

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

М.А. Комков, В.А. Тарасов

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ
КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ БАЛЛОНОВ
И КОРПУСОВ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Методические указания
к домашнему заданию

Под редакцией *М.А. Комкова*

М о с к в а
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2 0 0 7

УДК 678.067: 621.763 (076)
ББК 34.8:24.7
К63

Рецензенты: *А.А. Смердов, Г.А. Орлов*

Комков М.А., Тарасов В.А.
К63 Расчет параметров намотки композитных оболочек цилиндрических баллонов и корпусов двигателей.: Метод. указания к домашнему заданию / Под ред. М.А. Комкова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 24 с.: ил.

Изложена методика определения конструкторских и технологических параметров цилиндрических оболочек баллонов давления, изготавливаемых методом намотки из однонаправленных композиционных материалов. Результаты расчетов служат основой для разработки технологического процесса и управляющих программ намотки композитных корпусов двигателей или баллонов давления на станках с программным управлением.

Для студентов 4-го и 5-го курсов, обучающихся по специальностям «Ракетостроение», «Двигателестроение» и «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов».

Табл. 3. Ил. 7. Библиогр. 5 назв.

УДК 678.067: 621.763 (076)
ББК 34.8:24.7

Методическое издание

Михаил Андреевич Комков
Владимир Алексеевич Тарасов

**Расчет параметров намотки композитных оболочек
цилиндрических баллонов и корпусов двигателей**

Редактор *А.В. Сахарова*
Корректор *Г.С. Беляева*
Компьютерная верстка *А.Ю. Ураловой*

Подписано в печать 01.03.2007. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печ. л. 1,5. Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,3.
Тираж 100 экз. Изд. № 129. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и изготовление конструкций из полимерно-волоконистых композиционных материалов (КМ) намоткой связаны не только с формообразованием самих изделий, но и одновременно с формированием структуры материала, и обеспечением заданного уровня его физических и механических характеристик. Иными словами, в ходе формообразования изделия создаются и конструкция, и материал.

Наибольшая эффективность применения однонаправленных композиционных материалов достигается в тех случаях, когда конструкции из КМ (например, силовые оболочки баллонов давления, корпусов двигателей, трубопроводов и др.) работают на растяжение. Композитные оболочки сосудов давления, как правило, изготавливают методом непрерывной намотки, хорошо отработанным и широко распространенным в настоящее время в промышленности при производстве композитных конструкций.

При изучении и закреплении теоретических положений курсов «Производство изделий из композиционных материалов» и «Специальные технологические процессы композитных конструкций» большое значение имеет освоение студентами методов расчета конструкторских и технологических параметров композитных оболочек сосудов давления, получаемых намоткой. Результаты расчетов позволяют подготовить необходимые данные для разработки управляющих программ намотки композитных оболочек баллонов или корпусов двигателей на намоточных станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

В данной работе рассмотрена наиболее распространенная в настоящее время форма сосуда давления – цилиндр с днищами, который для цилиндрических баллонов высокого давления называется также овалоидом, а для цилиндрических корпусов двигателей – коконом.

Цель описываемого в данной работе домашнего задания – приобретение студентами практических навыков расчета парамет-

ров конструкции и разработки технологии намотки цилиндрических баллонов из однонаправленных полимерно-волокнистых материалов, определение кинематических, траекторно-угловых, режимных и временных параметров изготовления композитных оболочек сосудов давления.

Содержание работы. На основании исходных данных технического задания студенты определяют геометрические размеры, форму днища и структуру материала композитной оболочки цилиндрического баллона или корпуса двигателя. Полученные конструкторские характеристики изделия служат основой для расчета траекторно-угловых и временных параметров намотки композитной оболочки. В частности, определяют: углы намотки и угловой шаг намотки, нормальную и угловую ширину ленты, толщину наматываемой ленты, количество нитей в ленте, количество витков ленты в одном слое оболочки и суммарное количество наматываемых слоев, скорость намотки и частоту вращения оправки, время намотки спиральных и окружных слоев и оболочки в целом. Результаты расчетов служат основой для разработки управляющих программ для намоточных станков с ЧПУ.

Порядок выполнения домашнего задания.

1. Получить индивидуальный вариант задания.
2. Ознакомиться с методикой выполнения работы.
3. Выполнить расчеты, определяющие конструкторские параметры композитной оболочки сосуда давления.
4. Вычертить эскиз баллона с указанием геометрических размеров, схемы армирования и структуры материала стенки оболочки.
5. Расчетным путем определить траекторно-угловые и геометрические параметры намотки композитной оболочки.
6. Вычертить эскиз цилиндрической оболочки с днищами, отражающий траекторию укладки наматываемых лент на ее поверхности.
7. Определить время намотки спиральных и окружных слоев и композитной оболочки в целом.
8. Результаты расчетов конструктивных и технологических параметров баллона давления или корпуса двигателя занести в таблицу.
9. Оформить отчет и защитить домашнее задание.

ОСОБЕННОСТИ НАМОТКИ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

Силовые оболочки сосудов давления (цилиндр с днищами, рис. 1), изготовленные намоткой из однонаправленных КМ, представляют со-

бой, как правило, комбинации спиральных и окружных слоев. Спиральные слои, наматываемые под небольшими углами β к оси изделия выходят на торцевую поверхность оправки и формируют днище баллона давления (рис. 2). Окружные слои дополнительно усиливают цилиндрическую часть оболочки в кольцевом направлении.

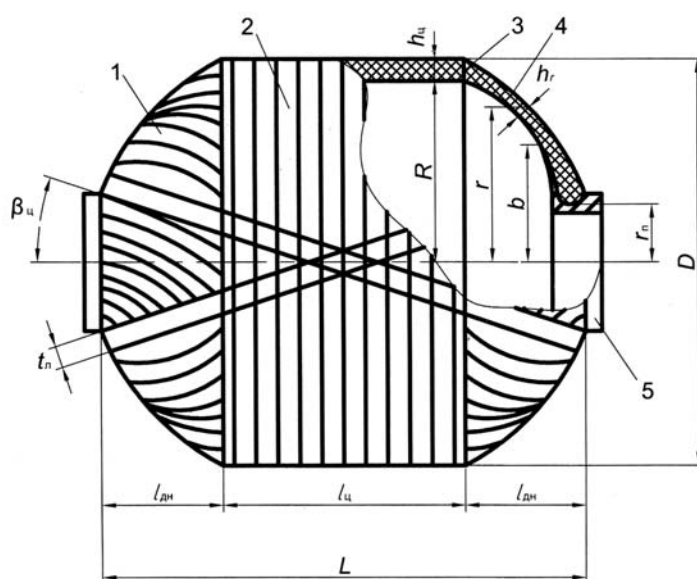
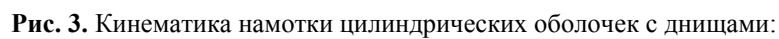


Рис. 1. Конструктивная схема баллона давления:

1 – спиральный слой; 2 – окружной слой; 3 – герметик; 4 – днище;
5 – фланец (штуцер)

Намотку слоев оболочки осуществляют на специальных пяти координатных намоточных станках путем вращения технологической оправки и возвратно-поступательного движения суппорта с ните- или лентораскладчиком (рис. 3). Для обеспечения точности укладки и равномерности натяжения нитей необходимо, чтобы расстояние от места схода ленты с раскладчика до места ее касания с оправкой было постоянным, а плоскость ленты была касательной плоскостью к наматываемой поверхности оболочки.

Эти требования по точности укладки нитей на поверхность оправки выполняются за счет радиального перемещения лентораскладчика у торцов оправки и одновременного поворота раскладчика вокруг собственной оси, предотвращающего скручивание (жгутование) наматываемой ленты.



6

Ввиду сложности траектории намотки и высоких требований к качеству баллонов высокого давления и корпусов двигателей из КМ, намоточные станки имеют автоматизированную систему ЧПУ по всем координатам. Промышленные станки обеспечивают точность укладки лент по углам намотки $\Delta\beta = \pm 1,5^\circ$, а по шагу намотки $\Delta t = \pm 0,5 \dots 1,5$ мм и позволяют осуществлять дистанционную регистрацию и регулирование параметров процесса намотки, в том числе поддерживать усилие натяжения нитей, скорость намотки, стабильность температуры подогрева связующего, процентное содержание волокна и связующего в ленте, точность углов намотки, а также осуществлять поворот плоскости наматываемой ленты относительно плоскости укладки нитей на технологическую оправку.

РАСЧЕТ КОНСТРУКТОРСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК БАЛЛОНОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Создание композитной оболочки начинают прежде всего с проектирования ее конструкции, т. е. с определения конструктивных параметров, размеров и геометрии оболочки. Обычно из технического задания (табл. П1) известны рабочее давление $P_{\text{раб}}$ и коэффициент запаса прочности $n_{з.п.}$, а также внутренний объем сосуда $V_{\text{вн}}$ и некоторые размеры изделия, например диаметр цилиндрической части корпуса D_k и диаметры полярных отверстий (фланцев или штуцеров) d_n , которые выбирают из условий компоновки, эксплуатации или технологических возможностей изготовления намоткой композитного сосуда давления.

Основным принципом проектирования композитных оболочек сосудов давления является получение равнопрочной конструкции, обладающей минимальной массой. В такой конструкции все нити, входящие в оболочку, должны быть равнонапряженными и уложенными по геодезическим линиям поверхности. Геодезические линии на поверхности оболочки вращения (см. рис. 2) определяются уравнением Клеро

$$r \sin \beta_r = R \sin \beta_{\text{ц}} = r_n \sin \beta_n = \text{const}, \quad (1)$$

где R и r – максимальный и текущий радиусы вращения оболочки; β_r – угол намотки (армирования) на днище, т. е. угол между на-

правлением меридиана и нитью; $\beta_{\text{ц}}$ – угол намотки на цилиндрической части оболочки; $\beta_{\text{п}} = \pi/2$ – угол намотки на полюсном отверстии при $r = r_{\text{п}}$.

Если композитная оболочка баллона давления спроектирована равнонапряженной, то она имеет минимально возможную расчетную массу

$$M_{\text{min}}^{\text{KM}} = 3P_{\text{раз}} V_{\text{вн}} \rho_{\text{к}} / \bar{\sigma}_{\text{в.к}} = M_{\text{расч}}^{\text{KM}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{раз}} = n_{\text{з.п}} P_{\text{раб}}$ – разрушающее давление; $\rho_{\text{к}}$ – плотность КМ; $\bar{\sigma}_{\text{в.к}} = \sigma_{\text{в.к}} k_{\sigma}$ – допустимый предел прочности; $\sigma_{\text{в.к}}$ – предел прочности однонаправленного КМ по результатам испытания кольцевых образцов; k_{σ} – коэффициент реализации прочности материала в конструкции композитной оболочки.

Определение конструктивных параметров днища и цилиндрической части композитной оболочки производят в такой последовательности.

1. Из формулы (1) определяют угол намотки на цилиндрической части оболочки:

$$\beta_{\text{ц}} = \arcsin(r_{\text{п}}/R) = \arcsin \bar{r}_{\text{п}}, \quad (3)$$

где $\bar{r}_{\text{п}} = r_{\text{п}}/R$ – относительное полюсное отверстие.

2. Форму меридиана днища (рис. 4) определяют из дифференциального уравнения [1]:

$$y' = \frac{dy}{dr} = -r^3 / \sqrt{\frac{R^4}{\cos^2 \beta_{\text{ц}}} (r^2 - R^2 \sin^2 \beta_{\text{ц}}) - r^6}. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) записывают через алгебраические функции и эллиптические интегралы первого и второго родов:

$$y = R \left[\frac{1-k_2}{\sqrt{k_2}} F(\lambda, \theta) + \sqrt{k_2} E(\lambda, \theta) \right], \quad (5)$$

$$r = R\sqrt{1 - k_1 \sin^2 \theta}, \quad r_{\min} \leq r \leq R, \quad (5a)$$

где $F(\lambda, \theta)$ и $E(\lambda, \theta)$ – эллиптические интегралы I и II родов;
 $\lambda = \sqrt{k_1 / k_2}$ и $\theta = \arcsin \sqrt{(R^2 - r^2) / (R^2 - r_{\min}^2)}$ – соответственно
 модуль и аргумент эллиптических интегралов, $k_{1,2} = 0,5 \times$
 $\times (3 \mp \sqrt{1 + 4 \operatorname{tg}^2 \beta_{\text{ц}}})$. Минимальный радиус вращения оболочки

$$r_{\min} = \frac{R}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + 4 \operatorname{tg}^2 \beta_{\text{ц}}} - 1} \geq r_{\text{п}}.$$

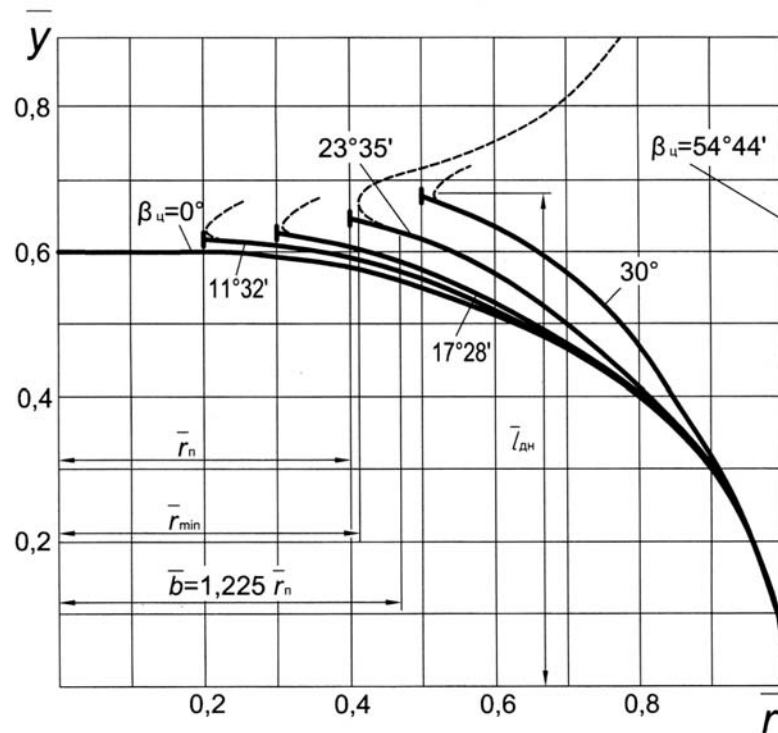


Рис. 4. Формы меридианов равнонапряженных днщ композитных оболочек баллонов в относительных координатах

3. Высоту днища определяют из уравнений (5) и (5а) при минимальном значении радиуса вращения оболочки $r = r_{\min}$:

$$l_{\text{дн}} = y(r_{\min}) = R \left[\frac{1-k_2}{\sqrt{k_2}} K(\lambda) + \sqrt{k_2} E(\lambda) \right], \quad (6)$$

где $K(\lambda)$ и $E(\lambda)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго родов, в которых аргумент $\theta = \pi/2$.

Примечание. Форма образующих днищ, зависящая от относительного полюсного отверстия $\bar{r}_n$ (см. рис. 4), – неограниченная длинная гофрированная труба с минимальным радиусом вращения $r = r_{\min}$. Чтобы днище баллона оказалось всюду выпуклым, необходимо образующую в интервале от точки перегиба ($r = b = \sqrt{3/2} r_{\text{п}}$; $y''_{rr} = 0$) до полюсного отверстия ($r = r_{\text{п}}$) достроить иным образом [2]. В связи с этим для рациональной конструкции баллона (корпуса двигателя) наибольший радиус закладного элемента (штуцера, фланца) должен удовлетворять условию $r_{\text{фл}} = b \geq 1,225 r_{\text{п}}$.

4. Определяют внутренний объем одного днища баллона

$$V_{\text{дн}} = \pi \int_{r_{\min}}^r r^2 y'_r dr = \frac{\pi R^3 K(\lambda)}{3 \sqrt{k_2} \cos^2 \beta_{\text{п}}}. \quad (7)$$

5. Исходя из общего объема сосуда давления $V_{\text{вн}}$ (табл. П1) и объема двух днищ $2V_{\text{дн}}$ (7) находят длину цилиндрической части $l_{\text{ц}}$, а с учетом высоты днищ $l_{\text{дн}}$ (6) – длину всего баллона или корпуса двигателя L .

6. Из табл. П2 для заданного вида однонаправленного КМ (в соответствии с вариантом домашнего задания) выбирают предел прочности $\sigma_{\text{в.к}}$ и коэффициент реализации прочности в конструкции оболочки k_{σ} .

7. Определяют проектную (расчетную) толщину спирального слоя намотки на цилиндрическом участке оболочки по формулам

$$h_{\beta}^{\text{pac}} = h_{\text{сп}}^{\text{ц}} = \frac{P_{\text{раз}} R}{2\sigma_{\text{в.к}} k_{\sigma} (1 - r_{\text{п}}^2)}, \quad P_{\text{раз}} = n_{\text{з.п}} P_{\text{раб}}. \quad (8)$$

8. Определяют толщину окружной намотки и общую (суммарную) толщину оболочки на цилиндрической части баллона или корпуса двигателя соответственно:

$$h_{\text{окр}}^{\text{pac}} = \frac{P_{\text{раз}} R}{2\sigma_{\text{в.к}} k_{\sigma}} (2 - \text{tg}^2 \beta_{\text{ц}}), \quad (9)$$

$$h_{\Sigma} = h_{\beta}^{\text{pac}} + h_{\text{окр}}^{\text{pac}} = h_{\text{ц}}. \quad (10)$$

Примечания: 1. Для безмоментной оболочки $\bar{h}_{\Sigma} = h_{\Sigma} / R \leq 0,05$.

Если это условие не соблюдается (при $\bar{h}_{\Sigma} > 0,05$), то уменьшают величину рабочего давления так, чтобы выполнялось условие $\bar{h}_{\Sigma} \leq 0,05$, и расчеты по формулам (8) – (10) повторяют вновь.

2. При необходимости толщину спирального слоя на днище оболочки определяют по формуле $h_r = h_{\text{сп}}^{\text{ц}} \sqrt{(1 - r_{\text{п}}^2) / (r^2 - r_{\text{п}}^2)}$. Формула справедлива при удалении от края полюсного отверстия на расстояние, превышающее ширину наматываемой ленты.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК БАЛЛОНОВ И КОРПУСОВ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для определения траекторных параметров намотки рассмотрим схему укладки пряжи нитей или ленты препрега шириной $t_{\text{л}}$ на поверхность вращающейся оправки (рис. 5). За один двойной ход нитераскладчика или за один такт намотки на оправку будет уложен один полный виток нитей или одна спираль. При этом начало и конец витка нитей совпадут только в том случае, если за время одного такта намотки оправка повернется на целое число оборотов $Z_{\text{т}}$. Во всех остальных случаях, когда $Z_{\text{т}}$ не является целым числом, начало и конец витка не совпадут на величину углового шага намотки $\Delta\Phi$.

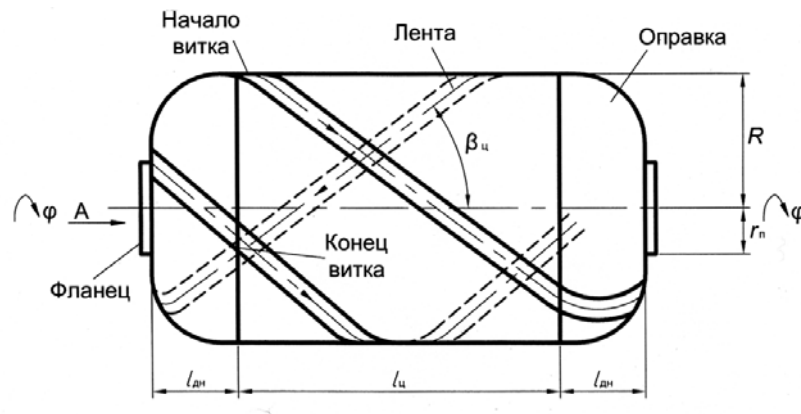


Рис. 5. Схема намотки витка ленты на цилиндрической оболочке с днищами

Для обеспечения плотной (без зазоров) укладки наматываемых лент необходимо добиться, чтобы угол $\Delta\Phi$ был кратным углу 2π (или 360°), т. е. одному полному повороту оправки. Кратными называют те углы, для которых отношение $2\pi/\Delta\Phi$ выражено целыми числами: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 и т. д. Этим числам соответствуют значения углового шага намотки $\Delta\Phi^* = 360, 180, 120, 90, 72, 60, 45^\circ$ и т. д. Наиболее просто кратность углового шага намотки за двойной ход лентораскладчика достигается доворотом оправки на фланцах оболочки на угол $\phi_{\text{фл}}$. Кроме того, после каждого такта намотки или укладки одного витка ленты на оправку ее следует повернуть еще на угловую ширину ленты $\phi_{\text{л}}$. При этом лента должна укладываться целое число раз в угловом шаге намотки $\Delta\Phi^*$.

За один такт намотки (проход раскладчика в одну и другую сторону) лента дважды пересекает любую широту оболочки. После $N_{\text{т.сп}} = 2\pi/\phi_{\text{л}}$ тактов намотки (двойных проходов раскладчика) будет образовано два полных спиральных слоя, уложенных друг относительно друга под углами $\pm \beta$ в каждой точке поверхности. Таким образом, в любом поперечном сечении оболочки после намотки одного двойного слоя будет уложено $2(2\pi/\phi_{\text{л}})$ спиральных лент. При этом оправка, сделав $Z_{\text{сп}}$ оборотов, вернется в исходное положение со смещением на угловую ширину ленты $\phi_{\text{л}}$.

Для заданных (в вариантах домашнего задания) и полученных расчетным путем (формулы (3) – (10)) геометрических размеров композитной оболочки сосуда давления определение траекторно-угловых, режимных и временных параметров намотки производят в такой последовательности.

1. Рассчитывают угол, на который поворачивается оправка при укладке ленты на цилиндрическую часть оболочки за один такт намотки (см. рис. 5):

$$\Phi_{\text{ц}} = 2\varphi_{\text{ц}} = 2\left(\frac{l_{\text{ц}}}{R}\right) \text{tg}\beta_{\text{ц}},$$

где $l_{\text{ц}}$ – длина цилиндрической части оболочки.

2. В случае разнополюсных отверстий (корпус двигателя), когда $d_{\text{ц2}} > d_{\text{ц1}}$, угол поворота оправки на цилиндрическом участке

$$\Phi_{\text{ц}} = 2\varphi_{\text{ц.лпро}} = \frac{2(l_{\text{ц}} / R_{\text{ц}})}{1/\sin\beta_{\text{ц1}} - 1/\sin\beta_{\text{ц2}}} \left[\ln \text{tg}(\beta_{\text{ц2}} / 2) - \ln \text{tg}(\beta_{\text{ц1}} / 2) \right].$$

Примечание. Для оболочек с разнополюсными отверстиями углы армирования на цилиндрической части со стороны каждого из днищ получаются неодинаковыми. Поэтому намотку цилиндрического участка производят не по геодезической линии, а по линии равного геодезического отклонения (ЛРО). При этом угол укладки нитей вдоль образующей непрерывно изменяется от значения $\beta_{\text{ц1}}$, соответствующего диаметру полюсного отверстия $d_{\text{ц1}}$ (см. (1)), до $\beta_{\text{ц2}}$, соответствующего второму полюсному отверстию $d_{\text{ц2}}$. Такое непрерывное изменение угла намотки достигают путем непрерывного изменения скорости перемещения суппорта станка на цилиндрическом участке оболочки.

3. Определяют угол поворота оправки $\Phi_{\text{дн}}$ (рис. 6) при намотке ленты на каждом из днищ из дифференциального уравнения

$$\Phi_{\text{дн}} = 2\varphi_{\text{дн}} = 2 \int_{r_{\text{мин}}}^R \frac{\text{tg}\beta_r}{r} \sqrt{1 + (y'_r)^2} dr,$$

где β_r – угол армирования на днище баллона, определяемый по формуле (1); y'_r – производная, записанная в форме уравнения (4).

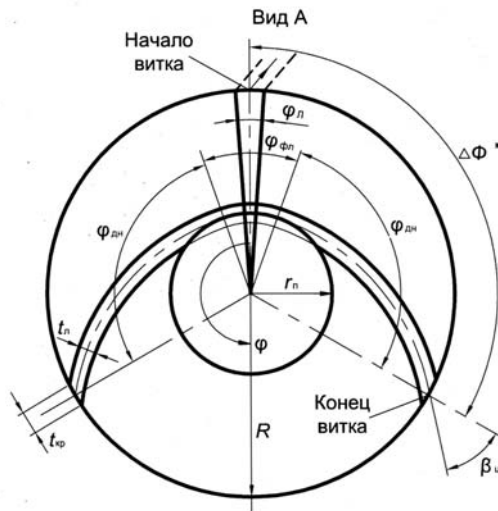


Рис. 6. Схема укладки ленты на днищах композитной оболочки баллона

Приближенное значение угла поворота оправки на одном днище может быть найдено из выражения

$$\Phi_{\text{дн}} = 2\varphi_{\text{дн}} = 2 \frac{(\pi/2 - \beta_{\text{ц}})}{(R - r_{\text{п}})} \sqrt{l_{\text{дн}}^2 + (R - r_{\text{п}})^2}.$$

4. Находят расчетный угол поворота оправки за один такт намотки или за один двойной проход лентораскладчика:

$$\Phi_{\text{т}}^{\text{расч}} = \Phi_{\text{ц}} + 2\Phi_{\text{дн}}.$$

5. Определяют расчетный угловой шаг намотки

$$\Delta\Phi_{\text{рас}} = \Phi_{\text{т}}^{\text{рас}} - \left(\frac{\Phi_{\text{т}}^{\text{рас}}}{2\pi} \right) 2\pi,$$

где $\frac{\Phi_{\text{т}}^{\text{рас}}}{2\pi}$ – целое число оборотов оправки в одном такте намотки.

6. Определяют доворот оправки на каждом из фланцев оболочки за один такт намотки:

$$\varphi_{\text{фл}} = (\Delta\Phi^* - \Delta\Phi_{\text{рас}}) / 2,$$

где $\Delta\Phi^*$ – принятый угловой шаг намотки, равный ближайшему кратному углу. Рекомендуется в качестве углового шага выбирать $\Delta\Phi^* \geq 60^\circ$ (т. е. 60, 72, 90, 120 или 180°). Если $\Delta\Phi^* > 180^\circ$, то доворот оправки на угол $\varphi_{\text{фл}}$ надо делать до ближайшего дополнительного угла, т. е. до $\Delta\Phi^* = 240, 270, 288, 300, 360^\circ$.

7. Рассчитывают смещение последующей спирали (витка ленты) по отношению к ранее уложенной ленте, т. е. определяют доворот оправки на угловую ширину ленты за один такт намотки:

$$\varphi_{\text{л}} = \frac{t_{\text{кр}}}{R} = \frac{t_{\text{л}}}{R \cos \beta_{\text{ц}}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{кр}}$, $t_{\text{л}}$ – кроющая и нормальная ширина ленты соответственно (рис. 7).

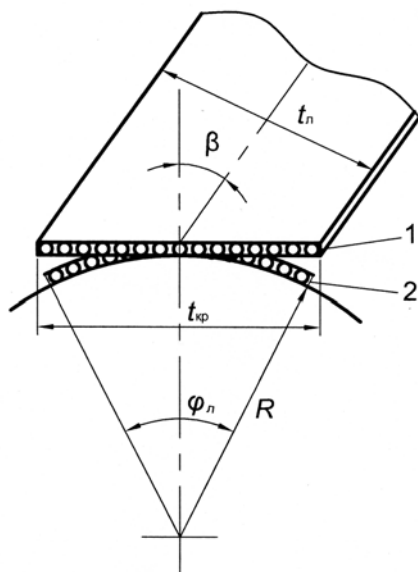


Рис. 7. Схема укладки наматываемой ленты на криволинейную поверхность:

1 – намотка ленты без натяжения; 2 – намотка ленты с натяжением

Примечание. Угловая ширина ленты $\varphi_{\text{л}}$ должна быть максимально большой (увеличивается производительность намотки) и кратной угловому шагу намотки $\Delta\Phi^*$ – этим достигается равномерность укладки лент на поверхности оболочки.

8. Определяют максимально допустимую ширину наматываемой ленты $t_{\text{л}}^{\text{доп}}$ для мокрого или сухого способов намотки в зависимости от варианта домашнего задания. Очевидно, что $t_{\text{л}} \leq t_{\text{л}}^{\text{доп}}$ и $\varphi_{\text{л}} \leq \varphi_{\text{л}}^{\text{доп}}$.

Примечания: 1. Для **способа мокрой намотки** максимальное значение угла $\varphi_{\text{л}}$ зависит от коэффициента трения $f_{\text{тр}}^{\text{доп}}$ пряжи нитей о поверхность оправки или о поверхность наматываемого слоя. Для рассматриваемого случая можно записать (см. рис. 7): $\text{tg}(\varphi_{\text{л}}/2) \leq f_{\text{тр}}^{\text{доп}}$, откуда с учетом (11) максимально допустимая ширина ленты

$$t_{\text{л}}^{\text{доп}} = 2R \cos \beta_{\text{ц}} \text{arc tg } f_{\text{тр}}^{\text{доп}}.$$

2. При **сухом способе намотки** все нити в ленте препрега зафиксированы друг относительно друга и не могут изменить свою длину при укладке их на криволинейную поверхность. Поэтому основным ограничением угловой ширины ленты $\varphi_{\text{л}}$ здесь является неравномерность натяжения нитей в ленте (особенно крайних), приводящая к снижению средней (реализуемой) прочности однонаправленного КМ в конструкции изделия. Для рассматриваемого случая относительная разница в длине нитей ленты (см. рис. 7) $\Delta \bar{l} = 1 - \cos(\Delta\varphi_{\text{л}}/2)$, откуда с учетом (11) максимальная допустимая ширина ленты

$$t_{\text{л}}^{\text{доп}} = 2R \cos \beta_{\text{ц}} \text{arc cos}(1 - \Delta \bar{l}).$$

9. Определив по формуле (11) с учетом примечаний к п. 8 допустимую угловую ширину ленты, выбирают максимально возможную (фактическую) угловую ширину $\varphi_{\text{л}}^{\text{фак}}$, по которой и определяют нормальную (фактическую) ширину наматываемой ленты

$$t_{\text{л}}^{\text{фак}} = \varphi_{\text{л}}^{\text{фак}} R \cos \beta_{\text{ц}}.$$

10. Определяют фактический угол поворота оправки за один такт намотки:

$$\Phi_{\text{т}}^{\text{фак}} = \Phi_{\text{ц}} + 2\Phi_{\text{дн}} + 2\varphi_{\text{фл}} + \varphi_{\text{л}}^{\text{фак}}.$$

11. Определяют толщину собранной из нитей наматываемой ленты, и примерно равную диаметру нити со связующим или толщине слоя намотки

$$h_{\text{сл}} = h_{\text{л}} \cong d_{\text{н}} = \sqrt{\frac{4T_{\text{н}}}{\pi\rho_{\text{в}}\vartheta_{\text{в}}}},$$

где $T_{\text{н}}$ – линейная плотность сухой нити без связующего; $\vartheta_{\text{в}}$ – объемное содержание волокна в однонаправленном КМ; $\rho_{\text{в}}$ – плотность волокна.

Примечание. Толщину углепластиковой ленты (слоя) принимают равной 1/2 от расчетной толщины: $h_{\text{сл}} = h_{\text{л.уп}} = (1/2)h_{\text{л.уп}}^{\text{рас}}$, так как она набирается не из комплексных крученных или некрученных нитей, а из жгутов, которые под натяжением расплющиваются примерно вдвое. Коэффициент армирования однонаправленных КМ (табл. П2), рациональный с точки зрения получения максимальной прочности на растяжение, для каждого типа волокон выбирают из следующих интервалов: $\vartheta_{\text{в}} = 0,62 \dots 0,67$ – для углепластика; $\vartheta_{\text{в}} = 0,65 \dots 0,70$ – для стеклопластика; $\vartheta_{\text{в}} = 0,67 \dots 0,72$ – для органопластика.

12. Находят (без учета пор) расчетное количество нитей в ленте $m_{\text{рас}} = f_{\text{л}} / f_{\text{н}}$, где $f_{\text{л}} = t_{\text{л}}^{\text{фак}} h_{\text{л}}$ – площадь поперечного сечения наматываемой ленты, а $f_{\text{н}} = \pi d_{\text{н}}^2 / 4$ – площадь сечения отдельной нити.

13. Определяют расчетное число двух спиральных слоев оболочки: $K_{\beta}^{\text{рас}} = h_{\beta}^{\text{рас}} / 2h_{\text{сл}}$, полученное значение округляют до ближайшего меньшего целого числа $K_{\beta}^{\text{фак}}$.

14. Определяют фактически необходимую толщину одного слоя намотки: $h_{\text{сл}}^{\text{фак}} = h_{\text{л}}^{\text{фак}} = h_{\beta}^{\text{рас}} / 2K_{\beta}^{\text{фак}}$. В связи с этим увеличивают количество нитей в ленте до значения $m_{\text{фак}} = m_{\text{рас}} h_{\text{сл}}^{\text{фак}} / h_{\text{сл}}$, которое округляют до ближайшего большего целого числа.

15. Определяют число окружных слоев оболочки: $K_{\text{ок}}^{\text{рас}} = h_{\text{ок}}^{\text{рас}} / h_{\text{сл}}^{\text{фак}}$, полученное значение округляют до ближайшего меньшего целого числа $K_{\text{ок}}^{\text{фак}}$. Чтобы скомпенсировать суммарную толщину окружных слоев оболочки, уменьшают шаг окружной намотки (намотка с нахлестом) до значения

$$t_{\text{нм}}^{\text{ок}} = t_{\text{л}}^{\text{фак}} K_{\text{ок}}^{\text{фак}} / K_{\text{ок}}^{\text{рас}},$$

где $t_{\text{нм}}^{\text{ок}}$ и $t_{\text{л}}^{\text{фак}}$ – шаг намотки и ширина наматываемой ленты соответственно.

Примечание. Геометрические параметры ленты ($t_{\text{л}}^{\text{фак}}$, $h_{\text{л}}^{\text{фак}}$ и др.) для окружной намотки принимают такими же, как и для спиральной намотки. Очевидно, что возможны и другие варианты выбора параметров ленты для намотки окружных слоев, но при этом должно выполняться условие (2): приращение массы $\Delta M_{\text{ок}}$ должно быть нулевым.

16. Далее определяют число оборотов оправки за один такт намотки:

$$Z_{\text{т}} = \Phi_{\text{т}}^{\text{фак}} / 2\pi.$$

17. Определяют число витков ленты (спиралей) или число тактов при намотке одного двойного спирального слоя:

$$N_{\text{т.сп}} = \frac{2\pi}{\varphi_{\text{л}}^{\text{фак}}} = \frac{2\pi R \cos \beta_{\text{ц}}}{t_{\text{л}}^{\text{фак}}}.$$

Примечание. Число двойных проходов в одном спиральном слое контролируют счетчиком намоточного станка.

18. Находят полное число оборотов оправки для намотки одного двойного спирального слоя:

$$Z_{\text{сп}} = Z_{\text{т}} N_{\text{т.сп}} = \frac{\Phi_{\text{т}}^{\text{фак}}}{\Phi_{\text{л}}^{\text{фак}}} = \Phi_{\text{т}}^{\text{фак}} \frac{R \cos \beta_{\text{ц}}}{t_{\text{л}}^{\text{фак}}}.$$

Примечание. Число оборотов оправки в одном спиральном слое контролируют счетчиком намоточного станка.

19. Определяют допустимую частоту вращения оправки из расчета максимальной скорости намотки:

$$n_{\text{оп}} = \frac{U_{\text{нм}}^{\text{max}} \sin \beta_{\text{ц}}}{2\pi R}.$$

Примечания: 1. Полученную величину числа оборотов оправки $n_{\text{оп}}$ округляют до ближайшего паспортного значения намоточного станка.

2. Для $\beta_{\text{ц}} = \pi/2$ $U_{\text{нм}} = n_{\text{оп}} 2\pi R_{\text{ц}}$.

20. Находят время намотки одной спирали (такта намотки) или время одного двойного прохода суппорта станка (лентораскладчика):

$$\tau_{\text{т}} = Z_{\text{т}} / n_{\text{оп}}.$$

21. Находят минимально возможное время намотки одного двойного спирального слоя:

$$\tau_{\text{сп}}^{\text{сл}} = \tau_{\text{т}} N_{\text{т.сп}} = Z_{\text{сп}} / n_{\text{оп}}.$$

22. Определяют времена намотки всех спиральных и окружных слоев и всей композитной оболочки баллона (корпуса) соответственно

$$\tau_{\beta}^{\Sigma} = \tau_{\text{сп}}^{\text{сл}} K_{\beta}^{\text{фак}}, \quad \tau_{\text{ок}}^{\Sigma} = \frac{l_{\text{ц}}}{t_{\text{нм}}^{\text{ок}} n_{\text{оп}}^{\text{ок}}} K_{\text{ок}}^{\text{фак}}, \quad \tau_{\text{нм}\Sigma} = \tau_{\beta}^{\Sigma} + \tau_{\text{ок}}^{\Sigma}.$$

23. В заключение определяют суммарное время, мин, намотки цилиндрического участка баллона:

$$\tau_{\text{нм}}^{\text{ц}} = \frac{M_{\text{км}}^{\text{ц}} 10^6}{U_{\text{нм}}^{\text{max}} T_{\text{л.км}}}, \quad (12)$$

где $M_{\text{км}}^{\text{ц}}$ и $T_{\text{л.км}}$ – соответственно масса цилиндрического участка баллона и линейная плотность ленты, $M_{\text{км}}^{\text{ц}} = 2\pi R h_{\Sigma}^{\text{ц}} l_{\text{ц}} \rho_{\text{км}}$,

$$T_{\text{л.км}} = m_{\text{фак}} \frac{T_{\text{н}} \rho_{\text{км}}}{\rho_{\text{в}} g_{\text{в}}}.$$

Примечание. При постоянном вращении оправки $n_{\text{оп}}^{\beta}$ скорость спиральной намотки (укладки) ленты на днища оболочки $U_{\text{нм}}^{\text{дн}}$ является величиной переменной, а в момент изменения движения суппорта станка на обратное (реверс) она становится равной нулю. Поэтому суммарное время намотки двух днищ определяют как $\tau_{\text{нм}}^{\text{дн}} = \tau_{\text{нм},\Sigma} - \tau_{\text{нм}}^{\text{ц}}$.

24. Оформляют таблицу (см. табл. ПЗ), результаты расчетов сравнивают с контрольными значениями параметров.

25. По результатам расчетов вычерчивают в масштабе с указанием размеров и параметров схемы армирования: а) эскиз конструкции композитной оболочки баллона или корпуса (см. рис. 1); б) схему укладки витков ленты на днище композитной оболочки (см. рис. 6).

26. Оформляют отчет и сдают домашнее задание преподавателю.

Приложение

Таблица П1

**Техническое задание на проектирование и расчет
конструктивно-технологических параметров композитной оболочки**

Номер варианта	Давление рабочее $P_{\text{раб}}$, МПа	Объем оболочки $V_{\text{вн}}$, л	Коэффи- циент запаса прочно- сти, $n_{3,п}$	Диаметры			Материал компо- зитной оболочки	Способ намот- ки
				цилин- дра $D_{\text{ц}}$, мм	полюсного отверстия			
					$d_{п1}$, мм	$d_{п2}$, мм		
1	22,0	75	2,0	400	152	152	СП	С
2	22,0	145	2,1	500	168	168	УП	М
3	22,0	250	2,2	600	176	176	ОП	С
4	8,5	2840	1,32	1100	130	425	СП	М
5	8,5	5380	1,42	1300	170	370	УП	С
6	8,5	9300	1,37	1500	210	505	ОП	М
7	24,0	85	2,1	400	146	146	УП	С
8	24,0	160	2,2	500	130	130	ОП	М
9	24,0	275	2,0	600	184	184	СП	С
10	7,5	3050	1,42	1100	146	360	УП	М
11	7,5	5700	1,37	1300	180	430	ОП	С
12	7,5	9800	1,32	1500	224	525	СП	М
13	20,0	65	2,2	400	174	174	ОП	С
14	20,0	120	2,0	500	162	162	СП	М
15	20,0	210	2,1	600	158	158	УП	С
16	10,0	2600	1,37	1100	120	420	ОП	М
17	10,0	5050	1,32	1300	156	380	СП	С
18	10,0	8800	1,42	1500	198	515	УП	М

Примечание. СП – стеклопластик; УП – углепластик; ОП – органопластик;
С – способ сухой намотки; М – способ мокрой намотки.

Таблица П2

**Свойства материала, характеристики нити (волокон)
и способов намотки**

Материал наматываемой ленты	Плотность материала ρ_k , кг/м ³	Предел прочности при растяжении $\sigma_{в,к}$, МПа	Коэффициент реализации прочностности K_c , отн. ед.	Линейная плотность нити (ровинга) $T_{в,н}$ текс (мг/м)	Плотность волокна в нити ρ_v , кг/м ³	Сухая намотка		Мокрая намотка	
						Скорость намотки $U_{нм}$, м/мин	Допустимое удлинение нитей $\overline{\Delta l}$, %	Скорость намотки $U_{нм}$, м/мин	Допустимый коэффициент трения $f_{тр}^{доп}$, отн. ед.
Стеклопластик (нить ВМПС8 + ЭДТ-10), коэффициент армирования волокнистого КМ $\vartheta_v = 0,67$	2020	1850	0,85	112	2580	20	0,08	15	0,08
Органопластик (ровинг СВМ + ЭДТ-10), коэффициент армирования волокнистого КМ $\vartheta_v = 0,70$	1380	2100	0,85	$60 \times 10 = 600$	1450	20	0,10	15	0,07
Углепластик (жгут УКН-5000 + ЭДТ-10), коэффициент армирования волокнистого КМ $\vartheta_v = 0,65$	1540	1460	0,80	410	1750	15	0,06	12	0,06

Примечания: 1. Ровинг состоит из 10 некрученных нитей с линейной плотностью $T_{в,н} = 60$ текс. 2. ЭДТ-10 – эпоксидное связующее.

Таблица ПЗ

**Результаты расчета конструктивных и технологических параметров
композитной оболочки корпуса**

Параметры оболочки	Обозначение параметра	Единица измерения, числовое значение параметра
<i>Конструктивные параметры (расчетные)</i>		
Расчетная масса оболочки корпуса (баллона)	$M_{\text{рас}}^{\text{км}}$	
Толщина спиральной намотки	$h_{\beta}^{\text{рас}}$	
Толщина окружной намотки	$h_{\text{окр}}^{\text{рас}}$	
Толщина стенки на цилиндрическом участке	$h_{\Sigma}^{\text{ц}}$	
Высота днища оболочки корпуса (баллона)	$l_{\text{дн}}$	
Длина цилиндрической части оболочки	$l_{\text{цил}}$	
Полная длина оболочки корпуса (баллона)	$L_{\text{кор}}$	
Диаметр оболочки корпуса (баллона) из технического задания	$D_{\text{кор}}$	
<i>Технологические параметры намотки (расчетные)</i>		
Угол намотки на цилиндрическом участке	$\beta_{\text{ц}}$	
Угловой шаг намотки	$\Delta\Phi^*$	
Угол доворота оправки на фланцах	$\Phi_{\text{фл}}$	
Угловая ширина наматываемой ленты	$\varphi_{\text{л}}^{\text{фак}}$	
Нормальная ширина наматываемой ленты	$t_{\text{л}}^{\text{фак}}$	
Толщина наматываемой ленты	$h_{\text{л}}^{\text{фак}}$	
Количество нитей (ровингов, жгутов) в ленте	$m_{\text{фак}}$	
Число двойных спиральных слоев	$K_{\beta}^{\text{фак}}$	
Число слоев окружной намотки	$K_{\text{ок}}^{\text{фак}}$	
Число витков ленты во втором спиральном слое	$N_{\text{т.сп}}$	
Число витков ленты в окружном слое	$N_{\text{окр}}$	
Частота вращения оправки (спиральные слои)	$n_{\text{оп}}^{\beta}$	
Частота вращения оправки (окружные слои)	$n_{\text{оп}}^{\text{окр}}$	
Суммарное время намотки спиральных слоев	$\tau_{\text{нм}\beta}^{\Sigma}$	
Суммарное время намотки окружных слоев	$\tau_{\text{нм.окр}}^{\Sigma}$	
Время намотки всей композитной оболочки	$\tau_{\text{нм}\Sigma}$	
Время намотки цилиндрического участка оболочки по формуле (12)	$\tau_{\text{нм}}^{\text{ц}}$	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елпатьевский А.Н., Васильев В.В.* Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов. М.: Машиностроение, 1972. 168 с.
2. *Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А.* Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 145 с.
3. Композиционные материалы: Справ. / В.В. Васильев, В.В. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
4. *Белов Г.В., Ерохин Б.Т., Киреев В.П.* Композиционные материалы в двигателях летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 344 с.
5. *Тростянская Е.Б., Михайлин Ю.А., Бухаров С.В.* Тенденция применения и развития композиционных материалов в самолетостроении // *Авиационная промышленность*. 2002. № 2. С. 18–22.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Особенности намотки композитных оболочек сосудов давления	4
Расчет конструкторских параметров композитных оболочек баллонов цилиндрической формы	7
Расчет параметров намотки композитных оболочек баллонов и корпусов двигателей	11
Приложение	21
Список литературы	24