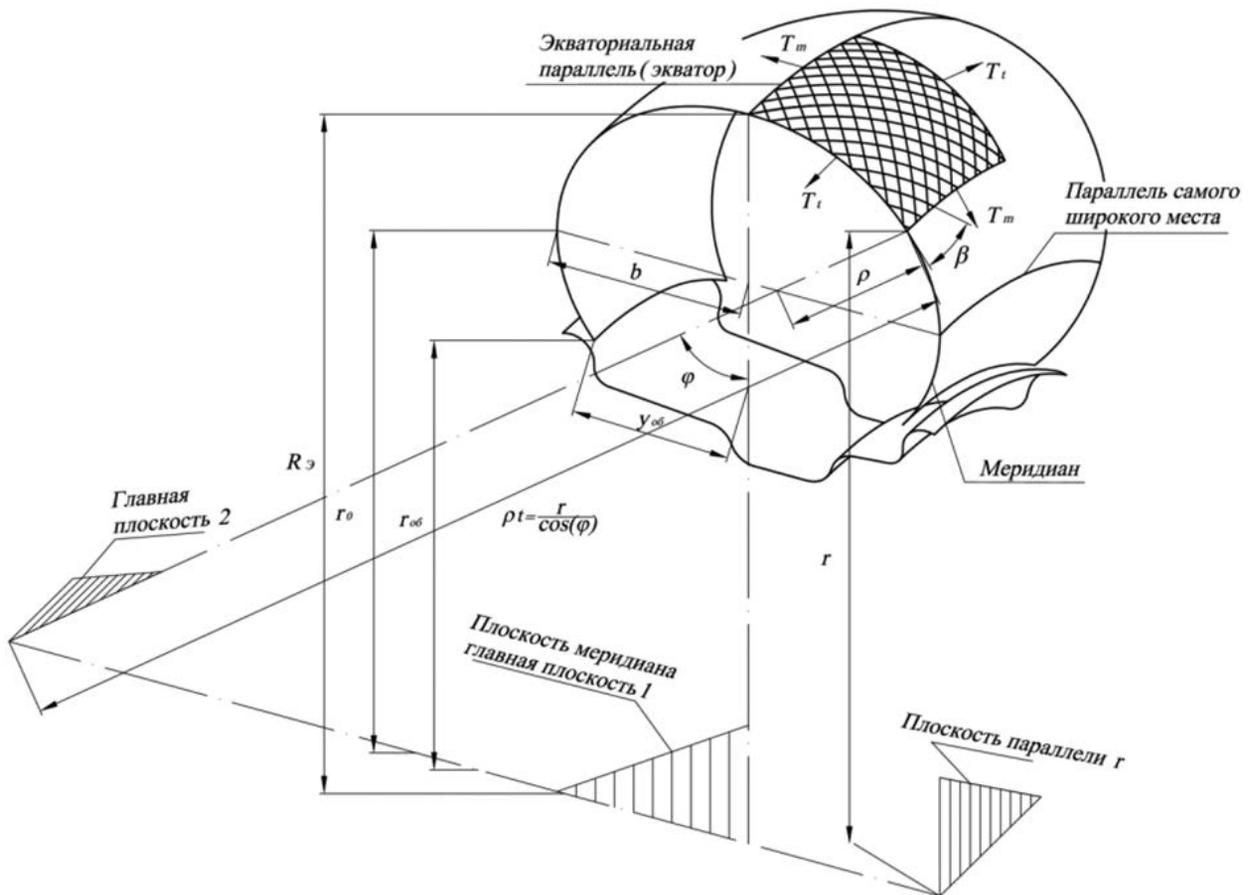


Рисунок 1 — Участок срединной поверхности каркаса диагональной шины 6,95-14, смонтированной на ободе 5 J-14 и нагруженной внутренним давлением

Figure 1 — Section of the frame middle surface of the cross-ply tire 6.95-14, mounted on the rim 5 J-14 and loaded with internal pressure

усилий в нитях корда по толщине каркаса равномерным. Поскольку на такой элемент будут оказывать существенное влияние только мембранные усилия, изгибающими моментами и поперечными силами можно пренебречь. На рисунке 1 представлен участок срединной поверхности каркаса диагональной шины 6,95-14 на ободе 5 J-14.

В соответствии с терминологией работ [1–3, 5], кривая пересечения экваториальной плоскости и срединной поверхности каркаса называется главной параллелью (экваториальной параллелью или экватором). Кривая пересечения плоскости меридиана и срединной поверхности каркаса называется меридианом, средней линией каркаса или профилем шины (если расчет равновесного профиля шины ведут по внутреннему контуру шины, под меридианом понимается кривая пересечения плоскости меридиана и поверхности внутреннего контура). Под сетчатой оболочкой понимают срединную поверхность резинокордной конструкции, состоящей из четного количества слоев корда, в которых нити скрещиваются под одинаковым углом.

При выводе уравнения связи между интенсивностью меридионального и окружного усилий необходимо учитывать, что между относительно жесткими слоями обрешиненного корда находится резиновая прослойка и при изгибе боковой стен-

ки в резиновой прослойке возникают напряжения сдвига (рисунок 2).

В трудах Бидермана [1–4], Робекки [5], Пурди [6], Накаджима [7] получены уравнения, описывающие равновесное состояние профиля шины:

$$\frac{1}{\rho} + \frac{\operatorname{tg}^2(\beta) \cdot \cos(\varphi)}{r} = \frac{2 \cdot r \cdot \cos(\varphi)}{r^2 - r_0^2}, \quad (1)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{r^2 - r_0^2}{R_\ominus^2 - r_0^2} \cdot e^{\int_{r_0}^r \frac{\operatorname{tg}^2(\beta)}{r} dr}. \quad (2)$$

Следуя теории сетчатых оболочек, запишем выражение для интенсивности меридионального и окружного усилий в кордной системе диагональной шины:

$$T_m = p \cdot \frac{R_\ominus^2 - r_0^2}{2 \cdot r \cdot e^{\int_{r_0}^r \frac{\operatorname{tg}^2(\beta)}{r} dr}}; \quad (3)$$

$$T_t = p \cdot \frac{(R_\ominus^2 - r_0^2) \cdot \operatorname{tg}^2(\beta)}{2 \cdot r \cdot e^{\int_{r_0}^r \frac{\operatorname{tg}^2(\beta)}{r} dr}}. \quad (4)$$

Напряженное состояние диагональной шины можно определить, если известен путь нити корда на поверхности, полученной вращением вокруг оси у меридиана сетчатой оболочки. Траектория

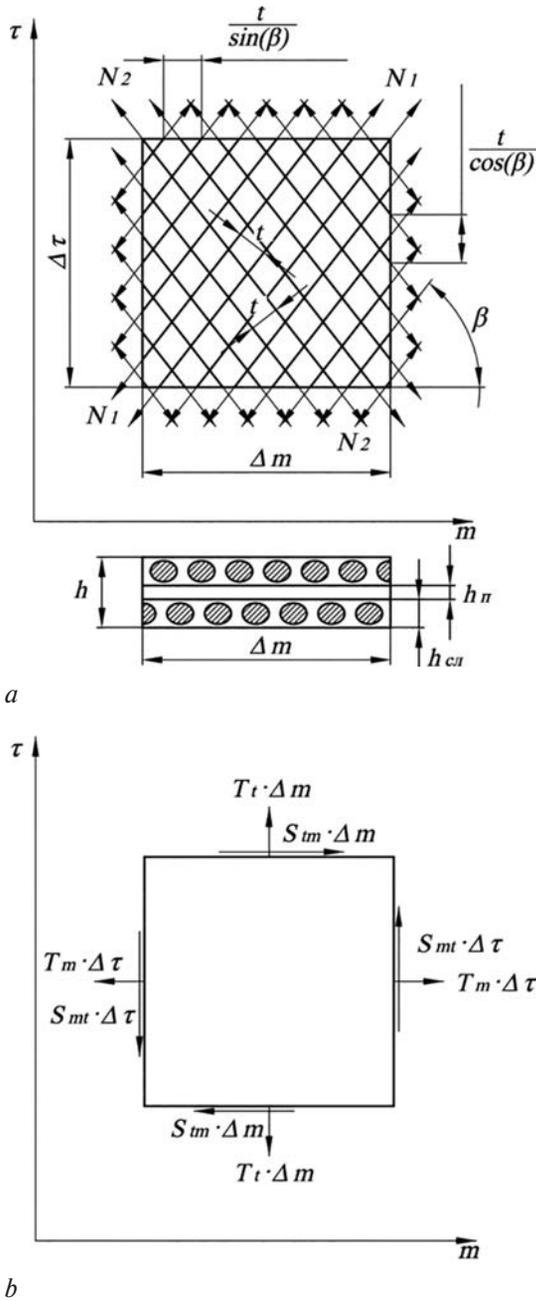


Рисунок 2 — К выводу уравнения связи между интенсивностью меридионального и окружного усилий  
 Figure 2 — To the derivation of an equation of connection between the intensity of the meridional and circumferential forces

нити корда диагональной шины не может быть определена с помощью простого уравнения, поскольку она зависит от материала, производственного процесса и других факторов.

В работах [5–8] приведены различные траектории нити корда на поверхности меридиана. Так как они оказывают существенное влияние на геометрию и напряженное состояние равновесной конфигурации диагональной шины, показаны их преимущества и недостатки. Можно предположить, что существуют технологические процессы, посредством которых реализуются эти траектории. Например, при геодезической траектории, обеспечивающей кратчайшее расстояние

на поверхности между точкой на экваторе шины и точкой обода, шина нагружается равномерно по всей длине, а в резиновой матрице отсутствуют напряжения межслойного сдвига, что может оказать существенное влияние на эксплуатационные характеристики шины. Далее рассматривается траектория нити корда при пантографической деформации, которая соответствует технологическому процессу производства пневматических шин на ОАО «Белшина» (рисунок 3).

Для определения геометрических параметров равновесной конфигурации и напряженного состояния сетчатой оболочки при указанном виде деформации используются уравнения:

$$y = \int_r^{R_3} \frac{(r^2 - r_0^2) \cdot \sqrt{R_3^2 - r^2} \cdot \sin^2(\beta_k)}{r \sqrt{R_3^2 \cdot \cos^2(\beta_k) \cdot (R_3^2 - r_0^2)^2 - (r^2 - r_0^2)^2 \cdot (R_3^2 - r^2 \cdot \sin^2(\beta_k))}} \cdot dr; \quad (5)$$

$$s = \int_r^{R_3} \frac{R_3 \cdot \cos(\beta_k) \cdot (R_3^2 - r_0^2)}{r \sqrt{R_3^2 \cdot \cos^2(\beta_k) \cdot (R_3^2 - r_0^2)^2 - (r^2 - r_0^2)^2 \cdot (R_3^2 - r^2 \cdot \sin^2(\beta_k))}} \cdot dr; \quad (6)$$

$$L = \int_r^{R_3} \frac{R_3 \cdot \cos(\beta)}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{R_3^2} \cdot \sin^2(\beta_k)}} \times \frac{(R_3^2 - r_0^2)}{\sqrt{R_3^2 \cdot \cos^2(\beta_k) \cdot (R_3^2 - r_0^2)^2 - (r^2 - r_0^2)^2 \cdot (R_3^2 - r^2 \cdot \sin^2(\beta_k))}} \cdot dr; \quad (7)$$

$$\rho = \frac{R_3 \cdot \cos(\beta_k) \cdot (R_3^2 - r_0^2) \cdot \sqrt{R_3^2 - r^2} \cdot \sin^2(\beta_k)}{r \cdot (2 \cdot R_3^2 - (3 \cdot r^2 - r_0^2) \cdot \sin^2(\beta_k))}; \quad (8)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{(r^2 - r_0^2) \cdot \cos(\beta)}{(R_3^2 - r_0^2) \cdot \cos(\beta_k)}; \quad (9)$$

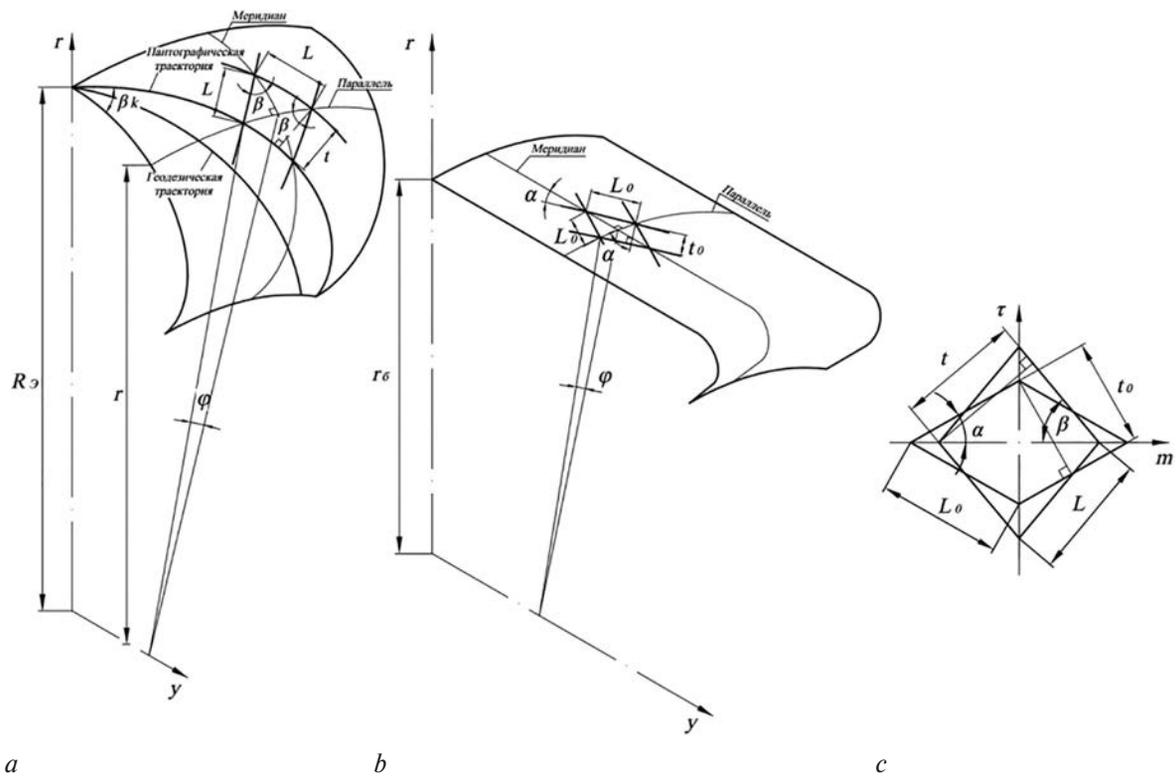
$$N = p \cdot \frac{R_3^2 - r_0^2}{2 \cdot n \cdot i_3 \cdot R_3} \cdot \frac{1}{\cos^2(\beta)}; \quad (10)$$

$$T_m = p \cdot \frac{(R_3^2 - r_0^2) \cdot \cos(\beta_k)}{2 \cdot r \cdot \cos(\beta)}; \quad (11)$$

$$T_t = p \cdot \frac{(R_3^2 - r_0^2) \cdot \cos(\beta_k)}{2 \cdot r \cdot \cos(\beta)} \cdot \operatorname{tg}^2(\beta). \quad (12)$$

Изменяя радиальную координату  $r$  при постоянстве геометрических параметров  $R_3$ ,  $r_0$ ,  $\beta_k$ , по формуле (5) можно вычислить координаты точек, лежащих на меридиане равновесной конфигурации, длину дуги меридиана по зависимости (6) и длину нити на поверхности меридиана по формуле (7). Варьируя геометрические параметры  $R_3$ ,  $r_0$ ,  $\beta_k$ , получают семейства кривых (номограмм), для которых определяются геометрические характеристики и напряженное состояние равновесной конфигурации сетчатой оболочки.

В проектном расчете по известным габаритам шины на обода следует определить профиль шины в прессформе и ее напряженное состояние на обода. При проверочном расчете по известному про-



**Рисунок 3 — Угол наклона нити при пантографической деформации элемента каркаса диагональной шины: *a* — траектория нити корда на поверхности равновесной конфигурации вулканизированной шины; *b* — траектория нити корда на поверхности сборочного барабана («сырая» шина); *c* — изменение геометрии элемента каркаса в результате технологического процесса**  
**Figure 3 — Angle of the threads with pantographical deformation of the frame element of the cross-ply tires: *a* — trajectory of the cord threads on the surface of the equilibrium configuration of the vulcanized tire; *b* — trajectory of the cord thread on the surface of the assembly drum (uncured tire); *c* — change of the geometry of the frame element in the result of the technological process**

филю в прессформе определяется профиль и напряженное состояние шины на обode.

Графический способ решения краевых задач проектного и поверочного расчета диагональной шины был предложен в работах [1, 2]. Несмотря на то, что с помощью атласа номограмм равновесных конфигураций [2] можно решать краевые задачи проектного и поверочного расчета диагональной шины, а также определять усилия и деформации в нитях корда, имеет место сложности проектирования новых моделей шин.

Во-первых, профиль меридиана равновесной конфигурации приходится строить вручную. Во-вторых, при выполнении проектного и поверочного расчета конструктору необходимо выполнять вспомогательные вычисления. В третьих, для моделирования монтажа шины на обод и нагружения ее внутренним давлением и эксплуатационной нагрузкой в конечно-элементных программах необходимо иметь модель распределения материалов в радиальном сечении шины в конфигурации прессформы, которая строится на основе параметров найденной равновесной конфигурации. Поэтому на стадии проектирования востребовано программное обеспечение, позволяющее не только определять напряженное состояние сетчатой оболочки, но и получать координаты ее профиля при выполнении проектного и поверочного расчета

с передачей в систему автоматизированного проектирования (САПР).

С этой целью расчетные зависимости, описывающие геометрические характеристики меридиана сетчатой оболочки, были модифицированы и представлены в форме, более удобной для дальнейшего использования. В частности, функционалы (5)–(7) имеют ограничения: при  $r = R_э$  знаменатели их подынтегральных функций обращаются в ноль и их значение в этой точке не определено. Были введены новые переменные интегрирования таким образом, чтобы неопределенность значений подынтегральных функций была не по верхнему пределу интегрирования, а по нижнему. После замены радиальных координат  $r, r_0, R_э$  на относительные координаты  $\lambda = \frac{r}{R_э}, \lambda_0 = \frac{r_0}{R_э}, 1 = \frac{R_э}{R_э}$  уравнения (5)–(7) записывались в виде:

$$\left( \begin{array}{l} \lambda = \frac{r}{R_э} \quad d\lambda = \frac{dr}{R_э} \\ \lambda_0 = \frac{r_0}{R_э} \quad , \quad \lambda|_{r=R_э} = 1 \\ dr = R_э \cdot d\lambda \quad \lambda|_{r=0} = 0 \end{array} \right); \quad (13)$$

$$y = R_э \int_0^1 \frac{(\lambda^2 - \lambda_0^2) \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\beta_k)}}{\sqrt{\cos^2(\beta_k) \cdot (1 - \lambda_0^2)^2 - (\lambda^2 - \lambda_0^2)^2 \cdot (1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\beta_k))}} \cdot d\lambda; \quad (14)$$

$$s=R_{\Theta} \int_0^1 \frac{\cos(\beta_k) \cdot (1-\lambda_0^2)}{\sqrt{\cos^2(\beta_k) \cdot (1-\lambda_0^2)^2 - (\lambda^2 - \lambda_0^2)^2 \cdot (1-\lambda^2 \cdot \sin^2(\beta_k))}} \cdot d\lambda; \quad (15)$$

$$L=R_{\Theta} \int_0^1 \frac{\cos(\beta_k)}{\sqrt{1-\lambda^2 \cdot \sin^2(\beta_k)}} \times \frac{(1-\lambda_0^2)}{\sqrt{\cos^2(\beta_k) \cdot (1-\lambda_0^2)^2 - (\lambda^2 - \lambda_0^2)^2 \cdot (1-\lambda^2 \cdot \sin^2(\beta_k))}} \cdot d\lambda. \quad (16)$$

Для устранения сингулярности по верхнему пределу интегрирования в выражениях (14), (15), (16) введем новую переменную  $\eta$  и произведем следующую замену:

$$\left. \begin{aligned} \eta^2 &= 1 - \lambda^2 & \lambda^2 &= 1 - \eta^2 \\ \eta_0^2 &= 1 - \lambda_0^2 & \lambda_0^2 &= 1 - \eta_0^2 \\ 2 \cdot \eta \cdot d\eta &= -2 \cdot \lambda \cdot d\lambda & d\lambda &= -\frac{\eta}{\lambda} \cdot d\eta = -\frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \cdot d\eta \\ \eta|_{\lambda=1} &= \sqrt{1-1} = 0 & \eta|_{\lambda=\lambda_i} &= \sqrt{1-\lambda_i^2}, \quad 0 < \lambda_i \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (16')$$

Получим:

$$y=R_{\Theta} \int_0^{\sqrt{1-\lambda_i^2}} \frac{\eta_0^2 - \eta^2}{\sqrt{1-\eta^2}} \times \frac{\sqrt{\cos^2(\beta_k) + \eta^2 \cdot \sin^2(\beta_k)}}{\sqrt{(2 \cdot \eta_0^2 - \eta^2) \cdot (\cos^2(\beta_k) + \eta^2 \cdot \sin^2(\beta_k)) - \eta_0^4 \cdot \sin^2(\beta_k)}} \cdot d\eta; \quad (17)$$

$$s=R_{\Theta} \cdot \int_0^{\sqrt{1-\lambda_i^2}} \frac{\eta_0^2}{\sqrt{1-\eta^2}} \times \frac{\cos(\beta_k)}{\sqrt{(2 \cdot \eta_0^2 - \eta^2) \cdot (\cos^2(\beta_k) + \eta^2 \cdot \sin^2(\beta_k)) - \eta_0^4 \cdot \sin^2(\beta_k)}} \cdot d\eta; \quad (18)$$

$$L=R_{\Theta} \cdot \int_0^{\sqrt{1-\lambda_i^2}} \frac{\eta_0^2}{\sqrt{1-\eta^2} \cdot \sqrt{\cos^2(\beta_k) + \eta^2 \cdot \sin^2(\beta_k)}} \times \frac{\cos(\beta_k)}{\sqrt{(2 \cdot \eta_0^2 - \eta^2) \cdot (\cos^2(\beta_k) + \eta^2 \cdot \sin^2(\beta_k)) - \eta_0^4 \cdot \sin^2(\beta_k)}} \cdot d\eta. \quad (19)$$

На основе полученного математического описания равновесной конфигурации диагональной шины в отделе расчетных исследований механики шин управления проектирования и конструирования шин ОАО «Белшина» разработано программное обеспечение анализа напряженного состояния сетчатой оболочки и определения конструктивных параметров соответствующей резинокордной системы по следующему алгоритму:

1. Построение профиля равновесной конфигурации по радиусу экватора и точки обода. Исходные данные:  $\beta_k, R_{\Theta}, y_{об}, r_{об}$ .

2. Определение точки обода и построение профиля равновесной конфигурации по радиусу экватора и ширине профиля. Исходные данные:  $\beta_k, R_{\Theta}, b, y_{об}$ .

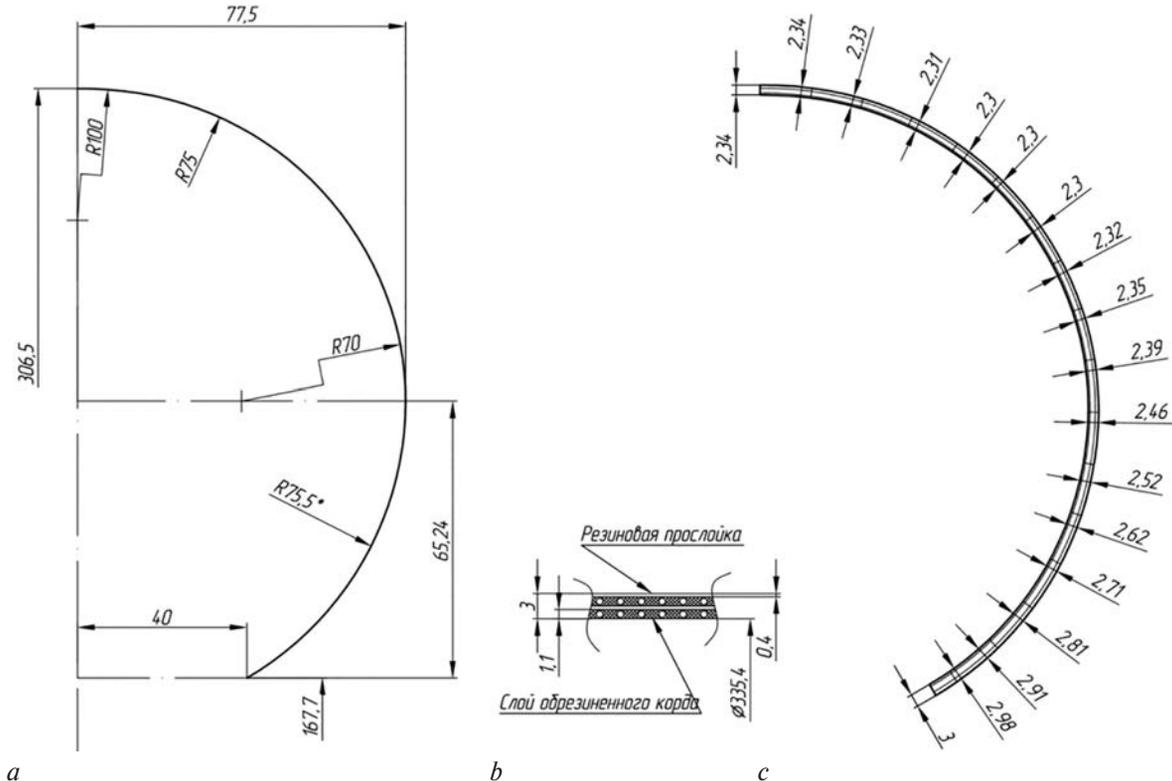


Рисунок 4 — Профиль меридиана оболочки в конфигурации прессформы и ее геометрические характеристики: *a* — меридиан оболочки; *b* — сечение двухслойной оболочки на сборочном барабане; *c* — профиль оболочки в конфигурации прессформы, построенный с учетом прессовок по толщине, для импорта в MSC.Marc  
 Figure 4 — Profile of the shell meridian in the mold configuration and its geometric characteristics: *a* — meridian of the shell; *b* — cross-section of the two-layer shell on the assembly drum; *c* — profile of the shell in the mold configuration, built taking into account the thickness compressions, for import to MSC.Marc

Таблица 1 — Механические характеристики нити корда  
Table 1 — Mechanical characteristics of the cord thread

Корд 2Л30НТ		Корд 35-АДУ-П	
Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
97 400	0,3	2425	0,4

Таблица 2 — Характеристики резинокордной системы оболочки на экваторе  
Table 2 — Characteristics of the rubber-cord shell system at the equator

№ слоя	Площадь поперечного сечения нити корда $S$ , мм <sup>2</sup>	Плотность нитей корда $i_e$ , 1/мм	Угол наклона нити корда $\beta_k$ , °	Радиус $R_э$ , мм
1	0,4778	0,75	50,8	307,5
2	0,4778	0,75	-50,8	307,5

3. Построение профиля равновесной конфигурации по его ширине и точке обода. Исходные данные:  $\beta_k, b, r_{об}, y_{об}$ .

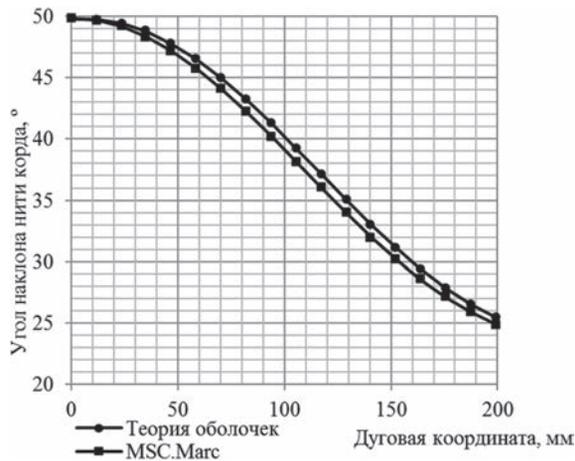
4. Построение профиля равновесной конфигурации по радиусу экватора, относительному радиусу широкого места и относительному радиусу точки обода. Исходные данные:  $\beta_k, R_э, \lambda_0, \lambda_{об}$ .

5. Определение напряженного состояния равновесной конфигурации диагональной шины. Исходные данные:  $\beta_k, R_э, \lambda_0, \lambda_{об}, p, n, i_e$ .

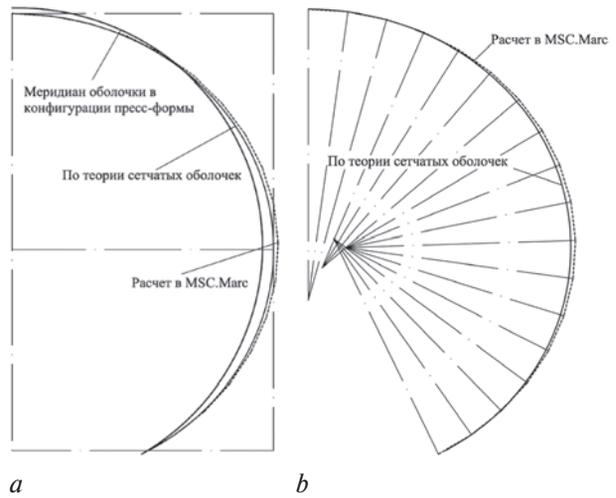
Для проверки полученных результатов задача решалась в конечно-элементном программном комплексе MSC.Marc (рисунок 4). Поверочный расчет проводился для двух вариантов: без учета и с учетом удлинения нити корда в каркасе оболочки.

В таблице 1 приведены механические характеристики относительно жесткого и эластичного материалов корда, использованные в расчете.

В таблице 2 приведены конструктивные характеристики резинокордной системы оболочки



a



a

b

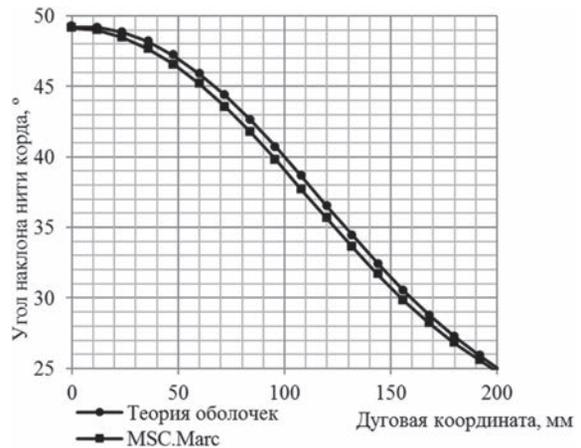
Рисунок 6 — Результаты поверочного расчета с учетом растяжения нити корда в каркасе оболочки: a — сравнение профилей меридиана; b — анализ отклонений меридиана равновесных конфигураций

Figure 6 — Results of the check calculation taking into account the stretching of the cord thread in the shell frame: a — comparison of meridian profiles; b — analysis of deviations of the meridian of equilibrium configurations

на экваторе, которые использовались при моделировании ее свойств в MSC.Marc.

В частности, на рисунках 5 и 6 приведены результаты расчета двухслойной резинокордной системы по теории сетчатых оболочек и при помощи конечно-элементного моделирования в MSC.Marc.

Сравнительный анализ результатов поверочного расчета двухслойной оболочки методами теории равновесных конфигураций и конечных элементов показывал следующие значения отклонений: радиус кривизны меридиана оболочки отклоняется не более чем на 2 %, угол наклона нити корда к плоскости меридиана — не более чем на 3 % и усилия в нитях корда — не более 8 %.



b

Рисунок 5 — Сравнение зависимости изменения угла наклона нити корда к плоскости меридиана от дуговой координаты: a — с учетом растяжения нити корда в каркасе оболочки; b — без учета растяжения нити корда в каркасе оболочки  
Figure 5 — Comparison of the variation of the angle of the cord thread to the meridional plane from the angular coordinate: a — taking into account stretching of the cord thread in the shell frame; b — without taking into account the stretching of the cord thread in the shell frame

**Заключение.** Теория сетчатых оболочек удовлетворительно описывает геометрию равновесного профиля шин диагональной конструкции, позволяя определить напряженное состояние резинокордных систем и их конструктивные параметры на различных этапах технологического процесса производства шин.

С помощью программного обеспечения, разработанного на базе этой теории, можно решать краевые задачи проектного и поверочного расчета шин. Его использование на стадии проектирования совместно с конечно-элементным программным продуктом MSC.Marc дает возможность получить хорошие конструкторские решения по геометрии профиля шины в конфигурации прессформы и распределению материалов в ее радиальном сечении.

## Список литературы

1. Автомобильные шины (конструкция, расчет, испытание, эксплуатация) / В.Л. Бидерман [и др.]. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1963. — 353 с.
2. Атлас номограмм равновесных конфигураций пневматических шин / В.Л. Бидерман [и др.]. — М.: Химия, 1967. — 36 с.
3. Бухин, Б.Л. Введение в механику пневматических шин / Б.Л. Бухин. — М.: Химия, 1988. — 222 с.
4. Бидерман, В.Л. Механика тонкостенных конструкций / В.Л. Бидерман. — М.: Машиностроение, 1977. — 488 с.
5. Robecchi, E. Mechanics of Pneumatic Tire. Part I. The Tire under Inflation Alone / E. Robecchi, L. Amici. — Tire Sci. Technol. — 1973. — Vol. 1(3). — Pp. 290–345.
6. Purdy, J.F. Mathematics Underlying the Design of Pneumatic Tires / J.F. Purdy. — Hiney Printing Co., 1963. — 217 p.
7. Nakajima, Y. Advanced Tire Mechanics / Y. Nakajima. — Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. — 1264 p.
8. Koutny, F. Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires / F. Koutny. — Zlin, CZE, 2007. — 139 p.

KHOTKO Alexander V.

Head of the Division of Calculation Studies of Tire Mechanics of the Department of Tire Design and Construction of the R&D Center<sup>1</sup>

E-mail: hotkoav2017@gmail.com

SHIL'KO Sergey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Mechanics of Composites and Biopolymers<sup>2</sup>

E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

<sup>1</sup>BELSHINA JSC, Bobruisk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

Received 09 August 2019.

## APPLICATION OF THE THEORY OF GRIDSHELLS IN THE DESIGN OF DIAGONAL AUTOMOBILE TIRES

*The article considers the equations of the theory of gridshells and methods for solving boundary problems for determining the profile of cross-ply and radial tires of the required width passing through a given point of the rim and a point at the equator. The algorithms for design and check calculation of tires are implemented. The forces in the body cord threads are determined. The results of calculations based on the theory of gridshells are compared with the results of finite element modeling in the MSC.Marc software package.*

**Keywords:** elastomeric composites, automobile tires, equilibrium configuration, theory of gridshells, finite element modeling

## References

1. Biderman V.L., Guslitzer R.L., Zakharov S.P., Seleznev I.I. *Avtomobilnye shiny (konstruktsiya, raschet, ispytanie, ekspluatatsiya)* [Automobile tires (design, calculation, testing, operation)]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo khimicheskoy literatury, 1963. 353 p.
2. Biderman V.L., Bukhin B.L., Nikolaev I.K., Smetankina R.M. *Atlas nomogramm ravnovesnykh konfiguratsiy pnevmaticheskikh shin* [Atlas of nomograms of equilibrium configurations of pneumatic tires]. Moscow, Khimiya Publ., 1967. 36 p.
3. Bukhin B.L. *Vvedenie v mekhaniku pnevmaticheskikh shin* [Introduction to mechanics of pneumatic tires]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 222 p.
4. Biderman V.L. *Mekhanika tonkostennykh konstruktсий* [Mechanics of thin-walled structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 488 p.
5. Robecchi E., Amici L. Mechanics of Pneumatic Tire. Part I. The Tire under Inflation Alone. *Tire Science and Technology*, 1973, vol. 1(3), pp. 290–345.
6. Purdy J.F. *Mathematics Underlying the Design of Pneumatic Tires*. Hiney Printing Co., 1963. 217 p.
7. Nakajima Y. *Advanced Tire Mechanics*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. 1264 p.
8. Koutny F. *Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires*. Zlin, 2007. 139 p.