

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗИНОКОРДНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ

В. С. Корнеев, С. А. Корнеев

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Представлен расчётно-экспериментальный метод определения в явном виде начальных распределений угла наклона нитей корда, шага между ними, объёмных долей нитей корда и резины в резинокордном композите вдоль меридиана оболочки вращения. Предварительно изложена краткая теория метода, разработанная ранее с участием одного из авторов. Основное внимание уделено процедуре подготовки образцов, порядку проведения измерений и математической обработке первичных данных для установления усреднённых значений угла наклона и шага нитей корда на экваторе оболочки. Практическое применение предложенного расчётно-экспериментального метода проиллюстрировано на примере резинокордной оболочки баллонного типа модели Н-50. Результаты проведённого исследования представляют интерес при проектировании систем ударовиброзащиты технических объектов, таких как подземные и подвижные комплексы пусковых установок стратегических ракет, радиоэлектронная аппаратура летательных аппаратов и автотранспортные средства общего назначения.

Ключевые слова: резинокордная оболочка, начальные распределения, угол наклона нитей корда, шаг между нитями корда, объёмные доли корда и резины.

Введение

Упругие элементы на базе резинокордных оболочек являются эффективным средством защиты от вибраций и ударов, которым подвергаются многие технические объекты: подземные и подвижные комплексы пусковых установок стратегических ракет, радиоэлектронная аппаратура и бортовое оборудование летательных аппаратов и морских кораблей, автотранспортные средства общего назначения [1–10]. Наиболее жёсткие требования предъявляются к амортизаторам в системах ударовиброзащиты летательных аппаратов и ракетного оборудования [5]: ударные перегрузки при работе двигателя достигают 30...70 g, вибрационная перегрузка составляет 5...10 g при частоте вибраций до 8 кГц.

Современная техническая теория пневматических амортизаторов с резинокордными оболочками [11–14] строится на расчётных зависимостях, основывающихся на допущении о нерастяжимости нитей корда. Однако прямое сопоставление изобарных силовых характеристик пневматических упругих элементов с резинокордными оболочками баллонного и рукавного типов, получаемых экспериментально и рассчитываемых традиционным методом, указывает на значительные отличия [15, 16], для устранения которых требуется учитывать упругую деформацию резинокордной оболочки под давлением. С этой целью в [17] разработана математическая модель резинокордной оболочки, которая отличается от математической модели безмоментной теории сетчатых оболочек, используемой в механике пневматических шин, учётом растяжимости

нитей корда и упругого сопротивления резиновой матрицы без ограничения величины возникающих деформаций. Для замыкания указанной математической модели необходимо располагать исходными данными, определяющими начальное расположение нитей корда наряду с начальной геометрией меридиана срединной поверхности оболочки в ненагруженном состоянии. С этой целью в [17] затронуты общие теоретические аспекты полуэмпирического метода, позволяющего устанавливать требуемые исходные данные, исходя из технологии изготовления резинокордной оболочки. Настоящая статья посвящена более детальному изучению данного вопроса с подробным описанием методики практической реализации указанного полуэмпирического метода и его иллюстрации на примере резинокордной оболочки баллонного типа модели Н-50, серийно изготавливаемой ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» [18].

Теория метода

Рассматриваемый метод определения начальных геометрических параметров резинокордной оболочки [17] основывается на трёх общепринятых допущениях: 1) материальная однородность заготовки; 2) полная осевая симметрия процесса формирования; 3) одинаковое относительное удлинение нитей корда по всей их длине. В отличие от традиционного подхода [10, 19, 20], анализирующего поведение элементарного участка отдельной нити корда в процессе формирования оболочки, в [17] рассмотрен процесс деформирования представительного элемента заготовки, содержащего достаточно большое число пере-

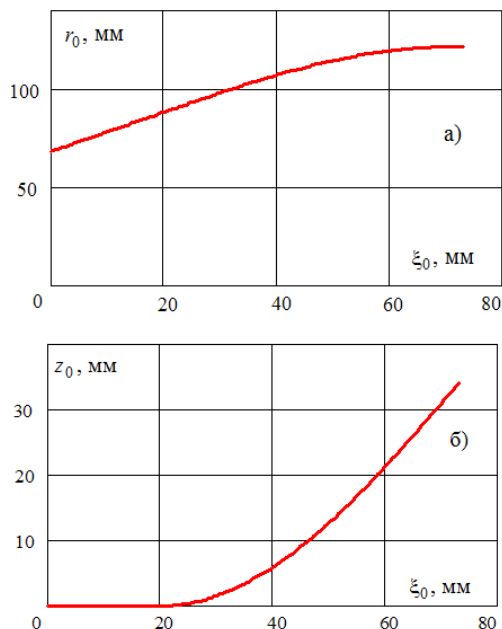


Рис. 1. Параметрические зависимости цилиндрических координат меридиана срединной поверхности резинокордной оболочки баллонного типа модели Н-50 в ненагруженном состоянии:
 а) радиальная координата;
 б) осевая координата
Fig. 1. Parametric dependencies of the cylindrical coordinates of the meridian of the middle surface of the rubber-cord shell balloon type model H-50 in the unloaded condition:
 a) radial coordinate;
 b) axial coordinate



Рис. 2. Меридиан срединной поверхности резинокордной оболочки баллонного типа модели Н-50 в ненагруженном состоянии:
 A_0 — точка крепления оболочки к металлической арматуре; B_0 — точка перехода от прямой линии к окружности; K_0 — точка экватора
Fig. 2. Meridian of the middle surface of the rubber-cord shell balloon type model H-50 in the unloaded condition:
 A_0 — point of attachment of the casing to metal fittings;
 B_0 — point of transition from a straight line to a circle;
 K_0 — equator point

крещивающихся элементарных нитей корда обоих направлений. Благодаря этому не возникает необходимости в принятии избыточных гипотез¹, приводящих к отличающимся друг от друга конечным результатам.

Для функции распределения начального угла наклона нитей корда к меридиану оболочки α_0 в [17] получена расчётная зависимость

$$\sin \alpha_0(\xi_0) = \frac{\sin \alpha_k r_0(\xi_0)}{r_k}, \quad (1)$$

для начального шага (кратчайшего расстояния) между нитями корда δ_0 выведена зависимость

$$\delta_0(\xi_0) = \delta_k \frac{\sin 2\alpha_0(\xi_0)}{\sin 2\alpha_k}, \quad (2)$$

а для объёмной доли нитей корда χ_k и объёмной доли резины χ_p в (несжимаемом) резинокордном композите установлены зависимости

$$\chi_k(\xi_0) = \frac{\pi d_k^2 k}{4 \delta_0(\xi_0) h_0},$$

$$\chi_p(\xi_0) = 1 - \chi_k(\xi_0). \quad (3)$$

Здесь $r_0 = r_0(\xi_0)$, $z_0 = z_0(\xi_0)$ — параметрические зависимости, описывающие геометрию меридиана срединной поверхности оболочки (в цилиндрической системе координат) по пресс-форме (чертежу); ξ_0 — криволинейная координата (длина меридиана), отсчитываемая от некоторой фиксированной точки меридиана A_0 (например, от точки, в которой при последующей сборке пневмоэлемента осуществляется крепление резинокордной оболочки к металлической арматуре); $r_k = r_0(\xi_k)$, $\alpha_k = \alpha_0(\xi_k)$, $\delta_k = \delta_0(\xi_k)$ — соответственно радиус экватора срединной поверхности оболочки, угол наклона нитей корда к меридиану на экваторе, шаг между нитями корда на экваторе (ξ_k — криволинейная координата точки экватора K_0 — точки меридиана, наиболее удалённой от оси оболочки); d_k — диаметр нити корда в ненагруженном состоянии; k — число слоёв нитей корда одного направления; h_0 — полутолщина стенки в ненагруженном состоянии.

Так, например, для резинокордной оболочки баллонного типа модели Н-50 на рис. 1 приведены графики параметрических зависимостей цилиндрических координат точек меридиана, построенные по рабочему чертежу меридиана оболочки в ненагруженном состоянии (рис. 2). У данной оболочки полутолщина стенки $h_0 = 2$ мм, число слоёв нитей корда одного направле-



Рис. 3. Образец резинокордной оболочки
Fig. 3. Sample rubber-cord shell

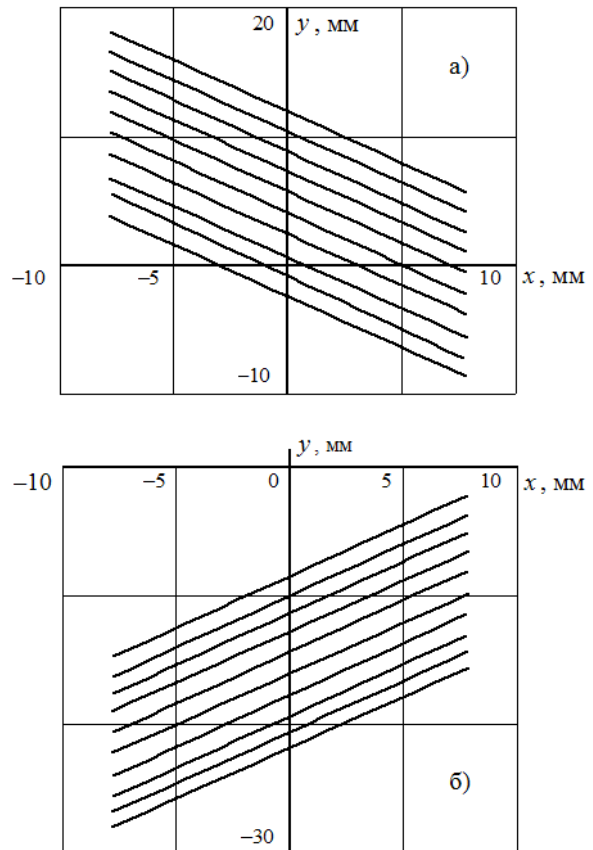


Рис. 4. Оцифрованные и обработанные данные расположения нитей корда первого направления (а) и второго направления (б) по отношению к меридиану (оси абсцисс) и экватору (оси ординат) срединной поверхности резинокордной оболочки модели Н-50
Fig. 4. Digitized and processed of location long fibre cord threading data first direction (a) and second direction (b) in relation to the meridian (x-axis) and equator (y-axis) the middle surface of the rubber-cord shell model H-50

ния $k = 1$, диаметр нити корда $d_k = 0,5$ мм (ткань кордная анидная 16 АТЛДУ), радиус экватора $r_k = 122$ мм (рис. 1, 2). Поэтому неопределёнными являются угол наклона нитей корда к меридиану на экваторе α_k и шаг между нитями корда на экваторе δ_k . Приблизённо порядок данных величин можно оценить по формулам [17]

$$\sin \alpha_k = \sin \alpha_0 \frac{r_k}{r_0(1 + \varepsilon_k^\phi)},$$

$$\delta_k = \delta_0 \frac{r_k \cos \alpha_k}{r_0 \cos \alpha_0},$$

располагая значениями четырёх технологических параметров: радиуса сборочного барабана r_0 , угла закроя корда α_0 , шага между нитями корда браслета (заготовки) δ_0 и относительного удлинения нитей корда ε_k^ϕ (под действием внутреннего избыточного давления в варочной камере). При этом относительное удлинение ε_k^ϕ полагается одинаковым по всей длине нитей корда и по оценочным данным лежит в диапазоне 4...10% [19], 2...8% [20]. Очевидно, что более достоверные значения угла α_k и шага δ_k можно получить только экспериментально, путём прямых измерений специальным образом подготовленных образцов резинокордной оболочки.

Методика экспериментального определения геометрических параметров расположения нитей корда

В проведённом экспериментальном исследовании вдоль экватора резинокордной оболочки баллонного типа модели Н-50 вырезались шесть образцов. Каждый образец обдирался на наждаке таким образом, чтобы были видны нити корда обоих направлений (рис. 3). Сканированное изображение образца экспортировалось в специализированную программу GetData Graph Digitizer, имеющуюся в открытом доступе и предназначенную для оцифровки графиков, диаграмм, карт и т.п. Для каждого направления выбирались десять подряд следующих нитей корда. На каждой из нитей выделялись три точки, координаты которых определялись в условных единицах (пикселях) по отношению к декартовой системе координат, устанавливаемой GetData Graph Digitizer «по умолчанию» и называемой далее лабораторной. Одновременно с нитями корда оцифровывались (по двум точкам) линия экватора и две перпендикулярные линии, расположенные на сканированном изображении штангенциркуля и металлической линейки (рис. 3). Благодаря последнему для каждой координатной оси определялся масштабный коэффициент, вычислялся

Таблица 1. Средние значения и среднеквадратическое отклонение геометрических параметров расположения нитей корда
 Table 1. Mean values and root-mean-square deviation of geometric parameters of the arrangement of cord threads

Образец	Угол наклона α_k , град	Расстояние по экватору Δ_k , мм
1	38,68±0,29	1,48±0,16
2	42,69±0,44	1,78±0,16
3	39,09±0,72	1,58±0,15
4	42,03±0,59	1,72±0,11
5	41,71±0,42	1,64±0,18
6	40,93±0,47	1,61±0,14

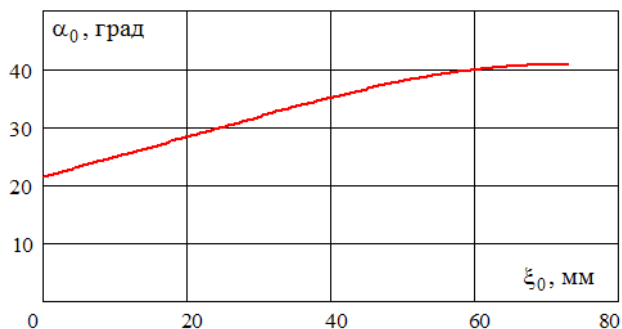


Рис. 5. Распределение угла наклона нитей корда к меридиану срединной поверхности резинокордной оболочки модели H-50
 Fig. 5. The distribution of the angle of inclination of the long fibre cords to the meridian the middle surface of the rubber-cord shell model H-50

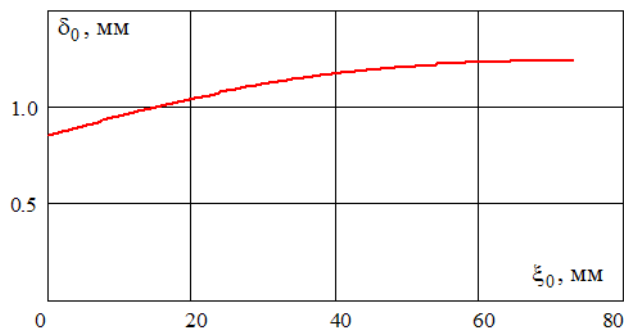


Рис. 6. Распределение шага между нитями корда вдоль меридиана срединной поверхности резинокордной оболочки модели H-50
 Fig. 6. The pitch distribution between the long fibre cords along the meridian the middle surface of the rubber-cord shell model H-50

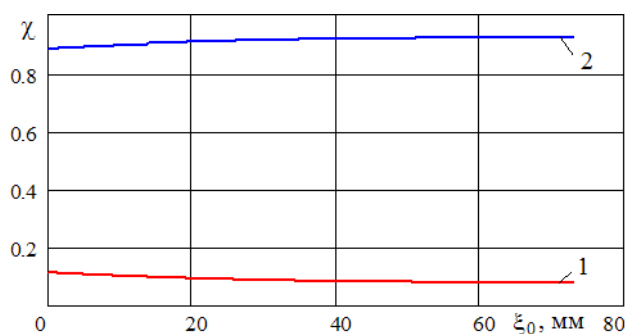


Рис. 7. Распределение объемных долей нитей корда и резины вдоль меридиана срединной поверхности оболочки модели H-50:
 1 — нити корда; 2 — резина
 Fig. 7. Distribution of volume fractions of cord and rubber threads along the meridian of the middle surface of the shell model H-50:
 1 — long fibre cord threads; 2 — rubber

ра. Каждая из нитей корда аппроксимировалась уравнением прямой $y = a + bx$. Коэффициенты a, b находились методом наименьших квадратов по оцифрованным данным декартовых координат точек нити корда. После этого корректировалось расположение линий меридиана и экватора так, чтобы средние значения углов наклона нитей обоих направлений совпадали (корректировка угла наклона меридиана и экватора составила $0,22^\circ$ в среднем по всем шести образцам). Установленное указанным образом окончательное расположение нитей корда обоих направлений представлено на рис. 4.

На заключительном этапе обработки первичных данных определялись значения угла наклона каждой нити корда к меридиану и величина расстояния между нитями корда вдоль экватора как разность длины отрезков, отсекаемых соответствующими прямыми на оси ординат (рис. 4).

Результаты

Средние значения угла наклона нитей корда к меридиану α_k и средние значения расстояния между нитями корда вдоль экватора Δ_k приведены в табл. 1 с указанием соответствующих среднеквадратических отклонений [22, 23]. Общее (для резинокордной оболочки в целом) среднее значение угла наклона нитей корда к меридиану $\bar{\alpha}_k$ и среднее значение расстояния между нитями корда вдоль экватора $\bar{\Delta}_k$, рассчитываемые по

среднее значение масштабного коэффициента, после чего производился перевод пикселей в метрическую систему единиц.

Обработка первичных данных измерений проводилась одинаковым образом для каждого образца в следующей последовательности. Осуществлялся переход от лабораторной системы координат к декартовой системе координат, оси которой направлены вдоль меридиана и эквато-

всем образцам, равны $\bar{\alpha}_k = 40,86^\circ \pm 1,57^\circ$, $\bar{\Delta}_k = 1,634 \pm 0,167$ мм. При этом шаг между нитями корда на экваторе оболочки, определяемый по формуле

$$\bar{\delta}_k = \bar{\Delta}_k \cos \bar{\alpha}_k,$$

имеет значение $\bar{\delta}_k = 1,24 \pm 0,15$ мм. Разброс средних значений угла наклона α_k и экваториального расстояния между нитями корда Δ_k по всем шести образцам (табл. 1) указывает на приближённый характер принятых допущений о материальной однородности заготовки, полной осевой симметрии процесса формирования оболочки и одинакового относительного удлинения нитей корда по всей их длине. Тем не менее полученные результаты можно рекомендовать к практическому использованию в дальнейших прикладных расчётах как первое приближение значений величин $\bar{\alpha}_k$ и $\bar{\delta}_k$.

Обсуждение результатов

Экспериментально полученные усреднённые экваториальные значения угла $\bar{\alpha}_k$ и шага $\bar{\delta}_k$ позволяют определить в явном виде распределения (по длине меридиана срединной поверхности резинокордной оболочки модели Н-50) угла наклона нитей корда к меридиану (рис. 5), шага между нитями корда (рис. 6), объёмных долей нитей корда и резины в (несжимаемом) резинокордном композите (рис. 7) в соответствии с расчётными формулами (1) – (3) и параметрическими зависимостями, приведёнными на рис. 1. Как видим, первые две зависимости (рис. 5, 6) являются монотонно возрастающими, вследствие чего наиболее редко нити корда расположены на экваторе. Поэтому в процессе эксплуатации с ростом внутреннего избыточного давления наиболее вероятно разрушение оболочки в той области экватора, где расстояние Δ_k (табл. 1) имеет наибольшее значение. На основании графика на рис. 7 можно сказать, что в области экватора резинокордный композит на 92% состоит из резины, хотя всю приложенную нагрузку воспринимают нити корда. Подобного рода информация может быть полезной при совершенствовании технологии изготовления резинокордных оболочек.

Заключение

Подробно описан и проиллюстрирован на практическом примере расчётно-экспериментальный метод определения начальных геометрических параметров расположения нитей корда в резинокордных оболочках вращения. Параметрические зависимости для цилиндрических координат меридиана срединной поверхности оболочки рекомендуется устанавливать по рабочему чертежу резинокордной оболочки, который является основой при изготовлении соответствующей пресс-формы.

Усреднённые значения угла наклона и шага нитей корда по экватору целесообразно определять экспериментально, используя предложенную методику проведения измерений и обработки получаемых первичных данных. По мере накопления статистики допустимо использова-

ние сугубо расчётного метода, описанного в [17], с надлежащими уточнениями и корректировкой данных, касающихся материальной неоднородности заготовки и неравномерного распределения деформации нитей корда по их длине.

Функции начального распределения геометрических параметров резинокордной оболочки вращения, получаемые по предлагаемому методу, являются исходными данными для математического моделирования напряжённо-деформированного состояния пневматических элементов под нагрузкой [17], результаты которого необходимы для оптимального проектирования систем ударовиброзащиты таких технических объектов, как подземные и подвижные комплексы пусковых установок стратегических ракет, радиоэлектронная аппаратура летательных аппаратов и автотранспортные средства общего назначения.

Примечания

¹ Имеется в виду (пантографическая) гипотеза о том, что при формировании оболочки перекрещивающиеся слои корда в браслете не смещаются относительно друг друга, либо гипотеза о постоянстве шага между нитями корда, либо гипотеза о постоянстве площади элементарной ромбической ячейки заготовки [21].

Список источников

1. Карлов В. И., Комочков В. А., Фитилев Б. Н. [и др.]. Введение в ракетно-космическую технику. В 2 ч. Ч. 2. Стартовые и технические комплексы ракет / под ред. В. А. Комочкова. Волгоград: ВолгГТУ, 2008. 156 с. ISBN 978-5-9948-0155-0.
2. Круглов Ю. А., Туманов Ю. А. Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры. Л.: Машиностроение, 1986. 222 с.
3. Маликов В. Г. Шахтные пусковые установки. М.: Воениздат, 1975. 120 с.
4. Цыс В. Г., Шалай В. В., Сергаева М. Ю. Основы проектирования стартовых ракетных комплексов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. 111 с.
5. Грибов М. М. Регулируемые амортизаторы радиоэлектронной аппаратуры. М.: Советское радио, 1974. 144 с.
6. Грибов М. М., Жвакин Ю. И. Конструирование амортизационных систем РЭА с помощью моделирования. М.: Советское радио, 1977. 126 с.
7. Трибельский И. А., Шалай В. В., Зубарев А. В. [и др.]. Расчётно-экспериментальные методы проектирования сложных резинокордных конструкций: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 238 с. ISBN 978-5-8149-1077-6.
8. Акопян Р. А. Пневматическое подрессоривание автотранспортных средств (вопросы теории и практики). В 2 ч. Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1979. Ч. 1. 218 с.
9. Певзнер Я. М., Горелик А. М. Пневматические и гидропневматические подвески. М.: Машгиз, 1963. 319 с.
10. Равкин Г. О. Пневматическая подвеска автомобиля. М.: Машгиз, 1962. 289 с.
11. Поздеев А. В., Новиков В. В., Дьяков А. С. [и др.]. Регулируемые пневматические и пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств: моногр. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2014. 243 с. ISBN 978-5-9948-1296-9.
12. Калашников Б. А. Системы амортизации объектов с дискретной коммутацией упругих элементов: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. 341 с. ISBN 978-5-8149-0637-3.

13. Хамитов Р. Н., Аверьянов Г. С. Системы амортизации крупногабаритных объектов с активными упругими и демпфирующими элементами: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 123 с. ISBN 978-5-8149-0963-3.

14. Корнеев С. А., Корнеев В. С., Зубарев А. В., Климентьев Е. В. Основы технической теории пневматических амортизаторов: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 147 с. ISBN 978-5-8149-2360-8.

15. Корнеев С. А., Корнеев В. С., Адонин В. А. Термодинамический метод построения рабочих характеристик пневматических элементов (воздушных пружин) с упруго деформируемой резинокордной оболочкой // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4 (56). С. 8–18. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).8-18.

16. Korneev S. A., Korneev V. S., Adonin V. A. Thermodynamic description of performance characteristics pneumatic elastic elements with rubber-cord envelopes // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020057-1–020057-10. DOI: 10.1063/1.4998877.

17. Корнеев В. С., Шалай В. В. Математическая модель резинокордной оболочки вращения для пневматических амортизаторов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 1. С. 22–41. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-22-41.

18. Пневмоэлементы с резинокордной оболочкой // ФГУП «ФНПЦ “Прогресс”». URL: <http://www.progress-omsk.ru/constructor.php?act=group5> (дата обращения: 19.04.2019).

19. Бидерман В. Л. Расчеты резиновых и резинокордных деталей // Расчеты на прочность в машиностроении. В 3 т. Т. 2. Некоторые задачи прикладной теории упругости. Расчеты за пределами упругости. Расчеты на ползучесть / под ред. С. Д. Пономарева [и др.]. М.: Машгиз, 1958. С. 487–591.

20. Бидерман В. Л., Гуслицер Р. Л., Захаров С. П. [и др.]. Автомобильные шины (конструкция, расчёт, испытание, эксплуатация). М.: Госхимиздат, 1963. 383 с.

21. Koutný F. Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires. CZE: Zlín, 2007. 139 p.

22. Сквайрс Дж. Л. Практическая физика / пер. с англ. М.: Мир, 1971. 246 с.

23. Худсон Д. И. Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике / пер. с англ. М.: Мир, 1970. 296 с.

КОРНЕЕВ Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы теории механики и автоматического управления».

SPIN-код: 5866-0890

AuthorID (РИНЦ): 566718

ORCID: 0000-0003-1694-1190

AuthorID (SCOPUS): 57190977806

Адрес для переписки: 79045840307@ya.ru

КОРНЕЕВ Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Основы теории механики и автоматического управления».

SPIN-код: 8127-1512

AuthorID (РИНЦ): 104542

ORCID: 0000-0002-0554-5451

AuthorID (SCOPUS): 15767848900

ResearcherID: M-4889-2016

Адрес для переписки: korneyev@omgtu.ru

Для цитирования

Корнеев В. С., Корнеев С. А. Расчётно-экспериментальный метод определения начальных геометрических параметров резинокордных оболочек вращения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 127–134. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-127-134.

Статья поступила в редакцию 26.04.2019 г.

© В. С. Корнеев, С. А. Корнеев

CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD FOR DETERMINING THE INITIAL GEOMETRIC PARAMETERS OF RUBBER-CORD SHELL OF ROTATION

V. S. Korneyev, S. A. Korneyev

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The calculation-experimental method for explicitly definition the initial distributions of the angle of inclination of the cord threads, the pitch between them, the volume fractions of cord threads and rubber in the rubber-cord composite along the rotation shell meridian is presented. A brief theory of the method developed earlier with the participation of one of the authors is set forth. The main attention is paid to the procedure of sample making, the order of measurement and mathematical processing of primary data to establish the average values of the angle of inclination and pitch of the long fiber cords at the equator of the shell. The practical application of the proposed calculation-experimental method is illustrated by the example of a rubber-cord shell of the balloon type of the model N-50. The results of the study are of interest in the design of systems for shock and vibration protection of technical objects, such as underground and mobile complexes of strategic missile launchers, aircraft electronic equipment and general-purpose vehicles.

Keywords: rubber-cord shell, initial distributions, angle of inclination of the long fiber cords, pitch of the long fiber cords, volume shares of a cord and rubber.

References

1. Karlov V. I., Komochkov V. A., Fitilev B. N. [et al.]. Vvedeniye v raketno-kosmicheskuyu tekhniku. V 2 ch. Ch. 2. Startovyye i tekhnicheskiye komplekсы raket [Introduction to rocket and space technology. In 2 parts. Part 2. Launch and technical complexes of missiles] / Ed. V. A. Komochkova. Volgograd: VSTU Publ., 2008. 156 p. ISBN 978-5-9948-0155-0. (In Russ.).
2. Kruglov Yu. A., Tumanov Yu. A. Udarovibrozhashchita mashin, oborudovaniya i apparatury [Shock protection of machines, equipment and apparatus]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1986. 222 p. (In Russ.).
3. Malikov V. G. Shakhthnyye puskovyye ustanovki [Mine launchers]. Moscow: Voenizdat Publ., 1975. 120 p. (In Russ.).
4. Tsyss V. G., Shalay V. V., Sergayeva M. Yu. Osnovy proyektirovaniya startovyykh raketnykh kompleksov [Fundamentals of the design of launch missile systems]. Omsk: OmSTU Publ., 2002. 111 p. (In Russ.).
5. Gribov M. M. Reguliruyemye amortizatory radioelektronnay apparatury [Adjustable shock absorbers of electronic equipment]. Moscow: Sovetskoye radio Publ., 1974. 144 p. (In Russ.).
6. Gribov M. M., Zhvakina Yu. I. Konstruirovaniye amortizatsionnykh sistem REA s pomoshch'yu modelirovaniya [Designing depreciation systems of electronic equipment using simulation]. Moscow: Sovetskoye radio Publ., 1977. 126 p. (In Russ.).
7. Tribelskiy I. A., Shalay V. V., Zubarev A. V. [et al.]. Raschetno-eksperimental'nyye metody proyektirovaniya slozhnykh rezinokordnykh konstruksiy [Computational-experimental methods for designing complex rubber-cord constructions]. Omsk: OmSTU Publ., 2011. 238 p. ISBN 978-5-8149-1077-6. (In Russ.).
8. Akopyan R. A. Pnevmaticheskoye podressorivaniye avtotransportnykh sredstv (voprosy teorii i praktiki) [Pneumatic suspension of vehicles (theory and practice questions)]. In 2 parts. Lviv: Vyshcha shkola Publ. Izdatel'stvo pri L'vovskom universitete Publ., 1979. Part 1. 218 p. (In Russ.).
9. Pevzner Ya. M., Gorelik A. M. Pnevmaticheskiye i gidropnevmaticheskiye podveski [Pneumatic and hydro-pneumatic suspensions]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 319 p. (In Russ.).
10. Ravkin G. O. Pnevmaticheskaya podveska avtomobilya [Air suspension car]. Moscow: Mashgiz Publ., 1962. 289 p. (In Russ.).
11. Pozdeyev A. V., Novikov V. V., D'yakov A. S. [et al.]. Reguliruyemye pnevmaticheskiye i pnevmogidravlicheskiye resory podvesok avtotransportnykh sredstv [Adjustable pneumatic and pneumohydraulic springs of vehicle suspensions]. Volgograd: VSTU Publ., 2014. 243 p. ISBN 978-5-9948-1296-9. (In Russ.).
12. Kalashnikov B. A. Sistemy amortizatsii ob'yektov s diskretnoy kommutatsiyey uprugikh elementov [Systems of depreciation of objects with discrete switching of elastic elements]. Omsk: OmSTU Publ., 2008. 341 p. ISBN 978-5-8149-0637-3. (In Russ.).
13. Khamitov R. N., Aver'yanov G. S. Sistemy amortizatsii krupnogabaritnykh ob'yektov s aktivnymi uprugimi i dempfirovuyushchimi elementami [Depreciation systems for large-sized objects with active elastic and damping elements]. Omsk: OmSTU Publ., 2010. 123 p. ISBN 978-5-8149-0963-3. (In Russ.).
14. Korneyev S. A., Korneyev V. S., Zubarev A. V., Kliment'yev E. V. Osnovy tekhnicheskoy teorii pnevmaticheskikh amortizatorov [The Foundations of the Technical Theory of Pneumatic Shock Absorbers]. Omsk: OmSTU Publ., 2016. 147 p. ISBN 978-5-8149-2360-8. (In Russ.).
15. Korneev S. A., Korneev V. S., Adonin V. A. Termodynamicheskiy metod postroyeniya rabochikh kharakteristik pnevmaticheskikh elementov (vozdushnykh pruzhin) s uprugoy deformiruyemoy rezinokordnoy obolochkoy [Thermodynamic

method of construction of operational characteristics of pneumatic elements (air springs) with elastic deformable rubber-cord casing] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. Modern Technologies System Analysis Modeling*. 2017. No. 4 (56). P. 8–18. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).8-18. (In Russ.).

16. Korneev S. A., Korneev V. S., Adonin V. A. Thermodynamic description of performance characteristics pneumatic elastic elements with rubber-cord envelopes // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876, Issue 1. P. 020057-1–020057-10. DOI: 10.1063/1.4998877. (In Engl.).

17. Korneyev V. S., Shalay V. V. Matematicheskaya model' rezinokordnoy obolochki vrashcheniya dlya pnevmaticheskikh amortizatorov [Mathematical model of rubber-cord shell of rotation for pneumatic dampers] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 22–41. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-22-41. (In Russ.).

18. Pnevmoelementy s rezinokordnoy obolochkoy [Pneumatic elements with rubber-cord sheath] // FGUP «FNPTS "Progress"» [FSUE «FRPC "Progress"»]. URL: <http://www.progress-omsk.ru/constructor.php?act=group5> (accessed: 19.04.2019). (In Russ.).

19. Biderman V. L. Raschety rezinovykh i rezinokordnykh detaley [Calculations of rubber and rubber-cord parts] // *Raschety na prochnost' v mashinostroyenii. V 3 t. T. 2. Nekotoryye zadachi prikladnoy teorii uprugosti. Raschety za predelami uprugosti. Raschety na polzuchest'* [Strength calculations in mechanical engineering. In 3 vols. Vol. 2. Some problems of the applied theory of elasticity. Calculations beyond elasticity. Calculations for creep] / Ed. S. D. Ponomarev [et al.]. Moscow: Mashgiz Publ., 1958. P. 487–591. (In Russ.).

20. Biderman V. L., Guslitsler R. L., Zakharov S. P. [et al.]. *Avtomobil'nyye shiny (konstruktsiya, raschet, ispytaniye, ekspluatatsiya)*. [Car tires (design, calculation, test, exploitation)]. Moscow: Goskhimizdat Publ., 1963. 383 p. (In Russ.).

21. Koutný F. *Geometry and Mechanics of Pneumatic Tires*. CZE: Zlín, 2007. 139 p. (In Engl.).

22. Squires G. L. *Prakticheskaya fizika [Practical physics]* / trans. from Engl. Moscow: Mir Publ., 1971. 246 p. (In Russ.).

23. Hudson D. I. *Statistika dlya fizikov. Lektsii po teorii veroyatnostey i elementarnoy statistike [Statistics lectures]* / trans. from Engl. Moscow: Mir Publ., 1970. 296 p. (In Russ.).

KORNEYEV Vladimir Sergeyeovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Fundamentals of the Theory of Mechanics and Automatic Control Department.

SPIN-code: 5866-0890

AuthorID (RSCI): 566718

ORCID: 0000-0003-1694-1190

AuthorID (SCOPUS): 57190977806

Address for correspondence: 79045840307@ya.ru

KORNEYEV Sergey Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Fundamentals of the Theory of Mechanics and Automatic Control Department.

SPIN-code: 8127-1512

AuthorID (RSCI): 104542

ORCID: 0000-0002-0554-5451

AuthorID (SCOPUS): 15767848900

ResearcherID: M-4889-2016

Address for correspondence: korneyev@omgtu.ru

For citations

Korneyev V. S., Korneyev S. A. Calculation-experimental method for determining the initial geometric parameters of rubber-cord shell of rotation // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 127–134. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-127-134.

Received 26 April 2019.

© V. S. Korneyev, S. A. Korneyev