

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИО-ДЕФОРМИРУЕМОГО
СОСТОЯНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ ПРИ
СТАЦИОНАРНОМ КАЧЕНИИ**

Выполнил: ст. II-33м Королёв П.В.
Руководитель: д.ф.-м.н., доц. Маслов Л.Б.

Цель и задачи

2

Цель работы:

Прогнозирование физико-механических свойств автомобильных шин методом конечно-элементного моделирования

Задачи работы:

1. Анализ литературных источников, определение особенностей структуры шин, математическая постановка задачи;
2. Изучение упругих свойств резины, используемой при производстве автомобильных шин, анализ возможностей моделирования свойств материала шин;
3. Численное решение упрогой контактной задачи свободного стационарного качения шины по поверхности, верификация с литературными источниками.
4. Анализ влияния различных параметров на НДС шины.

Объект и предмет исследования

3

Критериями успешного подбора резины и геометрии являются:

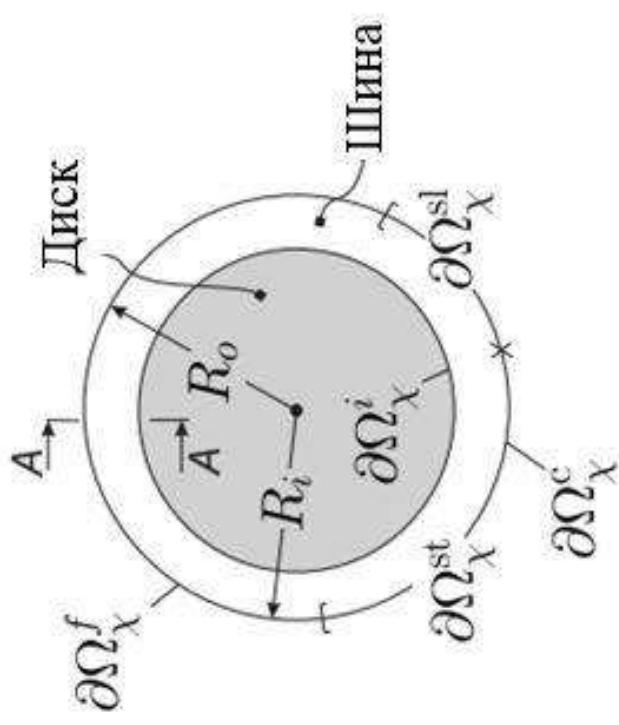
- равномерность распределения по ширине беговой поверхности давления и сил трения;
- снижение сопротивления качению шин;
- уменьшение значений максимальных температур в резиновом массиве;
- снижение напряжений в зонах их концентрации.

Классификация автомобильных шин:

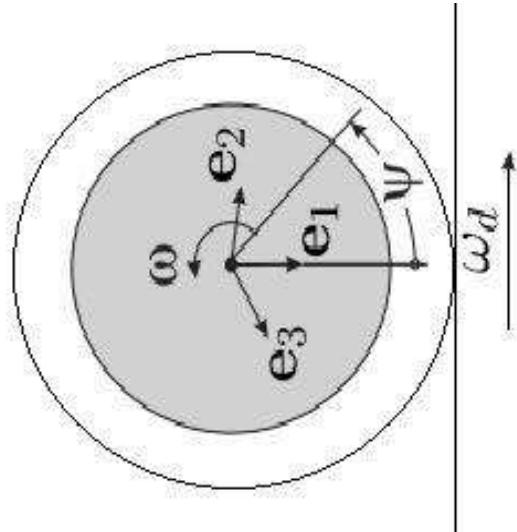
- По герметизации: камерные и безкамерные;
- По конструкции: радиальные и диагональные;
- По габаритным размерам: мало-, средне-, крупногабаритные;
- По типу профиля: тороидные, широкопрофильные, низкопрофильные, арочные, пневмокатки.

Математическая формулировка задачи

4



$$\left. \begin{array}{l} \sigma\left(t + \frac{2\pi}{\omega}\right) = \sigma(t) \\ \varepsilon\left(t + \frac{2\pi}{\omega}\right) = \varepsilon(t) \\ \nabla \cdot \sigma = 0 \\ \varepsilon(\psi), \sigma(\psi) \rightarrow 0 \quad \psi \rightarrow \psi - U \psi \rightarrow \psi + f = 0 \text{ на } \partial\Omega_\chi^f \\ g^- < 0, f_n = 0 \text{ на } \partial\Omega_\chi^c \\ g^- = 0, f_n < 0 \text{ на } \partial\Omega_\chi^c \\ |f_t| < \mu |f_n|, \xi = 0 \quad 0, f_n < 0 \text{ на } \partial\Omega_\chi^{st} \\ f_t = -\mu |f_n| \frac{\xi}{|\xi|}, \xi \neq 0 \quad 0, f_n < 0 \text{ на } \partial\Omega_\chi^{st} \\ M_r = \int_{\partial\Omega_\chi^c} (r \times f) \cdot e_3 \, d\Omega = 0 \end{array} \right\}$$



Эксплуатационные параметры

5

В настоящий момент не существует ни одного нормативного документа, регламентирующего интенсивность износа протектора, а также гарантирующего абсолютную величину пробега легковых шин.

$$Z = \frac{H_n - H_f}{H_n - H_{min}} \cdot 100\%$$

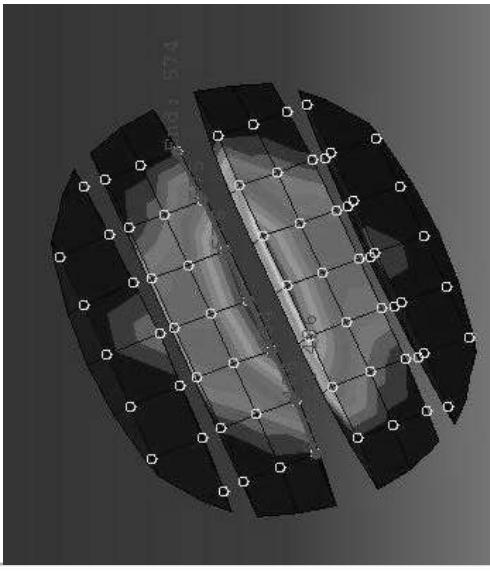
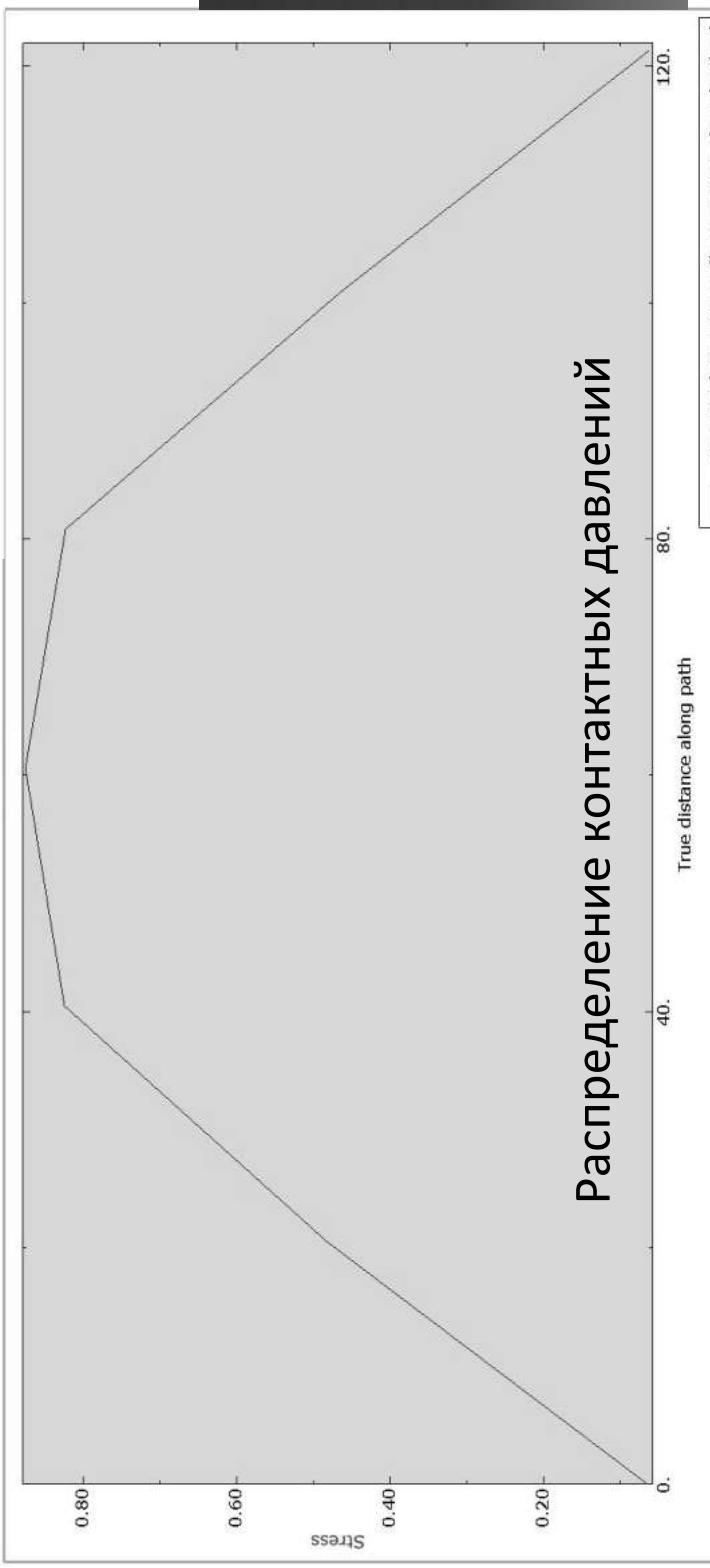
Модель Арчарда:

$$\dot{q} = \frac{k}{H} PA\dot{\gamma}$$

\dot{q} – скорость износа, $\text{мм}^3/\text{с};$
 k – безразмерный коэффициент износа;
 H – твердость мягкого материала контактной пары (по Шору), МПа;
 P – контактное давление, МПа;
 A – площадка контакта, $\text{мм}^2/\text{с};$
 $\dot{\gamma}$ – скорость проскальзывания, м/с.

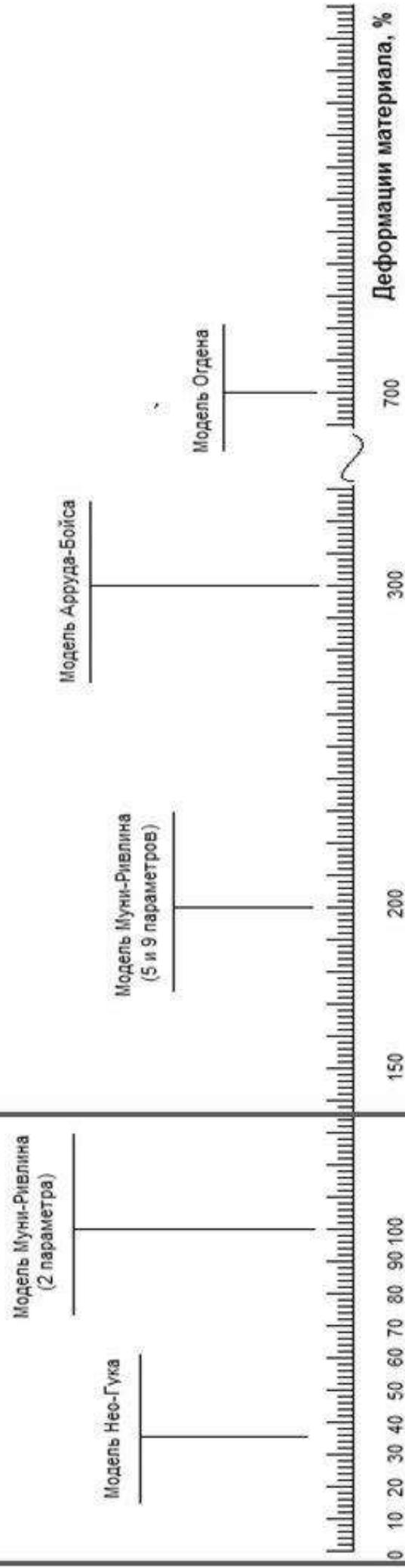
Для оценки износа по модели Арчарда используются значения размера площадки контакта и контактного давления, для оценки изменения параметров в зависимости от геометрии протектора может потребоваться уточнение рисунка протектора и перехода в полную трехмерную постановку.

Рисунок



Обзор нелинейных моделей материалов

6



ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Универсальные	Упрощённые	Узкоспециализированные
<u>Муни-Ривлина</u>	Нео-Гука	Арруда-Бойса Гента
Ордена	Йо	Микромеханические модели Гиперпенная Блатца-Ко

Обзор нелинейных моделей материалов

7

Двухпараметрическая модель Муни-Ривлина:

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J_{el} - 1)^2,$$

где c, d – константы материала,
 \bar{I} – инварианты деформации,
 J – объемная деформация.

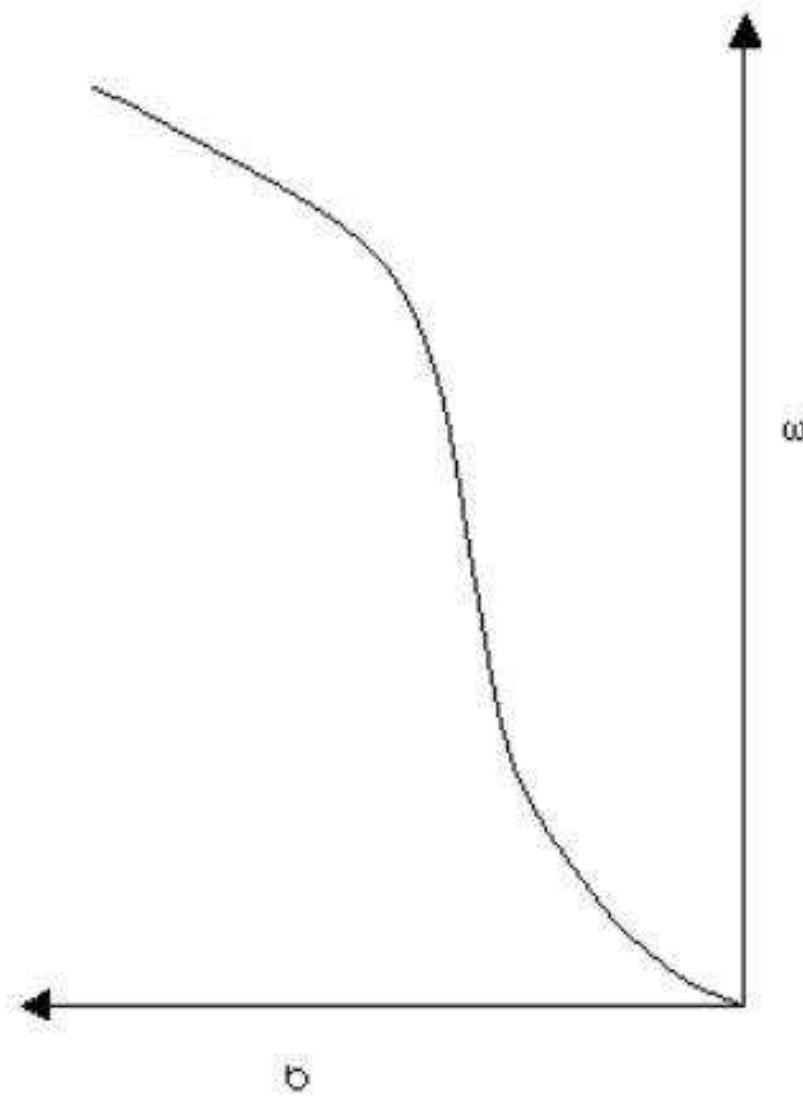
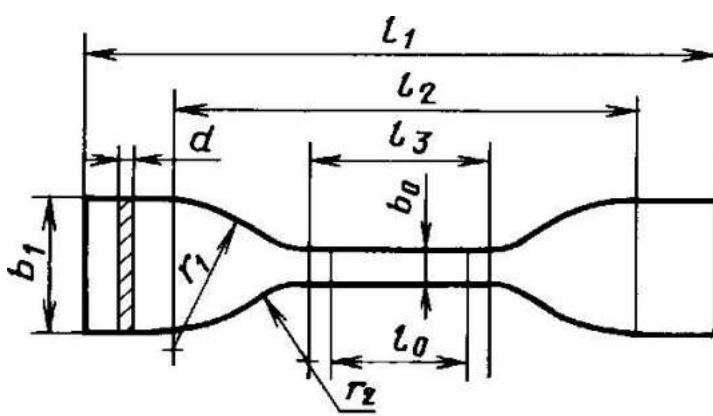
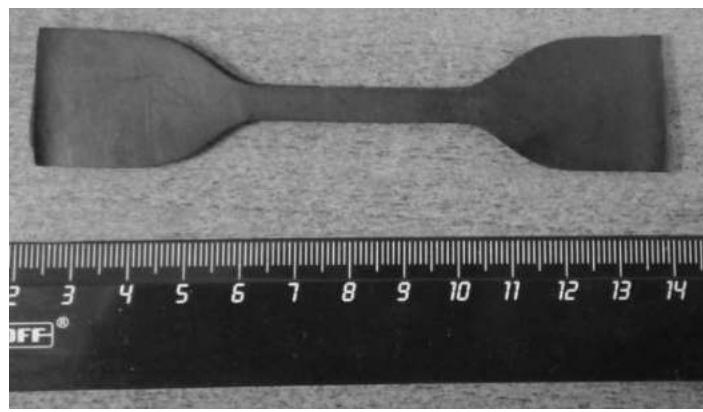
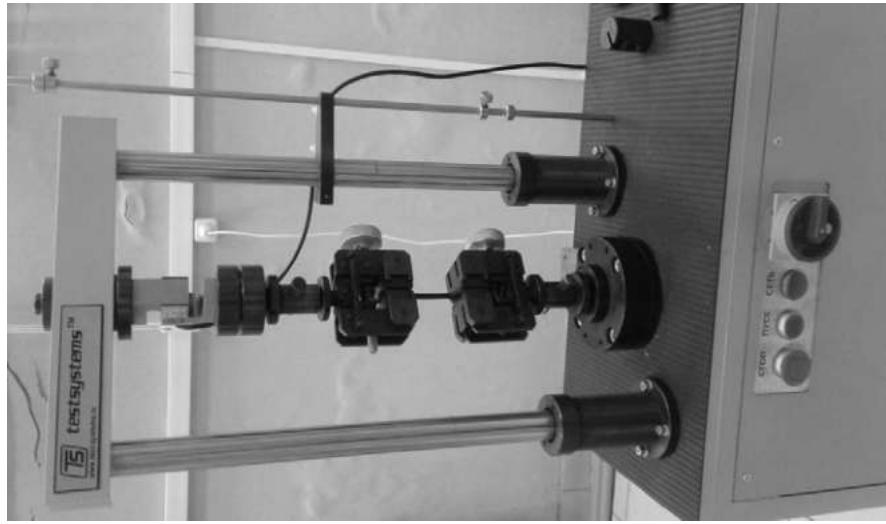


График полиномиальной
модели материала в
координатах
напряжение-деформация

Постановка эксперимента

8

ГОСТ 270-75 - Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении



Номинальное напряжение в образце:

$$\sigma_0 = \frac{P}{S_0}, MPa$$

Номинальное удлинение образца:

$$\varepsilon_0 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100, \%$$

Реальное напряжение в образце:

$$\sigma_p = \sigma_0 \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{100}\right), MPa$$

Реальное удлинение образца:

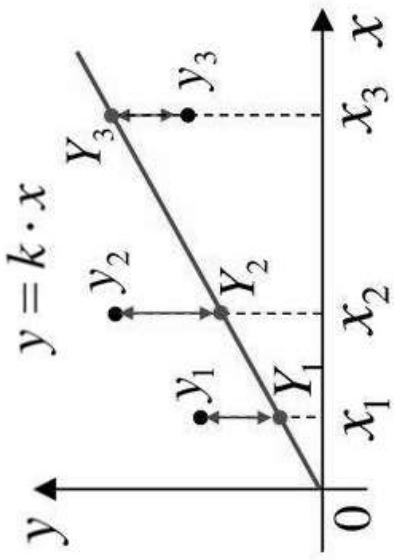
$$\varepsilon_p = \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{100}\right) \cdot 100, \%$$

Обработка результатов эксперимента

9

Подбор коэффициентов модели гиперупругого материала осуществляется по методу наименьших квадратов:

$$E(k) = (Y_1 - y_1)^2 + (Y_2 - y_2)^2 + \dots + (Y_n - y_n)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2$$



Для используемой двухпараметрической модели Муни-Ривлина имеем:

Коэффициенты, с учетом несжимаемости ($1/d = 0$), равны

$$C_{01} = 0.173901916 \text{ МПа}$$

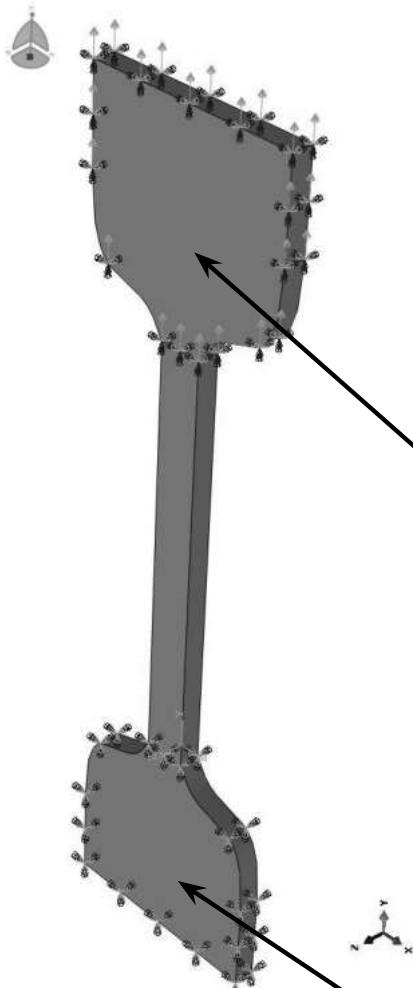
$$C_{10} = 0.394771500 \text{ МПа}$$

Соотношение экспериментальных и аппроксимированных данных представлены на графике:

Тестовые решения: растяжение лопатки

10

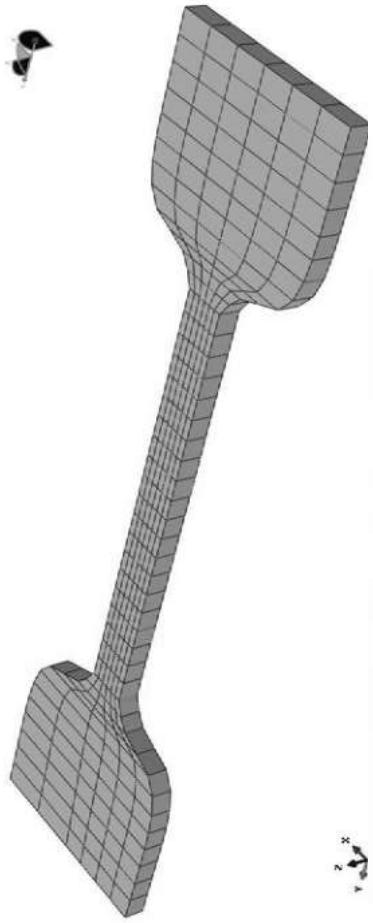
Геометрия и задание граничных условий:



Жесткое закрепление

Перемещение вдоль оси Оу

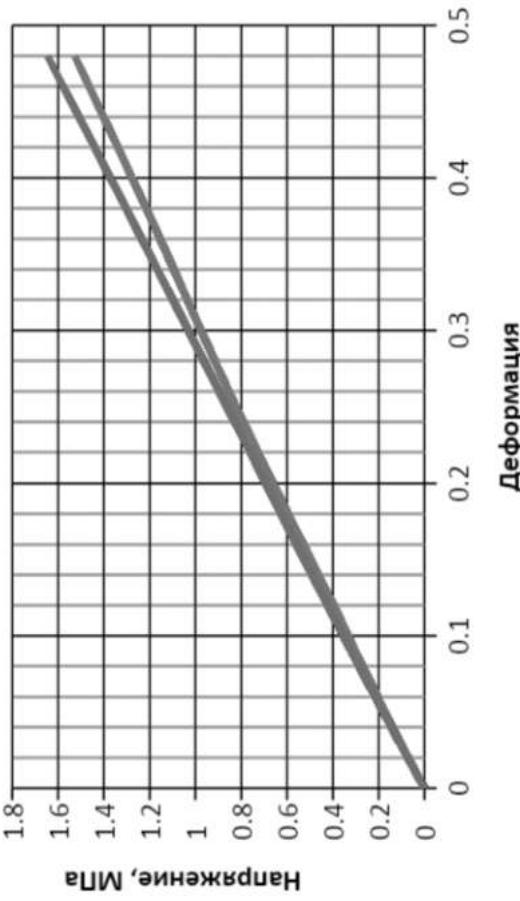
Разбиение на конечные элементы:



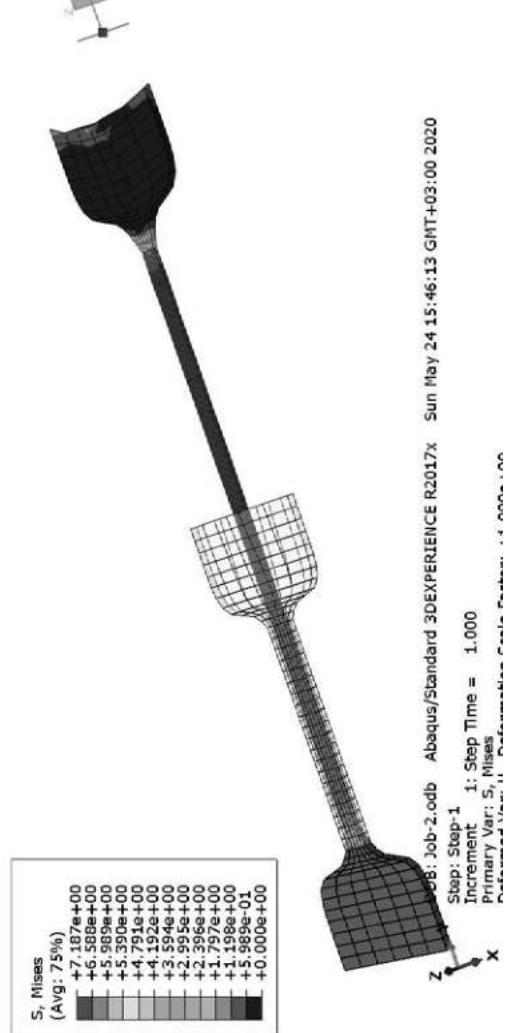
C3D8H: An 8-node linear brick, hybrid, constant pressure.

8-узловой, трехмерный, гибридный конечный элемент

— Эксперимент — Модель



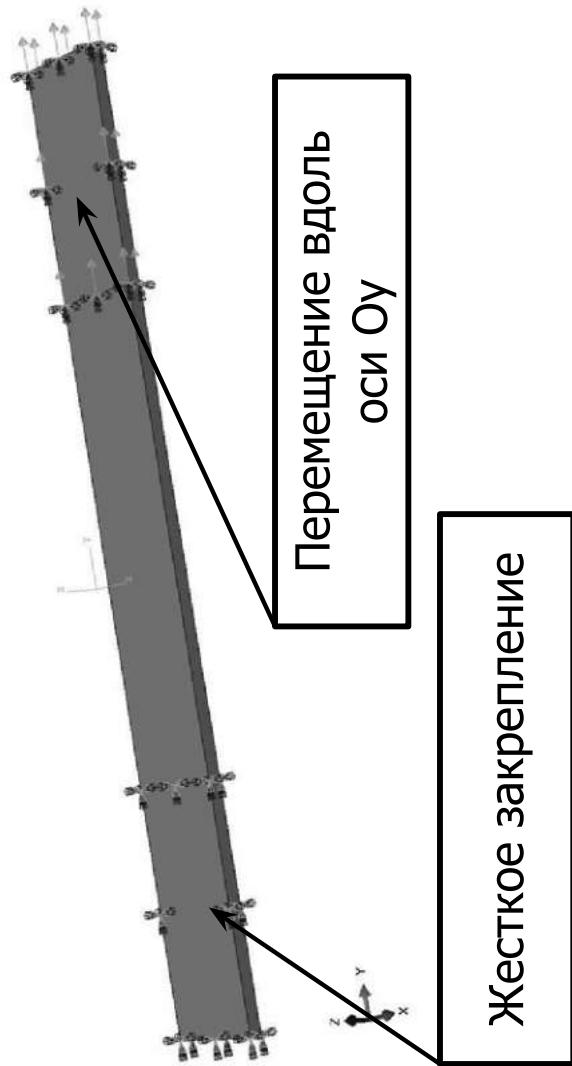
Погрешность моделирования на рабочем участке составила менее 5%



Тестовые решения: растяжение полоски

11

Геометрия и задание граничных условий:

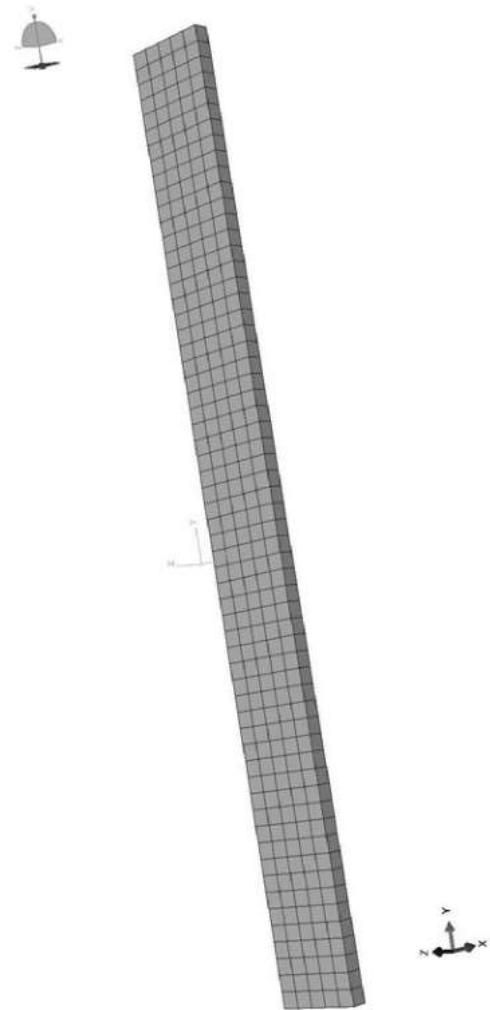


Выбор типа конечного элемента:

C3D8H: An 8-node linear brick, hybrid, constant pressure.

При выборе размера конечного элемента для верификации с численным экспериментом на лопатке рабочей части лопатки размером элемента рабочей части лопатки вдоль оси растяжения, т.е. Оу

Разбиение на конечные элементы:



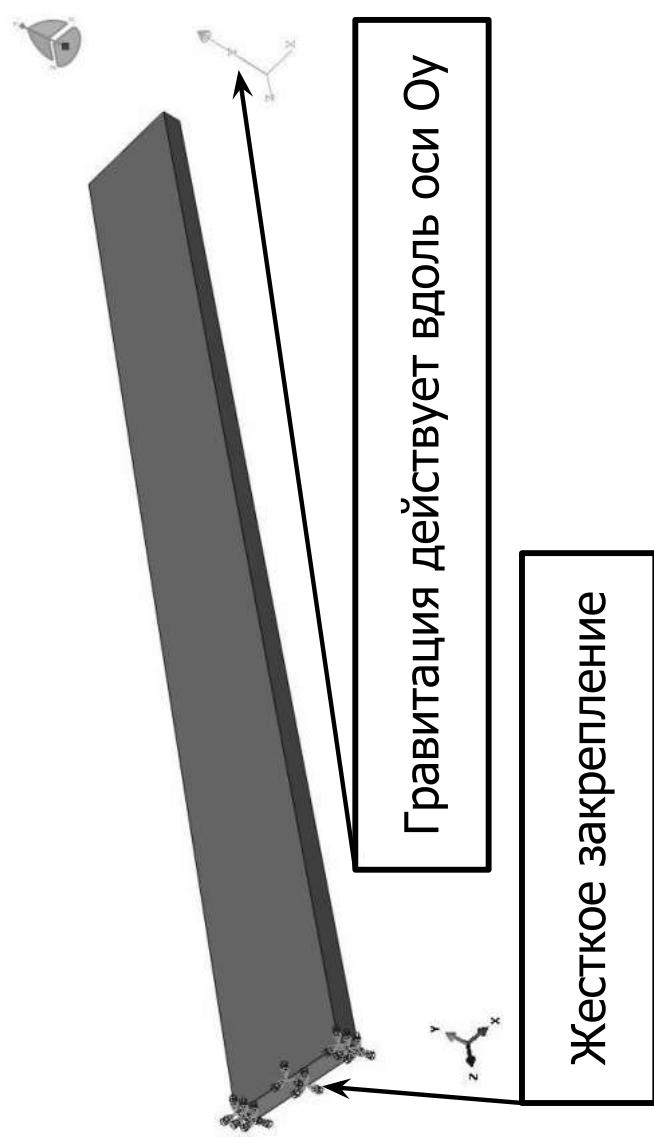
Сравнение геометрий:

Геометрия	Лопатка	Полоска
Напряжение в сечении модели, МПа	1,387	1,371
Деформация	0,4	0,4
Реальное экспериментальное напряжение, МПа	1,279	1,279
Погрешность, %	7,7	6,7
Погрешность относительно геометрии, %	13	

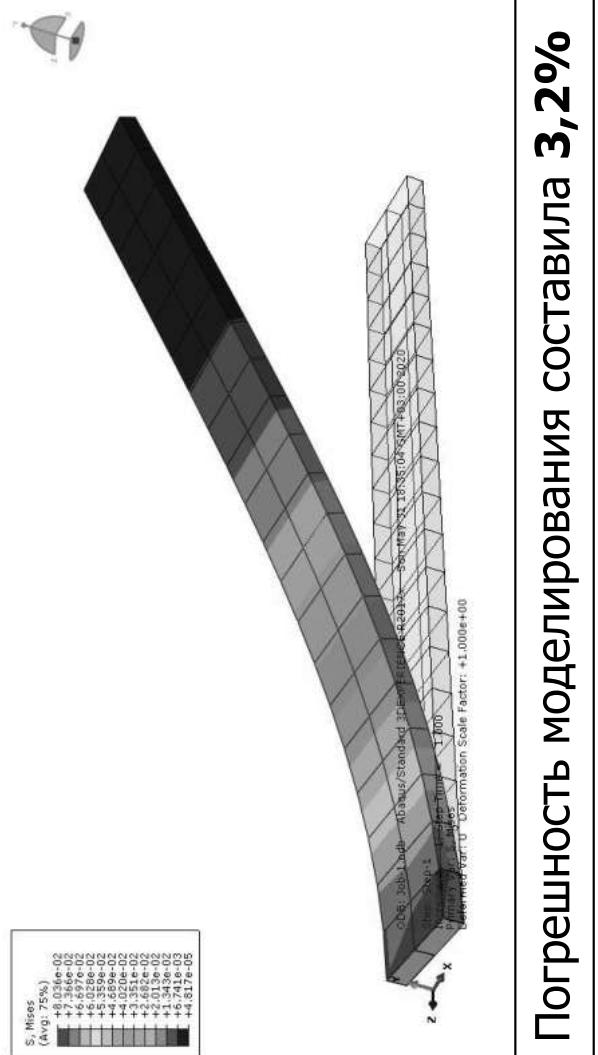
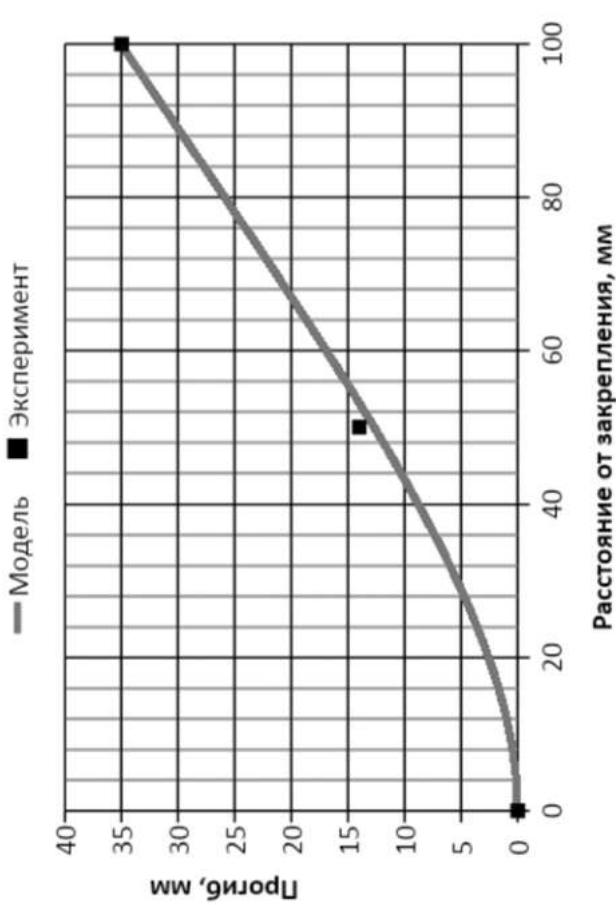
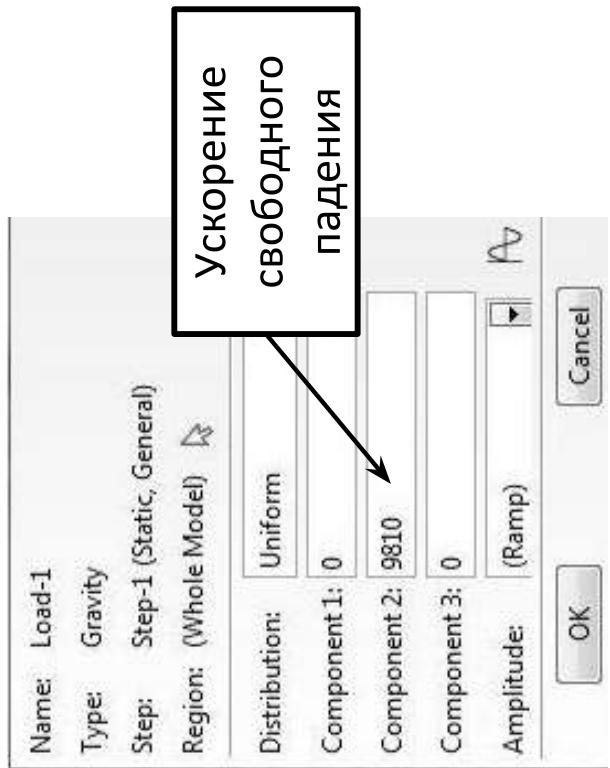
Тестовые решения: изгиб полоски под действием собственного веса

12

Геометрия и задание граничных условий:



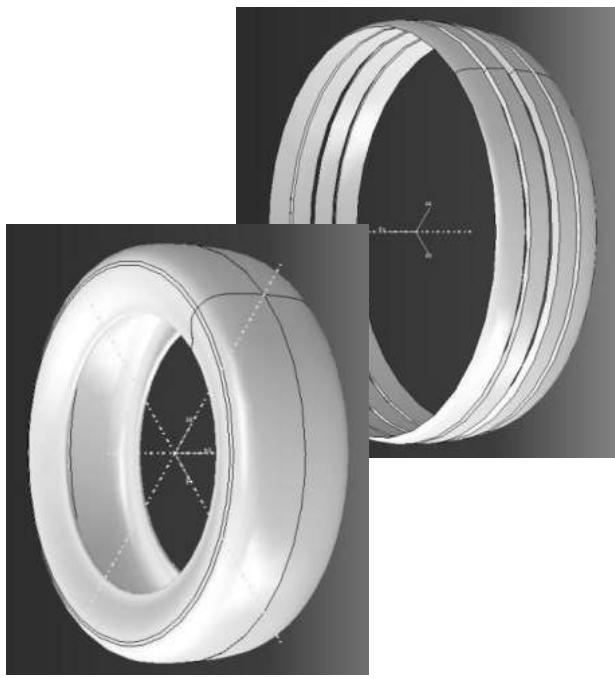
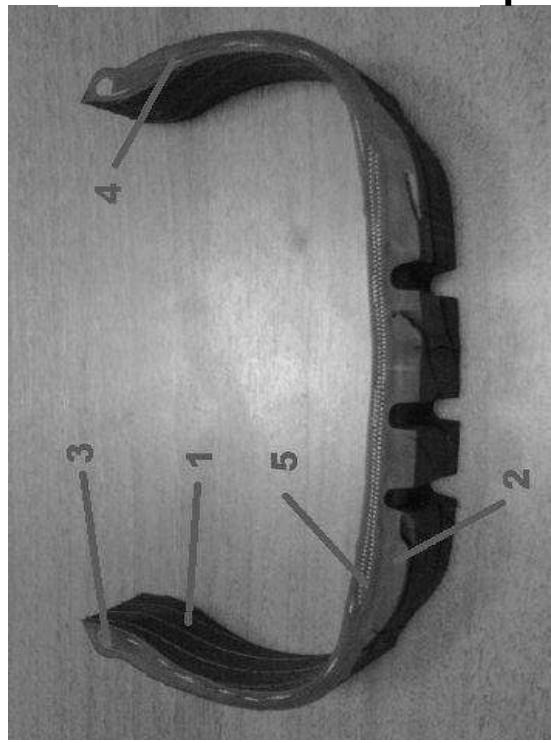
Задание нагрузки:



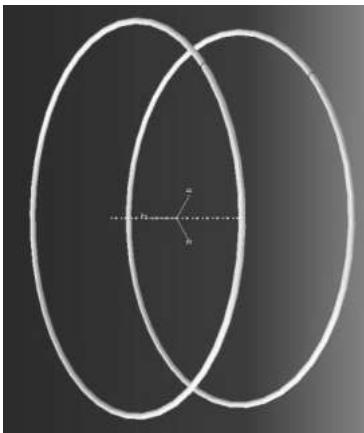
Моделирование шины: разработка КЭМ

13

- Сборка модели шины должна содержать все основные элементы реальной шины:
- 1) резиновая основа;
 - 2) протектор;
 - 3) стальной борт;
 - 4) нейлоновый крд;
 - 5) металлизированный брекер.



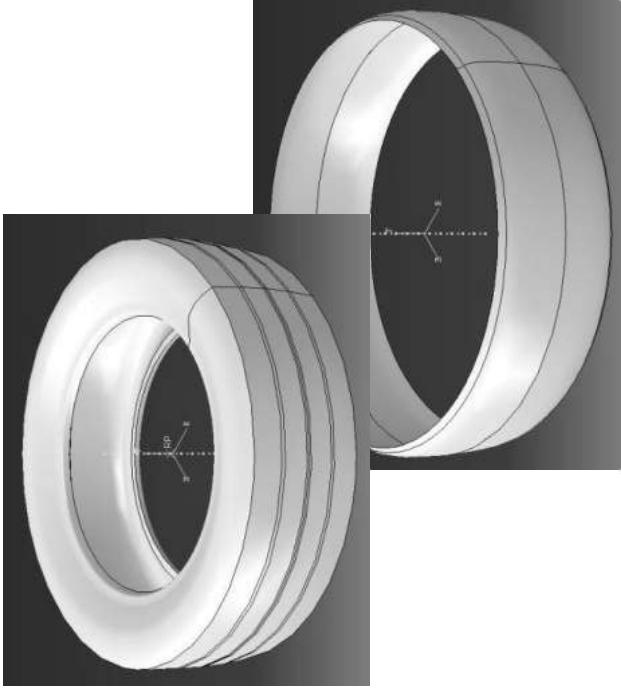
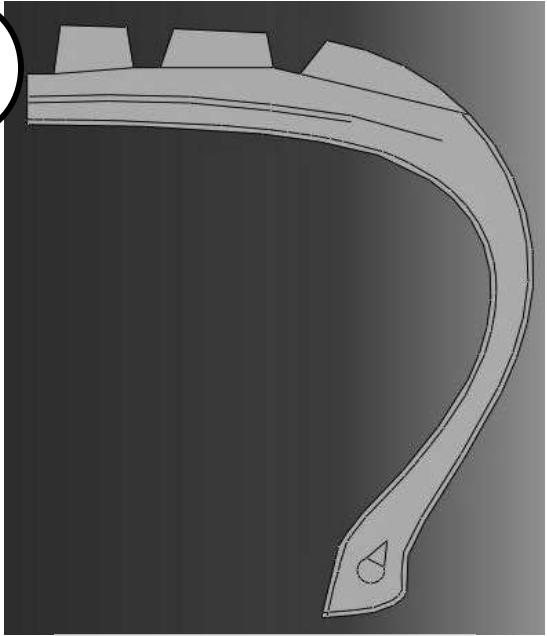
3
Solid линейный материал:
модуль Юнга и коэффициент
Пуассона



1 и 2
Solid материал, основанный
на коэффициентах
гиперупругих моделей

4 и 5

Композитный материал:
армирующие нити в резиновом
наполнителе



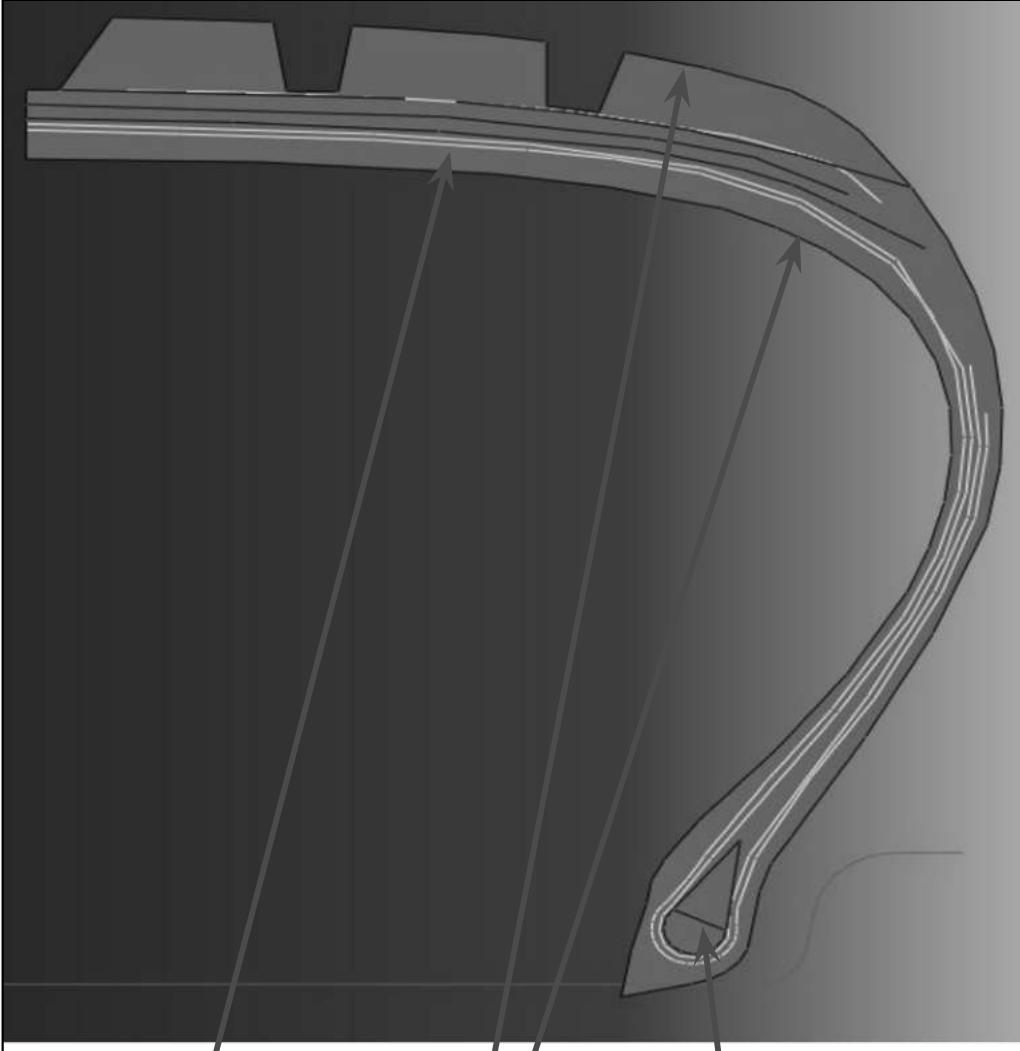
Решение шины: характеристики материалов

14

Нейлоновые нити корда:
Плотность – 1500 кг/м³
Гиперэластичная модель Марлоу
Армирующий слой в резиновой матрице

Резиновый наполнитель:
Плотность – 1100 кг/м³
Гиперупругая модель Муни-Ривлина:
 $C_{10} = 0,395 \text{ МПа}$ $C_{01} = 0,174 \text{ МПа}$

Металлический обод и армирующие нити брекеров:
Плотность – 7500 кг/м³
Модуль Юнга – 207000 МПа
Коэффициент Пуассона – 0,3



Решение шины: конечно-элементная модель

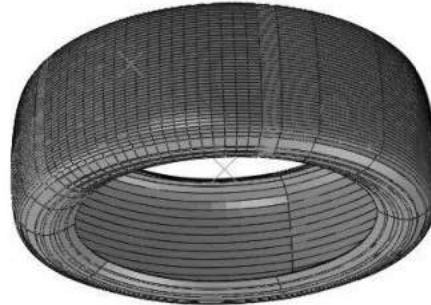
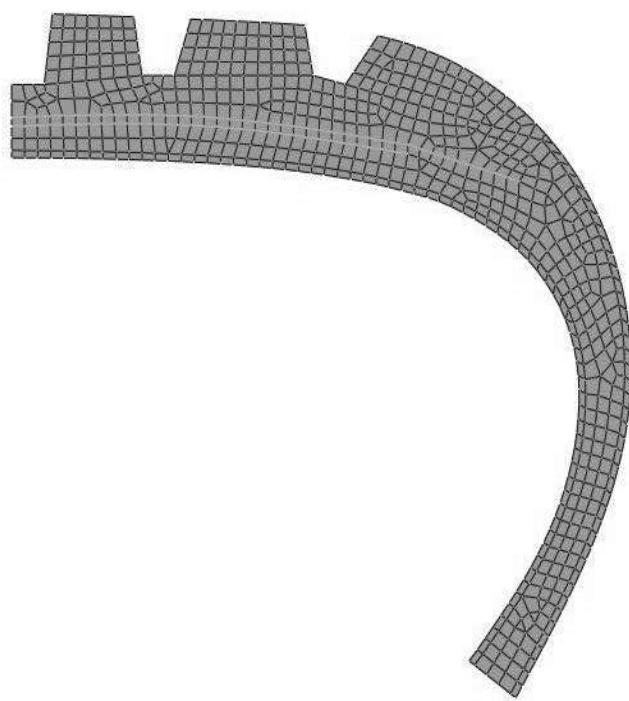
15

Число элементов для осесимметричной модели: 65

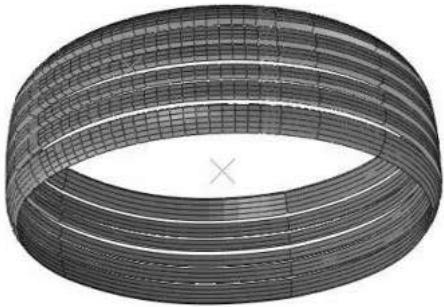
Число точек 3D модели: 49682

Число элементов 3D модели : 47881

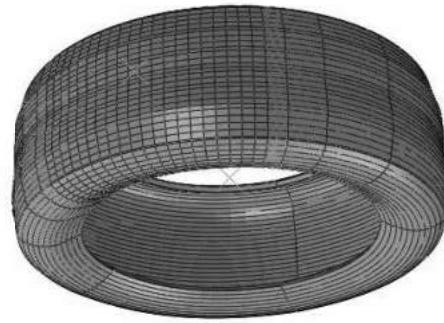
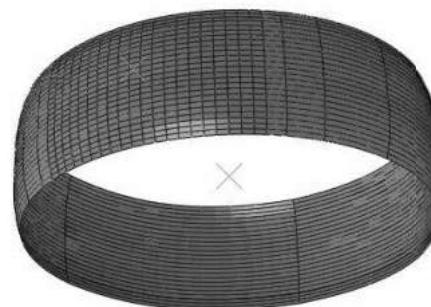
Типы элементов: ARSC C3D8H M3D4R RNODE3D



Корд



Брекер



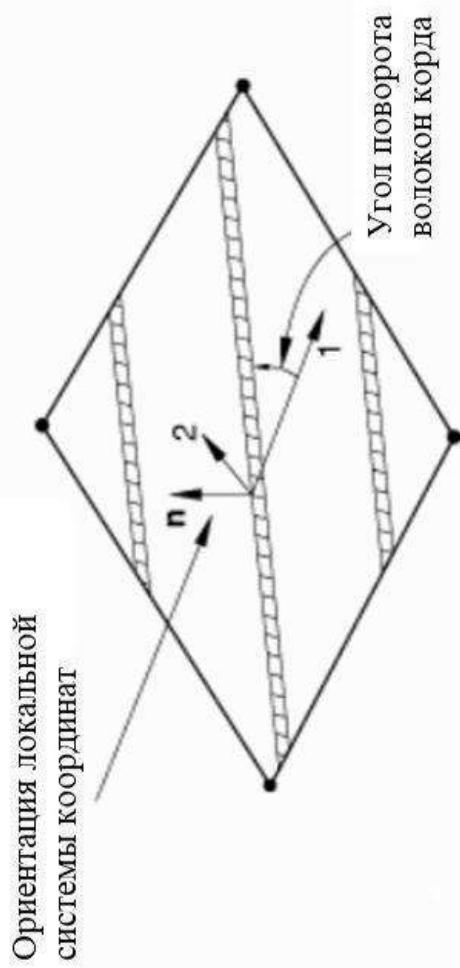
Гермослой

Протектор

Решение шины: композитный корд

16

Ориентация волокон композита в плоскости:



Окно настройки композита:

Rebar geometry: Constant Angular Lift equation-based

Layer Name	Material	Area per Bar	Spacing	Orientation Angle	Extension Ratio	Radius
belt2	rebar	2	1	65	0	295.324

Материал наполнителя до волокнами армирующего

Материал волокон

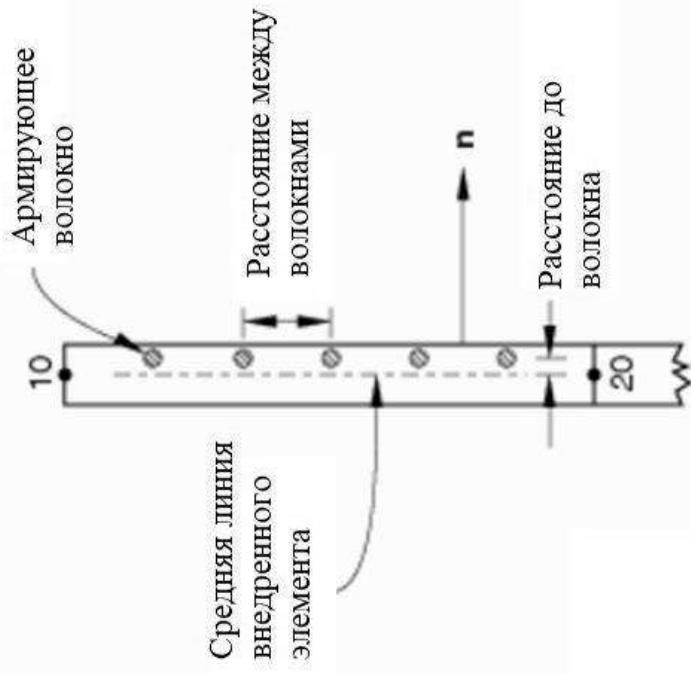
Радиус до волокон

Угол поворота волокон

Расстояние между волокнами

Коэффициент удлинения

Параметры модели:

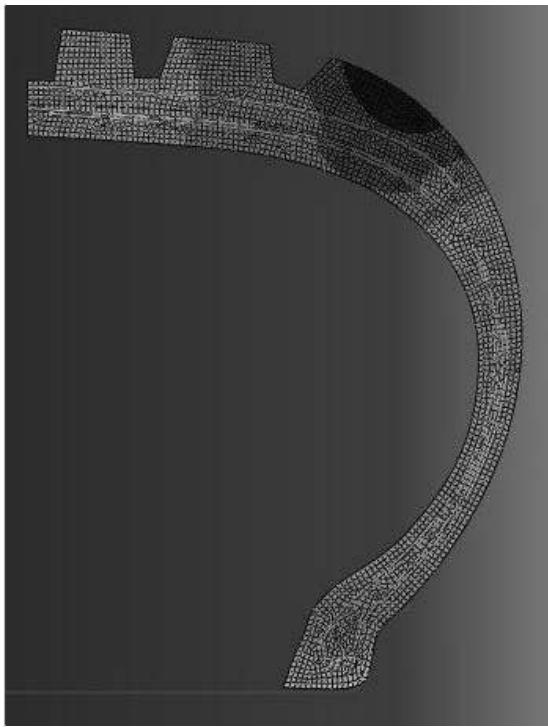


Note: A cylindrical orientation system must be defined if this option is used with three-dimensional membrane, shell, or surface elements.

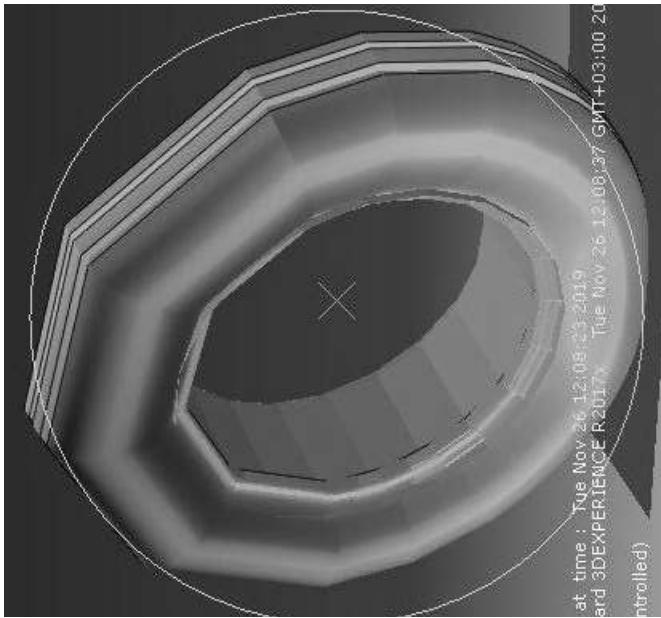
Решение шины: методика решения

17

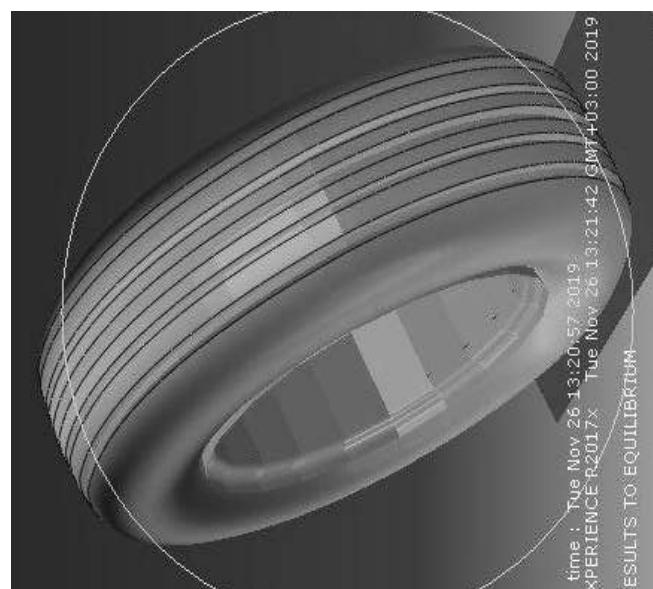
Шаг 1: получение осесимметричного решения надува шины



Шаг 2: перевод результатов в 3D и статическое прижатие шины



Шаг 3: квазистатическое качение шины



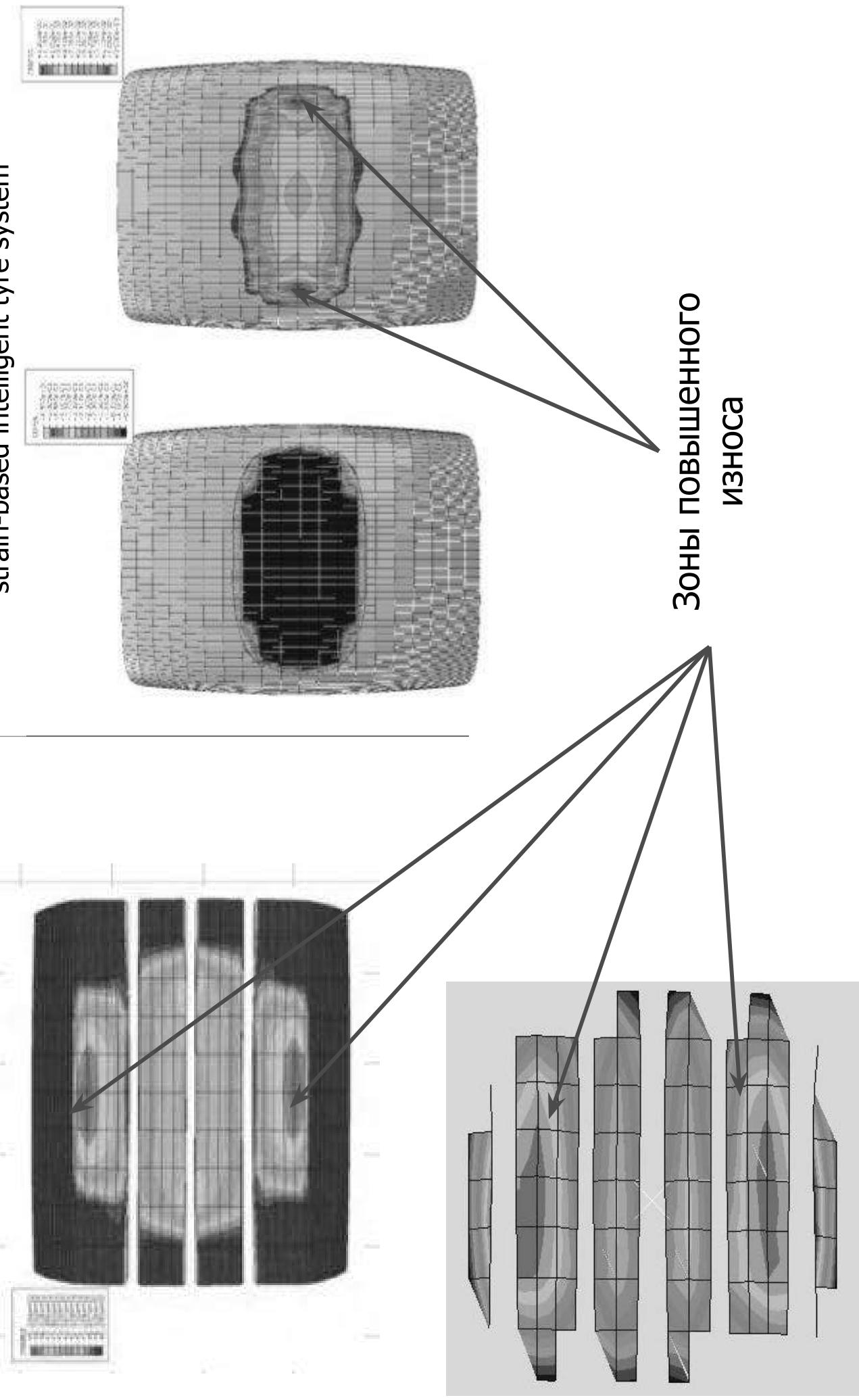
1. Полное решение моделирования надува шины в осесимметричной постановке;
2. Экспорт результатов решения в трехмерную постановку с помощью SYMMETRIC MODEL GENERATION, моделирование прижатия при постоянной нагрузке;
3. Решение квазистатической задачи качения шины в гибридной Эйлера-Лагранджевой постановке.

Решение шины: верификация результатов

18

С.А.Рыжов Проектирование шин с использованием
программного комплекса ABAQUS

X. Yang Finite element analysis and experimental investigation of tyre characteristics for developing strain-based intelligent tyre system

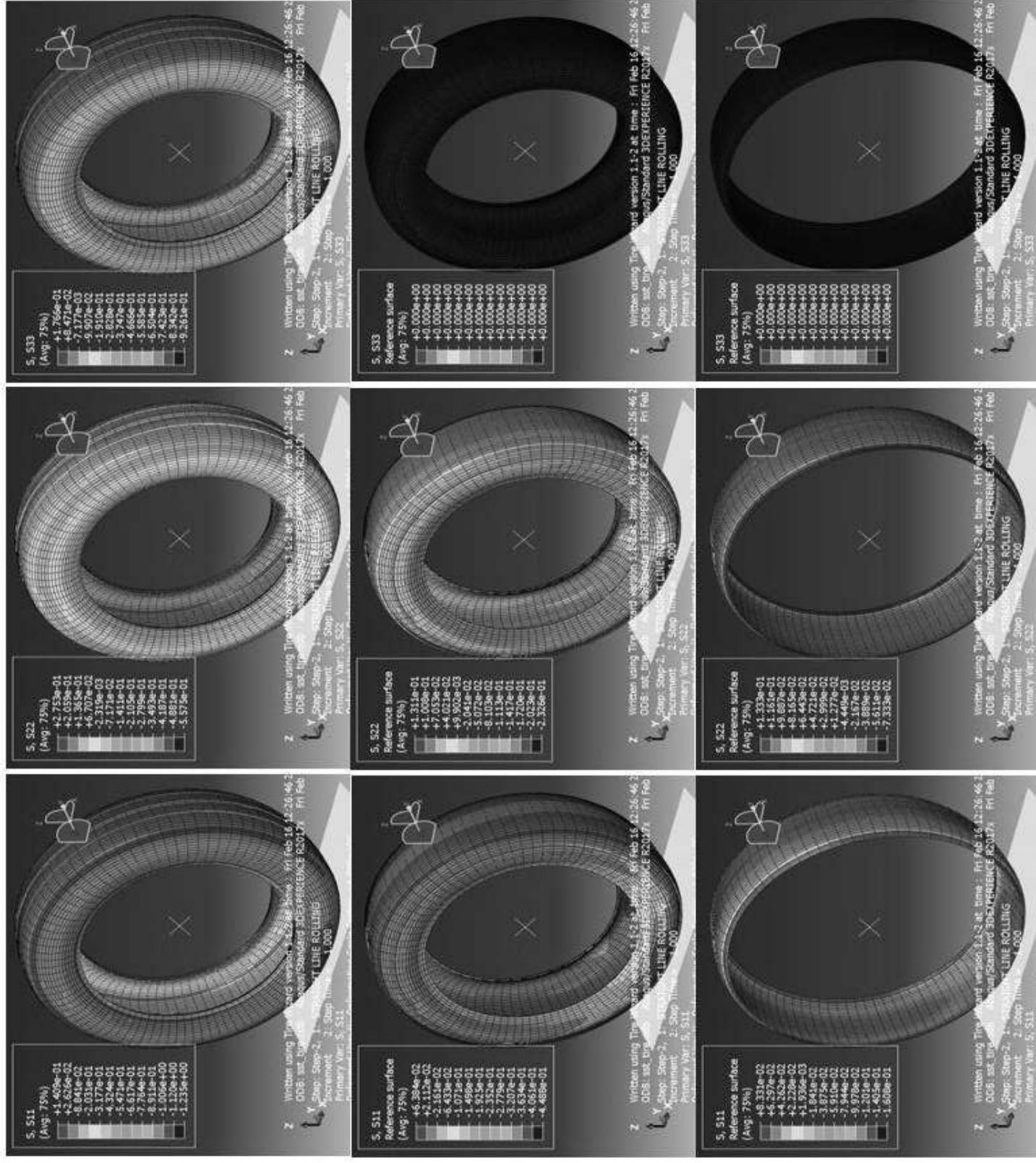


Решение шины: режимы нагружения

19

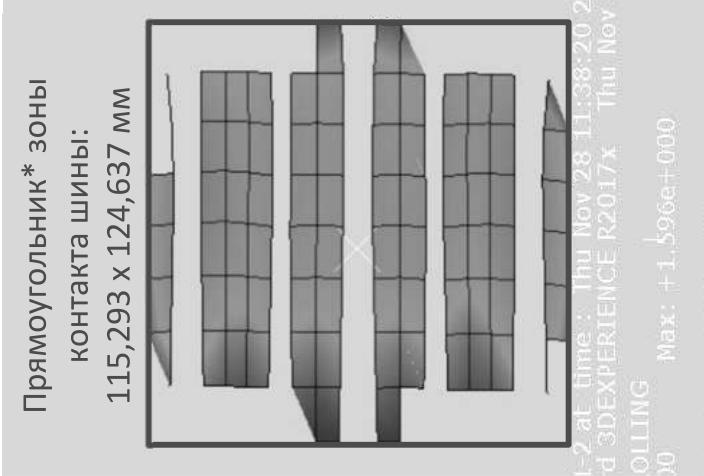
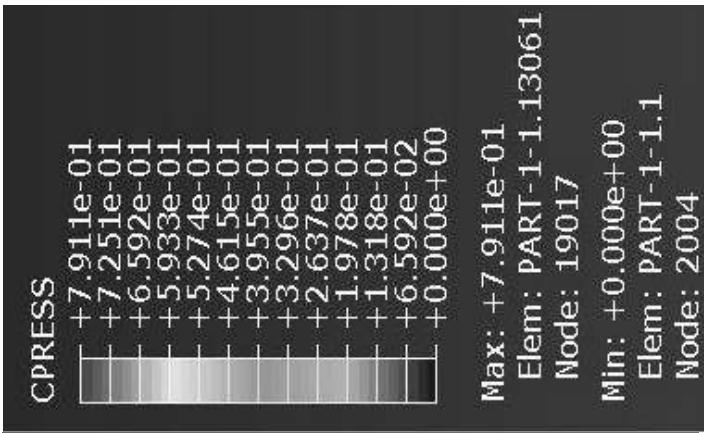
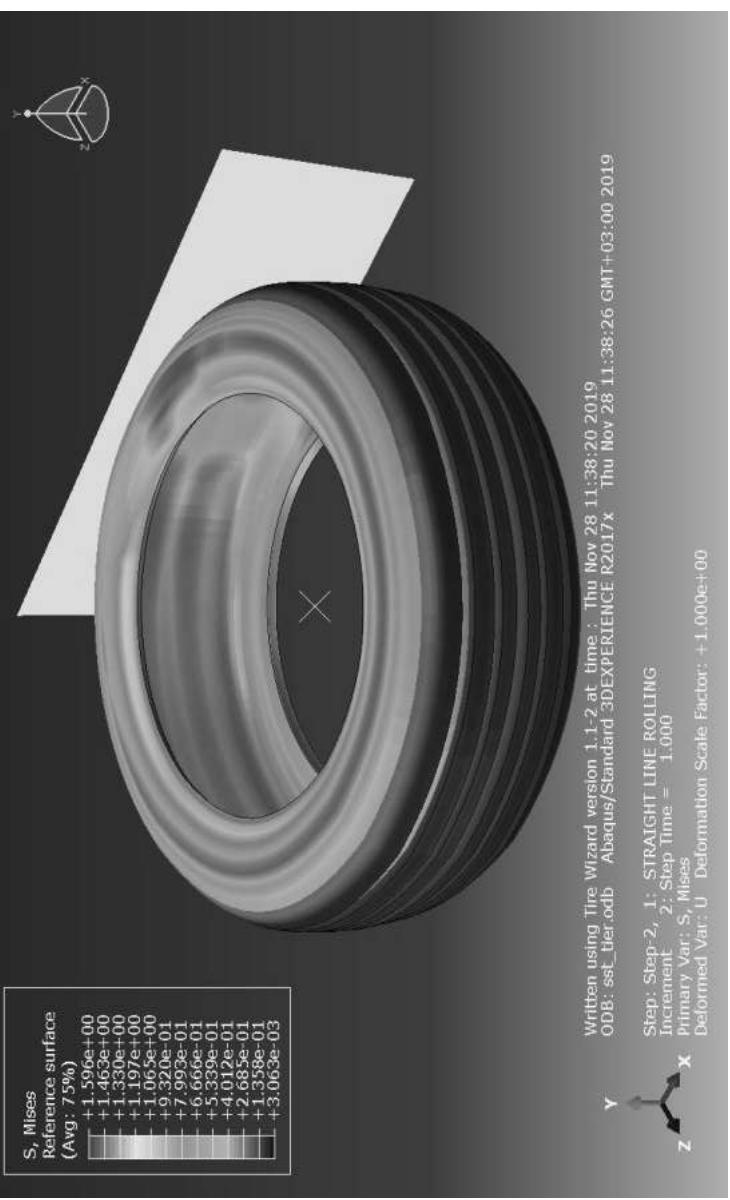
Название величин	Надув	Прижатие	Угловая скорость	Линейная скорость
Размерность	МПа	Н	Рад/с	Мм/с
1	0,3	3300	74	22222
2	0,2; 0,4	3300	74	22222
3	0,3	2800; 3800	74	22222
4	0,3	3300	50; 100	15000; 30000

Решение шины: распределение напряжений по компонентам



Результаты: Опыт №1

21

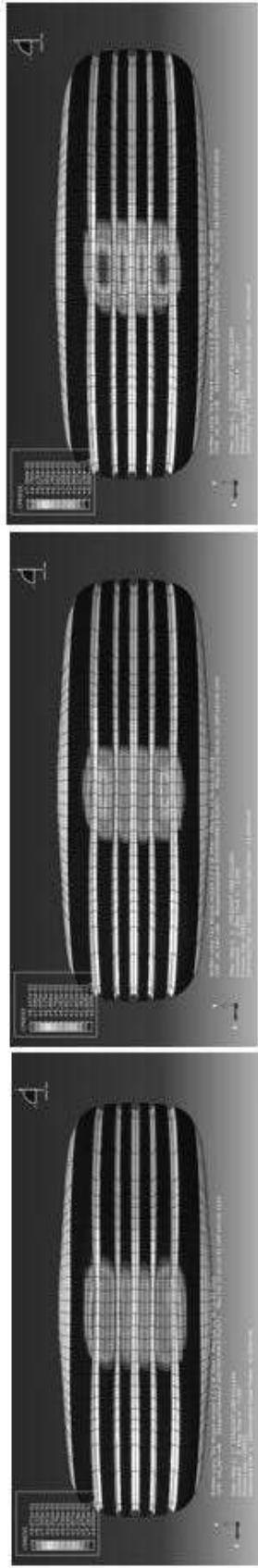


*Зона контакта шины с аналитической поверхностью на самом деле не прямоугольной формы, но возможности точного отображения её сильно ограничены, поэтому замеряются только наибольшие размеры, на основе которых строится «прямоугольник контакта». При грубой сетке дискретность области зоны контакта будет значительной.

Результаты: результаты численного эксперимента

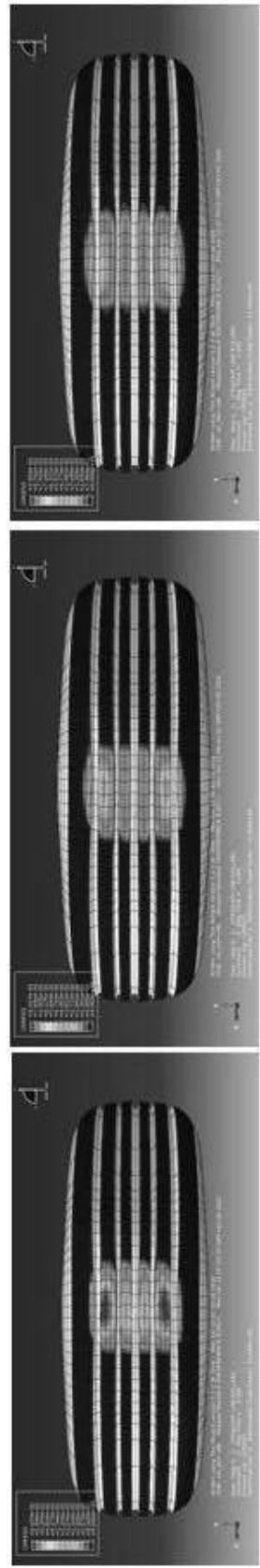
22

Надув шины



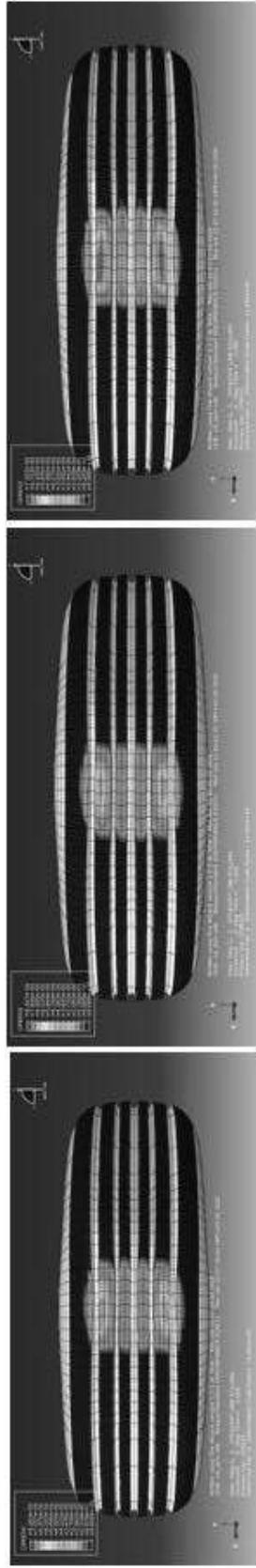
0,2 МПа
0,3 МПа
0,4 МПа

Вертикальное прижатие



2800 Н
3300 Н
3800 Н

Скорость движения



50 рад/с
74 рад/с
100 рад/с

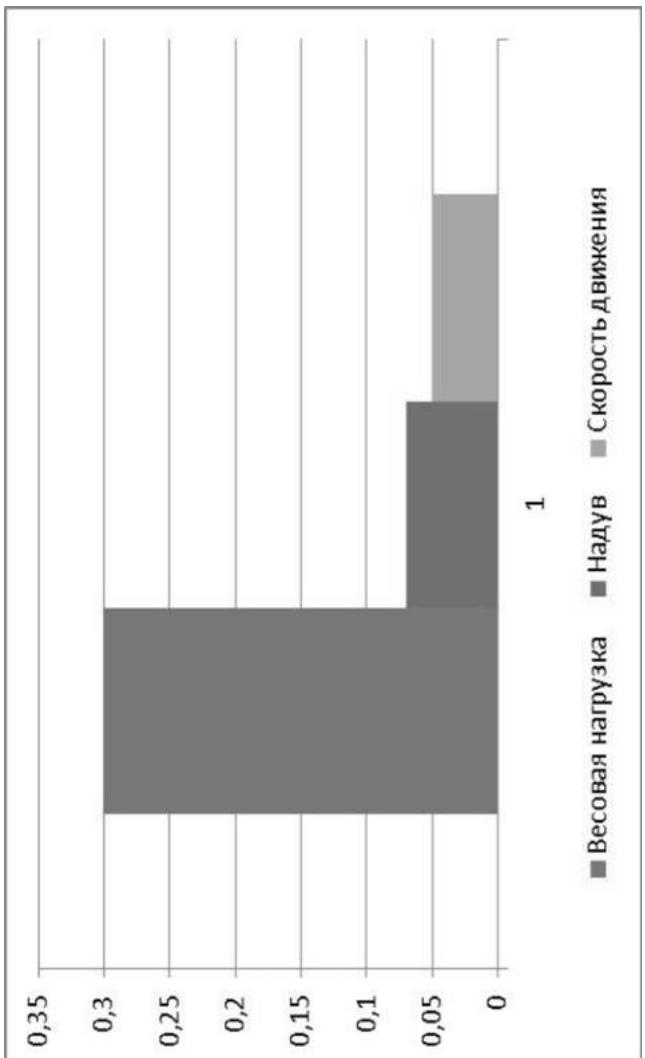
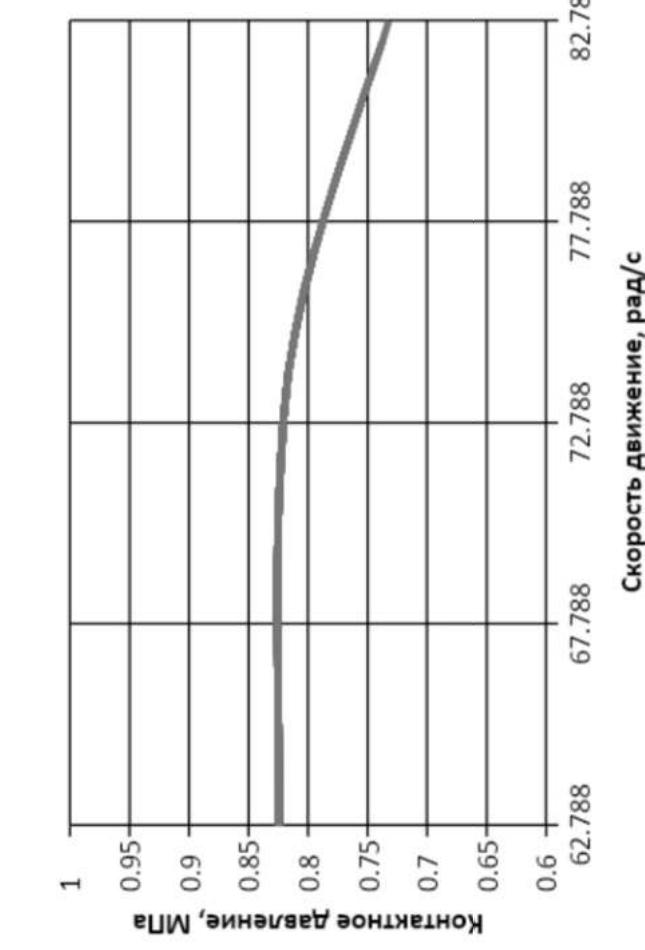
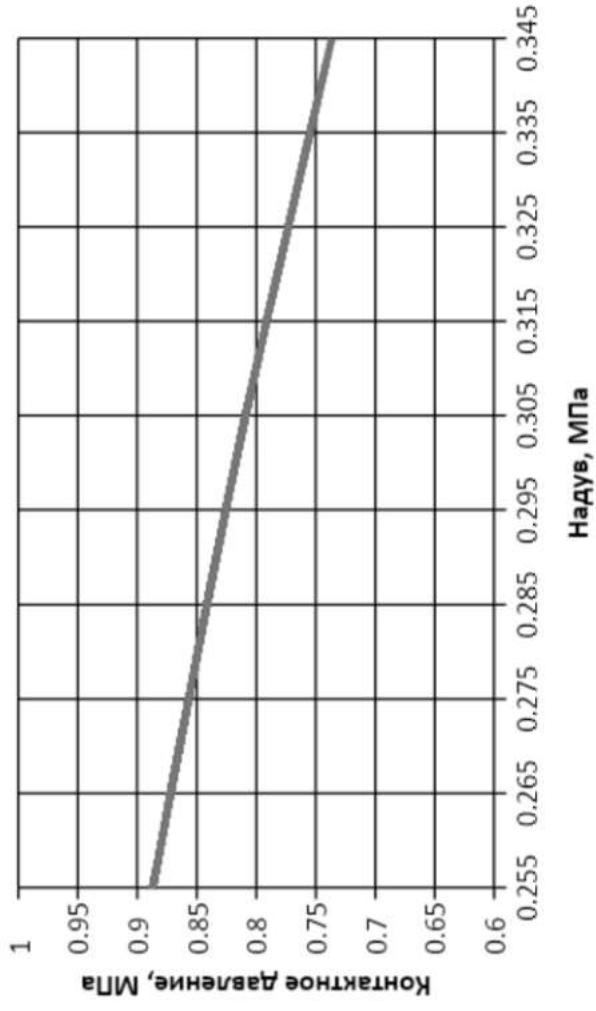
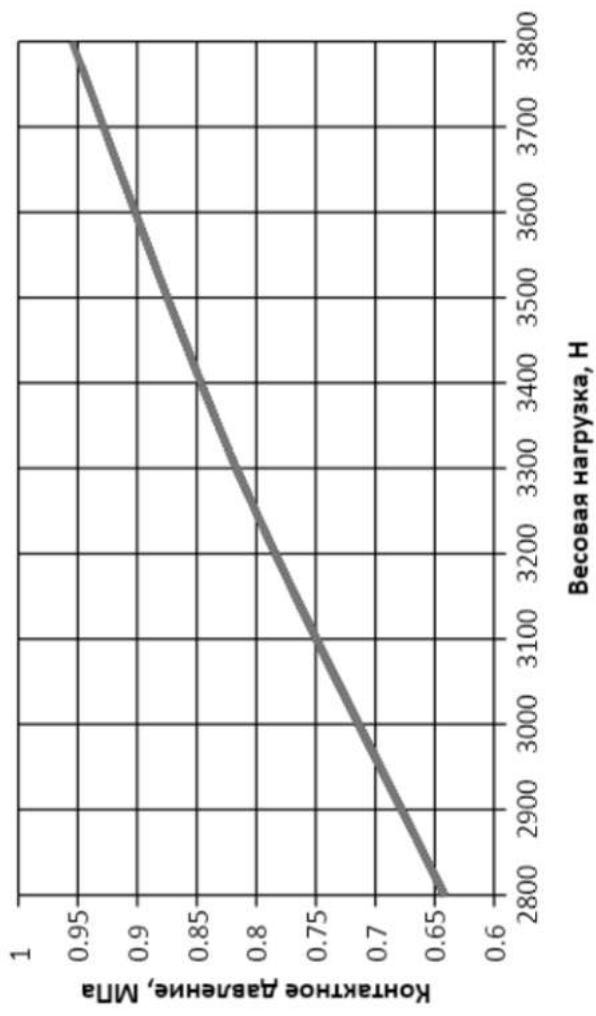
Результаты: результаты численного эксперимента

23

Контактное давление, МПа	Надув шины, МПа	Границы области, МПа
0,887	0,2	0,254
0,816	0,3	0,3
0,736	0,4	0,345
Контактное давление, МПа	Прижатие шины, Н	Границы области, доли
0,641	2800	1,178
0,816	3300	1
0,95	3800	0,868421
Контактное давление, МПа	Скорость движения, рад/с	Границы области, рад/с
0,824	50	62,787
0,816	74	74
0,732	100	85,212

Результаты: изменение величины контактного давления

24



Результаты: расчет объемного износа

25

$$\dot{V} = K \frac{P_A}{H} \dot{V}$$

№	Коэффициент износстойкости, Па	Площадь контакта, м ²	Твердость по Шору, Па	Скорость скольжения, м/с	Скорость объемного износа, м ³ /с
					1,7
1	0,00011	791000	1,34E-05	2000000000	9,91E-13
2	0,00011	900000	0,000014	2000000000	1,178E-12
3	0,00011	1124000	0,000014	2000000000	1,471E-12
4	0,00011	732200	1,37E-05	2000000000	1,7
					9,379E-13

1. Выявлены основные структурные и физико-механические особенности автомобильной шины;
 2. Исследованы упругие свойства резины СКИ-3, результаты аппроксимированы моделью гиперупругого материала Муни-Ривлина;
 3. Разработана конечно-элементная модель квазистатического качения автомобильной шины по ровной поверхности.
 4. Анализ полученных результатов выявил наибольшее влияние параметра осевого давления на давление в зоне контакта шины с поверхностью.
- Качественное сравнение результатов моделирования с литературными источниками показало совпадение результатов.