

Тороидальная равнонапряженная оболочка сосуда давления, образованная меридиональной и окружной намоткой нитей

© М.А. Комков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Показаны перспективы применения композитных тороидальных баллонов высокого давления — более эргономичных по сравнению с цилиндрическими аналогами — для дыхательных аппаратов бойцов МЧС, пожарных команд и промышленных рабочих. На основе аналитического решения уравнений равновесия определена форма поперечного сечения тороидальных оболочек, армированных по меридианам и представляющих собой пересекающиеся петлевидные кривые, образующие бесконечно длинную гофрированную трубу. Предложено решение тороидального композитного сосуда давления, образованного пересечением верхней и нижней ветвей оболочки, армированной по меридианам, и профильного кольцевого слоя нитей, установленного в точке их пересечения. Рассчитаны параметры равнонапряженной тороидальной оболочки сосуда давления, изготовленной с помощью кольцевой и меридиональной намоток нитей.

Ключевые слова: тороидальная композитная оболочка, форма кривой образующей тора, кольцевая и меридиональная намотка нитей, сосуд высокого давления

Введение. Широкому применению тороидальных баллонов высокого давления, изготовленных методом спиральной намотки ленточного препрега под углами $\pm\beta$ к меридиану тора [1], препятствует отсутствие торонамоточных станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Композитные тороидальные баллоны объемом до 9 л, рабочим давлением 24...30 МПа и массой 5...6 кг перспективны для применения в дыхательных аппаратах [2, 3] бойцов МЧС, пожарной команды и промышленных рабочих. Эргономические испытания дыхательных аппаратов с баллонами тороидальной формы [4] на спине человека (подъем по лестницам, перемещения ползком, прохождение люков, водных стоков, разбор завалов и др.) показали значительные преимущества применения тороидальных баллонов по сравнению с цилиндрическими аналогами.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана был спроектирован и изготовлен в единственном экземпляре малогабаритный торонамоточный станок СНТ-2А [5, 6] с системой управления траектории намотки (укладки) нитей по спирали от червячно-кулачкового механизма (ЧКМ). Подробное описание работы станка СНТ-2А и ЧКМ даны в [5]. Станок (рис. 1, а) предназначен для изготовления методом сухой орбитальной намотки тороидальных композитных конструкций диаметром

до 400 мм и сечением до 120 мм, имеющих круговую (рис. 1, б), эллиптическую или прямоугольную форму поперечного сечения.

Основные параметры станка СНТ-2А: диаметр тороидального баллона $D_{\text{бал}} = 403$ мм; диаметр сечения $d_{\text{сеч}} = 80$ мм; отношение малого и большого диаметров $\mu = 0,6$; угол намотки на большом диаметре тора $\beta_0 = 24^\circ 20'$.



Рис. 1. Общий вид торонамоточного станка СНТ-2А с системой управления от ЧКМ (а) и характер разрушения стеклопластикового тороидального баллона (б)

Спиральная намотка тороидальных оболочек баллонов — достаточно трудоемкий процесс, поэтому легче производить тороидальные конструкции методом поперечной намотки нитей или лент вдоль меридианов.

Цель настоящей статьи — спроектировать и определить конструктивно-геометрические параметры равнонапряженной оболочки тороидальных сосудов давления, изготовленной меридиональной и окружной намоткой нитей.

Некоторые фирмы [7] выпускают торонамоточные станки с программным управлением, которые обеспечивают изготовление крупногабаритных катушек электротехнического назначения поперечной намоткой ($\beta = \beta_0 = 0$) проволоки. Такие станки с незначительной доработкой привода движения кольцевой оправки могут быть использованы для изготовления тороидальных композитных или комбинированных оболочек сосудов давления [8, 9] и кольцевых коробчатых шпангоутов [5] поперечной намоткой ленты препрега [10] вдоль меридианов тора.

Постановка задачи. Задача о нитяной оболочке сфероидного баллона, не имеющей полюсного отверстия и армированной вдоль меридианов, решена в [11]. Высота такой оболочки от экватора до полюса составляет 0,599 от ее радиуса вращения. Аналитическое исследование оптимальной формы оболочек сосудов давления, образованных меридиональной намоткой одного семейства нитей, ранее было рассмотрено в [12, 13]. В [14] предложено изготавливать

днища цилиндрических баллонов с использованием двух систем нитей. Первую систему нитей укладывают вдоль меридианов, которая при подходе к полюсному отверстию касается его контура и возвращается в область больших радиусов. Вторую систему нитей располагают по окружности полюсного отверстия, она приматывает первую систему нитей и воспринимает от нее погонные силы. По мнению автора настоящей статьи, аналогичная задача может быть решена и для равнонапряженной тороидальной оболочки, образованной как меридиональной, так и окружной намоткой нитей.

Определение формы меридиана. Для определения формы образующей тороидальной оболочки, изготовленной намоткой нитей вдоль меридианов (рис. 2, а), необходимо использовать зависимость для угловой координаты от радиуса вращения тороидальной оболочки [5, п. 3.64]. Подставив в нее величину угла намотки нитей $\beta = \beta_0 = 0$, получим

$$\cos \alpha = \frac{(r^2 - c^2) \cos \beta_0}{(r_0^2 - c^2) \cos \beta} = \frac{r^2 - c^2}{r_0^2 - c^2}, \quad (1)$$

где α — угловая координата, $0 \leq \alpha \leq \pi$; r — радиус вращения, $r_0 \geq r \geq r_\pi$; c — расстояние от оси вращения до вершины тора ($\alpha = \pi/2$; см. рис. 2, а); r_0 — радиус вращения оболочки на максимальном диаметре (экваторе) тора.

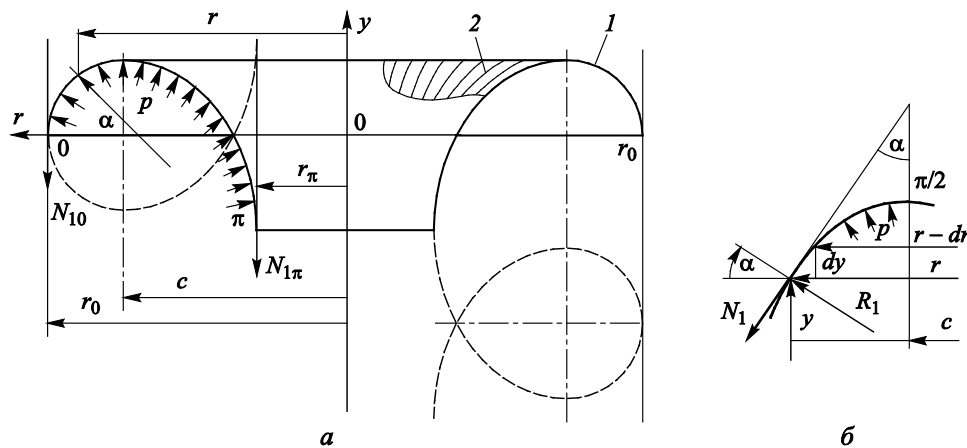


Рис. 2. Форма сечения тороидальной оболочки сосуда давления, образованной меридионально направленными нитями (а) для определения погонной силы и дифференциальных соотношений в тороидальной оболочке (б):

I — меридиан; 2 — нити; N_1 — меридиональная погонная сила в оболочке; R_1 — первый главный радиус кривизны оболочки; N_{10} — меридиональная погонная сила в оболочке N_1 в точке 0; $N_{1\pi}$ — меридиональная погонная сила в оболочке N_1 в точке π ; r_0 — радиус вращения оболочки на максимальном диаметре (экваторе) тора; r_π — радиус вращения оболочки на минимальном диаметре (экваторе) тора; r_1 — радиус вращения оболочки в точке пересечения верхней и нижней ветвей образующей оболочки; p — внутреннее давление в оболочке

Поскольку образующая оболочки пересекает малый экватор тора $r = r_\pi$ под прямым углом, угол $\alpha = \pi$, $\cos \alpha = -1$ и геометрические параметры тороидальной оболочки (1) будут связаны равенствами

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

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

Связь текущего радиуса вращения с угловой координатой оболочки α найдем из решения (1) с учетом (2):

$$r^2 = r_0^2 \frac{1}{2} [1 + \mu^2 + (1 - \mu^2) \cos \alpha]. \quad (3)$$

Заменив в уравнении (1) $\cos \alpha$ его дифференциальным соотношением, согласно обозначениям на рис. 2, б запишем

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

Выполнив алгебраические преобразования, получим

$$y' = \frac{dy}{dr} = -\frac{(r^2 - c^2)}{\sqrt{(r_0^2 - r^2)^2 - (r^2 - c^2)^2}}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (4) определяет меридиональное сечение равнонапряженной тороидальной оболочки, нагруженной равномерным внутренним давлением и образованной нитями, уложенными вдоль меридианов. Разложим подкоренное выражение (4) на множители и проведем интегрирование:

$$y = -\int_{r_0}^r \frac{(r^2 - c^2) dr}{\sqrt{(r_0^2 - r^2)(r^2 - r_\pi^2)}} + C_2, \quad (5)$$

где C_2 — постоянная интегрирования.

Поменяв пределы интегрирования в уравнении (5) и знак интеграла, представим его суммой двух интегралов, которые могут быть выражены через алгебраические функции и эллиптические интегралы следующим образом:

$$y(r) = \pm r_0 [E(\theta, k) - \bar{c}^2 F(\theta, k)] + C_2, \quad (6)$$

где $F(\theta, k)$ и $E(\theta, k)$ — эллиптические интегралы I и II рода; $k = \sqrt{1 - \mu^2}$ и $\theta = \arcsin \sqrt{(1 - r^2 / r_0^2) / (1 - \mu^2)}$ — модуль и аргумент

эллиптических интегралов, $\bar{r}^2 = r^2/r_0^2$ — относительный радиус вращения оболочки.

В экваториальной плоскости при $r = r_0$ координата образующей тора $y(r_0) = 0$. Тогда при подстановке $r = r_0$ в (6) аргумент θ будет равен нулю и, следовательно, $C_2 = 0$. Поскольку

$$\sin \theta = \sqrt{(1 - \bar{r}^2)/(1 - \mu^2)},$$

после подстановки в него \bar{r}^2 из (3) получим

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

Откуда $\theta = \alpha/2$. Если $\bar{r} = \mu$, то аргумент $\theta = \pi/2$ и эллиптические интегралы $F(\theta, k)$ и $E(\theta, k)$ перейдут в полные эллиптические интегралы первого $F(\pi/2, k)$ и второго $E(\pi/2, k)$ рода.

Из (6) следует, что при намотке нитей с углом $\beta_0 = 0$ образующая тороидальной оболочки из равнонапряженных волокон представляет собой петлеобразную кривую, определяющую неограниченно длинную гофрированную трубу (см. рис. 2, а) для каждого параметра тора μ , кроме $\mu = 0$.

Обсуждение результатов. Анализ уравнения (6) показывает, что намоткой нитей можно спроектировать и изготовить равнонапряженную тороидальную оболочку в интервале радиусов вращения от r_0 до $r_1 > r_\pi$, если в точке пересечения верхней и нижней ветви образующей оболочки (рис. 3, а) установить намотанный кольцевой слой нитей, который будет воспринимать растягивающие силы от меридионального слоя 1. При этом в точке пересечения ветвей оболочки при радиусе $r_1 > r_\pi$ ордината образующей $y(r_1) = y(r_0) = 0$.

В этом случае первая система нитей наматывается вдоль меридиана от большого экватора тора до малого, огибает отдельно намотанный и установленный на оправку кольцевой профильный слой нитей 2 и возвращается в область больших радиусов вращения оболочки.

Для определения параметров кольцевой системы нитей спроектируем меридиональные погонные силы в оболочке N_1 при радиусе вращения оболочки r_1 в точке пересечения верхней и нижней ветви образующей оболочки (см. рис. 3, а) верхней поверхности меридионального слоя на плоскость большого экватора тора. Приходящая на единицу длины кольцевого слоя (шпангоута) в окружном направлении распределенная нагрузка

$$q_{\text{шп}} = N_1 \sin \alpha_1,$$

где разрывная сила, растягивающая шпангоута, будет

$$q_{\text{шп}} r_1 = N_1 r_1 \sin \alpha_1 = \sigma_{\text{в.км}} h_{\text{км1}} r_1 \sin \alpha_1 = F_{\text{шп}} \sigma_{\text{в.км}}. \quad (7)$$

Здесь α_1 и $h_{\text{км1}}$ — угловая координата и толщина тороидальной оболочки в районе пересечения образующих тора при $r = r_1$ соответственно; $\sigma_{\text{в.км}}$ — предел прочности однонаправленного композиционного материала (КМ) на растяжение; $F_{\text{шп}}$ — половина площади сечения кольцевого шпангоута.

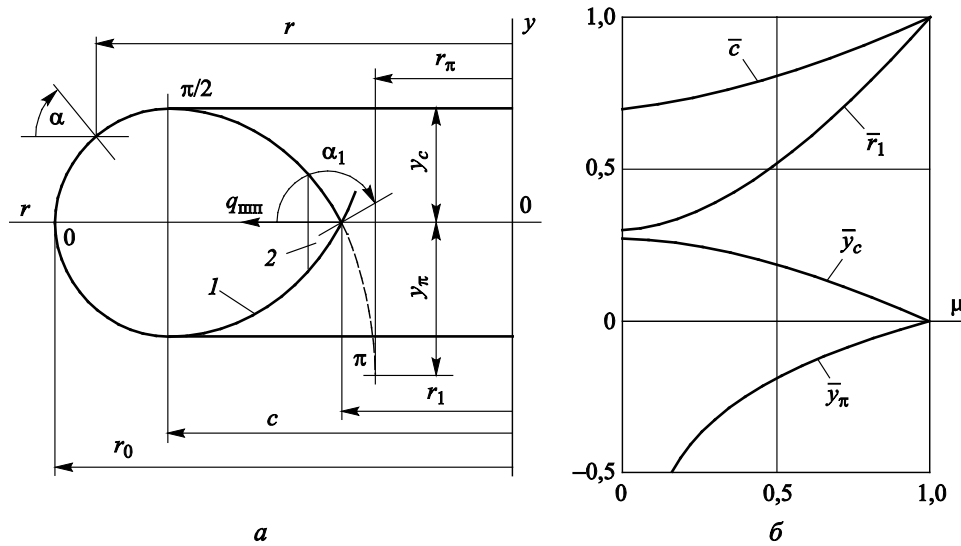


Рис. 3. Геометрия и форма сечения равнонапряженной тороидальной оболочки, образованной пересечением верхней и нижней ветви петлеобразной кривой тора (а) и расчетные параметры тороидальных оболочек (б): 1 — меридиональный слой; 2 — кольцевой профильный слой нитей (шпангоут); $\bar{y}_c = y_c / r_0$; $\bar{r}_1 = r_1 / r_0$

Записывая условие равновесия части оболочки, отсеченной коническим и цилиндрическим сечениями в направлении оси Oy (см. рис. 2, б), получим $2\pi r N_1 \cos \alpha = \pi (r^2 - c^2) p$, откуда меридиональная погонная сила в оболочке

$$N_1 = \sigma_{\text{в.км}} h_{\text{км}} = \frac{p(r^2 - c^2)}{2r \cos \alpha}, \quad (8)$$

где p — внутреннее давление в оболочке.

Меридиональные погонные силы в оболочке N_1 при радиусе $r = r_1$ найдем из условия равновесия оболочки (8):

$$N_1 = \sigma_{\text{в.км}} h_{\text{км1}} = \frac{p(r_1^2 - c^2)}{2r_1 \cos \alpha_1}. \quad (9)$$

Определив $h_{км1}$ из (9), а $\cos \alpha_1$ и $\sin \alpha_1$ из (1) и подставив их в (7) при $p = P_{раз}$ ($P_{раз}$ — разрушающее давление), найдем расчетное значение половины площади сечения кольцевых нитей шпангоута:

$$F_{шп} = \frac{P_{раз} r_0^2}{2\sigma_{в.км}} \sqrt{(1 - \bar{r}_1^2)(\bar{r}_1^2 - \mu^2)}. \quad (10)$$

Масса всего кольца $M_{кол}$ или окружной намотки, удерживающей нити меридионального слоя оболочки от воздействия внутреннего давления, с учетом (10):

$$M_{кол} = 2F_{шп} 2\pi \bar{r}_1 \rho_{км} = 2\pi r_0^3 P_{раз} \bar{r}_1 \sqrt{(1 - \bar{r}_1^2)(\bar{r}_1^2 - \mu^2)} / (\sigma_{в.км} / \rho_{км}), \quad (11)$$

где $\rho_{км}$ — плотность композиционного материала.

Масса всего меридионального слоя намотанной тороидальной оболочки $M_{мер}$ с учетом выражений (8) и (5):

$$M_{мер} = 2\pi r_0 h_0 L_{мер} \rho_{км} = 2\pi r_0^3 P_{раз} (1 - \bar{c}^2)^2 F_1(\theta_1, k) / (\sigma_{в.км} / \rho_{км}), \quad (12)$$

где длину нити в направлении меридиана $L_{мер}$ можно найти из уравнения

$$L_{мер} = \int_{r_n}^{r_0} \sqrt{1 + y'^2} dr = r_0 (1 - \bar{c}^2)^2 F_1(\theta_1, k),$$

в котором

$$y' = -\frac{(1 - \bar{c}^2)}{\sqrt{(1 - \bar{r}^2)(\bar{r}^2 - \bar{r}_1^2)}}; \quad \theta = \arcsin \sqrt{\frac{(1 - \bar{r}_1^2)}{1 - \mu^2}}; \quad k = \sqrt{1 - \mu^2};$$

толщину оболочки на большом экваторе тора определяем из (8) при $r = r_0$; $\alpha = \alpha_0$; $p = P_{раз}$:

$$h_0 = P_{раз} r_0 (1 - \bar{c}^2) / 2\sigma_{в.км}.$$

Суммируя массы слоев (11) и (12) тороидальной композитной оболочки, найдем

$$\begin{aligned} M_{км сум} &= M_{мер} + M_{кол} = \\ &= 2 \frac{\pi r_0^3 P_{раз}}{\sigma_{в.км} / \rho_{км}} \left[(1 - \bar{c}^2)^2 F_1(\theta_1, k) + \bar{r}_1 \sqrt{(1 - \bar{r}_1^2)(\bar{r}_1^2 - \mu^2)} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Объем тороидальной оболочки в интервале радиусов от r_0 до $r_1 \geq r_\pi$ и при y' из (12) определяется суммой интегралов, которые могут быть выражены через алгебраические функции и эллиптический интеграл первого рода [15, с. 260]:

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

$$= \frac{2}{3} \pi r_0^3 \left[(1 - \bar{c}^2)^2 F_1(\theta_1, k) + \bar{r}_1 \sqrt{(1 - \bar{r}_1^2)(\bar{r}_1^2 - \mu^2)} \right], \quad (14)$$

где $\bar{V}_{\text{обл}}$ — относительный объем оболочки; $V_{\text{обл}}$ — внутренний объем оболочки, $\bar{V}_{\text{обл}} = V_{\text{обл}} / (2\pi r_0^3 / 3)$ от параметра тора $\mu = r_\pi / r_0$.

Выразив значение πr_0^3 из (14) и подставив его в (13), найдем минимально возможную массу равнонапряженной тороидальной оболочки сосуда давления, образованной намоткой нитей по геодезическим линиям поверхности тора. Величину этой массы определяем по известной формуле, ранее полученной и в других работах [12, 14, 16]:

$$M_{\text{км min}} = 3 \frac{P_{\text{раз}} V_{\text{обл}} \rho_{\text{км}}}{\sigma_{\text{вк}}}. \quad (15)$$

В (15) не входят геометрические параметры и размеры сосуда давления, поэтому эта формула справедлива для сравнения всех композитных оболочек, изготовленных намоткой нитей и относящихся к разным топологическим классам (сферам, цилиндрам, торам).

Заключение. Был выполнен 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 $P_{\text{раз}} = 75$ МПа. Определен внутренний объем оболочки баллона $V_{\text{обл}} = 8,06$ дм³, опираясь на значение относительного объема оболочки $\bar{V}_{\text{обл}} = 0,48$ (см. рис. 3, б), умноженное на $2\pi r_0^3 / 3$. Ориентируясь на реализуемый в конструкции оболочки предел прочности однонаправленного стеклопластика $\sigma_{\text{в.км}} = 1480$ МПа и плотность $\rho_{\text{км}} = 2050$ кг/м³ из выражения (15) определили суммарную массу композитной оболочки $M_{\text{км сум}} = 2,51$ кг, при этом масса кольцевого слоя-шпангоута (11) для относительного

радиуса вращения $\bar{r}_1 = 0,39$ (см. рис. 3, б) составляет $M_{\text{кол}} = 0,43$ кг, что соответствует 17 % массы композитной оболочки в целом.

В ходе исследования были сделаны следующие выводы.

1. Получены аналитические зависимости меридиональных кривых равнонапряженных тороидальных оболочек сосудов давления, армированных намоткой нитей вдоль образующих тора.

2. Показана возможность создания и определения проектных параметров равнонапряженных тороидальных оболочек сосудов давления, изготовленных методом меридиональной и окружной намотки нитей.

3. Представлены расчетные зависимости конструктивно-геометрических параметров равнонапряженных тороидальных оболочек от отношения малого и большого диаметра тора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Комков М.А. Равнонапряженная торовая оболочка, изготовленная методом намотки из армированного стеклопластика. *Применение пластмасс в машиностроении*, 1978, № 17, с. 75–83.
- [2] Чан Нгок Тхань, Комков М.А. Технология изготовления композитных торовых баллонов для дыхательных аппаратов в условиях серийного производства. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2006, № 12, с. 47–56.
- [3] Комков М.А., Чан Нгок 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. *19th International Conference SAMPE Europe*. Paris, 1998, April, pp. 125–132.
- [5] 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.
- [6] Комков М.А., Галиновский А.Л., ред. *Технология производства и диагностики качества композитных конструкций ракетно-космической техники. Создание конструкций из волокнистых композиционных материалов*. Старый Оскол, ТНТ, 2020, 344 с.
- [7] Станки с ЧПУ для намотки тороидальных катушек. *Мир намоточных станков*. URL: http://www.namotka.com/products/?c_id=25 (дата обращения 03.03.2021).
- [8] Шишацкий В.А., Комков М.А. Комбинированная торовая оболочка из КМ с внутренним металлическим слоем. *Применение пластмасс в машиностроении*, 1982, № 19, с. 84–92.
- [9] Комков М.А., Шишацкий В.А. Анализ массы комбинированной торовой оболочки кругового сечения. *Применение пластмасс в машиностроении*, 1981, № 18, с. 92–100.
- [10] Гузева Т.А., Нехороших Г.Е. *Технология изготовления предварительно пропитанных волокнистых материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 29 с.

- [11] Феодосьев В.И. *Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов*. 4-е изд. Москва, Наука, 1973, 400 с.
- [12] Шёрч Г., Бёргграф О. Аналитическое исследование оптимальной формы сосудов давления, навитых из волокон. *Ракетная техника и космонавтика*, 1964, № 5, с. 33–47.
- [13] Черевацкий С.Б., Ромашов Ю.Т. К исследованию оболочек вращения образованных намоткой одним семейством нитей. *Прочность и динамика авиационных двигателей*, 1966, вып. 4, с. 5–19.
- [14] Зиновьев П.А., Фомин Б.Я. Проектирование сосудов давления минимального веса, образованных намоткой стеклонитью. *Полимерные материалы в машиностроении: сб. научных трудов. Вып. 127*. Пермь, 1973, с. 91–96.
- [15] Градштейн И.С., Рыжик И.М. *Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений*. Москва, Физматгиз, 1963, 1100 с.
- [16] Васильев В.В., Мороз Н.Г. *Композитные баллоны давления. Проектирование, расчет, изготовление и испытания: справ. пособие*. Москва, Машиностроение; Инновационное машиностроение, 2015, 373 с.

Статья поступила в редакцию 28.04.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Комков М.А. Тороидальная равнонапряженная оболочка сосуда давления, образованная меридиональной и окружной намоткой нитей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-8-2100>

Комков Михаил Андреевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: m_komkov@list.ru

Toroidal uniformly stressed pressure vessel shell formed by the meridian and ring filament winding

© M.A. Komkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper outlines the prospects for the use of composite toroidal high-pressure cylinders for the breathing apparatus of the Ministry of Emergency Situations, fire brigades, industrial workers, which are more ergonomic in comparison with their cylindrical counterparts. Relying on the analytical solution of the equilibrium equations, we determined the shape of the cross-section of toroidal shells reinforced along the meridians and representing intersecting loop-like curves that form an infinitely long corrugated pipe. The study introduces a solution for a toroidal composite pressure vessel formed by the intersection of the upper and lower branches of the shell, reinforced along the meridians, and a profiled ring layer of filaments installed at the point of their intersection. The parameters of the toroidal uniformly stressed pressure vessel shell made by ring and meridian filament winding are calculated.

Keywords: *toroidal composite shell, shape of the torus generatrix, ring filament winding, meridian filament winding, pressure vessel*

REFERENCES

- [1] Komkov M.A. *Primenenie plastmass v mashinostroenii (Application of plastics in mechanical engineering)*, 1978, no. 17, pp. 75–83.
- [2] Chan H.T., Komkov M.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2006, no. 12, pp. 47–56.
- [3] Komkov M.A., Chan H.T. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 10–19.
- [4] Cook J., Chambers J. Toroidal pressure vessels for breathing apparatus. *19th International Conference SAMPE Europe*. Paris, 1998, April, pp. 125–132.
- [5] Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruktsiy raket i sredstv porazheniya [Technology of winding composite structures of missiles and weapons]*. Moscow, BMSTU Publ., 2011, 431 p.
- [6] Komkov M.A., Galinovskiy A.L., ed. *Tekhnologiya proizvodstva i diagnostika kachestva kompozitnykh konstruktsiy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Manufacturing technology and quality diagnostics of composite structures of rocket and space technology]. Sozdanie konstruktsii iz voloknistykh kompozitsionnykh materialov [Creation of structures from fibrous composite materials]*. Stary Oskol, TNT, 2020, 344 p.
- [7] Stanki s ChPU dlya namotki toroidalnykh katushek [CNC machines for winding toroidal coils]. *Mir namotochnykh stankov [The world of winding machines]*. Available at: http://www.namotka.com/products/?c_id=25 (accessed March 3, 2021).
- [8] Shishatskiy V.A., Komkov M.A. *Primenenie plastmass v mashinostroenii (Application of plastics in mechanical engineering)*, 1982, no. 19, pp. 84–92.
- [9] Komkov M.A., Shishatskiy V.A. *Primenenie plastmass v mashinostroenii (Application of plastics in mechanical engineering)*, 1981, no. 18, pp. 92–100.

- [10] Guzeva T.A., Nekhoroshikh G.E. *Tekhnologiya izgotovleniya predvaritelno propitannykh voloknistykh materialov* [Manufacturing technology for pre-impregnated fibrous materials]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 29 p.
- [11] Feodosev V.I. *Izbrannye zadachi i voprosy po soprotivleniyu materialov* [Selected problems and questions on the strength of materials]. 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1973, 400 p.
- [12] Sherch G., Berggraf O. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika (Rocket technology and astronautics)*, 1964, no. 5, pp. 33–47.
- [13] Cherevatskiĭ S.B., Romashov Hu.T. *Prochnost i dinamika aviatsionnykh dvigateley (Strength and dynamics of aircraft engines)*, 1966, no. 4, pp. 5–19.
- [14] Zinovev P.A., Fomin B.Ya. *Proektirovanie sosudov davleniya minimalnogo vesa, obrazovannykh namotkoy steklonityu* [Design of minimum weight pressure vessels formed by winding fiberglass thread]. *Polimernye materialy v mashinostroenii. Sb. naun. trudov* [Polymer materials in mechanical engineering. Coll. papers]. No. 127. Perm, 1973, pp. 91–96.
- [15] Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 1100 p.
- [16] Vasilev V.V., Moroz N.G. *Composite pressure vessels. Design, analysis, manufacturing and testing: a reference book*. Moscow, Mashinostroenie, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2015, 373 p. (in Russian).

Komkov M.A. graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1966, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of over 140 research papers in the field of rocket and space engineering technology and composite structures. e-mail: m_komkov@list.ru