

УДК 678.067: 621.763 (075.8)

М. А. Комков

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАМОТКОЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБОЛОЧЕК ТОРОВЫХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ**

*Получены аналитические зависимости, определяющие геометрические, траекторно-угловые и кинематические параметры орбитальной намотки равнонапряженных торовых оболочек, выполненных из композиционных и комбинированных материалов. Представлен алгоритм решения проектной задачи на основании согласованных и взаимосвязанных расчетов параметров конструкции и технологии намотки оболочек торовой формы.*

В развитии ракетной и авиационно-космической техники наглядно прослеживается тенденция увеличения доли композиционных материалов (КМ) в конструкциях летательных аппаратов (ЛА). Так, объем использования эпоксидных углепластиков в фюзеляже и планере современных самолетов составляет 29...35% [1]. Высокопрочные КМ на основе полимерных связующих и непрерывных волокон (стеклянных, арамидных, углеродных) позволяют в процессе формообразования из них изделий получать требуемую анизотропию свойств материала в каждой точке конструкции. Появляется возможность формировать свойства материала под конкретную деталь и ее напряженно-деформированное состояние, что обеспечивает повышение несущей способности изделия и существенное снижение его массы в целом.

Наиболее нагруженными конструкциями в ЛА являются баллоны давления, корпуса твердотопливных двигателей и газогенераторов. В зависимости от условий компоновки сосуды давления могут иметь сферическую, цилиндрическую или торовую форму поверхности. Рабочее давление в них составляет 24...30 МПа, а разрушающее — в несколько раз больше. Для снижения газопроницаемости баллонов их стенку изготавливают из комбинированных материалов (металл + композит). В этом случае КМ выполняет еще полезную дополнительную функцию, исключает поражение людей и агрегатов осколками металлической оболочки при разрушении стенки баллона.

Основным методом изготовления баллонов из композиционных материалов является намотка. Это высокопроизводительный процесс,

который легко поддается автоматизации и позволяет снизить трудоемкость и стоимость изготовления изделий вследствие сокращения числа деталей, входящих в конструкцию, и числа сборочных операций, а также свести к минимуму механическую обработку и значительно повысить коэффициент использования материала.

В настоящее время мало опубликовано работ по проектированию и кинематике намотки баллонов торовой формы из КМ. Настоящая статья восполняет этот пробел. Необходимо отметить, что благодаря высоким эргономическим и эксплуатационным показателям большие перспективы открывает применение торовых баллонов для дыхательных аппаратов пожарных, промышленных рабочих, водолазов и других специалистов, работающих в экстремальных условиях [2]. Для снижения стоимости и трудоемкости изготовления таких баллонов их можно выполнить из волокнистого стеклопластика, а лейнер — из полимерного материала или резины.

Для газобаллонных автомобилей и других транспортных средств, работающих от сжатого до давления 24 МПа природного газа (95 %  $\text{CH}_4$ ), могут быть созданы также стеклопластиковые торовые баллоны с использованием неметаллического лейнера. Такие стеклопластиковые торовые баллоны будут легче, дешевле и удобнее, чем применяемые в настоящее время металлические или комбинированные баллоны цилиндрической формы.

Таким образом, применение композиционных и комбинированных материалов в сочетании с методом намотки открывает широкие перспективы для создания торовых баллонов из КМ различного назначения. Однако для проектирования, разработки конструкции и технологии изготовления торовых баллонов из КМ необходимы аналитические зависимости и математические модели, определяющие геометрические размеры, форму поверхности и схему армирования силовой оболочки, а также кинематику намотки и режимы изготовления композитных оболочек торовой формы.

**Проектирование торовых оболочек** минимальной массы из полимерно-волокнистых однонаправленных КМ основано на представлении материала как системы гибких нитей, которые при натяжении воспринимают всю внешнюю нагрузку. Свяжующее считают податливым, а его несущую способность не учитывают. За критерий оптимальности (получение минимума массы) принимают условие равнонапряженности всех нитей, лежащих на поверхности оболочки. Хотя при введении тонкого металлического лейнера (слоя) в конструкцию торового сосуда его массовая эффективность несколько уменьшается, однако металлокомпозитные или комбинированные оболочки имеют и целый ряд тех-

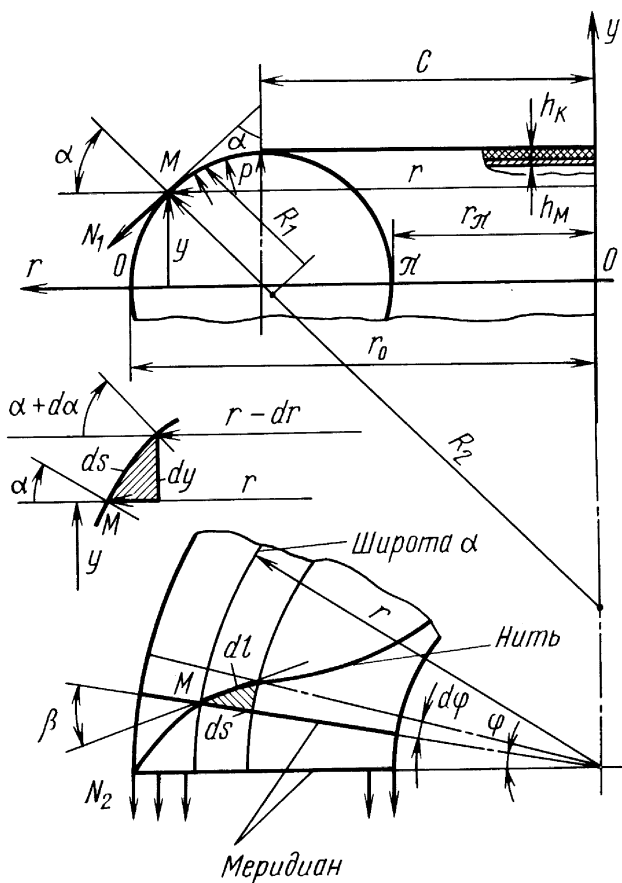


Рис. 1. Система координат, геометрические размеры и углы намотки торoidalной оболочки

нологических и эксплуатационных преимуществ. При этом комбинированная оболочка будет минимальной массы, если ее металлический слой выполнен равнонапряженным, а в слое КМ напряжения вдоль волокон всюду будут постоянны и одинаковы. При проектировании считают, что металлический слой и слой КМ прочно скреплены между собой и под нагрузкой (давлением) деформируются совместно без проскальзывания относительно друг друга.

Задачу по определению размеров и формы меридионального сечения оболочки, конструктивно-технологических параметров и массово-геометрических характеристик комбинированных торов решают в цилиндрической  $(y, r)$  системе координат (СК) со следующими допущениями: торовую оболочку, нагруженную внутренним давлением  $p$ , считают безмоментной, а главные радиусы кривизны  $R_1$  и  $R_2$  для обоих слоев оболочки принимают одинаковыми (рис. 1):

$$R_1 = \sqrt{(1 + (y'_r)^2)^3} / (-y''_{rr}) = dr/d(\cos \alpha); \quad (1)$$

$$R_2 = r/\cos \alpha, \quad y'_r = dy/dr = -\operatorname{ctg} \alpha.$$

Исходными данными для решения поставленной задачи являются геометрические соотношения торовых оболочек (1), уравнения равновесия безмоментных оболочек, условие непрерывности намотки и уравнение геодезических линий на поверхности вращения соответственно:

$$N_1 = \frac{p(r^2 - c^2)}{2r \cos \alpha}; \quad N_2 = \frac{p}{2r} \left( 2r - \frac{r^2 - c^2}{R_1 \cos \alpha} \right) R_2; \quad (2)$$

$$r h_k \cos \beta = r_0 h_{k0} \cos \beta_0 = \operatorname{const}; \quad (3)$$

$$r \sin \beta = r_0 \sin \beta_0 = \operatorname{const}, \quad (4)$$

где  $r_0$  и  $r$  — начальный и текущий радиусы вращения торовой оболочки;  $c$  — расстояние от оси вращения до вершины тора;  $h_{k0}$  и  $h_k$  — начальная и текущая толщина слоя КМ;  $\beta_0$  и  $\beta$  — начальный и текущий угол армирования оболочки.

Для тороидальных оболочек на основании равенств (1) и (2) получено обобщенное уравнение равновесия в дифференциальной форме:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{2r^2}{r^2 - c^2} - \frac{R_2}{R_1} = \frac{2r^2}{r^2 - c^2} - \frac{rd(\cos \alpha)}{\cos \alpha dr}. \quad (5)$$

Усилия от внутреннего давления воспринимаются обоими слоями оболочки, которые записываются в следующем виде [3]:

$$N_1 = \sigma_{m1} h_m + \sigma_k h_k \cos^2 \beta; \quad N_2 = \sigma_{m2} h_m + \sigma_k h_k \sin^2 \beta, \quad (6)$$

где  $h_m = \operatorname{const}$  — толщина металлического слоя.

Отношение усилий  $N_2/N_1$  в уравнении (5) для комбинированной торовой оболочки определяют из условия равнонапряженности металлического слоя ( $\sigma_{m1} = \sigma_{m2} = \sigma_m = \operatorname{const}$ ) и постоянства напряжений в нитях слоя из КМ ( $\sigma_k = \operatorname{const}$ ) при учете равенств (3), (4) и (6):

$$\frac{N_2}{N_1} = \left[ \lambda r^2 + \frac{r_0 \cos \beta_0 (r_0 \sin \beta_0)^2}{\sqrt{r^2 - r_0^2 \sin^2 \beta_0}} \right] / \left( \lambda r^2 + r_0 \cos \beta_0 \sqrt{r^2 - r_0^2 \sin^2 \beta_0} \right). \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (5) и (7) позволяет найти зависимость угловой координаты  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq \pi$ ) от радиуса вращения оболочки  $r$ :

$$\cos \alpha = \frac{r_0(\lambda + \cos^2 \beta_0)(r^2 - c^2)r}{(r_0^2 - c^2)(\lambda r^2 + r_0 \cos \beta_0 \sqrt{r^2 - r_0^2 \sin^2 \beta_0})}. \quad (8)$$

Подставив значение  $\cos \alpha$  из соотношений (1) в выражение (8), получим уравнение меридиана комбинированной торовой оболочки:

$$y(r) = - \int_{r=r_0}^r \frac{r(r^2 - c^2)dr}{\sqrt{\left[ \frac{r_0^2 - c^2}{r_0(\lambda + \cos^2 \beta_0)} \right]^2 \left( \lambda r^2 + r_0 \cos \beta_0 \sqrt{r^2 - r_0^2 \sin^2 \beta_0} \right)^2 - r^2 (r^2 - c^2)^2}}, \quad (9)$$

где  $r$  ( $r_\pi \leq r \leq r_0$ ) и  $y_r$  ( $0 \leq y \leq (r_0 - r_\pi)$ ) — координаты профиля сечения и диапазон их изменения;  $r_\pi$  — минимальный радиус вращения оболочки.

Уравнение (9) характеризуется четырьмя базовыми конструктивно-технологическими параметрами:  $\mu = r_\pi/r_0$  — относительное отверстие тора ( $0 \leq \mu \leq 1$ );  $\bar{c}^2 = c^2/r_0^2$  — квадрат относительного расстояния от оси вращения до вершины тора ( $0,3984 \leq \bar{c}^2 \leq 1$ );  $\beta_0$  — начальный угол армирования торовой оболочки ( $0 \leq \beta_0 \leq \beta_0^{\max} = 35^\circ 16'$ ) и  $\lambda = (\sigma_M h_M)/(\sigma_K h_{K0})$  — отношение усилий в слое металла и однонаправленного КМ на большом экваторе тора ( $0 \leq \lambda \leq \lambda_{кр} = 2/(1 + \mu)$ ), где  $\lambda_{кр}$  — отношение усилий в торовой оболочке с круговым поперечным сечением. Если геометрический параметр тора  $\mu$  задан, то для определения оставшихся трех параметров получены уравнения:

$$\bar{y}(\bar{r}) = \int_{\bar{r}=1}^{\bar{r}=\mu} d\bar{r} / \sqrt{\frac{(1 - \bar{c}^2)^2 \left( \lambda \bar{r}^2 + \cos \beta_0 \sqrt{\bar{r}^2 - \sin^2 \beta_0} \right)^2}{(\lambda + \cos^2 \beta_0)^2 \bar{r}^2 (\bar{r}^2 - \bar{c}^2)^2} - 1} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\bar{c}^2 - \mu^2}{1 - \bar{c}^2} = \frac{\lambda \mu^2 + \cos \beta_0 \sqrt{\mu^2 - \sin^2 \beta_0}}{\mu (\lambda + \cos^2 \beta_0)}; \quad (11)$$

$$pr_0(1 - \bar{c}^2)/2 = \sigma_K h_{K0} (\lambda + \cos^2 \beta_0), \quad (12)$$

где  $\bar{y} = y/r_0$ ,  $\bar{r} = r/r_0$  — относительные координаты сечения, а выражение (12) представляет условие прочности на большом экваторе торовой оболочки.

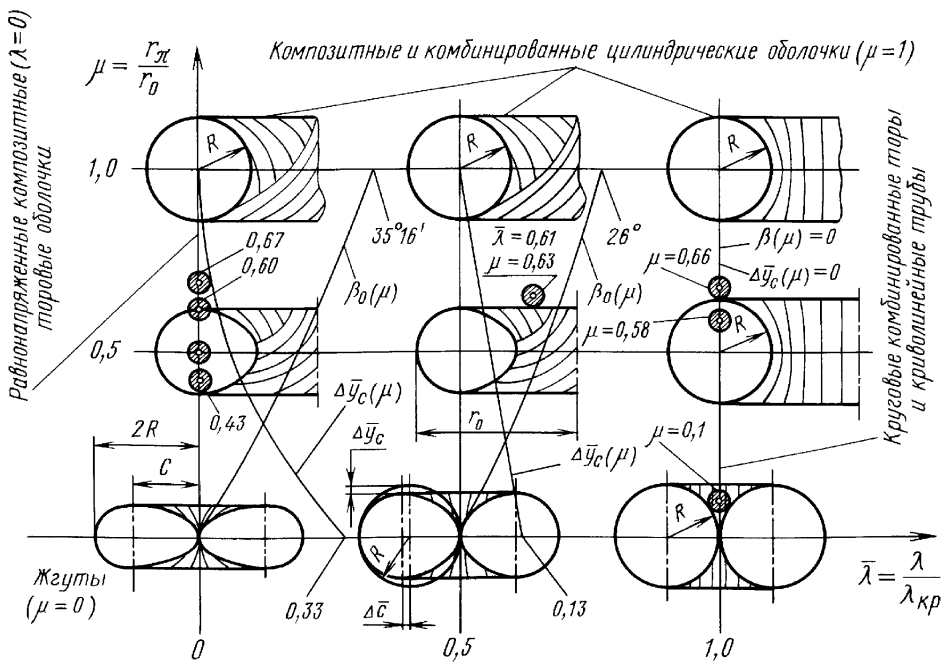


Рис. 2. Параметрическая область существования равнонапряженных торондальных оболочек;  $\ominus$  — экспериментальные оболочки

Параметрическая область существования равнонапряженных комбинированных торов, определяемая уравнениями (10)–(12), включает по краям в качестве частных случаев следующие оболочки (рис. 2).

Когда металлический слой отсутствует ( $\lambda = \lambda / \lambda_{кр} = 0$ ), то во всем диапазоне изменений параметра  $\mu$  реализуются равнонапряженные торы из КМ, меридиональное сечение которых может быть выражено через алгебраические функции и эллиптические интегралы первого  $F(\theta, k)$  и второго  $E(\theta, k)$  родов [4]:

$$\bar{y}(\bar{r}) = \pm \left[ \sqrt{2(1 - \bar{c}^2) + \mu^2 E(\theta, \kappa)} - \frac{1 + \mu^2 - \bar{c}^2}{\sqrt{2(1 - \bar{c}^2) + \mu^2}} F(\theta, \kappa) \right]; \quad (13)$$

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{(1 - \bar{r}^2)}{(1 - \mu^2)}}; \quad \kappa = \sqrt{\frac{1 - \mu^2}{2(1 - \bar{c}^2) + \mu^2}}.$$

Начальный угол намотки  $\beta_0$  и геометрический параметр тора  $\bar{c}^2$  определяются по формулам:

$$\beta_0 = \arcsin \left[ \pm \mu \sqrt{\frac{1 + \mu^2 - 2\bar{c}^2}{1 + \mu^2 - 2\bar{c}^2 + (\bar{c}^2 - \mu^2)^2}} \right]; \quad (14)$$

$$\bar{c}^2 = 1 - \mu^2 \frac{K(\pi/2, \kappa) - E(\pi/2, \kappa)}{2E(\pi/2, \kappa) - K(\pi/2, \kappa)},$$

где  $K(\pi/2, \kappa)$  и  $E(\pi/2, \kappa)$  — полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го родов.

Когда металлический слой имеет максимальную толщину ( $\bar{\lambda} = \lambda/\lambda_{\text{кр}} = 1$ ), поперечное сечение тора становится круговым, и реализуются равнонапряженные торовые оболочки и криволинейные трубы со схемой армирования ( $\beta_0 = \beta = 0$ ) [3], т.е. с поперечной намоткой.

При  $\mu = 0$  центральное отверстие отсутствует и торовая оболочка превращается в жгут, а при  $\mu = 1$  реализуются комбинированные цилиндрические оболочки со спиральной схемой армирования, при этом  $\bar{\lambda} = 1 - 3 \sin^2 \beta$ .

Для определения массы ( $M$ ) и толщины ( $h$ ) слоев комбинированной торовой оболочки общего вида получены следующие выражения:

$$M_{\text{кмо}} = M_{\text{к}} + M_{\text{м}} = \frac{p_{\text{раз}} V_{\text{об}} (1 - \bar{c}^2)}{\bar{V}(\lambda + \cos^2 \beta_0)} \left( \frac{\rho_{\text{м}}}{\sigma_{\text{вм}}} \lambda \bar{F} + \frac{\rho_{\text{к}}}{\sigma_{\text{вк}}} \bar{l} \cos \beta_0 \right);$$

$$h_{\text{к}}(r) = \frac{h_{\text{к0}} r_0 \cos \beta_0}{\sqrt{r^2 - r_0^2 \sin^2 \beta_0}}, \quad h_{\text{к0}} = \frac{p_{\text{раз}} r_0 (1 - \bar{c}^2)}{2\sigma_{\text{вк}}(\lambda + \cos^2 \beta_0)}, \quad (15)$$

$$h_{\text{м}} = h_{\text{к0}} \lambda \frac{\sigma_{\text{вк}}}{\sigma_{\text{вм}}},$$

где  $\bar{V}(\mu, \lambda)$ ,  $\bar{F}(\mu, \lambda)$  и  $\bar{l}(\mu, \lambda)$  — соответственно определенные интегралы, зависящие от параметров  $\mu$  и  $\lambda$ , а  $\sigma_{\text{вм}}/\rho_{\text{м}}$  и  $\sigma_{\text{вк}}/\rho_{\text{к}}$  — удельная прочность металла и однонаправленного КМ.

Объем оболочки ( $V_{\text{об}}$ ), площадь поверхности ( $F_{\text{об}}$ ) и длину витка наматываемых нитей ( $l_{\text{н}}$ ) определяют из равенств:

$$V_{\text{об}}/2\pi r_0^3 = \bar{V} = \int_{\bar{r}=\mu}^{\bar{r}=1} \bar{r}^2 \bar{y}' d\bar{r};$$

$$F_{\text{об}}/4\pi r_0^2 = \bar{F} = \int_{\bar{r}=\mu}^{\bar{r}=1} \bar{r} \sqrt{1 + (\bar{y}')^2} d\bar{r}; \quad (16)$$

$$l_{\text{н}}/2r_0 = \bar{l}(\mu, \lambda) = \int_{\bar{r}=\mu}^{\bar{r}=1} \left( \bar{r} \sqrt{1 + (\bar{y}')^2} / \sqrt{\bar{r}^2 - \sin^2 \beta_0} \right) d\bar{r},$$

где производную  $\bar{y}'(\bar{r})$  берут из уравнения (9).

Массу, объем и толщину оболочки равнонапряженных торов ( $\bar{\lambda} = 0$ ) находят по формулам из работы [4]:

$$M_{\text{КМ}}^{\text{мин}} = \frac{3p_{\text{раз}}V_{\text{об}}\rho_{\text{к}}}{\sigma_{\text{вк}}}; \quad V_{\text{об}} = \frac{2\pi r_0^3(1 - \bar{c}^2)^2 \kappa}{3 \cos^2 \beta_0 \sqrt{1 - \mu^2}} K(\pi/2, \kappa);$$

$$h_{\text{к}}(r) = \frac{p_{\text{раз}}r_0^2(1 - \bar{c}^2)}{2\sigma_{\text{вк}} \cos \beta_0 \sqrt{r^2 - r_0^2 \sin^2 \beta_0}},$$
(17)

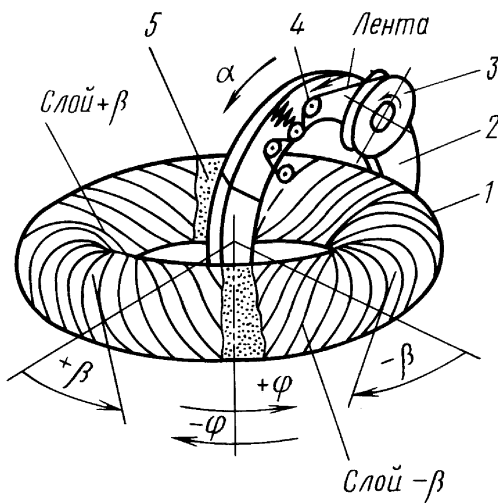
где параметры  $\bar{c}^2$ ,  $\beta_0$  и  $\kappa$  определяют из уравнений (13) и (14).

Массу, объем и толщины слоев комбинированных торов кругового сечения и криволинейных труб ( $\bar{\lambda} = 1$ ;  $\beta = 0$ ) определяют по выражениям из работы [3]:

$$M_{\text{КМБ}}^{\text{кр}} = M_{\text{М}} + M_{\text{К}} = p_{\text{раз}}V_{\text{об}} \left( \frac{\rho_{\text{М}}}{\sigma_{\text{вМ}}} + \frac{\rho_{\text{К}}}{\sigma_{\text{вК}}} \right), \quad V_{\text{об}} = 2\pi^2 R^3 a,$$
(18)

$$h_{\text{М}} = \frac{p_{\text{раз}}R}{2\sigma_{\text{вМ}}}, \quad h_{\text{К}} = h_{\text{К0}} \frac{a + 1}{a + \cos \alpha}, \quad h_{\text{К0}} = \frac{p_{\text{раз}}R}{2\sigma_{\text{вК}}} \frac{a}{a + 1},$$

где  $R$  — радиус поперечного сечения,  $a = c/R$  — геометрический параметр кругового тора. Связь параметров в круговом торе:  $a = (1 + \mu)/(1 - \mu)$ ,  $r_0 = R(a + 1)$ .



**Рис. 3. Кинематика намотки торовых оболочек:**

1 — наматываемый слой; 2 — намоточная головка; 3 — катушка с препрегом; 4 — нитераскладчик; 5 — торовая оправка;  $\beta$  — углы намотки нитей;  $\alpha$  и  $\varphi$  — углы вращения намоточной головки и торовой оправки

*Намотку торовых конструкций из КМ осуществляют на станках планетарного типа (рис. 3), на которых главное движение совершает намоточная головка, вращаясь вокруг поперечного сечения оправки. Намоточная головка имеет запас полимерно-волокнистого материала в виде ленточного препрега и оснащена орбитальным нитераскладчиком. В общем случае тороидальная оправка относительно вращающегося нитераскладчика может двигаться возвратно-поступательно, если наматываются криволинейные патрубки и трубы, или же не-*



прерывно вращаться в одну или другую сторону, если наматываются торовые оболочки и кольцевые шпангоуты.

Для определения траекторно-угловых параметров и кинематических закономерностей орбитальной намотки торовых оболочек используется криволинейная  $(\varphi, \alpha)$  СК, которая связана с цилиндрической СК (рис. 1) уравнением (8). Для решения поставленных задач получены дифференциальные соотношения:

$$\begin{aligned} d\varphi_\alpha &= \frac{\operatorname{tg}\beta_\alpha}{r_\alpha} \sqrt{1 + (y'_\alpha)^2} dr_\alpha; & y'_\alpha &= dy_\alpha/dr_\alpha; \\ dy_\alpha &= r_0 f(\bar{r}_\alpha, \alpha) \cos \alpha d\alpha; & dr_\alpha &= -r_0 f(\bar{r}_\alpha, \alpha) \sin \alpha d\alpha. \end{aligned} \quad (19)$$

В уравнениях (19) угол намотки  $\beta_\alpha = \beta(\alpha)$  находят из уравнения (4); переменную  $r_\alpha = r(\alpha) = f(r_0, c^2 \beta_0, \lambda, \alpha)$  из уравнения (8) —  $r_\alpha \sin \beta_\alpha = r_0 \sin \beta_0$ , а функционал  $f(\bar{r}_\alpha, \alpha)$  записывают в следующем виде:

$$f(\bar{r}_\alpha, \alpha) = \frac{\lambda \bar{r}_\alpha^2 + \cos \beta_0 \sqrt{\bar{r}_\alpha^2 - \sin^2 \beta_0}}{\left( \frac{\lambda + \cos^2 \beta_0}{1 - c^2} \right) (3\bar{r}_\alpha^2 - c^2) - \bar{r}_\alpha \left( 2\lambda + \frac{\cos \beta_0}{\sqrt{\bar{r}_\alpha^2 - \sin^2 \beta_0}} \right) \cos \alpha}, \quad (20)$$

где  $\bar{r}_\alpha = r_\alpha/r_0$ .

На основании соотношений (19) и выражения (20) получено уравнение кривой намотки  $\varphi(\alpha)$ , или траектории укладки нитей на торовой поверхности:

$$\varphi(\alpha) = \varphi_\alpha = \int_0^\alpha \frac{1}{r(\alpha)} \operatorname{tg}\beta(\alpha) f(\bar{r}_\alpha, \alpha) d\alpha = \int_0^\alpha \varphi'_\alpha(\mu, \lambda, \alpha) d\alpha. \quad (21)$$

Базовыми траекторно-угловыми параметрами (рис. 4) являются угловой шаг намотки  $\Phi = \Phi(\mu, \lambda)$ , остаток углового шага  $\Delta\Phi(\mu, \lambda)$  и угловая ширина наматываемой ленты на большом экваторе тора  $\varphi_\pi(\alpha = 0)$ :

$$\Phi(\mu, \lambda) = 2 \int_0^\pi \varphi'_\alpha(\mu, \lambda, \alpha) d\alpha; \quad \Delta\Phi(\mu, \lambda) = 2\pi - \left[ \frac{2\pi}{\Phi} \right] \Phi(\mu, \lambda); \quad (22)$$

$$\varphi_\pi(0) = \varphi_\pi(\alpha = 0) = \text{НОД}(\Phi, \Delta\Phi) = t_\pi / (r_0 \cos \beta_0),$$

где  $[2\pi/\Phi]$  — целое число,  $t_\pi$  — нормальная ширина ленты, НОД — наибольший общий делитель. Для получения плотной, без зазоров,

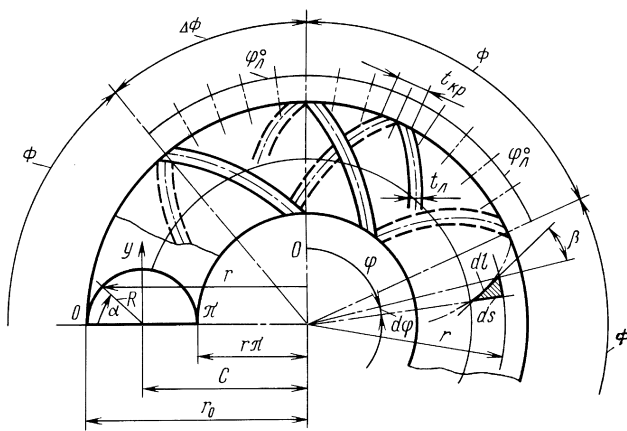


Рис. 4. Параметры намотки и схема укладки витков ленты из нитей на поверхности торовой оболочки

укладки нитей на торовую поверхность необходимо и достаточно, чтобы угловая ширина ленты  $\varphi_{л}(0)$  была НОД для значений углов  $\Phi(\mu, \lambda)$  и  $\Delta\Phi(\mu, \lambda)$ .

При намотке одного слоя оболочки под углом  $+\beta$  или  $-\beta$  к меридиану тора оправка ( $Z_{\text{опр}}$ ) и намоточная головка ( $Z_{\text{нг}}$ ), согласно выражениям (22), сделают следующее число оборотов:

$$Z_{\text{опр}} = \Phi(\mu, \lambda) / \varphi_{л}(0) = Z_{\text{нг}} \Phi(\mu, \lambda) / 2\pi; \quad (23)$$

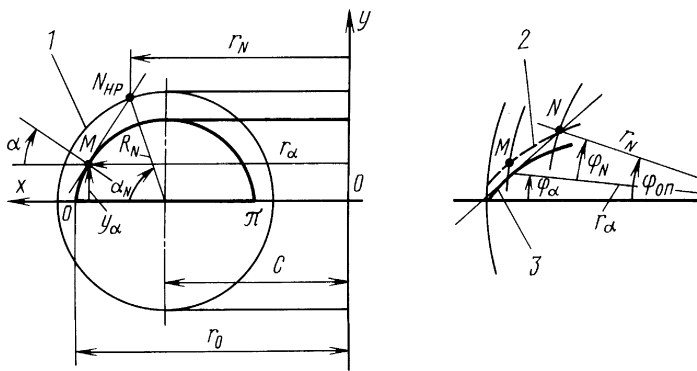
$$Z_{\text{нг}} = 2\pi / \varphi_{л}(0) = Z_{\text{опр}} 2\pi / \Phi(\mu, \lambda).$$

Представленные далее кинематические закономерности получены из условия вращения нитераскладчика с постоянной угловой скоростью вокруг центра поперечного сечения оправки. Если нитераскладчик намоточной головки перемещается непосредственно по торовой поверхности, то закон движения оправки  $\varphi_{\text{опр}}(\alpha)$  совпадает с уравнением кривой намотки на торе  $\varphi(\alpha)$  (см. выражение (21)).

Фактически нитераскладчик  $N$  вращается на некотором расстоянии от поверхности оправки (точка  $M$ , рис. 5) по угловой координате  $\alpha_N$  и радиусу  $R_N = \text{const}$ , поэтому в уравнении движения оправки появляется составляющая  $\varphi_N(\alpha_N, \alpha)$ , имеющая сложное аналитическое выражение:

$$\varphi_{\text{опр}}(\alpha) = \int_0^{\alpha} \varphi'_{\alpha}(\mu, \lambda, \bar{r}_{\alpha}, \alpha) d\alpha + \varphi_N(\alpha_N, \alpha). \quad (24)$$

Для определения дополнительного угла поворота оправки  $\varphi_N(\alpha_N, \alpha)$  относительно кривой намотки  $\varphi(\alpha)$  получены зависимости



**Рис. 5. К определению закона движения торовой оправки относительно вращающегося нитераскладчика (НР):**

$N$  — точка схода ленты с НР;  $M$  — точка касания лентой поверхности оправки; 1 — орбита НР; 2 — траектория НР на круговом торе радиуса  $R_N$ ; 3 — кривая намотки нитей на торовой оболочке

$$\cos \varphi_N(\alpha_N) = \frac{r_\alpha}{r_N} - \operatorname{tg} \alpha \frac{R_N \sin \alpha_N}{r_N}; \quad r_N(\alpha_N) = c + R_N \cos(\alpha_N), \quad (25)$$

где угол поворота нитераскладчика  $\alpha_N$  может быть выражен через угловую координату  $\alpha$ , найденную из уравнения

$$\frac{r_N^2}{R_N^2 \sin^2 \alpha_N} = r_\alpha^2 \left[ \left( \frac{\varphi'_\alpha}{y'_\alpha} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_N \sin \alpha} - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{r_\alpha} \right)^2 \right]. \quad (26)$$

Для круговых торовых оболочек и криволинейных труб угол поворота нитераскладчика  $\alpha_N = \alpha + \arccos(R/R_N)$ . С учетом этой зависимости (25) и (26) упрощаются, и решение для угла  $\varphi_N(\alpha)$  находят методом последовательных приближений из выражения

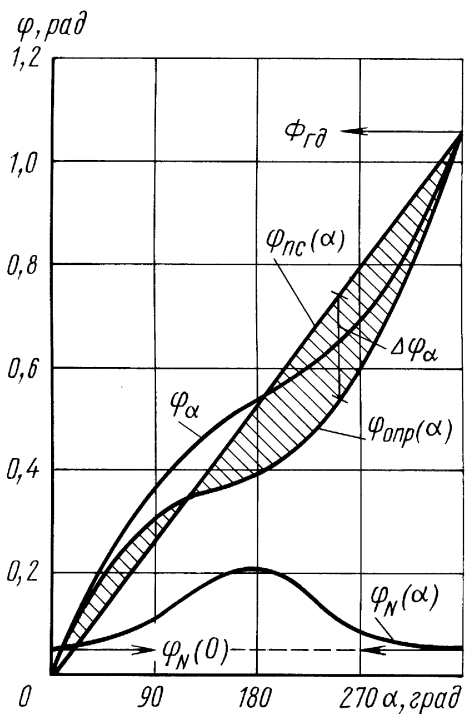
$$\sin \varphi_N \left( \frac{r_N \cos \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) + \frac{r_\alpha - r_N \cos \varphi_N}{r_\alpha \sin \varphi_N} R \operatorname{tg} \beta_\alpha = R_N \sin \alpha_N. \quad (27)$$

Для определения функции системы управления торонамоточного станка  $\varphi_{cy}(\alpha)$  в законе движения оправки (24) выделяют пропорциональную углу поворота нитераскладчика составляющую, которую определяют при постоянных угловых скоростях вращения оправки и нитераскладчика. Эту составляющую называют пропорциональной или опорной кривой намотки (рис. 6):

$$\varphi_{nc}(\alpha) = [\Phi(\mu, \lambda)/2\pi] \cdot \alpha = (\operatorname{const}) \cdot \alpha. \quad (28)$$

Знакопеременная часть или доворот оправки  $\varphi_{cy}(\alpha)$  относительно опорного вращения оправки (28) имеет вид

$$\varphi_{cy}(\alpha) = \frac{\Phi(\mu, \lambda)}{2\pi} \alpha - \int_0^\alpha \varphi'_\alpha(\bar{r}_\alpha, \alpha) d\alpha - \varphi_N(\alpha) + \varphi_N(0), \quad (29)$$



**Рис. 6.** Изменение кинематических зависимостей намотки композитной торовой оболочки кругового сечения с параметрами:

$\mu = 0,6$ ;  $\beta_0 = 24^\circ 21'$ ;  $\Phi_{гд} = 61,5^\circ$ ;  
 $\varphi_N(0) = 2^\circ 55''$ ;  $R/R_N = 0,866$

пряженных торовых оболочек из композиционных и комбинированных материалов.

Основополагающим принципом построения методики единого конструкторско-технологического проектирования торовых оболочек является принцип взаимного учета возможных технологических решений при проектных расчетах конструкции изделия и возможных конструкторских изменений и доработок при траекторных и иных технологических расчетах. Таким образом, при конструкторских расчетах определяются параметры, имеющие непосредственное отношение как к конструкторским, так и к технологическим задачам. В свою очередь, технологические расчеты имеют обратную связь с методиками конструкторского расчета и позволяют провести коррекцию полученных значений базовых параметров композитных оболочек из КМ торовой формы.

Методика позволяет избежать значительных потерь прочности конструкции баллона на основе выбора рациональной геометрии, схемы

где  $\varphi_N(0)$  — угловое положение нитераскладчика в начальный момент намотки при углах  $\alpha = 0$  и  $\varphi_\alpha = 0$  (см. рис. 5). Уравнение (29) служит для формирования управляющей программы станка и определяет переменную составляющую вращения торовой оправки  $\Delta\varphi_\alpha = \varphi_{cy}(\alpha)$  относительно ее опорного вращения  $\varphi_{пс}(\alpha)$  (см. рис. 6) в течение одного полного оборота нитераскладчика вокруг поперечного сечения тора.

Полученные аналитические зависимости позволяют разработать на их основе единую методику совместных и взаимосвязанных расчетов геометрических, конструктивно-массовых, траекторно-угловых и кинематических параметров, необходимых для проектирования и создания технологии изготовления орбитальной намоткой равнона-

армирования и параметров намотки торовой оболочки. Такая методика наиболее целесообразна на ранних стадиях проектирования, когда ее применение позволяет, во-первых, выделить наиболее эффективное конструкторско-технологическое решение благодаря большой степени свободы в выборе вариантов конструкции и технологии изготовления, а во-вторых, сократить время дальнейшего проектирования вследствие хорошей согласованности конструкторских и технологических параметров.

Последовательность конструкторско-технологического проектирования и расчета параметров равнонапряженных торовых оболочек, выполненных из композиционных и комбинированных материалов, приведена далее.

1. На основе анализа технического задания (ТЗ) выбирают конструктивно-силовую схему торового баллона, схему армирования и структуру материала стенки торовой оболочки. Формируют исходные данные, включающие рабочее и разрушающее давление  $p_{\text{раб}}$  и  $p_{\text{раз}}$ , внутренний объем оболочки  $V_{\text{об}}$ , максимальный диаметр тора  $D_{\text{об}} = 2r_0$ , количество и место расположения штуцеров. Проверяют возможность создания торового сосуда в заданных габаритных размерах по соотношению  $0 \leq V_{\text{об}}(\mu, \lambda)/r_0^3 \leq 1,618 \dots 2,467$ , которое следует из выражений (17) и (18). Выбирают материалы слоев комбинированной оболочки. Оценивают возможность изготовления силовой оболочки заданной массы (17), (18) по соотношению

$$M_{\text{KM}}^{\text{min}} \leq M_{\text{KMб}} \leq M_{\text{KM}}^{\text{min}}(1 + \psi_{\sigma})/3\psi_{\sigma}, \quad \psi_{\sigma} = (\sigma_{\text{вм}}/\rho_{\text{м}})/(\sigma_{\text{вк}}/\rho_{\text{к}}),$$

где  $\psi_{\sigma}$  — отношение удельных прочностей конструкционных металлов и однонаправленных КМ. В случае необходимости выбирают новую пару материалов.

2. Проводят конструкторские и технологические расчеты. Сначала методом итераций по выражениям (11)–(13) находят базовые конструктивно-технологические параметры (КТП) силовой оболочки  $\mu$  (задается),  $\bar{c}^2$ ,  $\lambda$  и  $\beta_0$ . Потом по выражению (8) определяют функцию  $\bar{r}_{\alpha} = f(\bar{r}, \text{КТП}, \alpha)$  и производную  $y'_{\alpha} = f(\bar{r}_{\alpha}, \text{КТП}, \alpha)$  из уравнения меридиана (9). Исходные данные ТЗ, полученные значения параметров  $\mu$ ,  $\bar{c}^2$ ,  $\beta_0$ ,  $\lambda$  и найденные зависимости  $\bar{r}_{\alpha}$  и  $y'_{\alpha}$  являются основой для проведения технологических расчетов. Определяют углы намотки  $\beta_{\alpha} = f(\bar{r}_{\alpha}, \alpha)$  и траекторию укладки нитей на поверхности тора  $\varphi_{\alpha} = f(y'_{\alpha}, \beta_{\alpha}, \bar{r}_{\alpha}, \alpha)$  в криволинейной СК. По формулам (22) рассчитывают угловой шаг  $\Phi(\varphi'_{\alpha}, \text{КТП}, \mu, \lambda)$  и остаток углового шага намотки  $\Delta\Phi(\Phi, \mu, \lambda)$ ; угловую  $\varphi_{\text{л}}(0) = \text{НОД}(\Phi, \Delta\Phi)$  и нормальную  $t_{\text{л}}(\varphi_{\text{л}}, 0) = t_{\text{л}}^{\text{pac}}$  ширину ленты на большом экваторе тора. Полученную

расчетным путем ширину ленты  $t_{\text{л}}^{\text{pac}}$  сравнивают с допустимой шириной ленты  $t_{\text{л}}^{\text{доп}}$ , которая определяется по величине разности между крайними и средними витками нитей образующей в одном наматываемом витке ленты. В предварительных расчетах можно принять значение для  $\varphi_{\text{л},0}^{\text{доп}} (\mu = 0,2 \dots 0,8) = 0,05 \dots 0,15$ . Если ширина ленты  $t_{\text{л}}^{\text{pac}} > t_{\text{л}}^{\text{доп}}$ , то объем оболочки или ее диаметр в исходных данных изменяют на величину  $\pm \Delta V$  или  $\pm \Delta D$ , и совместные расчеты базовых конструктивно-технологических параметров торовой оболочки из КМ повторяются.

3. Если при найденных значениях параметров  $\mu$ ,  $\bar{c}^2$ ,  $\beta_0$ ,  $\lambda$  и  $\Phi$ ,  $\Delta\Phi$ ,  $\varphi_{\text{л}}(0)$ ,  $t_{\text{л}}^{\text{pac}}$  обеспечиваются необходимый уровень качества структуры материала композитного слоя, то проводят взаимосвязанный расчет геометрических и конструктивно-массовых характеристик силовой оболочки и кинематических параметров орбитальной катушки.

По уравнениям (19) и (20) рассчитывают координаты теоретического контура меридионального сечения оболочки  $y_{\text{T}}(\alpha)$  и  $r_{\text{T}}(\alpha)$ , а по выражениям (16) ... (18) — толщину ее слоев  $h_{\text{к}}(\alpha)$ ,  $h_{\text{к}0}$ ,  $h_{\text{м}}$ . Определяют массу слоев и комбинированной оболочки в целом:  $M_{\text{к}}$ ,  $M_{\text{м}}$ ,  $M_{\text{кмб}}$ . Уточняют внутренний объем оболочки  $V_{\text{об}}$ . Если масса и объем оболочки не соответствуют ТЗ, то расчеты вновь повторяют при измененных значениях исходных данных.

4. Полученные значения координат сечения  $y_{\text{T}}(\alpha)$  и  $r_{\text{T}}(\alpha)$ , а также толщин  $h_{\text{к}}(\alpha)$ ,  $h_{\text{к}0}$ , и  $h_{\text{м}}$  торовой оболочки используют при технологических расчетах режимных и кинематических параметров орбитальной катушки. Определяют необходимую величину натяжения наматываемой ленты  $q_{\text{нт}}(t_{\text{л}})$ , которая сравнивается с критической или допустимой  $q_{\text{нт}}^{\text{доп}}(t)$  величиной натяжения, когда лента наматывается на тонкостенную металлическую оправку-лейнер. По формулам (23) находят число витков ленты или оборотов наматочной головки  $Z_{\text{нт}}(\Phi, Z_{\text{оп}})$  и число оборотов оправки  $Z_{\text{оп}}(\Phi, \varphi_{\text{л},0})$  в одном слое катушки, а по отношению  $K_{\text{сл}} = h_{\text{к}0}/h_{\text{л}}$ , где  $h_{\text{л}}$  — толщина ленты, рассчитывают общее количество слоев катушки. Выбирают скорость катушки  $U_{\text{нм}}$  и определяют частоту вращения нитераскладчика  $n_{\text{нт}}(U_{\text{нм}}, R)$  и торовой оправки  $n_{\text{оп}}(n_{\text{нт}}, \Phi)$ , находят полное время катушки оболочки из КМ  $T_{\text{нм}} = f(U_{\text{нм}}, t_{\text{л}}, h_{\text{л}}, M_{\text{к}})$ .

Далее определяют закон движения оправки относительно вращающегося нитераскладчика (24) —  $\varphi_{\text{опр}} = f(\varphi'_{\alpha}, \varphi_N, \alpha)$ ; доворот оправки (25) —  $\varphi_N = f(R_N, \alpha_N, \alpha)$  относительно кривой катушки (21) —  $\varphi_{\alpha} = f(r_{\alpha}, \beta_{\alpha}, \alpha)$ , а также функцию системы управления или суммарный доворот оправки (29) —  $\varphi_{\text{cy}}(\alpha) = f(\Phi, \varphi_{\text{опр}}, \alpha)$  относительно ее опорного вращения (28) —  $\varphi_{\text{пс}}(\Phi, \alpha)$ .

Таким образом, приведенная методика расчета базовых параметров и конструктивно-технологических характеристик равнонапряженных торовых оболочек, выполненных из композиционных и комбинированных материалов орбитальной намоткой, является основой для разработки чертежа конструкции торового баллона и чертежно-конструкторской документации на удаляемую торовую оправку или вытяжной штамп для изготовления металлического слоя комбинированной торовой оболочки. Траекторно-кинематические зависимости служат основой для проектирования торонамоточных станков, необходимых для орбитальной намотки торовых баллонов из КМ, а также для намотки кольцевых коробчатых шпангоутов, изогнутых патрубков и криволинейных труб.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т р о с т я н с к а я Е. Б., М и х а й л и н Ю. А., Б у х а р о в С. В. Тенденция применения и развития композиционных материалов в самолетостроении // *Авиационная промышленность*. – 2002. – № 2. – С. 18–22.
2. S o o k J. & C h a m b e r s J. Toroidal pressure vessels for breathing apparatus. Paris, 19-International Conference SAMPE Europe, April 1998, pp. 125–132.
3. К о м к о в М. А., Ш и ш а ц к и й В. А. Анализ массы комбинированной торовой оболочки кругового сечения // *Применение пластмасс в машиностроении*. – 1981. – № 18. – С. 92–100.
4. К о м к о в М. А. Равнонапряженная торовая оболочка, изготовленная методом намотки из однонаправленного стеклопластика // *Применение пластмасс в машиностроении*. – 1979. – № 17. – С. 75–83.

Статья поступила в редакцию 20.06.2003

Михаил Андреевич Комков родился в 1938 г., окончил в 1966 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Технология ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор около 40 научных работ и одной монографии в области конструирования и производства изделий из композиционных материалов.

M.A. Komkov (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1938. D. Sc. (Eng.), professor of “Technology of Rocket and Space Engineering” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 40 publications and a monograph in the field of construction and production of articles made of composite materials.