

УДК 678.067; 678.019.31

doi: 10.18698/0536-1044-2023-8-87-95

Методика расчета параметров равнонапряженной тороидальной оболочки композитного баллона

М.А. Комков, Ю.В. Баданина

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Method for calculating parameters of the equidistant toroidal shell of a composite balloon

M.A. Komkov, Yu.V. Badanina

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрен перспективный тороидальный композитный баллон высокого давления. Предложен вариант конструкции, в которой его силовая оболочка армирована прочными волокнами вдоль меридиана. Получены расчетные зависимости для определения формы образующей равнопрочной тороидальной оболочки, записанные с помощью эллиптических интегралов. Образующая состоит из двух симметрично расположенных относительно горизонтальной оси гладких кривых, пересекающихся под острым углом. Вдоль окружности, по которой пересекаются поверхности вращения, образованные указанными кривыми, установлен кольцевой шпангоут, изготавливаемый окружной намоткой волокон. Приведен численный пример, в котором рассчитаны геометрические и массовые характеристики спроектированного тороидального баллона давления.

Ключевые слова: композитный баллон, образующая тороидальной оболочки, меридиональная намотка, окружная намотка, эллиптические интегралы

The paper considers a promising high-pressure toroidal composite cylinder. It proposes a design option, where its load-bearing shell is reinforced with strong fibers along the meridian. Calculated dependences were obtained to determine the shape of the equal-strength toroidal shell generatrix registered by the elliptic integrals. The generatrix consisted of two smooth curves symmetrically located relative to the horizontal axis and intersecting at the acute angle. The annular frame made by the fibers circumferential winding was installed along the circle, where the revolution surfaces formed by the indicated curves intersected; the frame was made by circumferential winding of the fibers. Numerical example is provided, where geometric and mass characteristics of the designed toroidal pressure vessel were calculated.

Keywords: composite balloon, toroidal shell generatrix, meridional winding, circumferential winding, elliptic integrals

Тонкостенные металлические и композитные оболочки сферической, цилиндрической и конической формы получили широкое распространение в изделиях ракетно-космической техники. Как показывает практика, они хорошо komponуются с тороидальными оболочками

(ТО), например, при проектировании малых разгонных блоков в качестве топливных баков и газовых баллонов наддува [1, 2].

Композитные тороидальные баллоны вместимостью 6...8 л с рабочим давлением 24...30 МПа и массой 4...5 кг перспективны к при-

менению в дыхательных аппаратах [3, 4] бойцов МЧС, пожарной команды и промышленных рабочих. По эргономическим показателям (подъем по лестницам, перемещение ползком, прохождение люков, водных стоков, разбор завалов и др.) баллоны тороидальной формы [4] имеют значительные преимущества перед цилиндрическими аналогами.

Однако изготовление композитных ТО методом спиральной намотки нитей [5, 6] — достаточно сложный и трудоемкий процесс. Значительно проще и производительнее выполнять ТО баллонов методом намотки лент препрега [7] вдоль меридианов тора, т. е. поперечной намоткой [6].

Для меридиональной (поперечной) намотки лентами препрега ТО композитных баллонов диаметром до 1150...1500 мм и сечением до 305 мм можно использовать торонамоточные станки с числовым программным управлением [8], на которых наматывают крупногабаритные катушки электротехнического назначения.

Постановка задачи. Аналитическое исследование оптимальной формы силовых оболочек баллонов высокого давления, образованных непрерывной намоткой нитей, изложено в трудах [9, 10]. Оболочки вращения различной геометрической формы, включая тороидальные, подробно исследованы в работе [2]. Оптимальные формы оболочек общего вида, полученных намоткой нитей одного семейства вдоль меридианов, рассмотрены в публикаци-

ях [11, 12]. Весьма близкое по смыслу решение задачи о сферической оболочке без полюсного отверстия, образованной нерастяжимыми нитями, уложенными вдоль меридиана, описано в книге [13].

В работе [14] предложено изготавливать днища цилиндрических баллонов с использованием двух систем нитей. Первая, укладываемая вдоль меридианов, при подходе к полюсному отверстию касается его контура и возвращается в область больших радиусов. Вторую систему нитей укладывают по окружности полюсного отверстия. Она приматывает первую систему нитей и воспринимает погонные силы от нее. По мнению авторов, аналогичным образом с помощью двух систем нитей можно изготовить и равнонапряженную ТО баллона давления, сочетая поперечную и окружную намотку нитей.

Цель работы — спроектировать и рассчитать конструктивно-геометрические параметры равнонапряженной ТО, изготовленной поперечной и окружной намоткой нитей.

Определение формы образующей тороидальной силовой оболочки, изготавливаемой путем меридиональной намотки волокон. Для определения такой формы воспользуемся соотношениями безмоментной теории оболочек вращения при осесимметричном нагружении.

Рассмотрим ТО общего вида (рис. 1, а), нагруженную равномерным внутренним давлением p . Условие равновесия части ТО, отсеченной коническим и цилиндрическим сече-

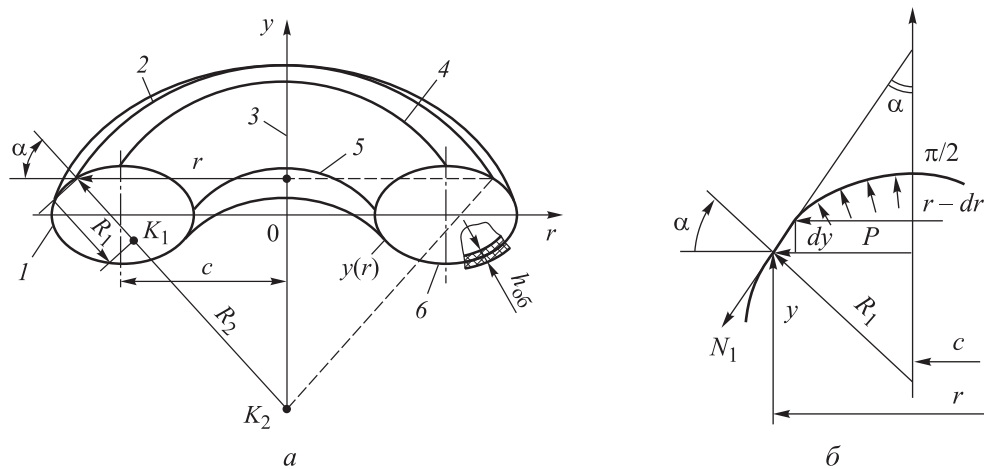


Рис. 1. Схемы тороидальной поверхности вращения (а) и к определению погонных сил в ТО сосуда давления (б):

1 — большой экватор; 2 — угол широты; 3 — ось вращения OY; 4 — вершина тора;
5 — малый экватор тора; 6 — меридиан; R_1, R_2 — главные радиусы кривизны оболочки вращения;
 K_1, K_2 — центры кривизны; $h_{об}$ — толщина ТО

ниями в направлении оси OY (рис. 1, б), запишем как

$$2\pi r N_1 \cos \alpha = \pi(r^2 - c^2) p; \\ r_\pi \leq r \leq r_0; \quad 0 \leq \alpha \leq \pi; \quad r_\pi \leq c \leq r_0,$$

где r — текущий радиус вращения; N_1 — меридиональная погонная сила; α — текущая угловая координата вдоль меридиана тора; c — расстояние от оси вращения до вершины ТО ($\alpha = \pi/2$); r_π — минимальный радиус вращения тора при $\alpha = \pi$; r_0 — максимальный радиус вращения тора при $\alpha = 0$.

Из условия равновесия имеем

$$N_1 = \frac{p(r^2 - c^2)}{2r \cos \alpha}. \quad (1)$$

Выражение для окружной силы N_2 находим из уравнения Лапласа

$$N_1/R_1 + N_2/R_2 = p.$$

После подстановки в него формулы (1) получаем

$$N_2 = \frac{p}{2r} \left[2r - \frac{r^2 - c^2}{R_1 \cos \alpha} \right] R_2. \quad (2)$$

Поделив почленно друг на друга левые и правые части уравнений (1) и (2), запишем

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{2r^2}{r^2 - c^2} - \frac{R_2}{R_1}. \quad (3)$$

Главные радиусы кривизны в уравнении (3) определяются дифференциальными соотношениями оболочек вращения (см. рис. 1, б)

$$R_1 = -\frac{\sqrt{[1+y'^2]^3}}{y''} = \frac{dr}{d(\cos \alpha)}; \\ R_2 = \frac{r}{\cos \alpha} = -\frac{r\sqrt{1+y'^2}}{y'}, \quad (4)$$

где

$$y' = \frac{dy}{dr} = -\operatorname{ctg} \alpha; \quad \cos \alpha = -\frac{y'}{\sqrt{1+y'^2}}. \quad (5)$$

После подстановки соотношений (4) в выражение (3), преобразований и интегрирования получаем дифференциально-интегральное уравнение

$$\ln(\cos \alpha) = \ln(r^2 - c^2) + \ln C_1 - \int \frac{N_2 dr}{N_1 r}, \quad (6)$$

где C_1 — постоянная интегрирования, определяемая из граничных условий.

Уравнение (6) связывает геометрические параметры и погонные силы в безмоментной ТО. Задавая (определяя) отношение сил N_2/N_1 и решая уравнение (6), находим форму меридионального сечения и геометрические размеры ТО.

Определение формы меридиана. В предлагаемом способе расчета предел прочности однонаправленного волокнистого композиционного материала (КМ) при растяжении в меридиональном направлении обозначим через $\sigma_{\text{в.к}}$. Несущей способностью связующего в окружном направлении ТО будем пренебрегать.

Тогда для ТО с меридиональной схемой армирования в уравнении (6) необходимо положить окружные силы равными нулю ($N_2 = 0$). Интегрируя уравнение (6), получаем

$$\cos \alpha = C_1(r_0^2 - c^2). \quad (7)$$

На большом экваторе тора (см. рис. 1, а) при $r = r_0$ угол $\alpha = 0$ и $\cos \alpha = 1$. Постоянная в выражении (7) приобретает вид

$$C_1 = 1/(r^2 - c^2).$$

С учетом этого выражения и формулы (5) запишем

$$\cos \alpha = \frac{-y'}{\sqrt{1+y'^2}} = (r^2 - c^2)/(r_0^2 - c^2), \quad (8) \\ 0 \leq \alpha \leq \pi, \quad r_0 \geq r \geq r_\pi.$$

Так как образующая ТО пересекает малый экватор тора $r = r_\pi$ под прямым углом, то $\alpha = \pi$, $\cos \alpha = -1$ и геометрические параметры ТО на основании выражения (8) будут связаны соотношениями

$$c^2 = (r_0^2 + r_\pi^2)/2; \quad \bar{c}^2 = (1 + \mu^2)/2, \quad (9)$$

где $\bar{c} = c/r_0$ и $\mu = r_\pi/r_0$ — относительное расстояние от оси вращения до вершины и малого экватора тора соответственно.

Решая уравнение (8) с учетом выражения (9), находим связь текущего радиуса вращения с угловой координатой ТО α :

$$r^2 = r_0^2 \frac{1}{2} [1 + \mu^2 + (1 - \mu^2) \cos \alpha]. \quad (10)$$

После замены в уравнении (8) $\cos \alpha$ его дифференциальным соотношением и алгебраических преобразований получаем

$$y' = \frac{dy}{dr} = -\frac{r^2 - c^2}{\sqrt{(r_0^2 - r^2)^2 - (r^2 - c^2)^2}}. \quad (11)$$

Разложив подкоренное выражение (11) на множители и выполнив интегрирование, имеем

$$y = -\int_{r_0}^r \frac{(r^2 - c^2) dr}{\sqrt{(r_0^2 - r^2)(r^2 - r_\pi^2)}}. \quad (12)$$

Согласно уравнению (12), при $r = c$ функция y достигает максимального значения y_c , а при $r = r_0$ и $r = r_\pi$ имеют место вертикальные асимптоты (рис. 2). Уравнение (12) можно решить численно, воспользовавшись, например, программой MathCAD. Введем следующие обозначения: $\bar{r} = r/r_0$ — относительный радиус вращения ТО; $\bar{y} = y/r_0$ — относительная ордината. На рис. 2 в безразмерных координатах \bar{r} и \bar{y} изображены образующие ТО при различных значениях геометрического параметра тора μ .

Решение уравнения (12) можно записать также с помощью эллиптических интегралов первого и второго рода. Изменив пределы интегрирования в уравнении (12) и знак интеграла, выразим его через алгебраические функции и эллиптические интегралы следующим образом:

$$y(r) = \pm r_0 [E(\theta, k) - \bar{c}^2 F(\theta, k)]. \quad (13)$$

Здесь $E(\theta, k)$ и $F(\theta, k)$ — эллиптические интегралы второго и первого рода с аргументом θ и модулем k ,

$$\theta = \arcsin \sqrt{(1 - \bar{r}^2)/(1 - \mu^2)}; \quad k = \sqrt{1 - \mu^2}.$$

После подстановки уравнения (10) в выражение $\sin \theta = \sqrt{(1 - \bar{r}^2)/(1 - \mu^2)}$ получаем

$$\sin \theta = \sqrt{(1 - \cos \alpha)/2} = \sin \alpha/2.$$

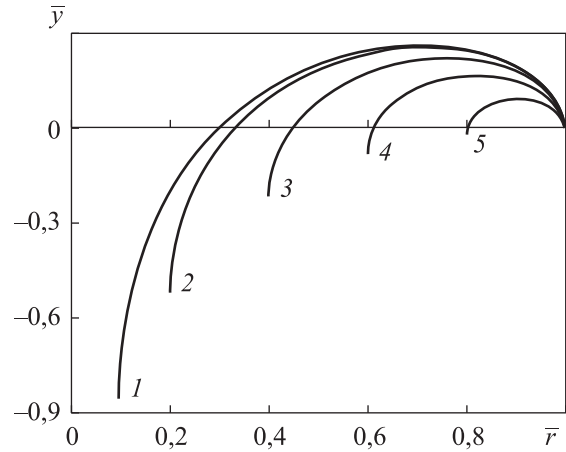


Рис. 2. Формы гладких образующих ТО при геометрическом параметре $\mu = 0,1$ (1), $0,2$ (2), $0,4$ (3), $0,6$ (4) и $0,8$ (5)

Отсюда аргумент эллиптических интегралов $\theta = \alpha/2$.

Уравнение (13) определяет форму меридионального сечения равнонапряженной ТО, нагруженной равномерным внутренним давлением и образованной нитями, которые уложены вдоль меридианов.

Анализ уравнения (13) показывает, что при меридиональной намотке (рис. 3) образующая ТО из равнонапряженных волокон представляет собой петлеобразную кривую, определяющую неограниченно длинную гофрированную трубу вдоль ординаты y для каждого параметра тора μ , за исключением $\mu = 0$.

Как видно из рис. 3, если в точке пересечения верхней и нижней ветвей образующей ТО установить кольцевой шпангоут из нитей,

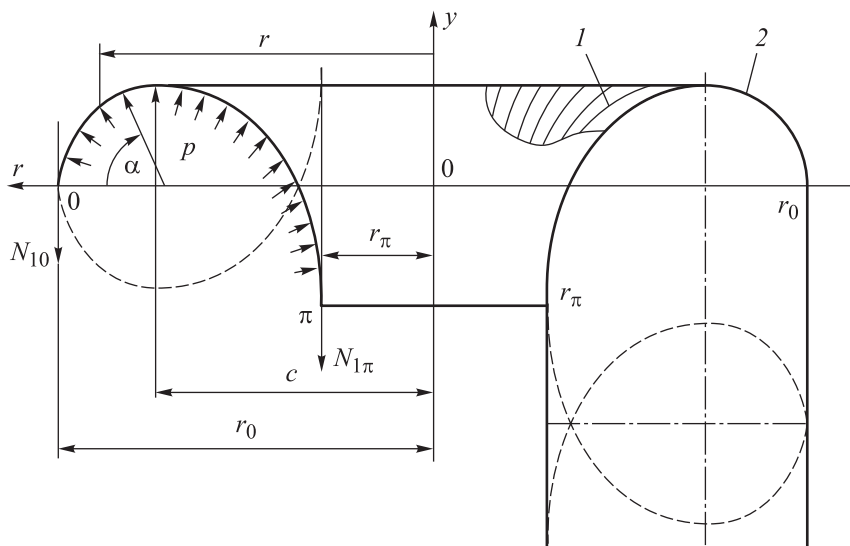


Рис. 3. Форма сечения ТО баллона давления, образованной меридионально направленными нитями: N_{10} и $N_{1\pi}$ — меридиональная погонная сила в оболочке N_1 в точке 0 и π соответственно

намотанных в окружном направлении [15, 16], то можно спроектировать и изготовить намоткой равнонапряженную ТО в интервале радиуса вращения от r_0 до $r_1 > r_\pi$.

В этом случае первая система нитей наматывается вдоль меридиана 2 от большого экватора тора до малого (рис. 4), огибает отдельно намотанный и установленный на оправку кольцевой слой нитей (шпангоут) 1, и возвращается в область больших радиусов вращения ТО.

Рассмотрим условие сопряжения верхней и нижней поверхностей, образующих ТО (см. рис. 4). В месте их стыка угол α_1 делает скачок на величину $\Delta\alpha = \pi - \alpha_1$. Спроектируем погонные силы N_1 верхней поверхности меридионального слоя ТО при радиусе вращения r_1 на плоскость большого экватора тора.

Эти погонные силы не могут быть восприняты безмоментной ТО. Стык необходимо усилить шпангоутом, намотанным по окружности радиуса r_1 , который будет воспринимать растягивающие силы от первого меридионального слоя. При этом в точке пересечения ветвей ТО ордината образующей $y(r_1) = y(r_0) = 0$.

Для определения параметров кольцевой системы нитей найдем распределенную нагрузку, приходящуюся на единицу длины кольцевого слоя в окружном направлении:

$$q_{шп} = N_1 \sin(\pi - \alpha_1) = N_1 \sin \alpha_1.$$

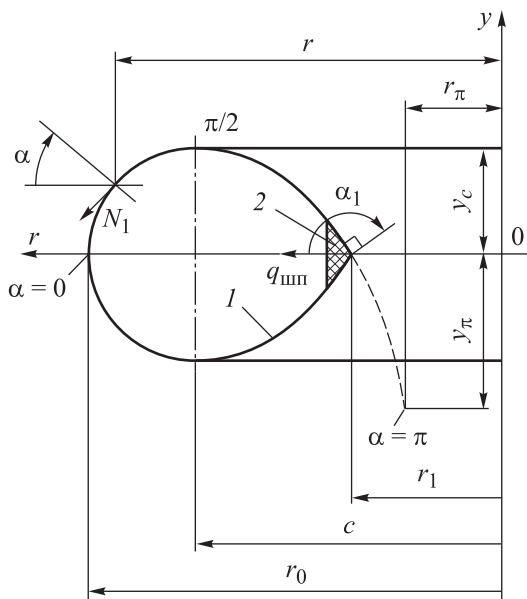


Рис. 4. Форма сечения и геометрические параметры равнонапряженной ТО, образованной пересечением верхней и нижней ветвей гладкой кривой тора

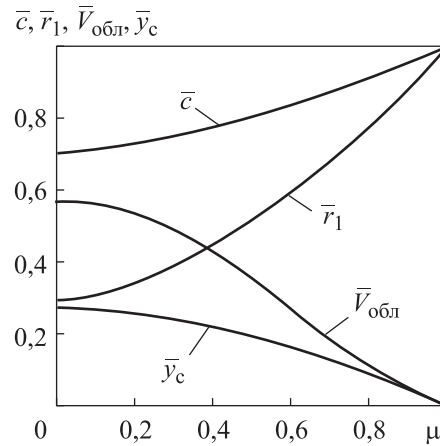


Рис. 5. Зависимости относительных параметров ТО \bar{c} , \bar{y}_c , \bar{r}_1 и $\bar{V}_{обл}$ от геометрического параметра тора μ

Тогда для силы, растягивающей шпангоут в окружном направлении, запишем

$$q_{шп}r_1 = N_1r_1 \sin \alpha_1 = \sigma_{в.к}h_{КМ1}r_1 \sin \alpha_1 = F_{шп}\sigma_{в.к}, \quad (14)$$

где $h_{КМ1}$ — толщина ТО в районе пересечения образующих тора при $r = r_1$; $F_{шп}$ — половина площади сечения кольцевого шпангоута.

Определяя $h_{КМ1}$ из выражения (1), а $\cos \alpha_1$ и $\sin \alpha_1$ из формулы (8) при $r = r_1$ и подставляя их в уравнение (14) при давлении p , равном разрушающему давлению ($p = p_p$), находим расчетное значение половины площади сечения кольцевых нитей шпангоута

$$F_{шп} = \frac{p_p r_0^2}{2\sigma_{в.к}} \sqrt{(1 - \bar{r}_1^2)(\bar{r}_1^2 - \mu^2)}. \quad (15)$$

Масса всего кольца или окружной намотки, удерживающей нити меридионального слоя ТО от действия внутреннего давления, с учетом соотношения (15) приобретает вид

$$M_{шп} = 2F_{шп} 2\pi r_1 \rho_{КМ} = 2\pi r_0^3 p_p \bar{r}_1 \sqrt{(1 - \bar{r}_1^2)(\bar{r}_1^2 - \mu^2)} / (\sigma_{в.к} / \rho_{КМ}), \quad (16)$$

где $\rho_{КМ}$ — плотность КМ.

С учетом выражений (1) и (12) масса всего меридионального слоя намотанной ТО

$$M_{обл} = 2\pi r_0 h_0 L_m \rho_{КМ} = 2\pi r_0^3 p_p (1 - \bar{c}^2)^2 F_1(\theta_1, k) / (\sigma_{в.к} / \rho_{КМ}). \quad (17)$$

Здесь L_m — длина нити в направлении меридиана,

$$L_m = \int_{r_1}^{r_0} \sqrt{1 + y'^2} dr = r_0 (1 - \bar{c}^2)^2 F_1(\theta_1, k), \quad (18)$$

где

$$y' = -\frac{(r^2 - c^2)}{\sqrt{(r_0^2 - r^2)(r^2 - r_\pi^2)}};$$

$$\theta_1 = \arcsin \sqrt{\frac{1 - \bar{r}_1^2}{1 - \mu^2}}; \quad k = \sqrt{1 - \mu^2}.$$

Толщина ТО на большом экваторе тора $h_{\text{КМ1}}$, определяемая из уравнения (1) при $r = r_0$ и $\alpha = \alpha_0$ и $p = p_p$, имеет вид

$$h_0 = p_p r_0 (1 - \bar{c}^2) / 2\sigma_{\text{в.к.}}$$

Суммируя массу шпангоута (16) и массу всего меридионального слоя (17) ТО, получаем

$$M_{\text{КМсум}} = M_{\text{шп}} + M_{\text{обл}} = 2 \frac{\pi r_0^3 p_p}{\sigma_{\text{в.к.}} / \rho_{\text{КМ}}} \times$$

$$\times \left[(1 - \bar{c}^2)^2 F_1(\theta_1, k) + \bar{r}_1 \sqrt{(1 - \bar{r}_1^2)(\bar{r}_1^2 - \mu^2)} \right]. \quad (19)$$

Объем ТО в интервале радиуса вращения от r_0 до $r_1 \geq r_\pi$, записанный через производную y' из выражения (18), определяется суммой интегралов, которые выражены через алгебраические функции и эллиптический интеграл первого рода [17] следующим образом:

$$V_{\text{обл}} = 2\pi \int_{r_1}^{r_0} r^2 y' dr = 2\pi \left[\int_{r_1}^{r_0} \frac{r^4 dr}{\sqrt{(r_0^2 - r^2)(r^2 - r_\pi^2)}} - \right.$$

$$\left. - c^2 \int_{r_1}^{r_0} \frac{r^2 dr}{\sqrt{(r_0^2 - r^2)(r^2 - r_\pi^2)}} \right] =$$

$$= \frac{2}{3} \pi r_0^3 \left[(1 - \bar{c}^2)^2 F_1(\theta_1, k) + \bar{r}_1 \sqrt{(1 - \bar{r}_1^2)(\bar{r}_1^2 - \mu^2)} \right]. \quad (20)$$

Выражая πr_0^3 из выражения (20) и подставляя его в формулу (19), получаем известное выражение для минимальной массы [9, 11] равнонапряженных оболочек сосудов давления, изготовленных намоткой нитей:

$$M_{\text{КМmin}} = 3p_p V_{\text{обл}} \rho_{\text{КМ}} / \sigma_{\text{в.к.}}$$

В работе [18] методом конечных элементов выполнен поверочный расчет спроектированного композитного баллона [15, 16]. Показано, что установка кольцевого шпангоута в точке пересечения гладких кривых образующей ТО существенно уменьшает изгибные напряжения по сравнению с ТО без шпангоута, а напряжен-

ное состояние баллона становится близким к безмоментному. Основную нагрузку воспринимают волокна, работающие на растяжение, а в направлении поперек волокон напряжения практически отсутствуют. Такое напряженное состояние однонаправленного КМ соответствует гипотезе, принятой в формуле (6).

В качестве примера выполним расчет конструктивно-геометрических параметров стеклопластиковой оболочки тороидального баллона для дыхательных аппаратов, переносимых на спине человека. Максимальный диаметр оболочки $2r_0 = 400$ мм, параметр тора $\mu = r_\pi / r_0 = 0,3$, разрушающее давление $p_p = 75$ МПа.

По графическим зависимостям относительных параметров ТО $\bar{c} = c / r_0$, $\bar{y}_c = y_c / r_0$, $\bar{r}_1 = r_1 / r_0$ и $\bar{V}_{\text{обл}} = V_{\text{обл}} / (2\pi r_0^3 / 3)$ от геометрического параметра тора μ , приведенным на рис. 5, находим: $\bar{r}_1 = 0,38$ и $r_1 = 76$ мм; $\bar{c} = 0,74$ и $c = 148$ мм; $\bar{y}_c = 0,245$ и $y_c = 49$ мм; $\bar{V}_{\text{обл}} = 0,48$ и $V_{\text{обл}} = 8,04$ дм³.

Ориентируясь на реализуемый в конструкции ТО предел прочности однонаправленного стеклопластика $\sigma_{\text{в.к.}} = 1480$ МПа и плотность $\rho_{\text{КМ}} = 2050$ кг/м³, по формуле (19) определяем суммарную массу композитной ТО $M_{\text{КМсум}} = 2,62$ кг. Масса кольцевого шпангоута, вычисленная по формуле (16), $M_{\text{шп}} = 0,43$ кг, что составляет 16,4 % массы композитной ТО в целом.

Выводы

1. Показано, что с помощью двух систем нитей можно изготовить равнонапряженную ТО баллона давления, сочетая поперечную и окружную намотку нитей.

2. Предложенная методика расчета базовых параметров и конструктивно-технологических характеристик равнонапряженных ТО композитного баллона является основой для разработки конструкции тороидального баллона.

3. В качестве примера применения приведенной методики дан расчет параметров стеклопластиковой оболочки тороидального баллона для дыхательных аппаратов, переносимых на спине человека.

Литература

- [1] Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 341 с.
- [2] Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.
- [3] Комков М.А., Чан Нгюк Тхань. Композитной торовый баллон для дыхательных аппаратов с продольно-поперечной схемой армирования композитной оболочки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2006, № 3, с. 10–19.
- [4] Cook J., Chambers J., Richards B.J. Toroidal pressure vessels for breathing apparatus. *Progress Through Innovation and Cost Effectiveness*. SAMPE, 1998, pp. 125–132.
- [5] Комков М.А. Равнонапряженная торовая оболочка, изготовленная методом намотки из армированного стеклопластика. *Применение пластмасс в машиностроении*, 1978, № 17, с. 75–83.
- [6] Комков М.А., Бочкарев С.В., Галиновский А.Л. и др. *Технология производства и диагностики качества композитных конструкций ракетно-космической техники*. Старый Оскол, ТНТ, 2020. 344 с.
- [7] Гузева Т.А., Нехороших Г.Е. *Технология изготовления предварительно пропитанных волокнистых материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 29 с.
- [8] *Намоточные станки и другое оборудование*. namotka.com: веб-сайт. URL: <http://www.namotka.com/products/> (дата обращения: 05.05.2023).
- [9] Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. *Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1977. 144 с.
- [10] Vasiliev V.V. *Composite pressure vessels*. Bull Ridge, 2009. 690 p.
- [11] Шерч Г., Бергграф О. Аналитическое исследование оптимальной формы сосудов давления, навитых из волокон. *Ракетная техника и космонавтика*, 1964, № 5, с. 33–47.
- [12] Черевачкий С.Б., Ромашов Ю.Т. К исследованию оболочек вращения образованных намоткой одним семейством нитей. *Прочность и динамика авиационных двигателей*, 1966, № 4, с. 5–19.
- [13] Феодосьев В.И. *Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов*. Москва, Наука, 1996. 365 с.
- [14] Зиновьев П.А., Фомин Б.Я. Проектирование сосудов давления минимального веса, образованных намоткой стеклонитью. В: *Полимерные материалы в машиностроении. Сб. научных трудов*. Вып. 127. Пермь, Перм. политехн. ин-т, 1973, с. 91–96.
- [15] Komkov M.A., Galinovskiy A.L., Htet K.M. Composite shell of toroidal balloons of breathing apparatus with meridional winding of threads. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1990, art. 012048, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1990/1/012048>
- [16] Комков М.А. Тороидальная равнонапряженная оболочка сосуда давления, образованная меридиональной и окружной намоткой нитей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, № 8, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-8-2100>
- [17] Градштейн И.С., Рыжик И.М. *Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений*. Москва, Физматгиз, 1963. 1100 с.
- [18] Сарбаев Б.С., Муравьев В.В., Чжан С. Проектирование тороидального композитного баллона высокого давления, изготавливаемого меридиональной намоткой волокон. *Известия вузов. Сер. Технология текстильной промышленности*, 2021, № 6, с. 256–263, doi: http://dx.doi.org/10.47367/0021-3497_2021_6_256

References

- [1] Tumanov A.V., Zelentsov V.V., Shcheglov G.A. *Osnovy komponovki bortovogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of spacecraft on-board equipment layout]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 341 p. (In Russ.).
- [2] Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruksiy raket i sredstv porazheniya* [Technology of winding composite structures of missiles and weapons]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 431 p. (In Russ.).

- [3] Komkov M.A., Chan Ngok Tkhan. Composite torus balloon for breathing apparatus with longitudinal-transverse composite shell reinforcement scheme. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2006, no. 3, pp. 10–19. (In Russ.).
- [4] Cook J., Chambers J., Richards B.J. Toroidal pressure vessels for breathing apparatus. *Progress Through Innovation and Cost Effectiveness*. SAMPE, 1998, pp. 125–132.
- [5] Komkov M.A. Equal-tensioned torus sheathing made of fibreglass-reinforced plastic. *Primenenie plastmass v mashinostroenii*, 1978, no. 17, pp. 75–83. (In Russ.).
- [6] Komkov M.A., Bochkarev S.V., Galinovskiy A.L. et al. *Tekhnologiya proizvodstva i diagnostika kachestva kompozitnykh konstruksiy raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Manufacturing technology and quality diagnostics of composite structures of rocket and space technology]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2020. 344 p. (In Russ.).
- [7] Guzeva T.A., Nekhoroshikh G.E. *Tekhnologiya izgotovleniya predvaritelno propitannykh voloknistykh materialov* [Manufacturing technology for pre-impregnated fibrous materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018. 29 p. (In Russ.).
- [8] *Namotchnye stanki i drugoe oborudovanie* [Winding machines and other equipment]. namotka.com: website. URL: <http://www.namotka.com/products/> (accessed: 05.05.2023). (In Russ.).
- [9] Obraztsov I.F., Vasilyev V.V., Bunakov V.A. *Optimalnoe armirovaniye obolochek vrashcheniya iz kompozitsionnykh materialov* [Optimal reinforcement of rotating shells made of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 144 p. (In Russ.).
- [10] Vasiliev V.V. *Composite pressure vessels*. Bull Ridge, 2009. 690 p.
- [11] Sherch G., Berggraf O. Analytical study of the optimum shape of pressure vessels coiled from fibres. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika*, 1964, no. 5, pp. 33–47. (In Russ.).
- [12] Cherevatskiy S.B., Romashov Yu.T. Towards a study of rotating shells formed by winding a single filament family. *Prochnost i dinamika aviatsionnykh dvigateley*, 1966, no. 4, pp. 5–19. (In Russ.).
- [13] Feodosyev V.I. *Izbrannyye zadachi i voprosy po soprotivleniyu materialov* [Selected problems and questions on the strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 365 p. (In Russ.).
- [14] Zinoviyev P.A., Fomin B.Ya. *Proektirovaniye sudov davleniya minimalnogo vesa, obrazovannykh namotkoy steklonityu* [Design of minimum weight pressure vessels formed by winding fiberglass thread]. V: *Polimernyye materialy v mashinostroenii. Sb. nauchnykh trudov*. Vyp. 127 [In: Polymer materials in mechanical engineering. Coll. sci. pap. Iss. 127]. Perm, Perm. politekhn. in-t Publ., 1973, pp. 91–96. (In Russ.).
- [15] Komkov M.A., Galinovskiy A.L., Htet K.M. Composite shell of toroidal balloons of breathing apparatus with meridional winding of threads. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1990, art. 012048, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1990/1/012048>
- [16] Komkov M.A. Toroidal uniformly stressed pressure vessel shell formed by the meridian and ring filament winding. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, no. 8, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-8-2100> (in Russ.).
- [17] Gradshcheyn I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 1100 p. (In Russ.).
- [18] Sarbaev B.S., Muravyev V.V., Chzhan S. Design of the toroidal composite pressure vessel made by meridional winding of fibers. *Izvestiya vuzov. Ser. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti* [Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology], 2021, no. 6, pp. 256–263, doi: http://dx.doi.org/10.47367/0021-3497_2021_6_256 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.05.2023

Информация об авторах

КОМКОВ Михаил Андреевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: m_komkov@list.ru).

БАДАНИНА Юлия Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: badanina@bmstu.ru).

Information about the authors

KOMKOV Michail Andreevich — Doctor of Science (Eng.), Professor. Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: m_komkov@list.ru).

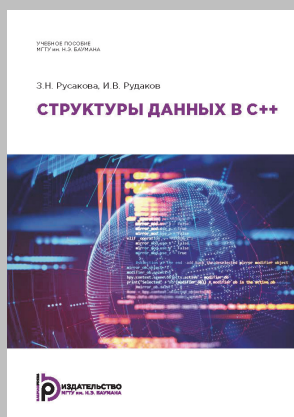
BADANINA Yulia Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: badanina@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Комков М.А., Баданина Ю.В. Методика расчета параметров равнонапряженной тороидальной оболочки композитного баллона. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 8, с. 87–95, doi: 10.18698/0536-1044-2023-8-87-95

Please cite this article in English as:

Komkov M.A., Badanina Yu.V. Method for calculating parameters of the equidistant toroidal shell of a composite balloon. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 8, pp. 87–95, doi: 10.18698/0536-1044-2023-8-87-95



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие

«Структуры данных в C++»

Авторы: З.Н. Русакова, И.В. Рудаков

Рассмотрены методики, идиомы и приемы решения задач обработки динамических структур данных на языке C++. Подробно описаны вычислительные алгоритмы, реализованные с использованием нотации указателей. Приведены краткие теоретические сведения и примеры приложений по изучаемому материалу. Изложена методика выполнения лабораторных работ по рассматриваемым темам, которая используется авторами в процессе проведения практических занятий в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Программная инженерия» и «Информатика и вычислительная техника».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>