

УДК 539.3; 621.891; 691.175

А.В. ХОТЬКО

начальник отдела расчетных исследований механики шин  
E-mail: hotkoav2017@gmail.com

ОАО «Белшина», г. Бобруйск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20.10.2021.

## РЕШЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИФИКАЦИИ ШИНЫ РАДИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Рассмотрены способы решения конструкторско-технологических задач на стадии проектирования спецификации шины радиальной конструкции. На базе теории сетчатых оболочек построена схема расчета распределения материалов в радиальном сечении сырой и вулканизированной шины радиальной конструкции. Для плоского способа сборки шины радиальной конструкции предложены алгоритмы расчета профилированных деталей. Рассмотрены алгоритмы поиска геометрии формообразующих поверхностей деталей протектора, боковины. Решена краевая задача поиска профиля сформированной сырой покрышки на второй стадии сборки. Предложен способ определения параметров технологической оснастки для сборки шин. Описаны эксперименты, проведенные для проверки принятых гипотез теории упругости.*

**Ключевые слова:** автомобильная шина, проектный и поверочный расчет, равновесная конфигурация, плоский способ сборки, резинокордная система брекера и каркаса, профилированные детали, прессовка детали по толщине, прессовка детали по ширине, сборочный барабан 1-й и 2-й стадии, электронный прототип шины, напряженно-деформированное состояние шины, цельнометаллокордная шина, конструкторско-технологическая карта

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-37-47>

**Введение.** При проведении опытно-конструкторских работ на стадии постановки новых моделей шин на серийное производство, выпуске опытных партий шин необходимо получить образец шины, близкий к своему электронному прототипу. Под электронным прототипом шины (виртуальной электронной моделью) понимается оптимальный для данного типоразмера профиль с распределением материалов в ее радиальном сечении в конфигурации пресс-формы. Данный профиль определяется на стадии выполнения: проектного, поверочного расчетов; моделирования в специализированном программном обеспечении: обжатия шины, смонтированной на обод дорожным покрытием; ее разгона, торможения, стационарного качения и качения с боковым уводом. Оптимальный виртуальный профиль шины определяется по результатам анализа расчетов нескольких вариантов профилей. Критериями, по которым определяется отклонение выпущенной в результате технологического процесса опытной шины от электронного прототипа, являются:

1. Отклонение геометрии профиля опытной шины от профиля виртуальной.
2. Отклонение конструктивных характеристик резинокордных систем опытной шины от

конструктивных характеристик у электронного прототипа.

3. Отклонение распределения материалов в радиальном сечении опытной шины от распределения материалов у электронного прототипа.

4. Отклонение результатов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) опытной шины, полученного на стадии обратного инженерного анализа от НДС электронного прототипа, полученного на стадии проектирования.

Для минимизации перечисленных выше отклонений опытной шины от электронного прототипа, конструктору шин на стадиях проектирования виртуальной электронной модели и карты конструкторско-технологической (ККТ) необходимо решить следующие задачи:

- определить марки кордов и конструктивные характеристики резинокордных систем брекера и каркаса шины;
- определить технологические параметры сборочного оборудования первой и второй стадии;
- опираясь на данные проектного и поверочного расчетов шины, построить геометрическую модель распределения материалов в ее радиальном сечении в конфигурации пресс-формы (электрон-

ный прототип шины) с учетом прессовок брекера и каркаса по толщине;

- рассчитать прессовки брекера по его ширине на сборочном барабане;
- определить длину нити каркаса на сборочном барабане;
- решить краевую задачу формования каркаса на второй стадии сборки; определить геометрию средней линии каркаса и расстояние между бортовыми кольцами на второй стадии; построить распределение материалов в радиальном сечении сырой шины на второй стадии сборки (электронный прототип сырой шины);
- рассчитать геометрию профилированных деталей шины (бортовых, каркасных, подбрекерных, брекерных, боковины и протектора).

В работах [1–3, 5, 6] рассматриваются методы решения конструкторско-технологических задач для шин диагональной конструкции при полудорновом и полуплоском способах сборки шин. К сожалению, в открытом доступе нет публикаций, в которых бы рассматривались способы решения конструкторско-технологических задач для шин радиальной конструкции при полудорновом и плоском способах сборки.

На методической основе работ [1–8] специалистами ОАО «Белшина» была разработана технология проектирования ККТ, которая в данное время применяется на предприятии при проектировании новых моделей шин. В статье рассмотрены методы решения перечисленных выше задач для плоского способа сборки шины радиальной конструкции.

**Критерии выбора конструктивных параметров резинокордных систем брекера и каркаса шины радиальной конструкции.** К конструктивным параметрам резинокордных систем брекера и каркаса шины относятся: толщина обрешиненного слоя, расстояние между соседними нитями корда в слое (шаг нити корда). Величина, обратная шагу нити корда, называется плотностью нитей. Усилия в нитях корда резинокордных систем брекера и каркаса шины обратно пропорциональны плотности нити корда по экватору шины. Но в зоне контакта шины с дорожным покрытием резинокордная система брекера, каркаса испытывает изгиб, поэтому резина между жесткими нитями будет испытывать деформации сдвига, которые будут способствовать саморазогреву шины. Для характеристики заполнения резиной пространства между нитями в слое и между слоями вводят величины, которые характеризуют резиносодержание

в слое  $\frac{t-d}{d}$  и между слоями  $\frac{h-d}{h}$  (где  $t$  — шаг

в слое;  $d$  — диаметр нити корда;  $h$  — толщина резинокордного слоя). Выбор резиносодержания в слое и по толщинам резинокордных систем шины оказывает влияние на теплообразование и потери на качение. В работах [1, 2] исследова-

лась зависимость поверхностной плотности энергии деформации резинокордного слоя от деформации сдвига в сравнении с плотностью энергии деформации резинового слоя, испытывающего такую же среднюю деформацию сдвига. Была получена следующая зависимость:

$$W_{\gamma} = K \cdot W_{\gamma}^{pc}, \quad (1)$$

где  $W_{\gamma}$  — поверхностная плотность энергии деформации резинокордного слоя;  $W_{\gamma}^{pc}$  — поверхностная плотность энергии деформации резинового слоя;  $K$  — показывает во сколько раз энергия деформации резинокордного слоя больше, чем энергия чисто резинового слоя, испытывающего такую же среднюю деформацию сдвига.

На рисунке 1 изображена зависимость коэффициента  $K$  от  $d/t$ . При выборе конструктивных параметров резинокордных систем брекера и каркаса шины конструктор должен найти оптимум между величиной резиносодержания и статическим запасом прочности. В ходе расчетных и экспериментальных исследований была определена верхняя граница  $d/t < 0,7$ . Критериями выбора армирующих материалов в резинокордном слое являются: статический запас прочности в нитях корда, жесткость нити корда, для комбинированных и текстильных шин низкие гистерезисные потери в нитях корда каркаса, брекера, усталостные характеристики кордов.

В качестве примера приведем результаты расчета резиносодержания в каркасе шины 385/55R22,5 (таблица).

Из таблицы видно, что резиносодержание в каркасе радиальной шины при выполнении технологических операций изменяется, увеличиваясь по ширине и уменьшаясь по толщине. При разработке комбинированных шин радиальной конструкции высоких серий в многослойном каркасе вулканизированной шины должно выполняться условие  $\frac{h-d}{h} \leq 0$ .

**Расчет прессовок каркаса по толщине и построение распределения материалов в радиальном сечении бортовой зоны шины.** На стадии

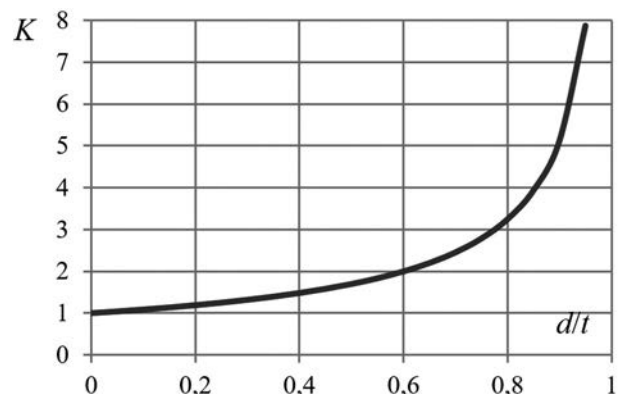


Рисунок 1 — Зависимость  $K$  от  $d/t$   
Figure 1 — Dependence of  $K$  on  $d/t$

Таблица — Результаты расчета резиносодержания в каркасе шины 385/55R22,5  
 Table — Results of the calculation of the rubber content in the tire frame 385/55R22.5

На сборочном барабане 1-й стадии				В вулканизованной шине			
По ширине		По толщине		По ширине		По толщине	
$d/t$	$\frac{t-d}{d}$	$d/h$	$\frac{h-d}{h}$	$d/t$	$\frac{t-d}{d}$	$\frac{h-d}{h}$	$d/h$
0,607	0,647	0,386	1,588	0,341	1,935	1,452	0,452

проектирования новой шины радиальной конструкции по окончании проектного и поверочного расчетов, описанных в работах [9, 10], конструктор получает вариант геометрии профиля шины в конфигурации пресс-формы. Для проведения расчетных исследований при помощи специализированного программного обеспечения, в основе которого лежит метод конечных элементов, конструктору необходимо построить распределение материалов в радиальном сечении шины в конфигурации пресс-формы (вариант электронного прототипа шины). Задача построения распределения материалов в радиальном сечении шины разбивается на две. В начале, исходя из геометрии внутреннего профиля шины (расчетный меридиан), рассчитываются прессовки по толщине деталей каркаса, прослоек каркаса и гермослоя, а также прессовки в завороте каркаса и бортовых деталей, геометрические параметры бортового кольца и наполнительного шнура. Конструкция бортового кольца рассчитывается на стадии проектного и поверочного расчетов. Таким образом, решается первая часть задачи. Вторая часть задачи связана с построением распределения материалов по ширине брекера.

Прессовки деталей каркаса по толщине связаны с технологическими операциями формования каркаса на второй стадии сборки, формованием и вулканизацией сырой покрышки в пресс-форме. При этом каркас шины воспринимает нагрузку от внутреннего давления и каждый его сегмент с радиуса сборочного барабана подымается на радиус, который соответствует положению сегмента на поверхности равновесной конфигурации. В результате этого в окружном направлении каждый сегмент растягивается, а ширина и толщина сегмента изменяется в соответствии с уравнениями прессовок по ширине и толщине, при этом также изменяется плотность нитей. Уравнения, которые описывают эти изменения, были получены в работах [1–2, 4–6, 8, 9]. Так как профиль шины обладает симметрией, то расчет прессовок выполняют для его половины. Внутренний профиль шины разбивают на сегменты равной ширины (рисунок 2). Количество сегментов  $N$  должно быть  $\geq 20$ . Для расчета прессовок необходимо знать диаметр сборочного барабана 1-й стадии сборки.

Прессовка  $i$ -го сегмента каркаса по толщине рассчитывается по формуле

$$\frac{t_i}{t_{0i}} = \frac{R_0}{(1 + \epsilon_0) \cdot R_i}, \quad (2)$$

где  $t_i$  — толщина  $i$ -го сегмента каркаса в вулканизованной шине в конфигурации пресс-формы;  $t_{0i}$  — толщина  $i$ -го сегмента каркаса на сборочном барабане;  $R_0$  — радиус сборочного барабана;  $R_i$  — радиус  $i$ -го сегмента каркаса в вулканизованной шине (радиальная координата середины расчетного сегмента);  $\epsilon_0$  — условная вытяжка нити корда (параметр, который зависит от марки армирующего материала каркаса, для легковых шин лежит в диапазоне 0,02...0,04, а для ЦМК (цельнометаллокордных) грузовых шин — 0,005...0,01).

Прессовка  $i$ -го сегмента каркаса по ширине на сборочном барабане рассчитывается по формуле

$$\frac{b_i}{b_{0i}} = (1 + \epsilon_0), \quad (3)$$

где  $b_i$  — ширина  $i$ -го сегмента каркаса в вулканизованной шине в конфигурации пресс-формы;  $b_{0i}$  — ширина  $i$ -го сегмента каркаса на сборочном барабане 1-й стадии.

Из формулы (3) видно, что на сборочном барабане ширина каркаса до основания бортового кольца должна быть уменьшена на величину  $(1 + \epsilon_0)$ , которая характеризует вытяжку каркаса при формовании и вулканизации его в пресс-форме. Это

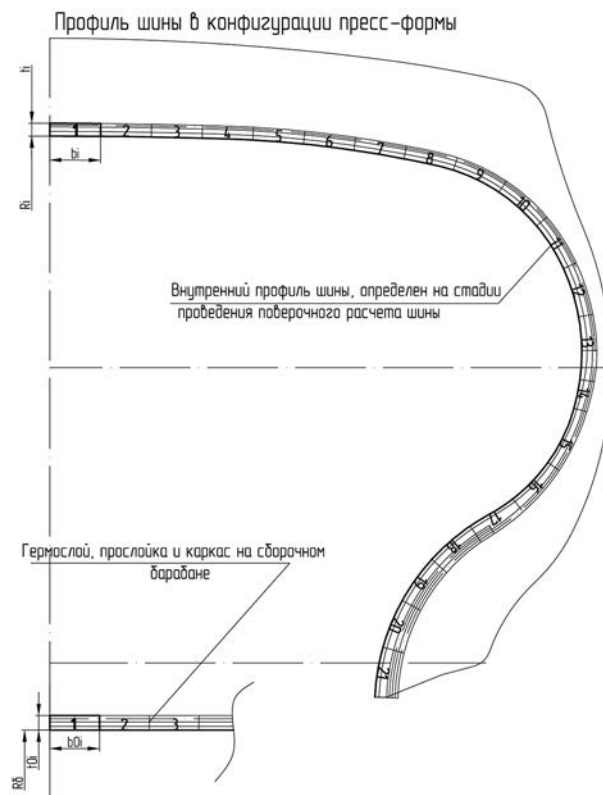


Рисунок 2 — Пример расчета прессовок каркаса и гермослоя по толщине шины 385/55R22,5  
 Figure 2 — Example of calculating the press forming of the frame and the innerliner by tire thickness 385/55R22.5

гарантирует натяжение нити каркаса при изготовлении шины. Выбор величины  $\varepsilon_0$  зависит от марки армирующего материала. Большая величина  $\varepsilon_0$  может привести к уходу бортовых колец и прорезанию нитями каркаса гермослоя. Малая величина  $\varepsilon_0$  приводит к извилистости нити каркаса.

На рисунке 2 представлены результаты решения задачи по определению прессовок каркаса по толщине и построению распределения материалов в радиальном сечении бортовой зоны шины 385/55R22,5, которые были получены с помощью формул (2), (3).

**Расчет прессовок брекера по толщине и его прессовок по ширине на сборочном барабане.** К построению брекера в вулканизованной шине приступают после определения границы «брекер — каркас» (рисунок 3). Предварительная ширина границы «брекер — каркас» определяется на стадии решения задачи проектного расчета. Ширина границы «брекер — каркас»  $B$  и расстояние  $p$  уточняются при анализе НДС различных вариантов электронного прототипа шины, полученных с помощью MSC.Marc при моделировании различных режимов его нагружения.

Граница «брекер — каркас» разбивается на сегменты равной ширины (рисунок 4). Количество сегментов  $N$  должно быть  $\geq 20$ . Для расчета прессовок необходимо знать диаметр брекерного барабана. Диаметр брекерного барабана определяется вытяжкой брекера  $\frac{h}{R_6} \cdot 100\%$ , которую задает

конструктор на стадии выполнения проектного расчета шины. Вытяжка брекера — технологический параметр, который определяет, на сколько процентов от радиуса брекерного барабана вытягивается брекер при формовании и вулканизации в пресс-форме. Диапазон вытяжек брекера для шин радиальной конструкции различных типоразмеров составляет величину 1,5...4%. Вытяжка брекера необходима для натяжения нитей каркаса и брекера, проникновения при формовании и вулканизации резины между филаментами нитей брекера. Это улучшает прочность связи между резиной и кордом.

Прессовка  $i$ -го сегмента брекера по толщине рассчитывается по формуле



Рисунок 3 — Определение границы «брекер — каркас»  
Figure 3 — Defining the breaker-frame boundary

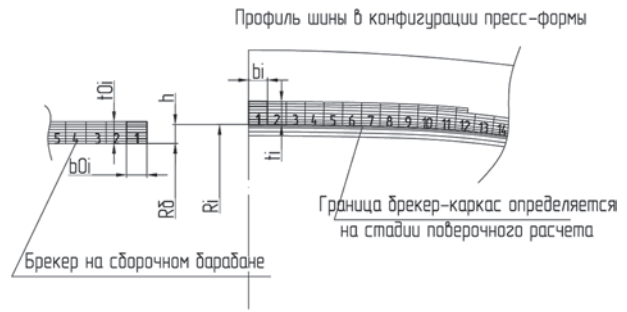


Рисунок 4 — Поясняющий пример расчета прессовок брекера по толщине в вулканизованной шине в конфигурации пресс-формы и прессовок брекера по ширине на сборочном барабане  
Figure 4 — Explanatory example of calculating the breaker presses by thickness in a vulcanized tire in the configuration of the mold and the presses of the breaker by width on the assembly drum

$$\frac{t_i}{t_{0i}} = \frac{R_6 \cdot \cos(\alpha)}{R_i \cdot \sin(\beta_i)}, \quad (4)$$

где  $t_i$  — толщина  $i$ -го сегмента брекера в вулканизованной шине;  $t_{0i}$  — толщина  $i$ -го сегмента брекера на сборочном барабане;  $\alpha$  — угол наклона нити корда брекера на сборочном барабане к плоскости меридиана;  $\beta_i$  — угол наклона нити корда  $i$ -го сегмента брекера в вулканизованной шине к плоскости меридиана;  $R_6$  — радиус брекерного барабана;  $R_i$  — радиус  $i$ -го сегмента брекера в вулканизованной шине.

Прессовка  $i$ -го сегмента брекера по ширине на сборочном барабане рассчитывается по формуле

$$\frac{b_i}{b_{0i}} = \frac{\cos(\beta_i)}{\cos(\alpha)}, \quad (5)$$

где  $b_i$  — ширина  $i$ -го сегмента брекера в вулканизованной шине;  $b_{0i}$  — ширина  $i$ -го сегмента брекера на сборочном барабане.

Для расчета прессовок брекера необходимо знать закон, по которому изменяется угол наклона нити корда при вытяжке брекера. В работе [6] для определения угла наклона нити корда брекера к плоскости меридиана предложено выражение

$$\sin(\beta_i) = \left( \frac{R_6}{R_i} \right)^n \cdot \sin(\alpha). \quad (6)$$

При выпуске опытных партий шин проводился анализ срезов и срезов расслоек. Анализируя конструктивные характеристики брекера вулканизованных шин опытных партий, были определены значения показателя  $n$  для шин различного назначения. Для легковых шин  $n = 0,65$ , для грузовых ЦМК  $n = 0,47$ .

Анализ формул (4)–(6) показывает, что при вытяжке брекера в пресс-форме при формовании и вулканизации происходит изменение его ширины, угла наклона нити корда к плоскости меридиана и плотности нитей корда.

**Решение задачи формования сырой шины на 2-й стадии сборки.** Сборка шины радиальной конструкции происходит в две стадии. Это связа-

но с тем, что жесткий в окружном направлении брекерный пояс не дает нитям каркаса сформоваться без извилистости. Поэтому сырой шине радиальной конструкции необходимо придать форму, близкую к вулканизованной шине. Детали гермослоя, каркаса, боковины, бортовых лент, боковин, крыльев накладывают в определенной последовательности на цилиндрический сборочный барабан 1-й стадии. Параллельно собирается брекерно-протекторный пояс на брекерном барабане. Затем при помощи манипулятора каркас переносится на сборочный барабан 2-й стадии, манипулятором переносится собранный брекерно-протекторный пояс, который центруется по отношению к каркасу. Далее идет формование каркаса при помощи подачи воздуха во внутреннюю полость сырой покрышки и изменения расстояния между бортовыми кольцами шины. При формовании устанавливается оптимальное расстояние между бортовыми кольцами, которое называется раздвигом сборочного барабана 2-й стадии. Оптимальным считается расстояние, при котором ширина контакта сформованного каркаса и брекерно-протекторного пояса принимает максимально возможное значение. При максимальной ширине контакта прикатчиком проще прикатать брекерно-протекторный пояс. Уменьшается вероятность отслоения брекерно-протекторного пояса от каркаса сырой покрышки.

На стадии разработки ККТ конструктору необходимо уметь определять раздвиг формования сырой покрышки на 2-й стадии сборки, а на стадии расчета распределения материалов в радиальном сечении сырой покрышки определять границу сформованного каркаса. На базе границы сформованного каркаса описанным выше способом можно рассчитать распределение материалов в сырой покрышке.

**Постановка задачи.** По заданной длине нити корда каркаса, диаметру брекерно-протекторного пояса, радиусу точки обода определить: геометрию профиля границы сформованного каркаса, раздвиг сборочного барабана в конце формования, ширину зоны регулировки раздвига барабана.

Длина нити сформованного каркаса определяется методами теории сетчатых оболочек и описывается функционалом:

$$\left( \begin{array}{cc} \eta^2 = 1 - \lambda^2 & \lambda^2 = 1 - \eta^2 \\ \eta_0^2 = 1 - \lambda_0^2 & \lambda_0^2 = 1 - \eta_0^2 \\ 2 \cdot \eta \cdot d\eta = -2 \cdot \lambda \cdot d\lambda & d\lambda = -\frac{\eta}{\lambda} \cdot d\eta = -\frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}} \cdot d\eta \\ \eta \Big|_{\lambda=1} = \sqrt{1-1} = 0 & \eta \Big|_{\lambda=\lambda_t} = \sqrt{1-\lambda_t^2}, 0 < \lambda_t \leq 1 \end{array} \right); \quad (7)$$

$$L = R_3 \cdot \int_0^{\sqrt{1-\lambda_t^2}} \frac{\eta_0^2}{\sqrt{1-\eta^2} \cdot \sqrt{2 \cdot \eta_0^2 - \eta^2}} \cdot d\eta. \quad (8)$$

Тогда определим функционал:

$$\Phi(\lambda, \lambda_0) = L_n - R_3 \cdot \int_0^{\sqrt{1-\lambda_t^2}} \frac{\eta_0^2}{\sqrt{1-\eta^2} \cdot \sqrt{2 \cdot \eta_0^2 - \eta^2}} \cdot d\eta, \quad (9)$$

где  $L_n$  — длина нити, которая была определена на этапе построения распределения материалов в радиальном сечении в конфигурации пресс-формы. Для решения поставленной задачи необходимо минимизировать и максимизировать функционал  $\Phi(\lambda, \lambda_0)$ . Для этого применим теорему Эйлера–Лагранжа. Определим  $\Phi'_{\lambda_0}(\lambda, \lambda_0)$  и с помощью метода Ньютона численно решим уравнение:

$$\Phi'_{\lambda_0}(\lambda, \lambda_0) = 0. \quad (10)$$

Для решения задачи формования каркаса сырой шины на 2-й стадии сборки было разработано программное обеспечение, с помощью которого можно определить следующие характеристики: равновесную конфигурацию сформованного каркаса при минимальной ширине контакта с брекерно-протекторным поясом, равновесную конфигурацию сформованного каркаса, при которой ширина контакта принимает максимальное значение, ширину зоны регулировки раздвига сборочного барабана, оптимальную равновесную конфигурацию сформованного каркаса.

На рисунке 5 приведен пример решения задачи формования каркаса на 2-й стадии сборки для шины 385/55R22,5.

При выпуске опытных партий шин экспериментально был определен диапазон изменения угла наклона касательной к оптимальной равновесной конфигурации в точке обода — 73...76°.

**Расчет профиля детали протектора.** Исходными данными для решения задачи по определению профиля детали протектора являются: электронная трехмерная модель рисунка протектора в конфигурации пресс-формы, граница «брекер — протектор» в конфигурации пресс-формы и электронная геометрическая модель брекера, которая определяется на стадии расчета прессовок брекера по толщине и ширине.

При расчете детали протектора принимаются следующие гипотезы: прямых нормалей, несжи-

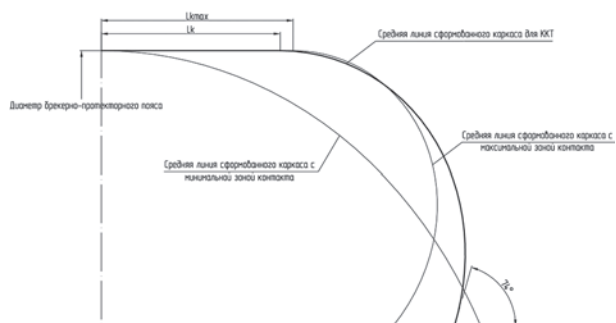


Рисунок 5 — Пример решения задачи формования каркаса сырой шины 385/55R22,5 на 2-й стадии сборки  
Figure 5 — Example of solving the problem of forming the frame of an uncured tire 385/55R22.5 at the 2nd stage of assembly

маемости резины, об изменении ширины расчетного сегмента протектора и связанного с ним сегмента брекера. Проверка принятых гипотез была подтверждена экспериментально. Для этого деталь протектора перед наложением на брекерный барабан разрезалась по толщине на определенных параллелях (рисунок 6), в полученные полости закладывалась маркировочная цветная резина. После вулканизации и проведения испытаний в области разметки делался срез. Анализ срезов показал, что отрезки цветной резины сохраняли свою прямолинейность и были ориентированы по нормали к брекеру (рисунок 7).

Для проверки гипотезы об изменении ширины расчетного сегмента протектора, посередине канавок детали протектора вдоль окружного направления накладывалась цветная маркировочная резина. После вулканизации по расположению разметки цветной резины определялась зона, куда попадала разметка. При совпадении разметки цветной резины с серединами окружных канавок протектора делался вывод о правильности предложенной гипотезы (рисунки 8, 9).

Рассмотрим алгоритм расчета детали протектора. Вращением границы «брекер — протектор» вокруг оси вращения шины получаем поверхность, относительно которой трехмерная электронная модель шага шины делится на 2 детали.

Отрезки нормалей к границе «брекер — каркас», которые были получены на стадии расчета прессовок брекера по толщине и ширине, продлеваем до пересечения с внешним профилем шины в конфигурации пресс-формы. Вращением эскиза, содержащего отрезки удлиненных нормалей вокруг оси вращения шины, получаем конические поверхности, которыми разбиваем трехмерную модель шага протектора на сегменты (рисунок 10).

Определяем объем  $i$ -го расчетного сегмента протектора в вулканизированной шине  $V_i$ . Составляем уравнение  $V_{oi} = V_i$ . Решаем полученное уравнение относительно неизвестной высоты  $i$ -го



Рисунок 6 — Нанесение разметки цветной резины на протектор ЦМК шины 315/80R22,5  
Figure 6 — Marking of colored rubber on the tread of the all-steel tire 315/80R22.5



Рисунок 7 — Анализ среза шины 315/80R22,5  
Figure 7 — Analysis of tire cut 315/80R22.5



Рисунок 8 — Нанесение разметки цветной резины на протектор сырой ЦМК шины 385/65R22,5  
Figure 8 — Marking of colored rubber on the tread of the uncured all-steel tire 315/80R22.5

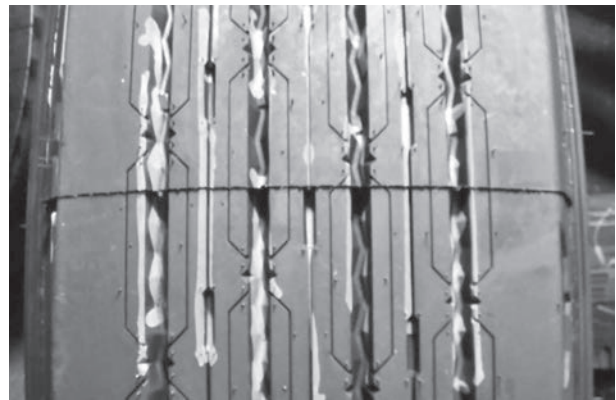


Рисунок 9 — Расположение разметки цветной резины на протекторе вулканизированной ЦМК шины 385/65R22,5  
Figure 9 — Location of the marking of colored rubber on the tread of the vulcanized all-steel tire 385/65R22.5

сегмента на сборочном барабане (см. рисунок 10). Прodelав описанную операцию для каждого сегмента детали протектора, получаем ее ступенчатый профиль на сборочном барабане, который затем аппроксимируем линейными участками, сохраняя характер изменения ступенчатого профиля. Экспериментально была определена точность подгонки детали протектора, она составляет не

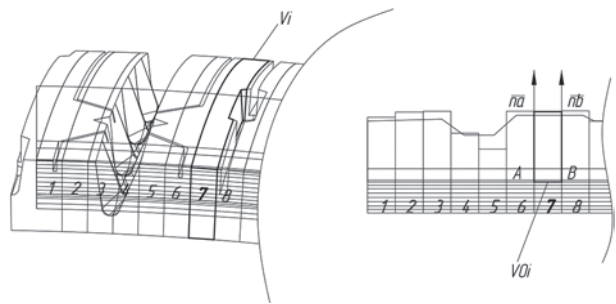


Рисунок 10 — Расчетные сегменты шага протектора в вулканизированной шине и на сборочном барабане  
Figure 10 — Calculated tread pitch segments in a vulcanized tire and on an assembly drum

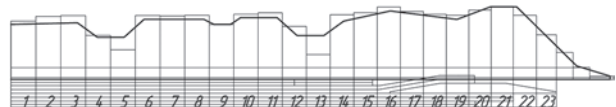


Рисунок 11 — Профиль детали протектора  
Figure 11 — Tread part profile

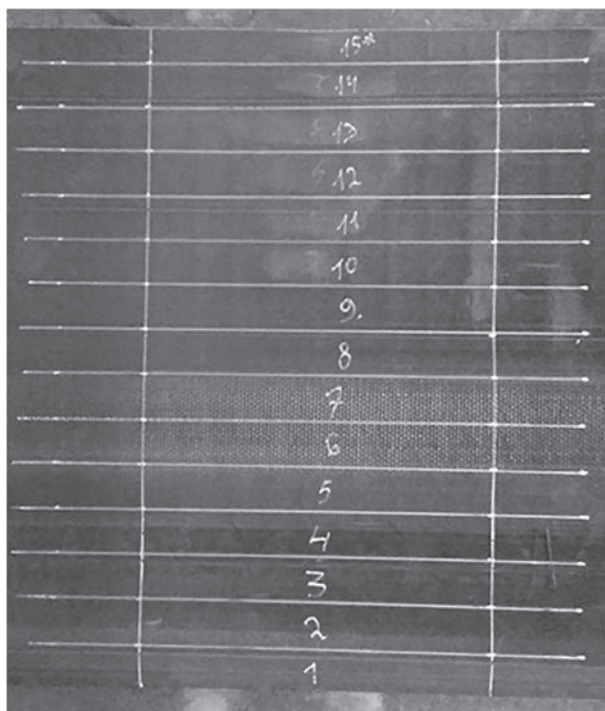


Рисунок 12 — Нанесение разметки по ширине и длине на детали боковины до сборки шины  
 Figure 12 — Marking the width and length of the sidewall parts before assembling the tire

более чем  $\pm 0,5\%$  от объема электронной трехмерной модели протектора. На рисунке 11 приведен профиль детали протектора шины 385/65R22,5, который был рассчитан по приведенному выше алгоритму.

**Расчет профиля детали боковины.** Профиль детали боковины зависит от способа сборки шины. Если шина радиальной конструкции собирается на полудорновом или полуплоском барабанах, расчетные сегменты боковины привязываются к средней линии каркаса. Вытягивание сегментов

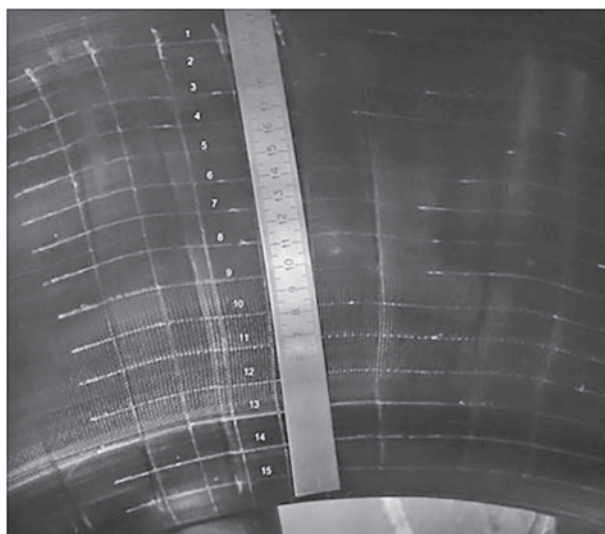


Рисунок 13 — Деформация нанесенной на боковину разметки после сборки шины  
 Figure 13 — Deformation of the marking applied to the sidewall after the tire assembly

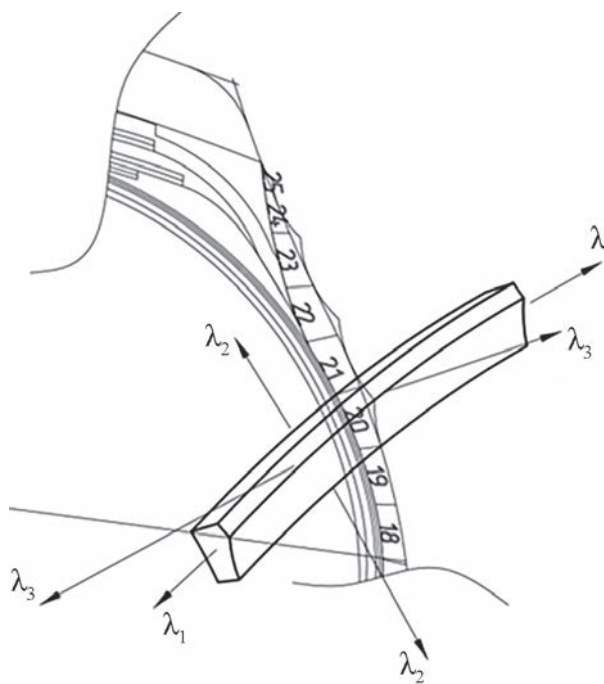
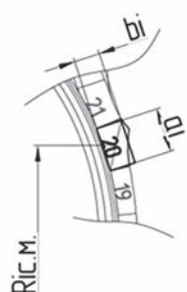


Рисунок 14 — Схема одноосного растяжения детали боковины  
 Figure 14 — Scheme of uniaxial stretching of the sidewall part

боковины происходит двухосно при формировании каркаса на 2-й стадии сборки, формировании и вулканизации его в пресс-форме. Схема расчета сводится к описанной выше схеме расчета детали протектора. Определяется объем  $i$ -го сегмента боковины в вулканизированной шине, и он пересчитывается на сборочный барабан. Интерес представляет расчет профиля детали боковины при плоском способе сборки, так как вытяжка боковины при формировании каркаса на 2-й стадии сборки осуществляется толкателями.

Для исследования деформированного состояния боковины на поверхность правой и левой боковин шины наносилась разметка в виде сетки с одинаковыми по ширине и длине шагами (рисунки 12, 13).

Сегменты боковины в конфигурации пресс-формы



Сегменты боковины на сборочном барабане

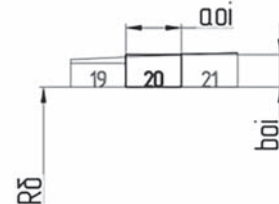


Рисунок 15 — Схема для расчета профиля  $i$ -го сегмента боковины на сборочном барабане  
 Figure 15 — Scheme for calculating the profile of the  $i$ -th sidewall segment on the assembly drum



Рисунок 16 — Сырая легковая шина радиальной конструкции на 1-й стадии сборки  
Figure 16 — Uncured radial passenger tire at the 1st stage of assembly

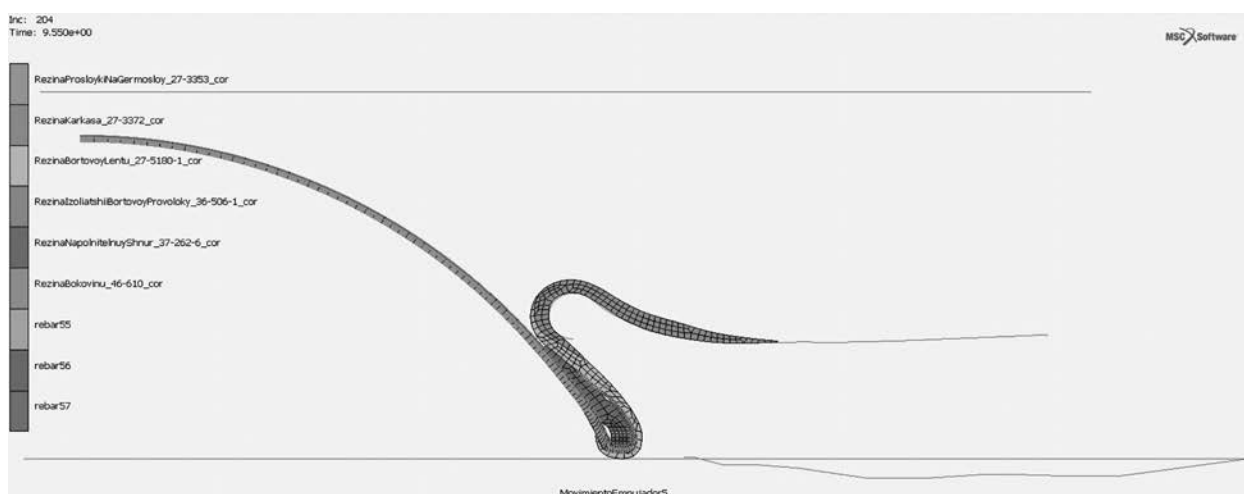


Рисунок 17 — Операция заворота боковины толкателями  
Figure 17 — Sidewall turn-up operation by pushers

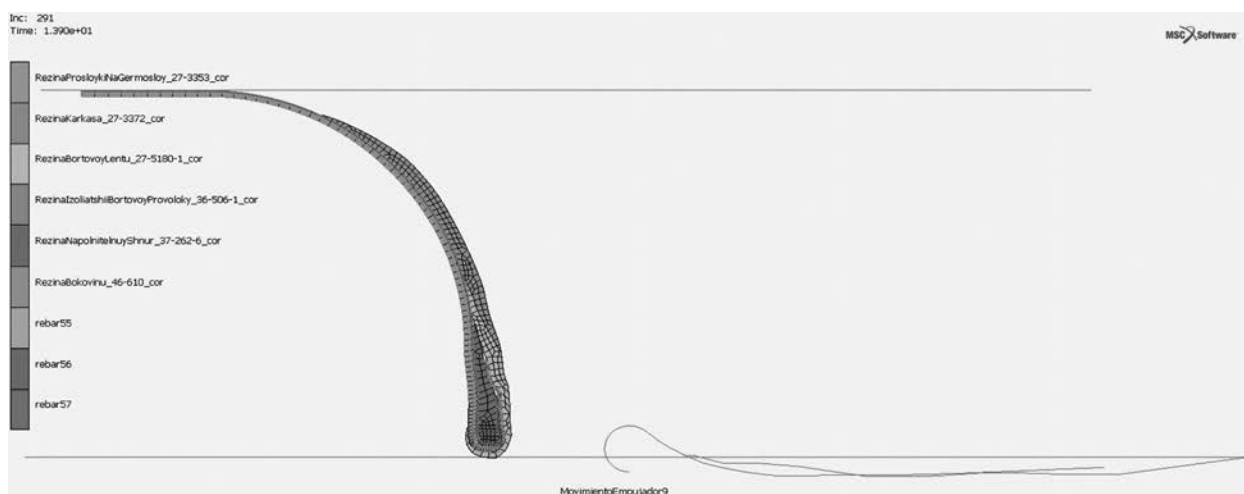


Рисунок 18 — Сформованная на 2-й стадии легковая шина  
Figure 18 — Passenger tire formed at the 2nd stage

После сборки шины анализировалась деформация нанесенной на боковины разметки. Было установлено, что боковина испытывает растяжение в окружном направлении. Анализ изменения ширины сегментов показал, что часть боковины

бортовой зоны испытывает двухосное растяжение, а другая часть, принадлежащая плечевой зоне, испытывает одноосное растяжение. Граница между этими зонами определяется экспериментально. Для ЦМК шин 55, 65, 70 и 80 серий



были экспериментально определены границы зон и построены зависимости, по которым для каждой из перечисленных серий рассчитывается ширина зоны двухосного растяжения боковины.

Рассмотрим алгоритм расчета профиля боковины в зоне одноосного растяжения. На рисунке 14 показана схема растяжения детали боковины при ее завороте на 2-й стадии сборки. Указаны направления главных осей деформации боковины. Кратность растяжения  $\lambda_1$  соответствует окружному направлению,  $\lambda_2$  — меридианальному направлению,  $\lambda_3$  — направлению по нормали к средней линии каркаса. Для расчета профиля детали боковины в зоне одноосного растяжения принимаются следующие гипотезы: прямых нормалей, несжимаемости резины. Из гипотезы несжимаемости резины следует, что

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1. \quad (11)$$

Тогда при одноосном растяжении сегмента боковины принимаем  $\lambda_1 = \lambda$ . Из уравнения (11) имеем  $\lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1/\lambda$ . Так как поперечные деформации по направлениям главных осей 2, 3 равны, то

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}. \text{ Теперь методом последовательных}$$

приближений можно организовать расчет сегментов детали боковины на сборочном барабане 1-й стадии. Объемный  $i$ -й сегмент боковины в конфигурации пресс-формы пересчитываем в сегмент с прямоугольным сечением. При этом пренебрегаем кривизной меридиана (спрямляем меридиан в зоне расчетного сегмента) и в качестве нормали принимаем вектор нормали одной из граничных точек сегмента. Осуществляем поиск прямоугольного сечения сегмента с учетом равенства объемов (рисунок 15). Далее полученное прямоугольное сечение пересчитываем на сборочный барабан. Применяем метод последовательных приближений для уточнения  $\lambda$ . Достаточно 2–3 итераций. Схема итерационного процесса описывается следующими уравнениями:

$$\lambda_i^r = \frac{R_{i0c.m.}}{R_{i0c.m.}} \text{ при } r = 1, R_{i0c.m.} = R_0; \quad (12)$$

$$a_{i0}^r = \sqrt{\lambda^r} \cdot a_i^r; \quad b_{i0}^r = \sqrt{\lambda^r} \cdot b_i^r; \quad R_{i0c.m.}^{r+1} = R_0 + \frac{b_{i0}^r}{2}, \quad (13)$$

где  $r$  — номер итерации;  $\lambda_i^r$  — кратность удлинения  $i$ -го сегмента боковины в окружном направлении на  $r$ -й итерации;  $a_{i0}^r$  — ширина  $i$ -го сегмента боковины на  $r$ -й итерации;  $b_{i0}^r$  — толщина  $i$ -го сегмента боковины на  $r$ -й итерации;  $R_{i0c.m.}^{r+1}$  — радиус центра масс  $i$ -го сегмента боковины на  $r+1$ -й итерации.

Для проверки расчета профиля детали боковины в зоне одноосного растяжения по описанному выше алгоритму был рассчитан профиль детали с учетом ее растяжения одноосно по всей ширине. Далее при помощи MSC.Marc моделировались операции формования каркаса и заворот боковины сырой легковой шины на 2-й стадии сборки без учета трения (боковина по всей ширине растягивалась одноосно). На рисунках 16–18 представлены результаты решения описанной выше задачи. Геометрия профиля детали боковины на крайнем инкременте решенной задачи экспортировалась в САД систему SolidWorks. При помощи описанного выше алгоритма расчета детали боковины ее профиль определялся на сборочном барабане. Полученный таким образом ступенчатый профиль детали накладывался на исходный (рисунок 19). Анализируя отклонения геометрии профиля детали боковины, можно сделать вывод, что описанный выше алгоритм дает удовлетворительную сходимость.

**Заключение.** Описанные выше алгоритмы решения конструкторско-технологических задач были отработаны при выпусках опытных партий легковых и грузовых шин. В качестве примера можно привести грузовую прицепную ЦМК шину типоразмера 385/65R22,5. Специалистами отдела расчетных исследований механики шин ОАО «Белшина» были проведены расчетные исследования по поиску оптимального распределения материалов в радиальном сечении шины для существующего варианта профиля пресс-формы. В результате был определен внутренний профиль шины в конфигурации пресс-формы. Рассчитаны прессовки каркаса по толщине, построено распределение материалов в бортовой зоне, определены прессовки брекера по толщине и по ширине, построено распределение материалов по беговой дорожке и на сборочном брекерном барабане, рассчитана геометрия профилированных деталей: боковины, протектора, каркаса, брекера, разработана ККТ. При выпуске опытной партии шин не было выявлено технологических дефектов. На линии инспекции качества не было определено отклонений от нормы. На рисунке 20 представлены результаты обратного инженерного анализа шины 385/65R22,5, сравнивается геометрия профиля электронного прототипа данной шины и полученный в результате анализа профиль опытной шины. Легко убедиться в том, что изменение толщины вдоль меридиана опытной шины соответствует ее изменению электронного прототипа.

Решение перечисленных в статье конструкторско-технологических задач позволило специа-

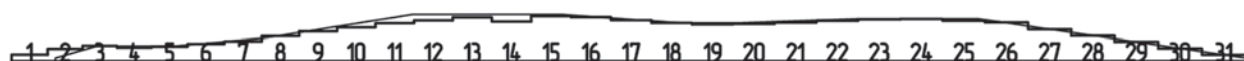


Рисунок 19 — Сравнение профилей детали боковины легковой шины  
Figure 19 — Comparison of profiles of the passenger tire sidewall part

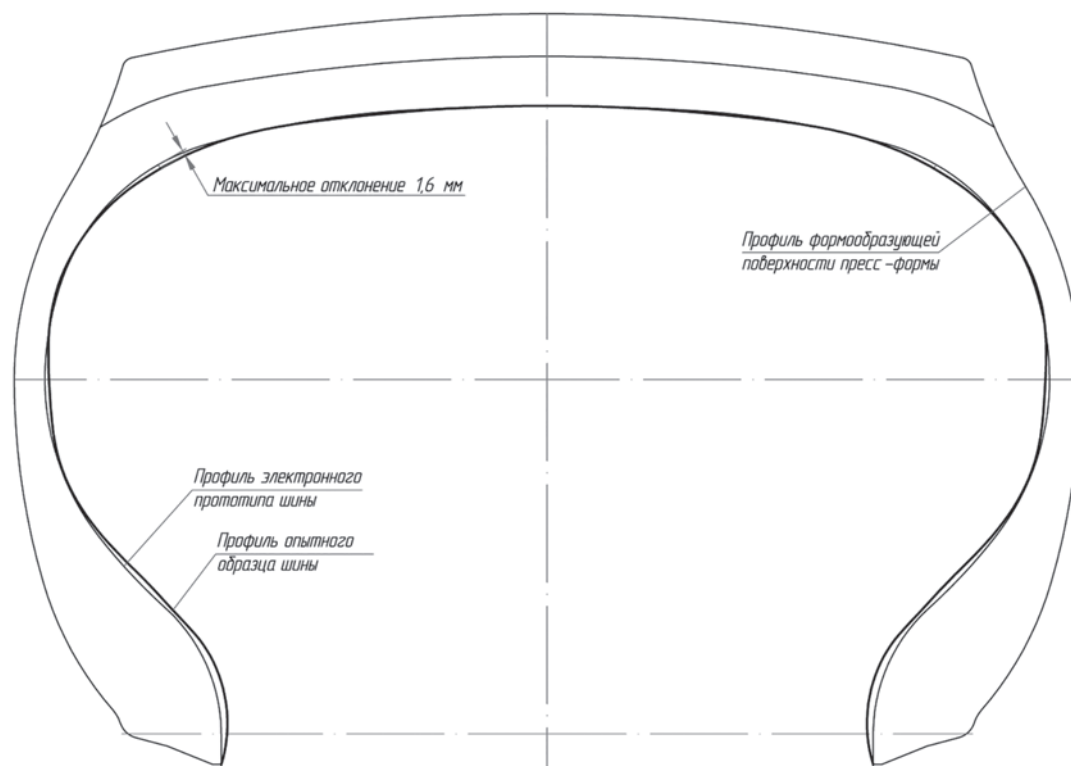


Рисунок 20 — Сравнение профилей электронного прототипа и опытной шины 385/65R22.5  
 Figure 20 — Comparison of the profiles of the electronic prototype and the experimental tire 385/65R22.5

листам ОАО «Белшина» разработать следующие технологии: «Технологию проектирования ККТ на базе профиля шины по пресс-форме виртуальным распределением материалов в ее радиальном сечении», «Технологию обратного инженерного анализа шины». Эти технологии успешно применяются на ОАО «Белшина» при разработке и проектировании новых типоразмеров шин радиальной конструкции. С их помощью было уменьшено количество выпусков опытных партий шин при прохождении предварительных и приемочных испытаний, были снижены затраты на производство технологической оснастки. В настоящее время проводится работа по автоматизации решения перечисленных выше задач.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ, проект № T21ЭТ-016 «Структурная оптимизация гибридных волоконно-армированных композиционных материалов для безопасного и надежного электротранспорта».*

### Список литературы

1. Автомобильные шины: конструкция, расчет, испытание, эксплуатация / В.Л. Бидерман [и др.]; под. общ. ред. В.Л. Бидермана. — М.: Госхимиздат, 1963. — 383 с.
2. Бидерман, В.Л. Расчет резино-металлических и резинокордных элементов машин: дис. ... д-ра техн. наук / В.Л. Бидерман; НИИ шинной промышленности. — М., 1958. — 373 с.
3. Бухин, Б.Л. Введение в механику пневматических шин / Б.Л. Бухина. — М.: Химия, 1988. — 222 с.
4. Nakajima, Yu. Advanced Tire Mechanics / Yu. Nakajima. — Singapore: Springer, 2019. — 1265 p.
5. Koutny, F. Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires / F. Koutny. — Zlin: UTB in Zlin, 2007. — 142 p.
6. Robecchi, E. Mechanics of pneumatic tire. Part I. The tire under inflation alone and in rotation / E. Robecchi, L. Amici // Tire Science and Technology. — 1973. — Vol. 1, iss. 3. — Pp. 290–345. — DOI: <https://doi.org/10.2346/1.2167169>.
7. Robecchi, E. Mechanics of the pneumatic tire. Part II. The laminar model under inflation and in rotation / E. Robecchi // Tire Science and Technology. — 1973. — Vol. 1, iss. 4. — Pp. 382–438. — DOI: <https://doi.org/10.2346/1.2167173>.
8. Purdy, J.F. Mathematics underlying the design of pneumatic tires / J.F. Purdy. — Akron: Lithographed by Hiney Print, 1963. — 230 p.
9. Хотько, А.В. Применение теории сетчатых оболочек при проектировании автомобильных шин диагональной конструкции / А.В. Хотько, С.В. Шилько // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 1(50). — С. 5–11.
10. Хотько, А.В. Возможности оптимального проектирования автомобильной шины по критерию пространственной равнопрочности / А.В. Хотько, С.В. Шилько, С.Н. Бухаров // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 4(53). — С. 11–18. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-11-18>.

KHOTKO Alexander V.

Head of the Division of Calculation Studies of Tire Mechanics<sup>1</sup>

E-mail: hotkoav2017@gmail.com

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

Received 20 October 2021.

## SOLUTION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS AT THE DESIGN STAGE OF THE RADIAL TIRE SPECIFICATION

*Methods are considered for solving design and technological problems at the design stage of the radial tire specification. On the basis of the theory of gridshells, a scheme is constructed for calculating the distribution of materials in the radial section of an uncured and vulcanized radial tire. For a flat method of assembling the radial tire, algorithms for calculating profiled parts are proposed. Algorithms are considered for finding the geometry of the shaping surfaces of the tread and sidewall parts. The boundary-value problem of finding the profile of the molded uncured tire at the second stage of assembly has been solved. A method is proposed for determining the parameters of industrial equipment for tire assembly. The experiments carried out to test the accepted hypotheses of the theory of elasticity are described.*

**Keywords:** car tire, design and check calculation, equilibrium configuration, flat assembly method, rubber-cord system of the breaker and frame, profiled parts, part pressing by thickness, part pressing by width, assembly drum of the first and second stages, electronic prototype of the tire, stress-strain state of the tire, all-steel tire, design and technological map

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-1-58-37-47>

### References

1. Biderman V.L., Guslitser R.L., Zakharov S.P., Seleznev I.I. *Avtomobilnye shiny: konstruktziya, raschet, ispytanie, ekspluatatsiya* [Car tires: design, calculation, testing, operation]. Moscow, Goskhimizdat Publ., 1963. 383 p. (in Russ.).
2. Biderman V.L. *Raschet rezino-metallicheskih i rezino-kordnykh elementov mashin*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Calculation of rubber-metal and rubber-cord elements of machines. D. Sc. Thesis]. Moscow, 1958. 373 p. (in Russ.).
3. Bukhin B.L. *Vvedenie v mekhaniku pnevmaticheskikh shin* [Introduction to the mechanics of pneumatic tires]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 222 p. (in Russ.).
4. Nakajima Yu. *Advanced tire mechanics*. Singapore, Springer, 2019. 1265 p.
5. Koutny F. *Geometry and mechanics of pneumatic tires*. Zlín, UTB in Zlín, 2007. 142 p.
6. Robecchi E., Amici L. Mechanics of pneumatic tire. Part I. The tire under inflation alone. *Tire science and technology*, 1973, vol. 1, iss. 3, pp. 290–345. DOI: <https://doi.org/10.2346/1.2167169>.
7. Robecchi E. Mechanics of the pneumatic tire. Part II. The laminar model under inflation and in rotation. *Tire science and technology*, 1973, vol. 1, iss. 4, pp. 382–438. DOI: <https://doi.org/10.2346/1.2167173>.
8. Purdy J.F. *Mathematics underlying the design of pneumatic tires*. Akron, Lithographed by Hiney Print, 1963. 230 p.
9. Khotko A.V., Shil'ko S.V. Primenenie teorii setchatykh obolechek pri proektirovanii avtomobilnykh shin diagonalnoy konstruktzii [Application of the theory of gridshells in the design of diagonal automobile tires]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 1(50), pp. 5–11 (in Russ.).
10. Khotko A.V., Shil'ko S.V., Buharov S.N. Vozmozhnosti optimalnogo proektirovaniya avtomobilnoy shiny po kriteriyu prostanstvennoy ravnoprochnosti [Possibilities for optimal design of a car tire based on a criterion of spatial strength balance]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 4(53), pp. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-11-18> (in Russ.).