

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(национальный исследовательский университет)»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ДНИЩЕМ**

Электронное методическое пособие

САМАРА
2010

Составители: ИВЧЕНКО Алексей Викторович
НЕХОРОШЕВ Максим Владимирович
ПРОНИЧЕВ Николай Дмитриевич

Методические указания предназначены для студентов обучающихся по специальности: 160301 Авиационные двигатели и энергетические установки, изучающих курсы «Технология производства АД и ЭУ», «Технология машиностроения», «Технологические методы обеспечения надежности деталей ГТД», «информационные технологии» и магистерской программы «Энергетика, экология и двигательные установки ракетных и космических систем» по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов».

Методические указания разработаны на кафедре производства двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КМ	
НАМОТКОЙ.....	4
<i>Общие сведения.....</i>	<i>4</i>
<i>Технологические режимы намотки.....</i>	<i>7</i>
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	8
<i>Определение конструктивно-технологических параметров намотки.....</i>	<i>8</i>
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ.....	14
ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.....	16
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	16
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	17
Приложение 1.....	18
Приложение 2.....	20

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ДНИЩЕМ

Цель работы: сообщить студентам сведения о методе изготовления изделий из композиционных материалов (КМ) путем намотки и навыков выполнения технологических расчетов, связанных с ее применением

ОСОБЕННОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КМ НАМОТКОЙ

Общие сведения

Метод намотки позволяет получить высокоточные изделия аэрокосмической техники из КМ и к тому же легко автоматизируется и реализуется на СЧПУ.

Намотка – технологический процесс, при котором непрерывный армирующий наполнитель (пряжи нитей, ленты, жгуты, ткани из полимеров, стекла, углерода, бора), пропитанный полимерным связующим, подается на вращающуюся оправку и укладывается на ее поверхности в заданном направлении. Вращающаяся оправка имеет конфигурацию внутренней поверхности изделия. Перемещение армирующего материала вдоль оси оправы осуществляется за счет возвратно-поступательного движения суппорта намоточного станка. По достижении требуемой схемы армирования и заданной толщины производится отверждение КМ, а оправка удаляется из изделия.

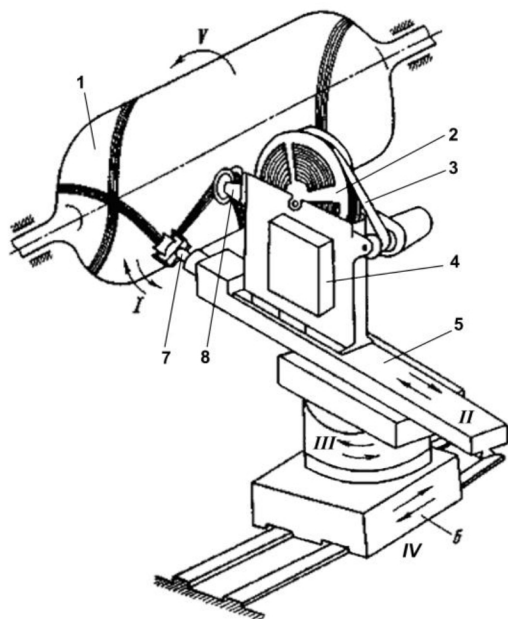


Рис.1 Схема "сухой" намотки препрегом изделия: 1 – оправка; 2 – бобина с препрегом; 3 – разделительная пленка; 4 – нагреватель; 5 – суппорт; 6 – каретка; 7 – головка; 8 - устройство натяжения; I...IV - степени подвижности станка

Намоткой изготавливают изделия, имеющие форму тел вращения: баки, баллоны давления, корпуса РД, оболочки статора компрессора ГТД, головные части и отсеки ракет, лопасти компрессоров, лопасти винтов вертолетов и др.

Основной элемент перечисленных конструкций – тонкостенная силовая оболочка. Геометрически она образована вращением двух плоских кривых вокруг неподвижной оси, лежащей в плоскости этих кривых. Расстояние между кривыми представляет толщину оболочки $h_{об}$, а средняя кривая $y = f(r)$ называется образующей или меридианом (рис.2)

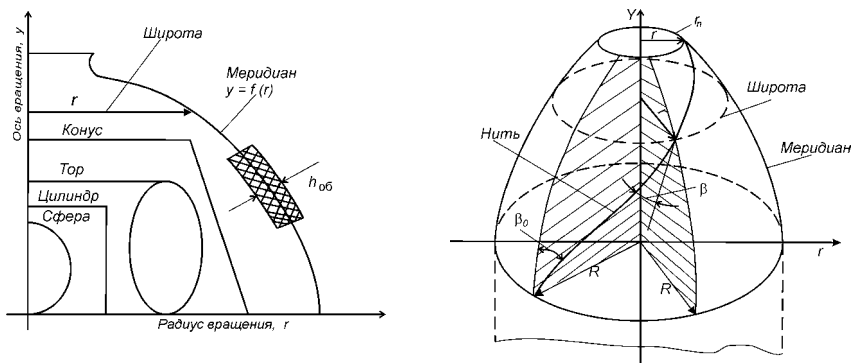


Рис.2. Геометрическое представление оболочки вращения:

a – основные геометрические формы; *b* – геометрические параметры и положение нити на поверхности вращения общего вида; *r* – радиус полюсного отверстия

Структура КМ в намотке создается в результате набора в ходе намотки *n*-го количества слоев, образующих схему армирования оболочки. Основным элементом намотки является форма витка нитей, укладываемых на поверхность.

Наиболее применима спиральная намотка, при которой виток представляет разомкнутую или замкнутую пространственную кривую.

Основная разновидность спирали – геодезическая кривая. Это линия, определяемая уравнением Клеро (рис.2)

$$r \cdot \sin \beta = R \cdot \sin \beta_0 = \text{const}, \quad (1)$$

где $\beta = f(r)$ - текущий угол намотки;

R – максимальный радиус вращения;

β_0 - расчетный (начальный) угол намотки.

Геодезическая кривая – это кратчайшее расстояние между двумя точками на поверхности, например винтовая линия на цилиндре, максимальный диаметр на сфере, - все меридианы оболочек вращения.

Спирально-перекрестная намотка. При этом методе лента армирующего материала заданной ширины B укладывается на оправку с подачей S , превышающей ширину ленты в целое число раз. За прямой и обратный ход раскладывающего устройства (полный проход) формируется один спирально-перекрестный виток, закрывающий часть поверхности оправки. При следующем проходе раскладывающего устройства лента укладывается встык к ранее намотанной (рис. 3).

Процесс ведут до тех пор, пока не будет закрыта вся поверхность оправки и, таким образом, сформирован полный двойной слой. Для получения заданной толщины стенки формуемого изделия проводят намотку нескольких таких слоев.

Технологические режимы намотки

Режим формообразования намотки определяют следующие параметры: натяжение материала арматуры, контактное давление этого материала на наматываемую поверхность, скорость намотки, состояние материала (температура, влажность).

Натяжение обеспечивает конструктивную жесткость и прочность изделия и достигается величиной натяга арматуры в процессе намотки. От натяга зависят кинематические и динамические условия и стабильность намотки арматуры на оправку по заданной траектории.

Сила натяжения арматуры при намотке назначается в долях разрывной силы T_p для материала арматуры. Например, для стеклопластика натяжение T_0 лежит в пределах $0,1T_p < T_0 < 0,2T_p$.

Контактное давление формования создает натяг в системе оправка-оболочка, а также и между слоями намотки, образующими стенку изделия. За счет контактного давления достигается уплотнение материала, устраняется пористость, усиливается адгезия связующего матрицы с арматурой. Контактное давление зависит от тех же факторов, что и T_0 .

Скорость намотки зависит от способа и кинематической схемы намотки, состояния наматываемой арматуры («мокрый» и «сухой» полуфабрикат – препрег) и обычно не превышает 15м/мин.

Изменяя температуру формования при намотке, регулируют вязкость связующего, его адгезионные свойства, уменьшают пористость, что также способствует возрастанию плотности намотки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Определение конструктивно-технологических параметров намотки

Силовые оболочки корпусов представляют комбинацию спиральных слоев, наматываемых непрерывно под углом β к оси изделия. Выходя на торцевую поверхность оправки, они формируют днище оболочек.

Намотка слоев оболочки осуществляется за счет вращения оправки, возвратно-поступательного движения суппорта с лентораскладчиком и радиального перемещения нитераскладчика у торцев оправки с одновременным его поворотом вокруг собственной оси с целью предотвращения скручивания (жгутования) наматываемой пряжи нитей.

Рассмотрим схему укладки прядей нитей или ленты препрега шириной t_L (рис. 3) на поверхность вращающейся оправки.

За один двойной ход нитераскладчика или один такт T намотки на оправку будет уложен один полный виток нитей (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_T . Во всех остальных случаях, когда Z_T не является целым числом, начало и конец витка не совпадают на угловой шаг намотки $\Delta\varphi$.

Для обеспечения плотной (без зазоров) укладки наматываемых лент необходимо добиться, чтобы угол $\Delta\varphi$ был кратным углу 2π (или 360°), т.е. одному полному повороту оправки. Кратными же будут те углы, для которых отношение $2\pi / \Delta\varphi$ является целым числом: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и т.д. Этим числам соответствуют значения углового шага намотки $\Delta\varphi^*$, равные 360° , 180° , 120° , 90° , 72° , 60° , 45° и т.д. Наиболее просто кратность углового шага достигается дополнительным поворотом оправки на фланцах оболочки на $\Delta\varphi_\phi$.

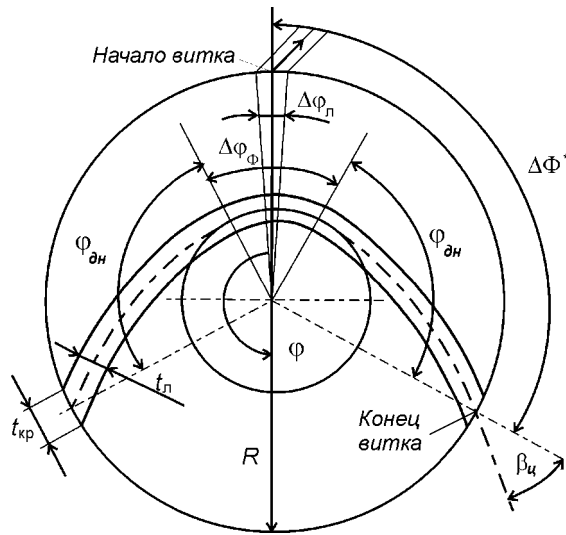
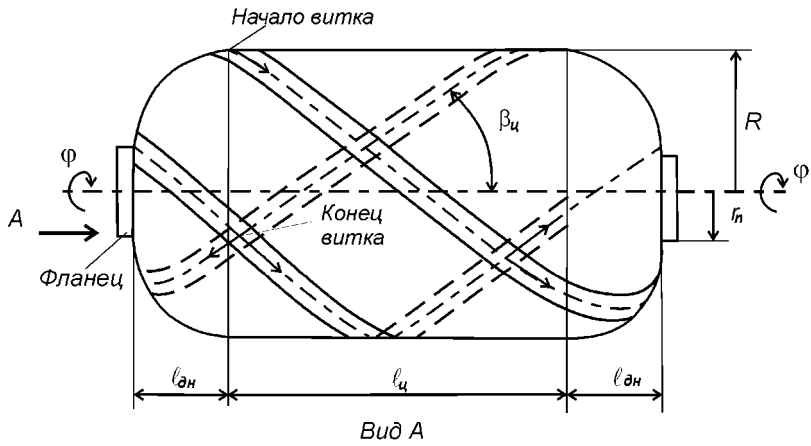


Рис. 3. Схема намотки цилиндрических оболочек с днищами

Кроме того, после каждого такта намотки или укладки одного витка ленты оправку следует повернуть на угловую ширину ленты $\Delta\varphi_L$, которая должна укладываться целое число раз в угловом шаге намотки $\Delta\varphi^*$.

Таким образом, в одном слое оболочки после его намотки будет уложено $2\pi/\Delta\varphi_L$ лент. Так как за один такт намотки виток ленты

дважды пересекает любую окружность оболочки, то при числе тактов $T = 2\pi / \Delta\varphi_{Л}$ образуется два полных спиральных слоя, уложенных под углами $\pm\beta$ в каждой точке. При этом оправка, при $Z = Z_T \cdot T$ вернется в исходное положение со смещением на угловую ширину ленты $\Delta\varphi_{Л}$.

Для заданных геометрических размеров технологические параметры намотки рассчитывают в указанной последовательности.

1. Определяют угол намотки на цилиндрической части оболочки

$$\beta_0 = \beta_{Ц} = \arcsin(r_n / R), \quad (2)$$

где r_n, R — радиусы цилиндрической части и полюсного отверстия оболочки соответственно;

$\beta_{Ц}$ — угол намотки на цилиндрической части.

2. Рассчитывают угол, на который поворачивается оправка при укладке ленты на цилиндрическую часть оболочки за один такт намотки,

$$\Phi_{Ц} = 2\varphi_{Ц} = 2 \frac{l_{Ц}}{R} \operatorname{tg}\beta_{Ц}, \quad (3)$$

где $l_{Ц}$ — длина цилиндрической части сосуда давления;

$\beta_{Ц} \sim$ угол поворота ленты.

3. Определяют угол поворота оправки при укладке ленты на каждом из днищ (см. рис. 3)

$$\Phi_{Ц} = 2\varphi_{ДН} = 2 \int_{r=r_n}^R \frac{\operatorname{tg}\beta_r}{r} dS = 2 \int_{r=r_n}^R \frac{\operatorname{tg}\beta_r}{r} \sqrt{1+y'^2(r)} dr, \quad (4)$$

здесь r — текущее значение радиуса вращения днища оболочки, β_r — угол армирования на днище; $y'(r)$ — производная образующей контура днища:

$$y = \int_{r=R}^r \frac{r^3 dr}{\sqrt{(R^2 - r^2)[r^2 - R^2(k_1 - 2)][r^2 - R^2(k_2 - 2)]}} + C_2, \quad (5)$$

где $k_{1,2} = \frac{1}{2}(3 \pm \sqrt{1 + 4 \operatorname{tg}^2 \beta_0})$,

β_0 - начальный угол намотки.

При этом максимальный радиус вращения $r_{\max} = \pm R$,

а минимальный $r_{\min} = \pm \frac{R}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_0} - 1}$

В конечном виде интеграл (6.5) после замены переменной

$$r = R \sqrt{1 - k_1 \sin^2 \theta}, \quad (6)$$

выражается через эллиптические интегралы первого и второго родов

$$y = R \left[\frac{1 - k_2}{\sqrt{k_2}} F(x, \theta) + \sqrt{k_2} E(x, \theta_2) \right], \quad (7)$$

где $F(x, \theta)$ и $E(x, \theta_2) \sim$ табличные значения эллиптических интегралов первого и второго родов; $x = \sqrt{k_1/k_2} \sim$ модуль эллиптического интеграла.

Аргумент эллиптического интеграла имеет вид

$$\theta = \arcsin \sqrt{(R^2 - r^2)(R^2 - r_{\min}^2)},$$

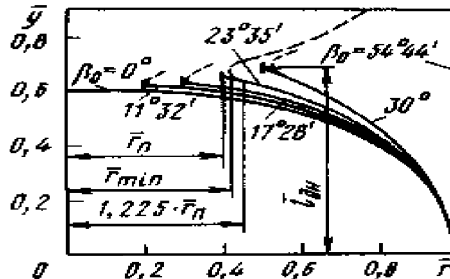


Рис. 4. Форма меридианов равно напряженных днищ цилиндрических оболочек при различных углах намотки на экваторе оболочки

Форма образующих дниц, построенных в относительных координатах ($\bar{y} = y/R$ и $\bar{r} = r/R$) по формулам (5) и (6) для разных значений β_0 , показана на рис. 4. В вершине оболочки при $\beta_0 = 0$ образуется отверстие, причем предполагается, что при действии внутреннего давления оно закрывается крышкой; меридиональная кривая $y(r)$ определена в интервале $r_{\min} \leq r \leq R$.

4. Находят расчетный угол поворота оправки за такт намотки или при укладке одной спирали

$$\Phi_T^P = \Phi_{Ц} + 2\Phi_{ДН}, \quad (8)$$

5. Определяют расчетный угловой шаг намотки

$$\Delta\Phi_P = \Phi_T^P - \left[\frac{\Phi_T^P}{2\pi} \right] 2\pi, \quad (9)$$

где $\left[\frac{\Phi_T^P}{2\pi} \right]$ — целое число оборотов оправки в одном такте намотки.

6. Определяют угловой шаг намотки $\Delta\Phi^*$, равный ближайшему кратному углу.

Рекомендуется в качестве углового шага выбирать $\Delta\Phi^* \geq 60^\circ$ ($60^\circ, 72^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ и 180°).

Если $\Delta\Phi_P > 180^\circ$, то оправку следует повернуть до ближайшего дополнительного угла ($240^\circ, 270^\circ, 288^\circ, 300^\circ$ и 360°).

7. Вычисляют дополнительный поворот оправки на фланцах оболочки

$$\Delta\varphi_\Phi = \frac{(\Delta\Phi^* - \Delta\Phi_P)}{2}, \quad (10)$$

8. Рассчитывают смещение последующей спирали (витка ленты) по отношению к ранее уложенной, т.е. определяют поворот оправки на угловую ширину ленты

$$\Delta\varphi_{\mathcal{L}} = \frac{t_{\text{кр}}}{R} = \frac{t_{\mathcal{L}}}{R \cos \beta_{\mathcal{L}}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{кр}}$ и $t_{\mathcal{L}}$ - кроющая и нормальная ширина наматываемой ленты соответственно. При этом угол $\Delta\varphi_{\mathcal{L}}$ должен быть кратным углу $\Delta\Phi^*$, что не сложно выполнить для названных выше значений $\Delta\Phi^*$.

Максимальное значение $\Delta\varphi_{\mathcal{L}}$ ограничивается коэффициентом трения $f_{\text{ТР}}$, пряди нитей о поверхность оправки или поверхность наматываемого слоя.

В данном случае можно принять $\text{tg}(\Delta\varphi_{\mathcal{L}}/2) < f_{\text{ТР}}$.

Следовательно, максимальная ширина наматываемой ленты

$$t_{\mathcal{L}}^{\text{max}} < 2R \cos \beta_{\mathcal{L}} \cdot \text{arctg} f_{\text{ТР}}, \quad (12)$$

Минимальная ширина ленты зависит от скорости процесса намотки $V_{\text{НАМ}}$

9. После выбора угловой ширины ленты $\Delta\varphi_{\mathcal{L}}$ определяют фактический угол поворота оправки за один такт намотки

$$\Phi_T^* = \Phi^* = \Phi_{\mathcal{L}} + 2\Phi_{\text{ДН}} + 2\Delta\varphi_{\varphi} + \Delta\varphi_{\mathcal{L}}, \quad (13)$$

10. Определяют число оборотов оправки за один такт намотки

$$Z_T = \frac{\Phi^*}{2\pi}, \quad (14)$$

11. Находят число витков ленты или число тактов при намотке двойного спирального слоя

$$T = \frac{2\pi}{\Delta\varphi_{\mathcal{L}}} = \frac{2\pi R \cos \beta_{\mathcal{L}}}{t_{\mathcal{L}}}, \quad (15)$$

12. Находят полное число оборотов оправки, необходимое для намотки двойного спирального слоя

$$Z_{\text{ОП}} = Z_T T = \frac{\Phi^*}{\Delta\varphi_{\mathcal{L}}} = \Phi^* \cdot \frac{R \cos \beta_{\mathcal{L}}}{t_{\mathcal{L}}}, \quad (16)$$

13. Определяют допустимую частоту вращения оправки из расчета максимальной скорости намотки

$$n_{ОП} = \frac{V_{нам}^{max} \cdot \sin \beta_{Ц}}{2\pi R}, \quad (17)$$

14. Находят время одного такта намотки

$$\tau_T = \frac{Z_T}{n_{ОП}} = \frac{R \cdot \Phi^*}{V_{НАМ} \sin \beta_{Ц}}, \quad (18)$$

15. Рассчитывают минимально возможное время намотки двойного спирального слоя

$$\tau_{СП} = \tau_T \cdot T = \frac{Z_{ОП}}{n_{ОП}} = \frac{2\pi \cdot R^2 \cdot \Phi^*}{t_{Л} V_{НАМ} \operatorname{tg} \beta_{Ц}}, \quad (19)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

Расчет параметров намотки выполняется с помощью пакета Mathcad.

Для проверки рассчитанных значений применяется моделирование намотки с помощью графических средств пакета Mathcad. Для этого используется файл, содержащий программные процедуры имитации расположения линий намотки с помощью трехмерных графиков зависимостей координат.

1. С помощью Mathcad выполнить расчет параметров намотки по формулам 1-5 (см содержание работы). При этом можно не использовать таблицы эллиптических интегралов, а воспользоваться средствами интегрирования и дифференцирования пакета, т.е. использовать для расчета исходную формулу (5).

Функцию $\operatorname{tg} \beta_r$ в формуле (4) можно определить из уравнения геодезической кривой из соотношения (1):

$$\operatorname{tg} \beta_r = \frac{R \sin \beta_0}{\sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \beta_0}},$$

2. По рассчитанным значениям Φ_T^P , необходимо определить фазовый угол поворота оправки, с учетом рекомендаций п.5 и п.6.

При вводе расчетных формул желательно использовать принятые обозначения. При этом используются переменные с подписью (термин Mathcad), обозначение которых вводится с помощью символа точка.

Пример формирования расчета приведен в приложении 1

3. Результаты расчета проанализировать с помощью графической модели намотки, формируемой документом Mathcad. Для этого в исходном документе вставить ссылку на файл Графики.mcd, задать значения, в соответствии с рассчитанными.

Программные функции файла приведены в Приложении 2.

4. Определить все возможные значения фазового угла поворота оправки (выбирая из рекомендованных по правилу п.б) и получить соответствующие им схемы укладки препрега на днищах.

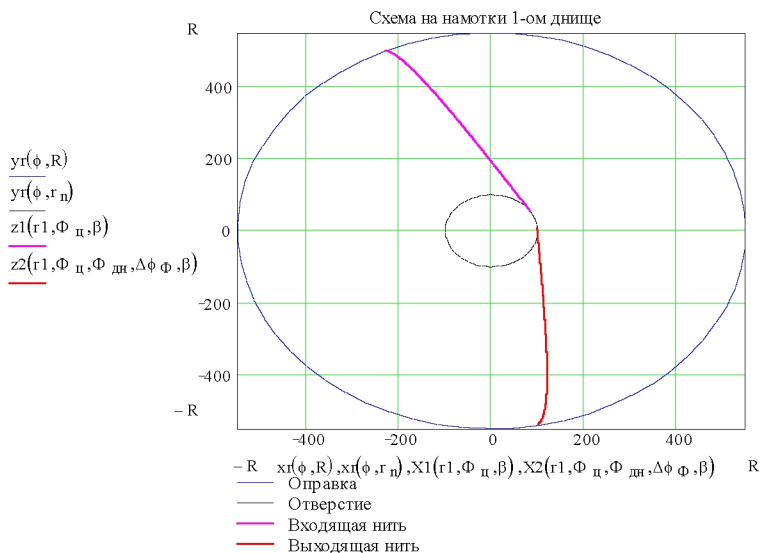
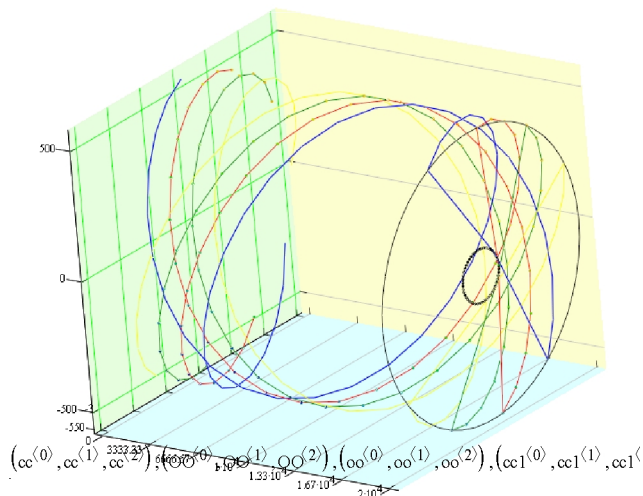


Схема намотки на цилиндрической части оболочки



5. Выполнить расчет остальных технологических параметров намотки в соответствии с формулами 11 – 19

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

В документе Word или в документе Mathcad сформировать отчет о проведенных расчетах с пояснениями рассчитываемых значений.

Указать множество значений фазового угла поворота оправки.

Кроме того, поместить в отчет модель графической схемы намотки на днищах и стенках оправки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите факторы, влияющие на контактное давление формообразования
2. Какие параметры наматываемой арматуры можно регулировать, чтобы увеличить плотность намотки?
3. Почему угловой шаг намотки должен быть кратен углу 2π ?
4. Чем ограничивается ширина наматываемой ленты?

5. Чем ограничивается максимальная скорость намотки?
6. Если угловой шаг намотки равен $3\pi/2$, то через сколько тактов лента арматуры разместиться вплотную к уже намотанной спирали?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.М. Буланов, В.В. Воробей Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. Москва. Из-во МГТУ им.Баумана 1998г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ

Ширина прядей нити $t_{\text{л}} := 1$

Радиус цилиндрической части $R := 550$

Радиус полюсного отверстия оболочки $r_{\text{н}} := 150$

Длина цилиндрической части $l_{\text{ц}} := 2000$

1. Угол намотки на цилиндрической части оболочки

$$\beta_{\text{ц}} := \text{asin}\left(\frac{r_{\text{н}}}{R}\right) \quad \beta_0 := \beta_{\text{ц}} \quad \beta_{\text{ц}} \cdot \frac{180}{\pi} = 15.827$$

2. Угол поворота оправки при намотке на цилиндрической части
(за 1 такт)

$$\Phi_{\text{ц}} := 2 \cdot \frac{l_{\text{ц}}}{R} \cdot \tan(\beta_{\text{ц}}) \quad \Phi_{\text{ц}} \cdot \frac{180}{\pi} = 118.122$$

3. Угол поворота оправки при укладке ленты на каждом из днищ

$$k_1 := \frac{1}{2} \cdot \left(3 + \sqrt{1 + 4 \cdot \tan^2(\beta_0)}\right) \quad k_1 = 2.075$$

$$k_2 := \frac{1}{2} \cdot \left(3 - \sqrt{1 + 4 \cdot \tan^2(\beta_0)}\right) \quad k_2 = 0.925$$

$$y'(r) := \frac{r^3}{\sqrt{(R^2 - r^2) \cdot [r^2 - R^2 \cdot (k_1 - 2)]} \cdot [r^2 - R^2 \cdot (k_2 - 2)]}$$

минимальный радиус вращения на днище

$$r_{\text{min}} := \frac{R}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\sqrt{1 + 4 \cdot \tan^2(\beta_0)} - 1} \quad \boxed{r_{\text{min}} = 150.39}$$

Окончание приложения 1

расчетный угол поворота оправки при укладке ленты на днище

$$\Phi_{\text{дн}} := 2 \cdot R \cdot \sin(\beta_{\text{ц}}) \cdot \int_{r_{\text{min}}}^R \frac{\sqrt{1 + y'(r)^2}}{r \cdot \sqrt{r^2 - R^2 \cdot (\sin(\beta_{\text{ц}}))^2}} dr$$

$$\Phi_{\text{дн}} \cdot \frac{180}{\pi} = \blacksquare$$

4. Расчетный угол поворота оправки за один такт

$$\Phi_{\phi} := \Phi_{\text{ц}} + 2\Phi_{\text{дн}}$$

$$\Phi_{\phi} \cdot \frac{180}{\pi} = \blacksquare$$

5. Определяем расчетный угловой шаг намотки

$$\Delta\Phi_{\phi} := \Phi_{\phi} - \text{sel}(\Phi_{\phi}) \cdot 2\pi$$

$$\Delta\Phi_{\phi} \cdot \frac{180}{\pi} = \blacksquare$$

6. Выбираем значение углового шага намотки:

$$\Delta\Phi := \frac{\pi}{2}$$

7. Дополнительный поворот оправки на фланцах

$$\Delta\Phi_{\phi} := \frac{\Delta\Phi - \Delta\Phi_{\phi}}{2}$$

$$\Delta\Phi_{\phi} \cdot \frac{180}{\pi} = \blacksquare$$

