

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра сопротивления материалов

А.П. Мазин, О.С. Гоголева

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ШПАНГОУТОВ

Методические указания к выполнению самостоятельных
работ по дисциплине «Прочность конструкций»

Рекомендовано к изданию Редакционно – издательским советом
Государственного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург
ИПК ГОУ ОГУ
2010

УДК 629.7(075.8)

ББК 39.5я73

М 13

Рецензент – профессор, кандидат технических наук Р.В. Ромашов

Мазин, А.П.

М 13 Расчет на прочность шпангоутов: методические указания к выполнению самостоятельных работ по дисциплине «Прочность конструкций»/ А.П.Мазин, О.С.Гоголева; Оренбургский гос. ун-т.- Оренбург: ОГУ, 2010. – 81 с.

Предлагаемое методическое указание содержит краткую теоретическую часть по расчету шпангоутов, примеры выполнения самостоятельных работ: расчет силовых шпангоутов, нагруженных усилиями, приходящими от оперения и крыла.

Методическое указание предназначено для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности 160201-Самолето- и вертолетостроение и 160801-Ракетостроение при изучении дисциплины «Прочность конструкции».

УДК 629.7(075.8)

ББК 39.5я73

© Мазин А.П., 2010
Гоголева О.С., 2010
© ГОУ ОГУ, 2010

Содержание

Введение	4
1 Теоретические положения	5
1.1 Нагружение шпангоутов	5
1.1.1 Определение нагрузки от горизонтального оперения	6
1.1.2 Определение нагрузки от вертикального оперения	8
1.1.3 Нагружение крыльевого шпангоута	10
2 Проектировочный расчет на прочность шпангоутов	11
3 Самостоятельная работа	17
3.1 Пример 1	17
3.2 Пример 2	27
3.3 Пример 3	38
3.4 Пример 4	50
4.1 Исходные данные к задаче №1	64
4.2 Исходные данные к задаче №2	66
4.3 Исходные данные к задачам № 3, 4	68
Список использованных источников	74
Приложение А Характеристики прессованных профилей	75

Введение

Шпангоуты фюзеляжа подразделяются на нормальные и усиленные (силовые).

Нормальные шпангоуты фюзеляжа служат для сохранения формы фюзеляжа и являются опорами стрингеров и обшивки, то есть играют ту же роль, что и нервюры в крыле. Однако, из-за небольшой строительной высоты сечений и сравнительно больших габаритных размеров, условия их нагружения и работы оказываются различными. Основной деформацией для шпангоута является изгиб, а для нервюр – сдвиг.

Усиленные шпангоуты (аналогично усиленным нервюрам крыла) передают на обшивку большие сосредоточенные силы от прикрепляемых к ним агрегатов и грузов. Шпангоуты обычно выполняются в виде замкнутых рам, которые обладают большой жесткостью при изгибе в своей плоскости.

1 Теоретические положения

1.1 Нагружение шпангоутов

Шпангоуты нагружаются местными аэродинамическими силами и нагрузками от совместной работы силовых элементов фюзеляжа (обшивки и стрингеров). Все эти нагрузки передаются на шпангоут обшивкой и стрингерами. Усиленные шпангоуты нагружаются еще и сосредоточенными силами от прикрепленных к ним других частей самолета (крыла, оперения, шасси) и грузов. Кроме того, усиленные шпангоуты ставятся по краям больших вырезов в фюзеляже, в местах стыков, где меняется форма фюзеляжа (стык цилиндрического и конического отсеков, цилиндрической части и сферического днища герметических кабин).

Аэродинамическая нагрузка бывает симметричной относительно продольной оси фюзеляжа (равномерно распределенная по контуру сечения) или несимметричной (не равномерно распределена по контуру сечения). Симметричная нагрузка является самоуравновешенной (рисунок 1 а). Не симметричная нагрузка не будет самоуравновешенной. Она уравнивается касательными усилиями T , передающимися на шпангоут со стороны обшивки через заклепки, работающие на срез (рисунок 1 б).

Воздушная нагрузка на шпангоут со стороны обшивки

$$q_s = q_0 (\cos \alpha - \cos \beta),$$

где

$$q_0 = \frac{F}{R \left(\beta - \frac{1}{2} \sin 2\beta \right)}.$$

Касательные усилия T равны

$$T = \frac{F}{I_{rz}} S_{rz},$$

где I_{rz} – редуцированный момент инерции сечения фюзеляжа, где установлен шпангоут;

S_{rz} – редуцированный статический момент отсеченной части по контуру сечения. Аналогично определяется нагрузка на силовые шпангоуты от крыла, оперения и шасси при их симметричном нагружении.

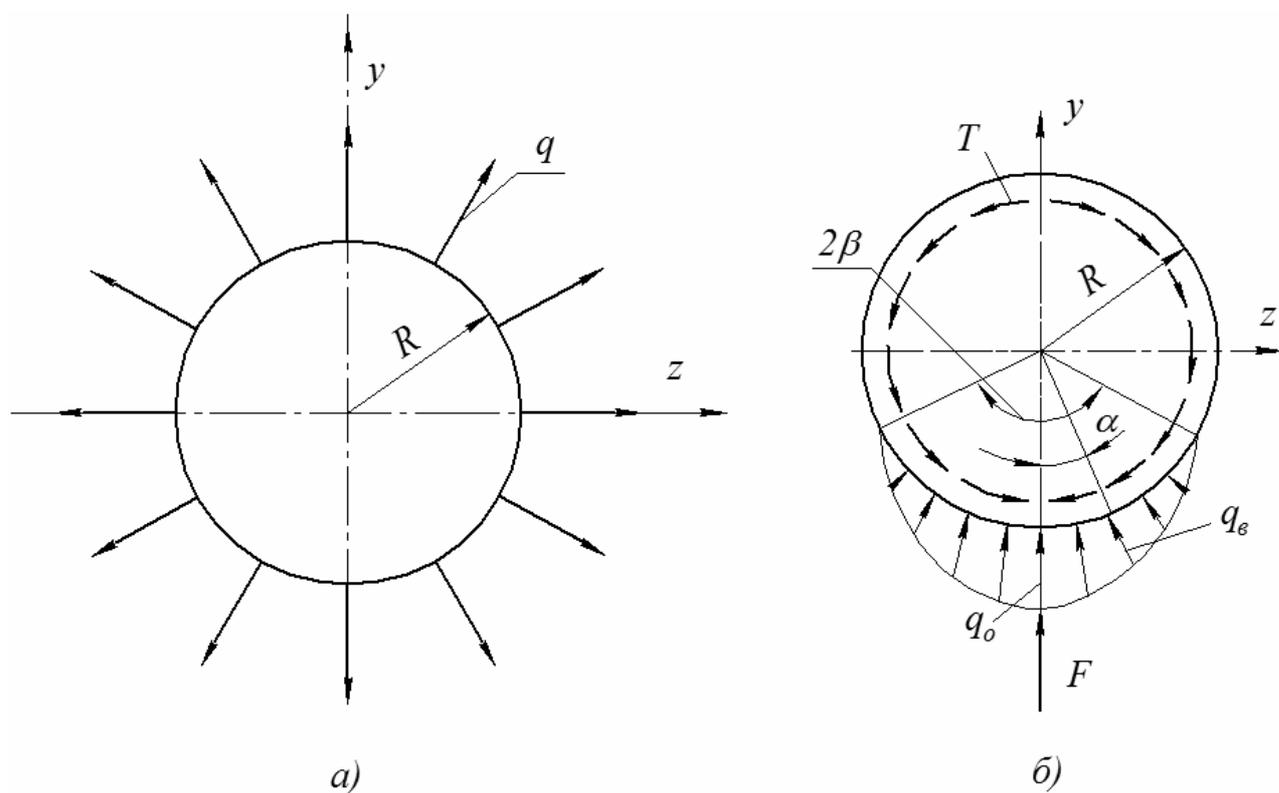


Рисунок 1

1.1.1 Определение нагрузки от горизонтального оперения

Определим в общем виде нагрузку на силовые шпангоуты от горизонтального оперения (ГО). Схема нагружения ГО показана на рисунке 2 а .

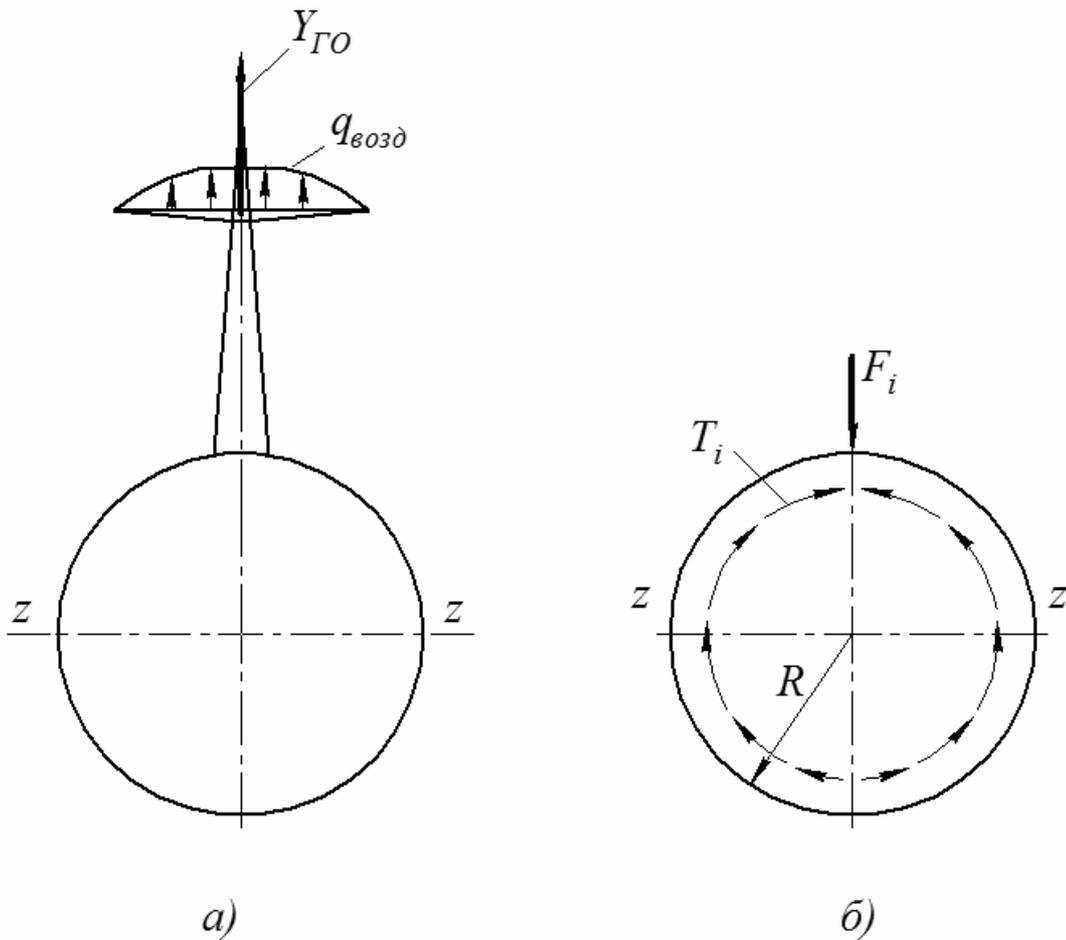


Рисунок 2

Подъемная сила горизонтального оперения находится из условия равновесия моментов аэродинамических сил относительно поперечной оси z

$$Y_{ГО} = \frac{Y_{кр}(x_{\delta} - x_{м})}{L_{ГО}},$$

где x_{δ} и $x_{м}$ – координаты центра давления крыла и центра масс самолета;

$L_{ГО}$ – расстояние от центра масс самолета до центра давления горизонтального оперения. Распределяем $Y_{ГО}$ по узлам крепления киля:

$$F_1 a + Y_{ГО} b = 0; \quad F_1 = \frac{Y_{ГО} b}{a}; \quad F_2 = Y_{ГО} - F_1,$$

где F_1 и F_2 – усилия, приходящиеся на узлы крепления кия

a – расстояние между узлами

b – расстояние между центром давления аэродинамической силы и задним узлом крепления кия.

Схема нагружения силового шпангоута силой F_i показана на рисунке 2 б).

1.1.2 Определение нагрузки от вертикального оперения

При нагружении вертикального оперения шпангоуты, к которым крепится киль, нагружены несимметричной нагрузкой (рисунок 3 а).

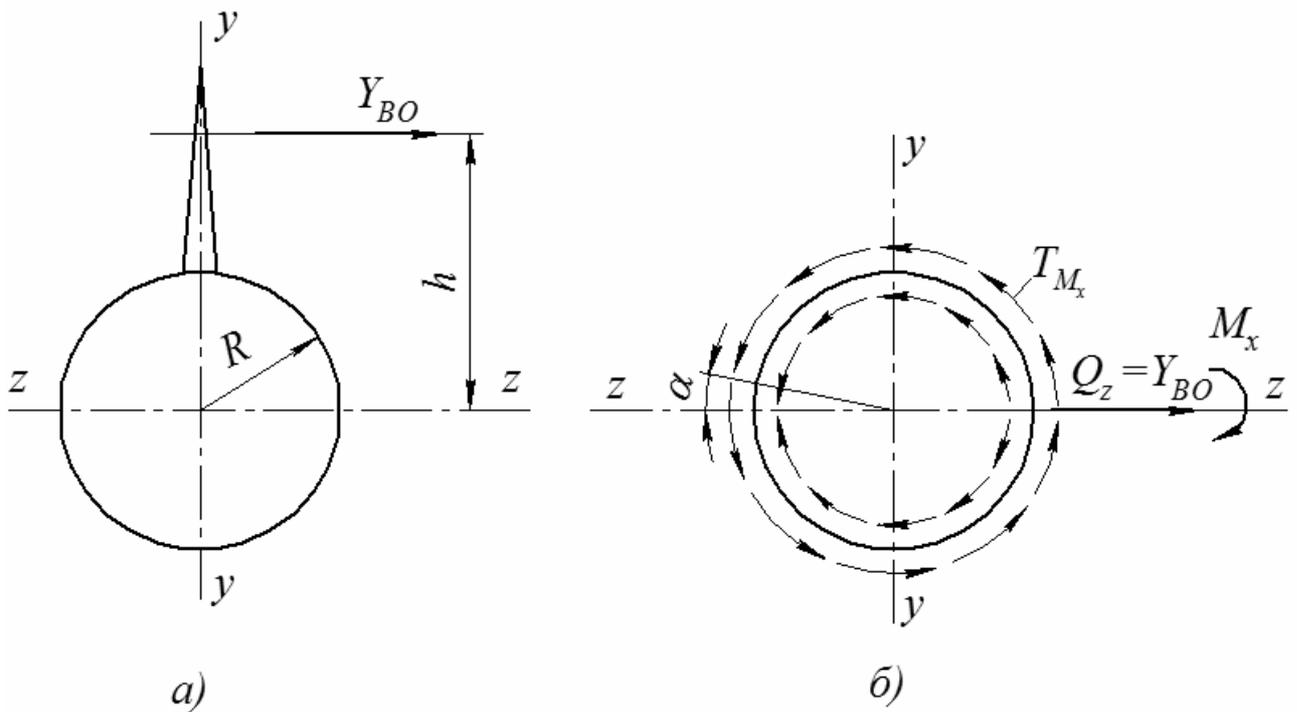


Рисунок 3

В этом случае на шпангоут действует сила $Q_z = Y_{BO}$ и момент $M_x = Y_{BO}h$, которые уравниваются потоком касательных усилий T_{Q_z} и T_{M_x} со стороны обшивки (рисунок 3 б). Касательные усилия равны:

$$T_{Q_z} = \frac{Q_z}{I_{ry}} S_{ry} \quad \text{и} \quad T_{M_x} = \frac{M_x}{\Omega},$$

где I_{ry} – приведенный момент инерции сечения фюзеляжа относительно оси y

S_{ry} – статический момент отсеченной части по периметру сечения фюзеляжа относительно оси y .

Ω – удвоенная площадь, ограниченная контуром сечения.

Если в качестве расчетной схемы принять условно гладкую оболочку с приведенной толщиной δ_{np} (рисунок 4), то

$$dS = R d\alpha; \quad dA = \delta_{np} dS = \delta_{np} R d\alpha; \quad Z = R \cos \alpha;$$

$$S_{ry} = \int_A z dA = \int_0^\alpha R \cos \alpha \delta_{np} R d\alpha = \delta_{np} R^2 \sin \alpha \Big|_0^\alpha = \delta_{np} R^2 \sin \alpha$$

$$I_{ry} = \int_0^{2\pi} R^2 \cos^2 \alpha R \delta_{np} d\alpha = \pi \delta_{np} R^3,$$

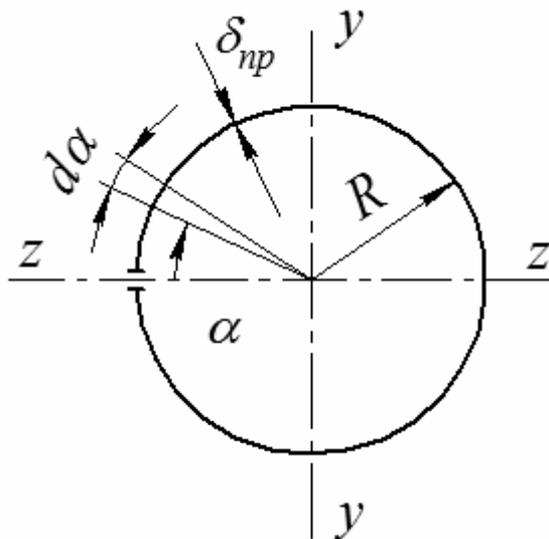


Рисунок 4

тогда

$$T_{Q_z} = \frac{Y_{BO}}{\pi R} \sin \alpha \quad \text{и} \quad T_{M_x} = \frac{Y_{BO} h}{2\pi R^2}.$$

Величина уравновешивающей силы Y_{BO} определяется из уравнения равновесия моментов

$$Y_{BO} = \frac{M_y}{L_{BO}},$$

где, M_y — момент внешних сил относительно вертикальной оси самолета, проходящей через центр масс самолета, $\text{кН} \cdot \text{м}$;

L_{BO} — расстояние от центра давления вертикального оперения до центра масс самолета, м .

1.1.3 Нагружение крыльевого шпангоута

Нагружение крыльевого шпангоута локальными нагрузками по симметричной схеме приведено на рисунке 5

$$T_{Q_y} = \frac{Q_y}{I_{rz}} S_{rz}; \quad Q_y = \frac{Y_{кр}}{2}; \quad M_x = \frac{Y_{кр}}{2} z_{цд},$$

где $z_{цд}$ — координата приложения $\frac{Y_{кр}}{2}$, м ;

I_{rz} — момент инерции сечения фюзеляжа, где установлен шпангоут, м^4 ;

S_{rz} — статический момент по контуру сечения, м^3 . Принятая расчетная схема статически определима и геометрически неизменяема.

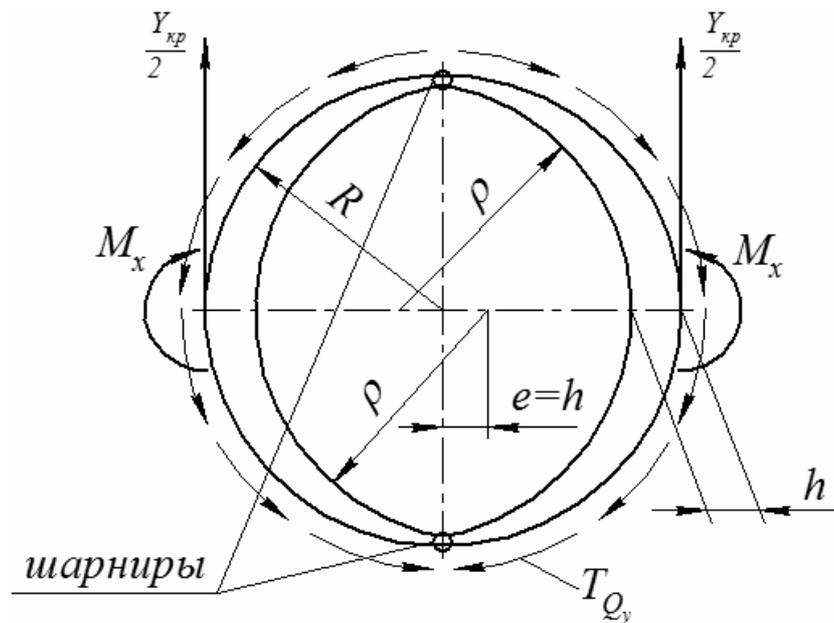


Рисунок 5

2 Проектировочный расчет на прочность шпангоутов

Шпангоут фюзеляжа представляет собой плоскую раму постоянного или переменного сечения, нагруженную в общем случае произвольной системой сил. При таком нагружении в каждом поперечном сечении шпангоута возникают изгибающий момент M_x , поперечная сила Q , и нормальная сила N , действующие в плоскости шпангоута (рисунок 6). Задача определения усилий M_x , Q и N в общем случае является трижды статически неопределимой. Для раскрытия статической неопределимости воспользуемся методом сил. Выберем эквивалентную систему, разрезав мысленно шпангоут в точке A (рисунок 6). Тогда для эквивалентной системы получим

$$M_x = M_F + \sum_{i=1}^3 \bar{M}_i X_i,$$

$$Q = Q_F + \sum_{i=1}^3 \bar{Q}_i X_i,$$

$$N = N_F + \sum_{i=1}^3 \bar{N}_i X_i,$$

где M_F , Q_F и N_F — изгибающий момент, поперечная и нормальная силы в эквивалентной системе от внешней нагрузки,

X_i — неизвестные силы ($i = 1, 2, 3$),

\bar{M}_i , \bar{Q}_i , \bar{N}_i — изгибающие моменты, поперечные и нормальные силы от единичных нагрузок, приложенных в направлении X_i в разрезанном шпангоуте.

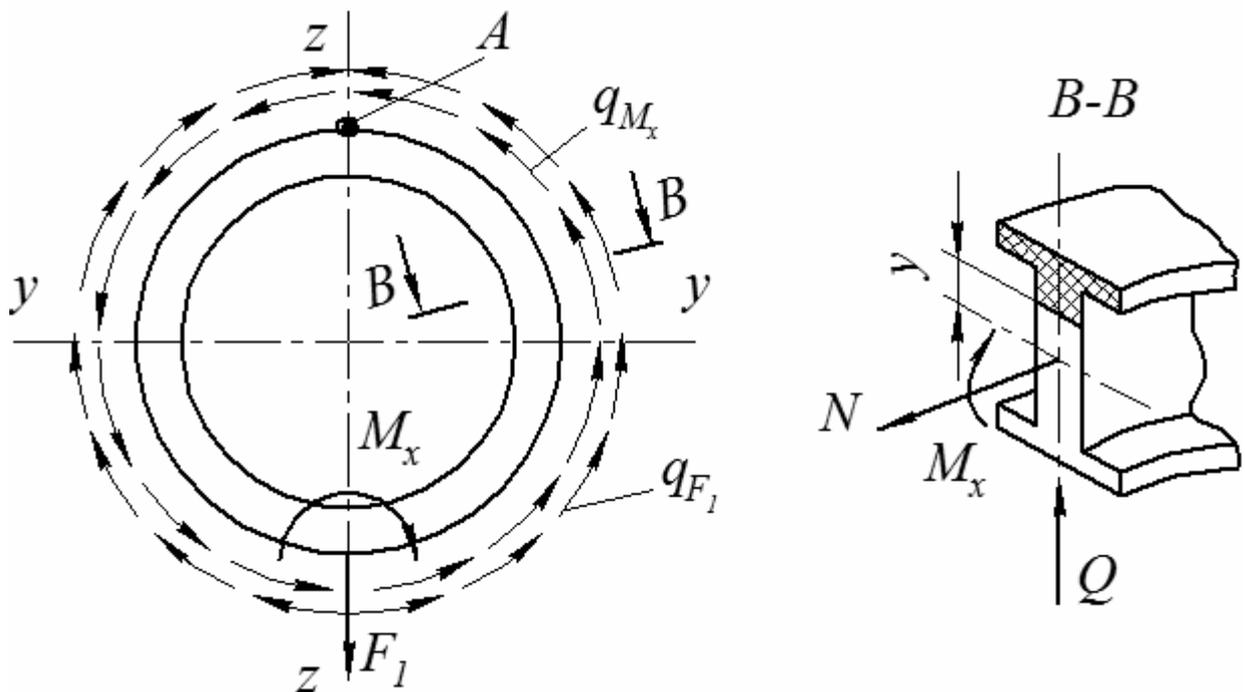


Рисунок 6

Неизвестные усилия найдем из системы канонических уравнений:

$$\Delta_{iF} + \sum_{i=1}^3 \delta_{ij} X_i \quad (i = 1, 2, 3),$$

$$\text{где } \Delta_{iF} = \int \frac{M_0 \overline{M}_i}{EI_x} ds \quad \text{и} \quad \delta_{ij} = \int \frac{\overline{M}_i \overline{M}_j}{EI_x} ds,$$

EI_x — изгибная жесткость сечения шпангоута.

Положительные направления внутренних усилий показаны на рисунке 7.

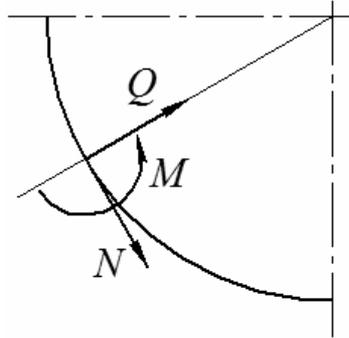


Рисунок 7

Эпюры \overline{M}_i показаны на рисунке 8.

Внешними нагрузками для шпангоута являются действующие сосредоточенные силы F_i , M_z и уравновешивающий их поток касательных усилий в обшивке T . Для определения усилий M_F , N_F и Q_F рассмотрим элементарную дугу ds с координатой φ (рисунок 9). На эту дугу от потока касательных усилий $T = T_\varphi$ действует элементарная сила $\Delta F = T_\varphi R d\varphi$. Перенесем эту силу в точку "С" с координатой α . Получим

$$\Delta M = -\Delta F [R - r \cos(\alpha - \varphi)],$$

$$\Delta N = -\Delta F \cos(\alpha - \varphi),$$

$$\Delta Q = -\Delta F \sin(\alpha - \varphi).$$

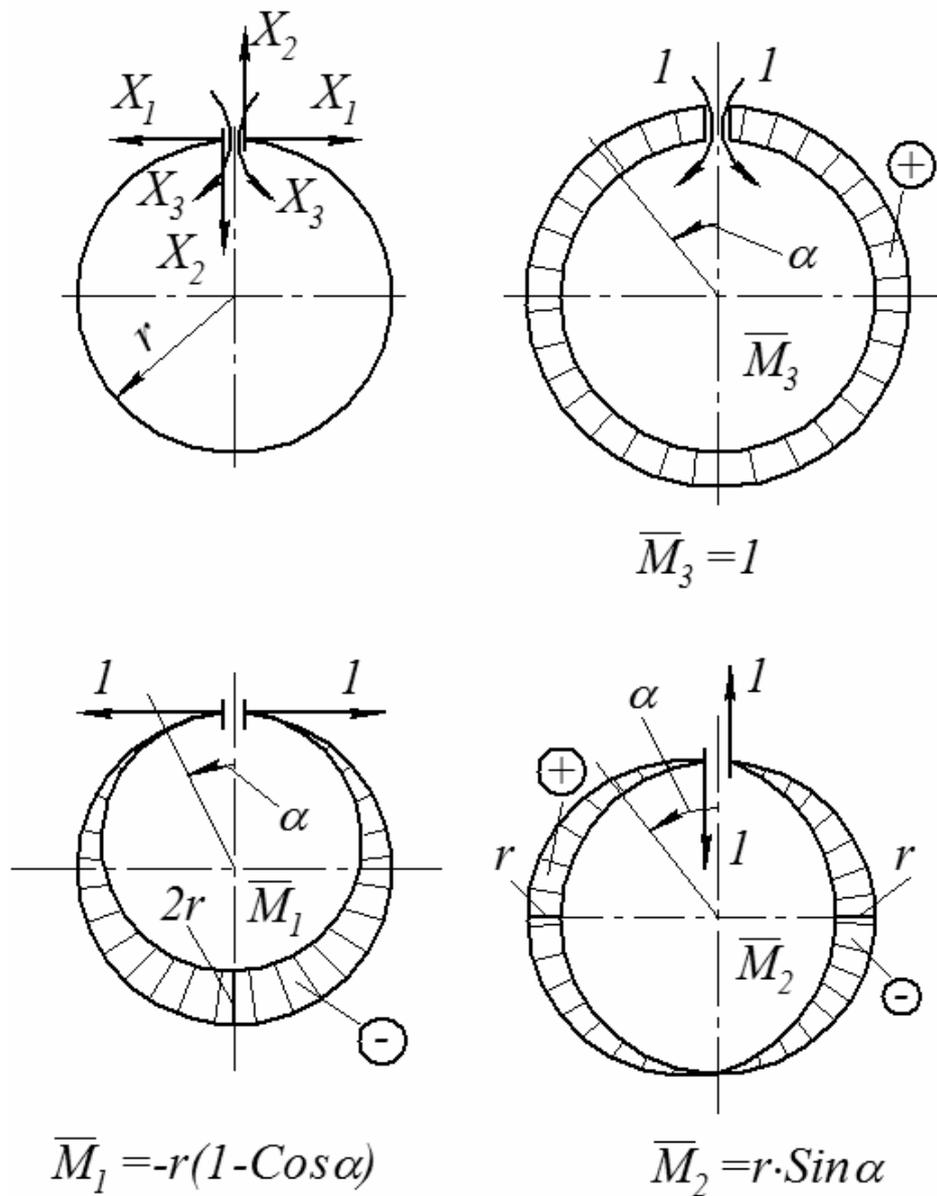


Рисунок 8

Полное значение усилий в сечении α определим, суммируя усилия по всей дуге. С учетом сосредоточенных сил F_i , действующих в промежутке от 0° до α , запишем:

$$M_F = -\int_0^\alpha T_\varphi [Rr \cos(\alpha - \varphi)] r d\varphi + \sum_{i=1}^n F_i l_i,$$

$$N_F = -\int_0^\alpha T_\varphi \cos(\alpha - \varphi) r d\varphi + \sum_{i=1}^n F_{iz},$$

$$Q_F = -\int_0^\alpha T_\varphi \sin(\alpha - \varphi) r d\varphi + \sum_{i=1}^n F_{iy},$$

где F_{iz} , F_{iy} — проекции на оси z и y сечения.

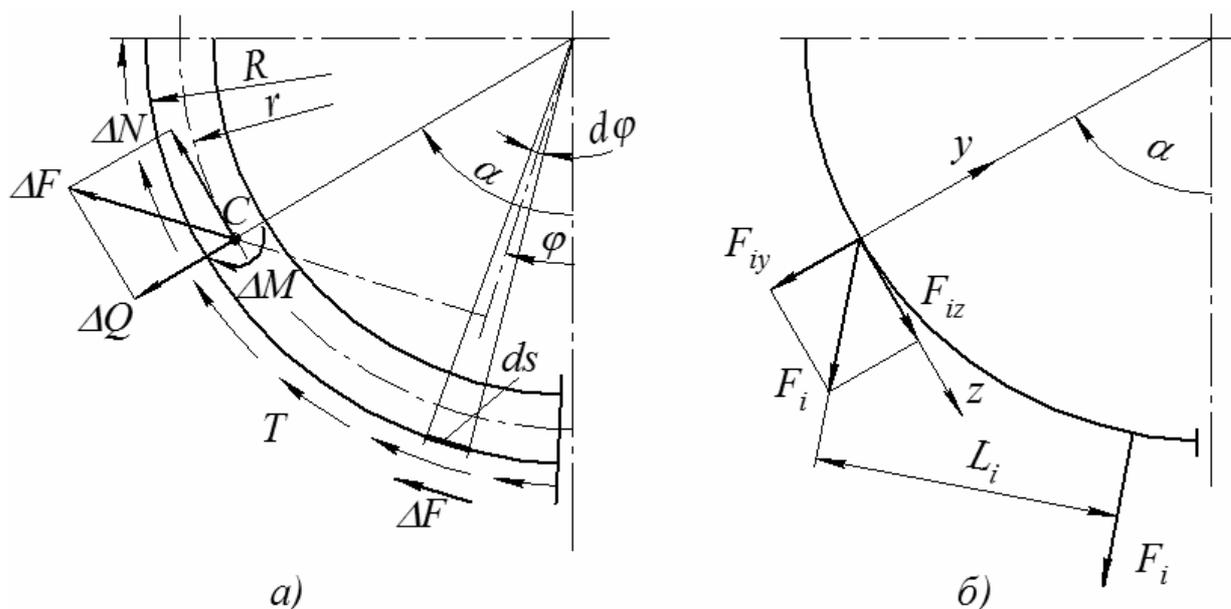


Рисунок 9

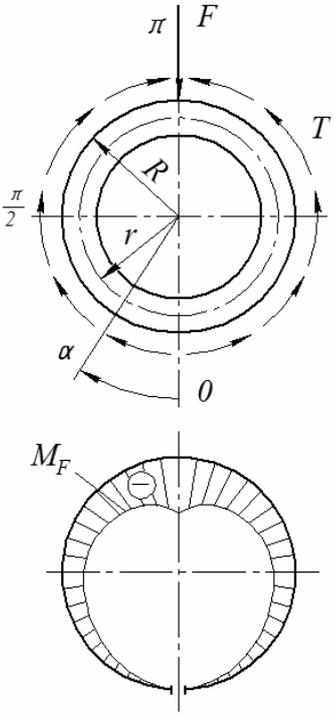
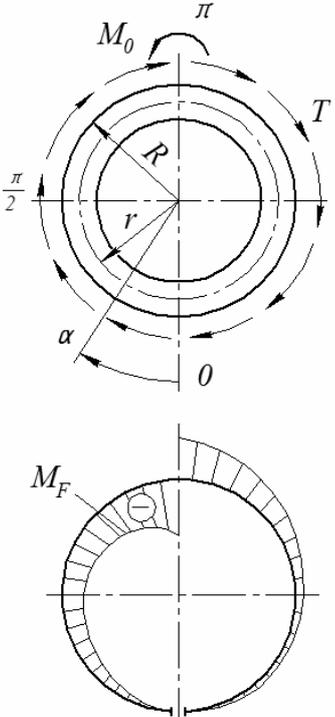
Для двух схем нагружения данные интегралы приведены (для разрезанного щпангоута) в таблице 1 [2].

Решая систему канонических уравнений, находим:

$$X_1 = \frac{\Delta_{3F}\delta_{13} - \Delta_{1F}\delta_{33}}{\delta_{11}\delta_{33} - \delta_{13}\delta_{31}}; \quad X_2 = -\frac{\Delta_{2F}}{\delta_{22}}; \quad X_3 = \frac{\Delta_{1F}\delta_{31} - \Delta_{3F}\delta_{11}}{\delta_{11}\delta_{33} - \delta_{13}\delta_{31}}.$$

После вычисления коэффициентов влияния δ_{ij} , Δ_{iF} и неизвестных усилий X_i определяются внутренние усилия для произвольного сечения замкнутого щпангоута.

Таблица 1

Схема нагружения	Расчетные формулы
	$T = \frac{F}{\pi R} \sin \alpha$ $M_F = -\frac{Fr}{2\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right]$ $N_F = -\frac{F}{2\pi} \alpha \sin \alpha$ $Q_F = -\frac{F}{2\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)$
	$T = \frac{M_0}{2\pi R^2}$ $M_F = -\frac{M_0}{2\pi} \left(\alpha - \frac{r}{R} \sin \alpha \right)$ $N_F = -\frac{M_0}{2\pi R} \sin \alpha$ $Q_F = -\frac{M_0}{2\pi R} (1 - \cos \alpha)$

$$M = M_F + X_1 M_1 + X_2 M_2 + X_3 M_3,$$

$$N = N_F + X_1 \cos \alpha - X_2 \sin \alpha,$$

$$Q = Q_F + X_1 \sin \alpha + X_2 \cos \alpha,$$

где M_F , N_F , Q_F — изгибающий момент, осевая сила, поперечная сила от внешних нагрузок в разрезанном шпангоуте.

После определения M , N и Q проводим эскизное проектирование, а затем проверочный расчет, при котором находим нормальные и касательные напряжения в любом сечении шпангоута.

3 Самостоятельная работа

3.1 Пример 1

По исходным данным провести проектировочный расчет на прочность силового шпангоута задней точки крепления киля (узел крепления моментный) для полетного случая «В».

Дано:

$R = 0,8$ м, $r = 0,7$ м — наружный и средний радиусы шпангоута.

$L_{ГО} = 6$ м — расстояние от центра масс самолета до центра давления аэродинамической нагрузки горизонтального оперения.

$\varepsilon_z = 4$ сек⁻² — угловое ускорение самолета относительно оси z .

$i_z = 2,27$ м — радиус инерции самолета относительно оси z .

$G = 98$ кН — сила тяжести самолета.

Схема крепления киля к фюзеляжу показана на рисунке 10.

Решение:

Определяем момент поверхностных сил из соотношения:

$$\varepsilon_z = \frac{M_z}{I_z};$$

$$M_z = \varepsilon_z I_z = 4 \frac{G}{g} i_z^2 = 4 \frac{98000}{9,8} 2,27^2 = 206116 \text{ Н} \cdot \text{м} = 206,116 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Находим маневренную нагрузку горизонтального оперения:

$$\Delta F_{\text{м.ГО}} = \frac{M_z}{L_{\text{ГО}}} = \frac{206116}{6} = 34352 \text{ Н}.$$

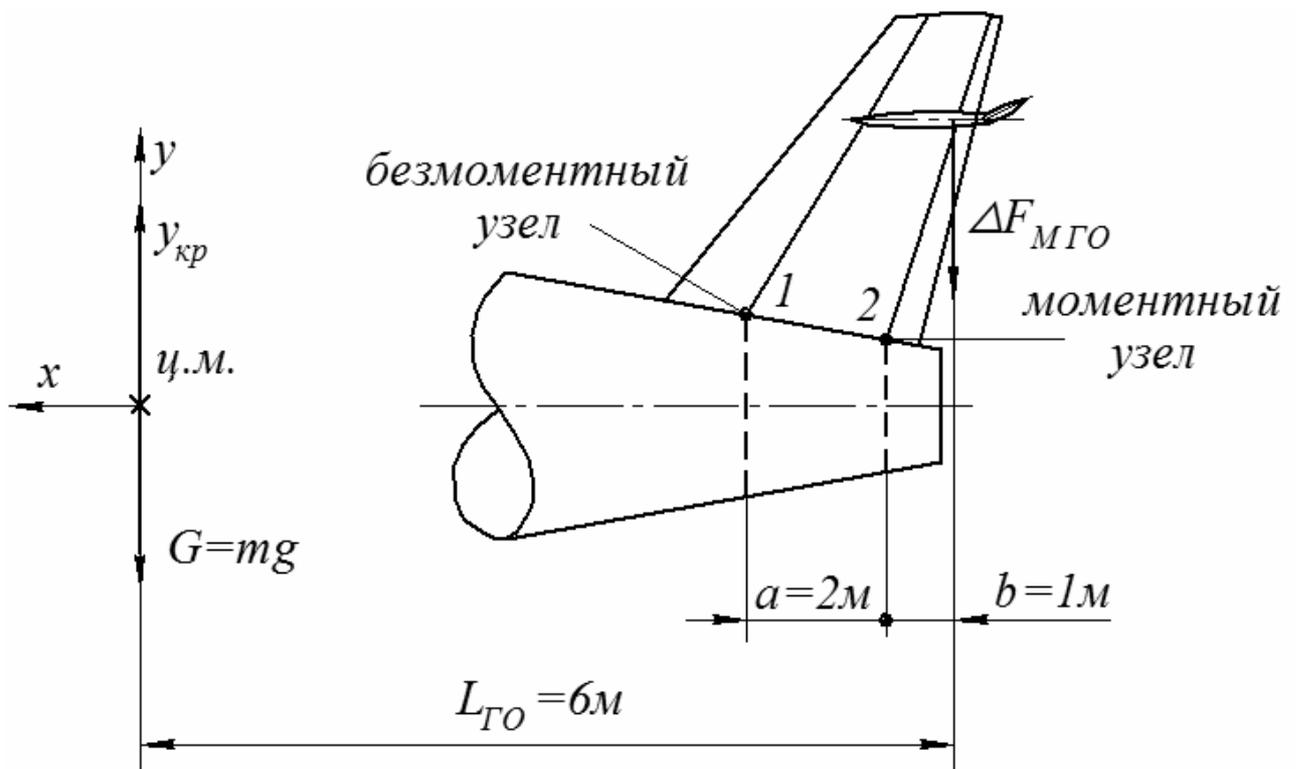


Рисунок 10

Определяем реакцию безмоментного узла крепления кила:

$$2R_1 = \Delta F_{\text{м.ГО}} \cdot b \quad (\text{рисунок 10})$$

$$R_1 = \frac{34352 \cdot 1}{2} = 17176 \text{ Н}.$$

Определяем реакцию моментного узла крепления кия:

$$2R_2 = \Delta F_{M.ГО} \cdot (a + b); \quad R_2 = \frac{34352 \cdot 3}{2} = 51528 \text{ Н.}$$

Принимаем следующую расчетную схему нагружения шпангоута (рисунок 11) где F - реакция R_1 или R_2 .

Выбираем основную статически определимую систему нагружения, выбрав место разреза. В месте разреза прикладываем неизвестные усилия, отбросив те, значения которых равны нулю. В нашем случае $X_2 = 0$ (в силу симметрии нагружения). Основная система приведена на рисунке 12.

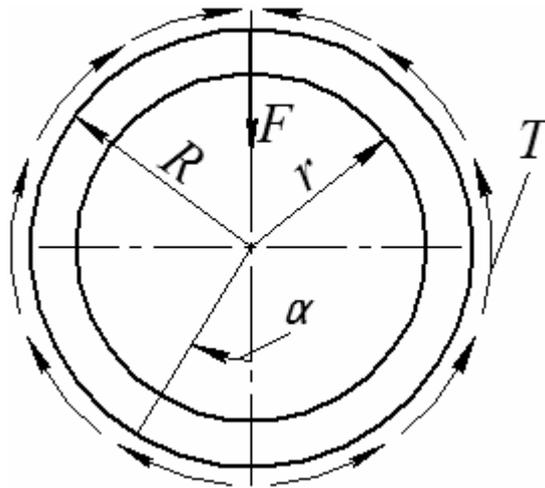


Рисунок 11

Определяем выражение изгибающих моментов M_F от внешних нагрузок для разрезанного шпангоута.

$$M_F = -\frac{Fr}{2\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right].$$

По данной зависимости строим эпюру M_F (рисунок 12б) Принимая неизвестные усилия равными единице, с помощью интеграла Мора (при $EI_x = const$) вычислим коэффициенты влияния от единичного нагружения.

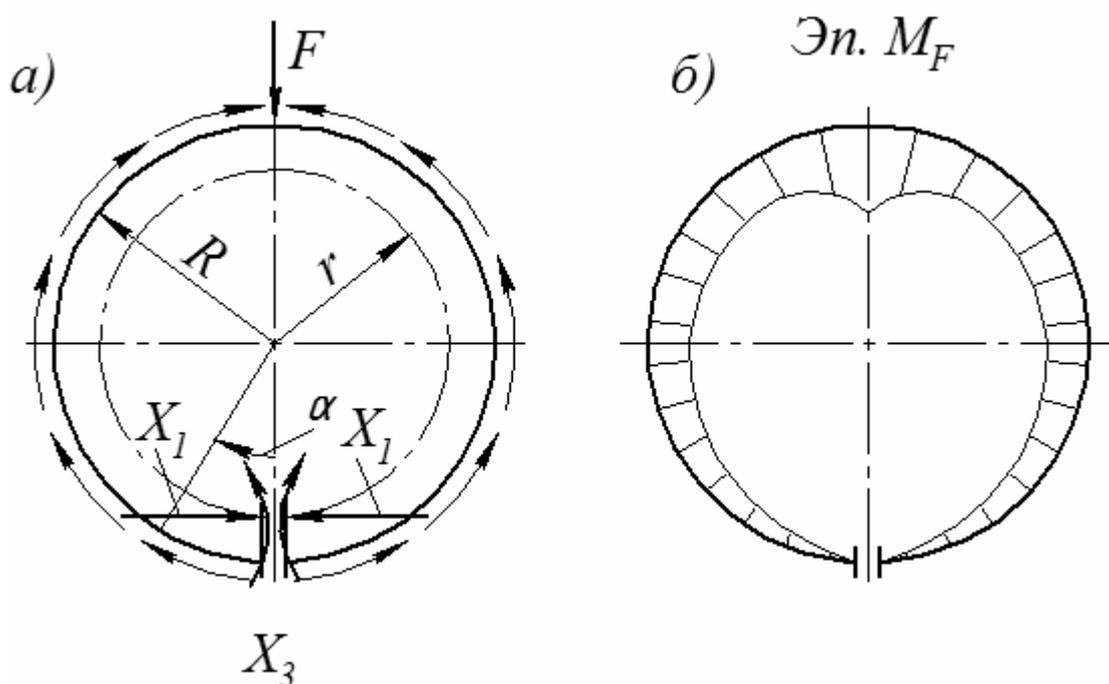


Рисунок 12

Значения моментов при единичном нагружении приведены на рисунке 8.

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{1}{EI_x} \int \overline{M}_1^2 r d\alpha = \frac{1}{EI_x} \int r^2 (1 - \cos \alpha)^2 r d\alpha = \frac{r^3 (2\pi - 2 \cdot 0 + \pi)}{EI_x} = \\ &= \frac{3\pi r^3}{EI_x} = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 0,7^3}{EI_x} = \frac{3,23}{EI_x} \text{ м} \\ \delta_{33} &= \frac{1}{EI_x} \int \overline{M}_3^2 r d\alpha = \frac{1}{EI_x} \int 1^2 r d\alpha = \frac{2\pi r}{EI_x} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,7}{EI_x} = \frac{4,4}{EI_x} \text{ м} \\ \delta_{13} = \delta_{31} &= \frac{1}{EI_x} \int \overline{M}_1 \overline{M}_3 r d\alpha = \frac{r}{EI_x} \int r (1 - \cos \alpha) \cdot 1 \cdot d\alpha = \frac{r^2}{EI_x} (2\pi - 0) = \\ &= \frac{2\pi r^2}{EI_x} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,7^2}{EI_x} = \frac{3,07}{EI_x} \text{ м.} \end{aligned}$$

Вычислим перемещения от внешней нагрузки Δ_{1F} , Δ_{3F} , соответствующим умножением эпюр единичных и внешних сил

$$\begin{aligned}\Delta_{1F} &= \frac{1}{EI_x} \int_0^{2\pi} M_F \bar{M}_1 r d\alpha; \\ \int_0^{2\pi} M_F \bar{M}_1 r d\alpha &= -r \int_0^{2\pi} (1 - \cos \alpha) \frac{F}{2\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] r d\alpha = \\ &= -\frac{FRr^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} (1 - \cos \alpha) \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] r d\alpha = \\ &= -\frac{FRr^2}{2\pi} \frac{2R}{r} \int_0^{2\pi} (1 - \cos \alpha)^2 d\alpha + \frac{FRr^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \alpha \sin \alpha (1 - \cos \alpha) d\alpha = \\ &= \frac{FRr^2}{\pi} (2\pi - 2 \cdot 0 + \pi) + \frac{FRr^2}{2\pi} \left(2\pi + \frac{\pi}{2} \right) = -3FRr^2 + \frac{5}{4}FrR^2 = -31,7 \text{ кН} \cdot \text{м}^3,\end{aligned}$$

$$\Delta_{1F} = -\frac{31,7}{EI_x} \text{ м},$$

$$\begin{aligned}\Delta_{3F} &= \frac{1}{EI_x} \int_0^{2\pi} M_F \bar{M}_3 r d\alpha, \\ \int_0^{2\pi} M_F \bar{M}_3 r d\alpha &= -\frac{Fr^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] d\alpha = -\frac{Fr^2}{2\pi} \frac{2R}{r} \int_0^{2\pi} (1 - \cos \alpha) d\alpha \\ &+ \frac{Fr^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \alpha \sin \alpha d\alpha = -\frac{Fr^2}{2\pi} \frac{2R}{r} (2\pi - 0) + \frac{Fr^2}{2\pi} 2\pi = -32,46 \text{ кН} \cdot \text{м}^2,\end{aligned}$$

$$\Delta_{3F} = -\frac{32,46}{EI_x} \text{ м}.$$

Составляем систему канонических уравнений

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{13}X_3 + \Delta_{1F} = 0 \\ \delta_{31}X_1 + \delta_{33}X_3 + \Delta_{3F} = 0. \end{cases}$$

Решая ее, находим:

$$X_1 = \frac{\Delta_{3F}\delta_{13} - \Delta_{1F}\delta_{33}}{\delta_{11}\delta_{33} - \delta_{13}\delta_{31}} = 14,585 \text{ кН},$$

$$X_3 = \frac{\Delta_{1F}\delta_{31} - \Delta_{3F}\delta_{11}}{\delta_{11}\delta_{33} - \delta_{13}\delta_{31}} = -2,88 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

По выражению M_Σ определяем величину изгибающих моментов по сечениям

$$M_\Sigma = -\frac{Fr}{2\pi} \left[\frac{2R}{r}(1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] + X_1 r (1 - \cos \alpha) + X_3$$

при $\alpha = 0$	при $\alpha = \frac{\pi}{2}$	при $\alpha = \pi$
$M_\Sigma = -2,88 \text{ кН} \cdot \text{м}$	$M_\Sigma = 3,28 \text{ кН} \cdot \text{м}$	$M_\Sigma = -8,62 \text{ кН} \cdot \text{м}.$

Вычисляем N_F для статически неопределимой системы.

Нормальная сила по сечениям шпангоута

$$N = N_F + X_1 \cos \alpha = -\frac{F}{2\pi} \alpha \sin \alpha + X_1 \cos \alpha :$$

$$\alpha = 0; \quad N_{\alpha=0} = 14,58 \text{ кН}$$

$$\alpha = 90^\circ; \quad N_{\alpha=90^\circ} = -12,88 \text{ кН}$$

$$\alpha = 180^\circ; \quad N_{\alpha=180^\circ} = -14,58 \text{ кН}.$$

Строим эпюру N (рисунок 13 б)

Вычисляем Q_F для статически неопределимой системы.

Для статически определимой системы перерезывающее усилие Q по сечениям шпангоута от внешней нагрузки определяется по формуле:

$$Q_F = -\frac{F}{2\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha).$$

Перерезывающая сила по сечениям определяется по формуле

$$Q = Q_F + X_1 \sin \alpha$$

при $\alpha=0$

$$Q_{\alpha=0} = -\frac{F}{2\pi}(\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) + 12,28 \sin \alpha = 0$$

при $\alpha=90^\circ$

$$Q_{\alpha=90^\circ} = -\frac{51,528}{2\pi} \left(1 - \frac{\pi}{2} \cdot 0\right) + 14,585 \cdot 1 = 6,38 \text{ кН}$$

при $\alpha=180^\circ$

$$Q_{\alpha=180^\circ} = -\frac{51,528}{2\pi} [-\pi \cdot (-1)] + 14,585 \cdot 1 = 25,76 \text{ кН.}$$

Эпюра перерезывающих сил показана на рисунке 13 в.

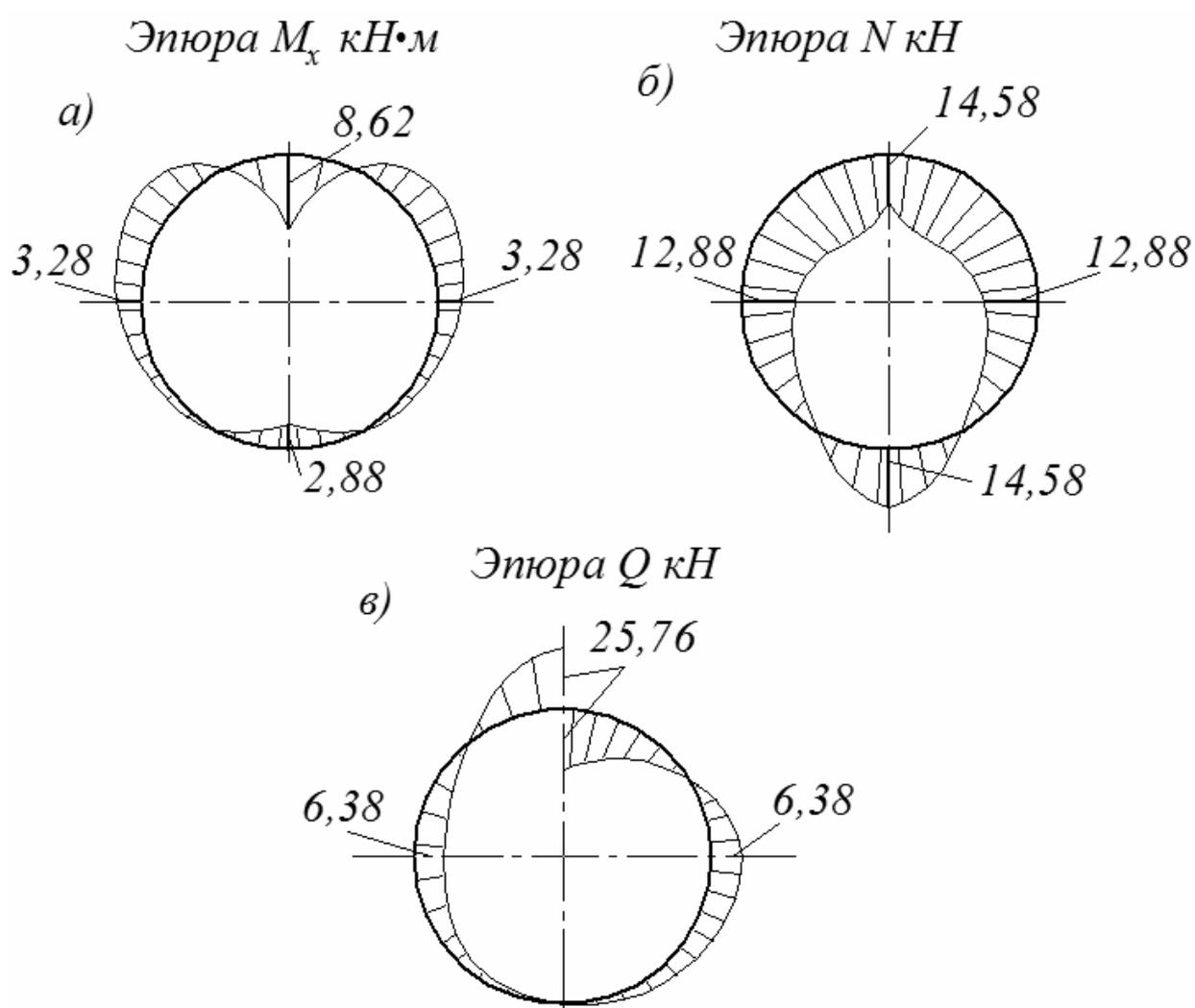


Рисунок 13

По максимальным внутренним силовым факторам подбираем геометрические параметры сечения шпангоута.

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -8,62 \text{ кН} \cdot \text{м} \\ N &= -14,58 \text{ кН} \\ Q &= 25,76 \text{ кН} \end{aligned} \right\} \text{ при } \alpha = 180^\circ.$$

Нормальные усилия на пояса шпангоута

$$N_F = N_{сж} = \frac{-8,62 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^{-2}} - \frac{14,58 \cdot 10^3}{2} = -50,45 \text{ кН}$$
$$N_F = N_{раст} = 35,75 \text{ кН.}$$

Площадь сечения пояса

$$A = \frac{N_F}{0,95 \cdot \sigma_u} = \frac{50,45 \cdot 10^3}{0,95 \cdot 400 \cdot 10^6} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Данной площади удовлетворяет профиль Пр—109 №2 (тавр):

$A = 1,291 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $\delta = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $\delta_1 = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, (δ_1 — вертикальная полка), материал — Д16Т

Погонная нагрузка стенки шпангоута

$$q = \frac{Q}{H} = \frac{25760}{0,2} = 129 \text{ кН/м.}$$

Толщина стенки

$$\delta_{cm} \geq \frac{q}{\tau_{cr}} = \frac{129 \cdot 10^3}{55 \cdot 10^6} = 0,233 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\tau_{cr} = \tau_u \frac{1+\nu}{1+\nu+\nu^2}; \quad \nu = \frac{\tau_u}{\tau_s} = \frac{0,6 \cdot 490 \cdot 10^6}{58 \cdot 10^6} = 5,06$$

$$\tau_s = \frac{0,9kE}{\left(\frac{b}{\delta}\right)^2} = \frac{0,9 \cdot 9,4 \cdot 0,69 \cdot 10^6}{\left(\frac{0,2}{2 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 58 \text{ МПа.}$$

$b = 0,2$ (м); $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м — принимаем предварительно,

$k = 5,6 + \frac{3,8}{\left(\frac{a}{b}\right)^2} = 9,4$ — для квадратной пластины при $a = b$.

$$\tau_{cr} = 235 \frac{1+5,06}{1+5,06+(5,06)^2} = 45 \text{ МПа}$$

$$\delta_{cm} = \frac{129 \cdot 10^3}{45 \cdot 10^6} = 0,28 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Принимаем по стандарту $\delta_{cm} = 0,3 \cdot 10^{-2}$ м.

Определим критическую силу стойки (между поясами шпангоута с шагом 0,2 м).

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l^2} = Q = 25,82 \text{ кН}$$

$$I \geq \frac{25820 \cdot (0,2)^2}{(3,14)^2 \cdot 0,69 \cdot 10^6} = 151,8 \text{ м}^4.$$

Подбираем профиль Пр—100 №52 $B = H = 18$ мм, $\delta = 3$ мм,
 $I_x = 1,63 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$. Профили устанавливаем попарно. Нагрузка на заклепку
 крепления профилей со стенкой шпангоута равна:

$$F_3 = q \cdot t = 129 \cdot 10^3 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} = 1,613 \text{ кН},$$

$t = 0,025 \text{ м}$ — устанавливаем двухрядные заклёпки в шахматном порядке.

Площадь сечения заклёпки:

$$A_3 = \frac{F_3}{0,63\sigma_u} = \frac{1613}{0,63 \cdot 392,4 \cdot 10^6} = 0,065 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$d \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 0,065 \cdot 10^{-4}}{3,14}} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

таким образом, диаметр заклёпки $d = 3 \text{ мм}$.

На этом проектировочный расчет заканчивается. На рисунке 14 представлен эскиз силового шпангоута.

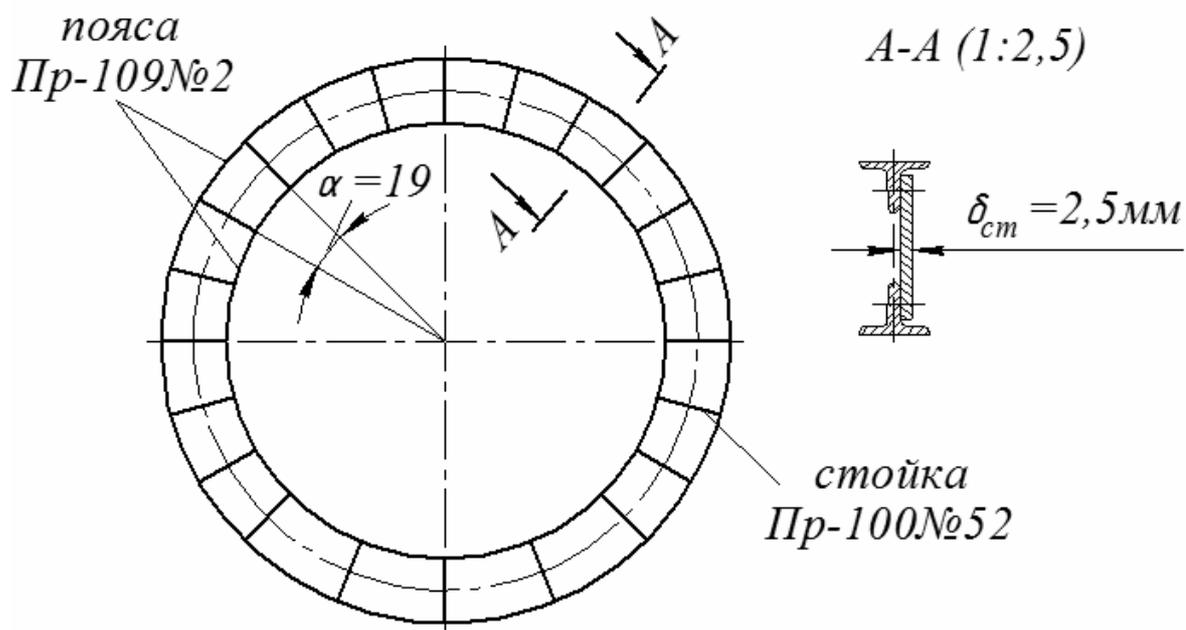


Рисунок 14

3.2 Пример 2

По исходным данным провести проектировочный расчет на прочность силового шпангоута задней точки крепления киля (узел крепления моментный) для полетного случая маневренная нагрузка со скольжением.

Дано:

$R = 0,8$ м, $r = 0,7$ м — наружный и средний радиусы шпангоута.

$L_{BO} = 6$ м — расстояние от центра масс самолета до центра давления аэродинамической нагрузки вертикального оперения.

$\varepsilon_y = 1,5 \text{ сек}^{-2}$ — угловое ускорение самолета относительно оси y .

$n_{z_0} = 0,8g$ — перегрузка в центре масс самолета

$i_y = 0,1(L+l)$ — радиус инерции самолета относительно оси y .

$G = 98$ кН — сила тяжести самолета.

$l \approx 6$ м — размах крыла.

$L_{нос} = 4$ м — расстояние от центра масс самолета до центра давления аэродинамической нагрузки носовой части фюзеляжа.

$h = 2$ м — расстояние от оси фюзеляжа самолета до центра давления аэродинамической нагрузки вертикального оперения.

Схемы нагружения и крепления киля к фюзеляжу показаны на рисунке 15. На самолет действует сила от вертикального оперения:

$$F_{BO} = F_{BO.ур} + \Delta F_{BO}$$

и аэродинамическая нагрузка носовой части

$$F_{нос} = F_{BO.ур} \frac{L_{BO}}{L_{нос}}; \quad F_{нос} + F_{BO.ур} = G \cdot n_{z_0}$$

$$F_{BO.ур} = 0,8 \cdot 98 - F_{нос} = 0,8 \cdot 98 - F_{BO.ур} \cdot \frac{6}{4}$$

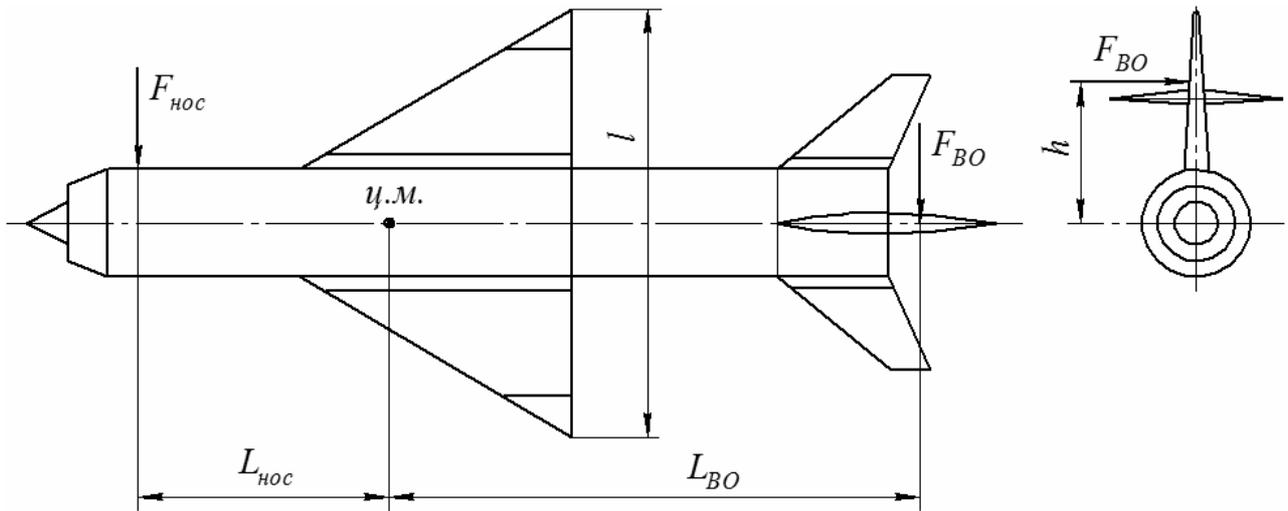


Рисунок 15

$$2,5F_{BO.ур} = 0,8 \cdot 98; \quad F_{BO.ур} = \frac{0,8 \cdot 98}{2,5} = 31,36 \text{ кН.}$$

Из соотношения:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta F_{BO} \cdot L_{BO}}{I_y}$$

определяем $\Delta F_{BO} = \frac{\varepsilon_y \cdot I_y}{L_{BO}}$. Массовый момент инерции самолета равен:

$$I_y = \frac{G}{g} i_y^2 = \frac{98}{9,8} \cdot (1,6)^2 = 25,6 \text{ кН} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2$$

$$i_y = 0,1(L + l) = 0,1(10 + 6) = 1,6 \text{ м,}$$

L и l — длина фюзеляжа и размах крыла.

$$\Delta F_{BO} = 31,36 + 6,4 = 37,76 \text{ кН.}$$

Схема расположения силовых шпангоутов крепления киля приведена на рисунке 16

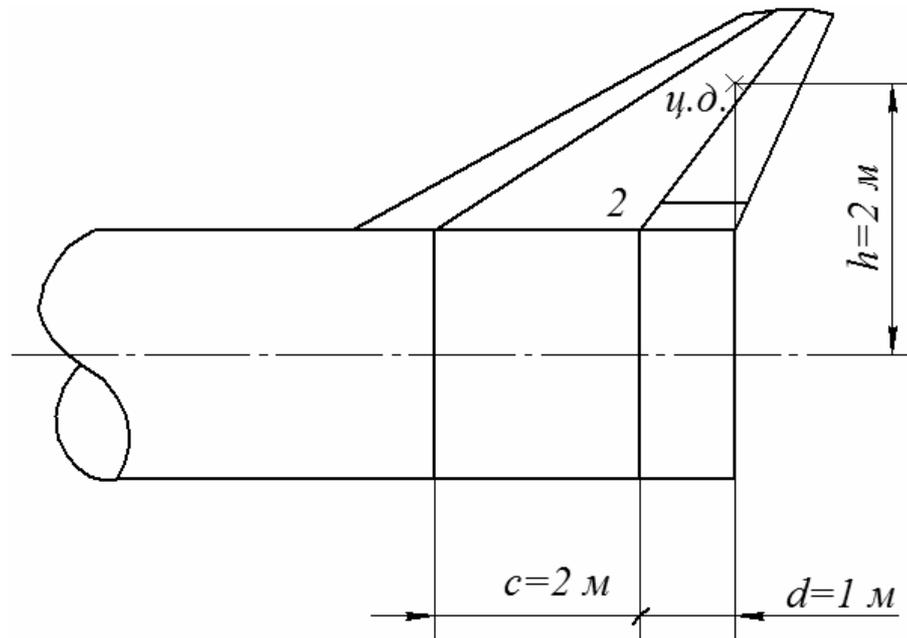


Рисунок 16

Нагрузки на силовой моментный шпангоут:

$$M_{кр} = F_{BO} \cdot h = 37,76 \cdot 2 = 75,52 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$R_2 \cdot 2 = F_{BO} \cdot 3; \quad R_2 = F = 37,76 \cdot 1,5 = 56,64 \text{ кН.}$$

Нагрузку, действующую на силовой шпангоут, можно представить в виде суммы симметричной и обратно симметричной нагрузок. В случае обратно-симметричного нагружения усилия X_1 и X_3 равны нулю, и задача станет один раз статически неопределимой. Схема нагружения силового шпангоута представлена на рисунке 17.

Методика определения внутренних силовых факторов для схемы нагружения на рисунке 17б была изложена выше.

Рассмотрим схему нагружения на рисунке 17в.

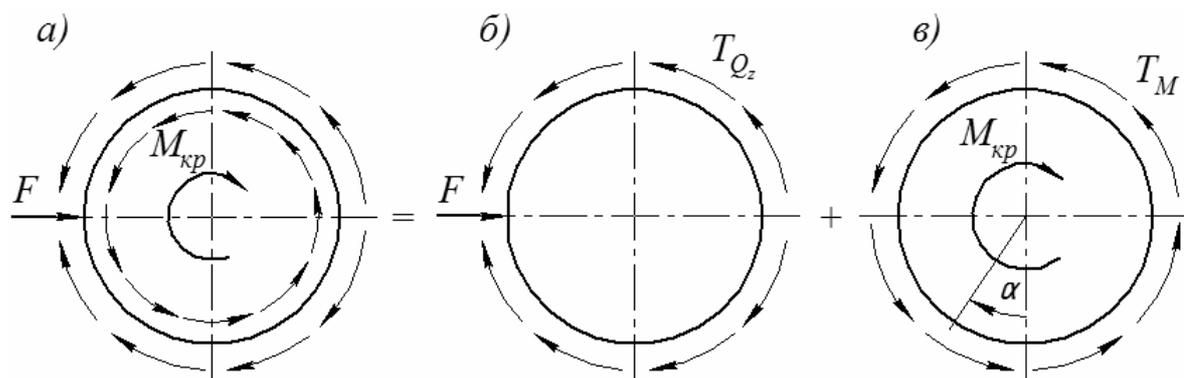


Рисунок 17

Система один раз статически неопределима. Каноническое уравнение метода сил запишется в виде:

$$X_2 \delta_{22} + \Delta_F = 0.$$

Эпюры моментов от единичной силы $\bar{X}_2 = 1$ и внешнего момента $M_{кр}$ для статически определимой системы представлены на рисунках 18а и 18б.

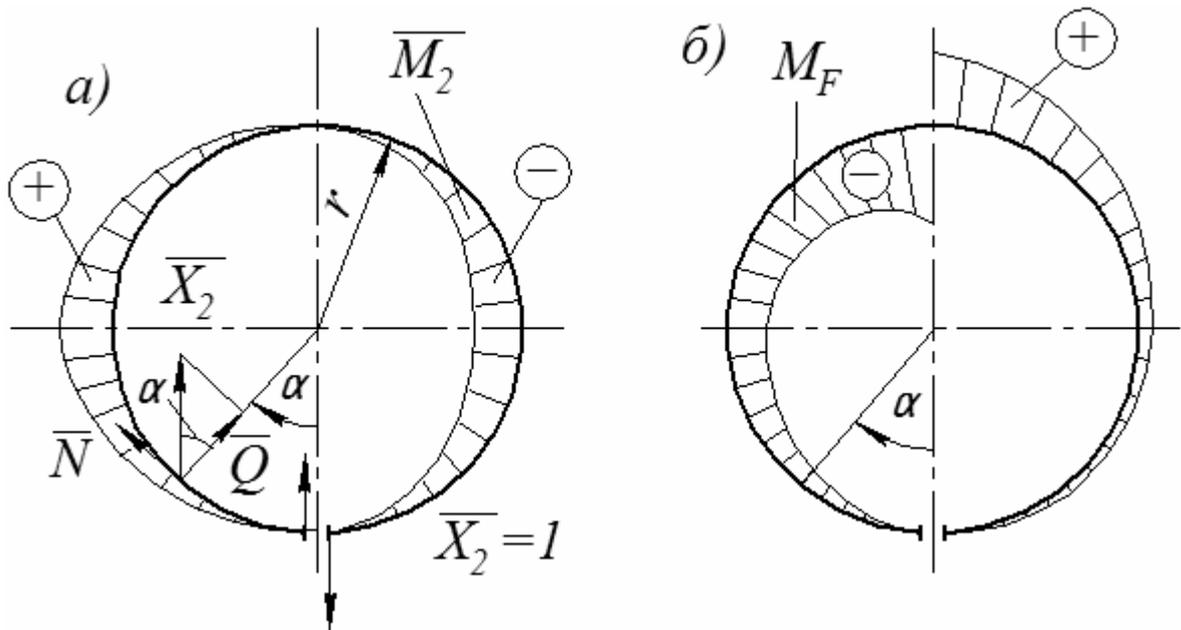
Вычислим интегралы:

$$\int \bar{M}_2^2 r d\alpha = \int r^2 \sin^2 \alpha r d\alpha = r^3 \pi = (0,7)^3 \cdot 3,14 = 1,07 \text{ м}^3$$

$$\begin{aligned} \int M_F \bar{M}_2 r d\alpha &= -\frac{M_{кр} r^2}{2\pi} \int \left(\alpha - \frac{r}{R} \sin \alpha \right) \sin \alpha d\alpha = \\ &= -\frac{M_{кр} r^2}{2\pi} \left[2\pi - \frac{r}{R} \pi \right] = -\frac{75,52}{6,28} \left(6,28 - \frac{0,7}{0,8} 3,14 \right) = -42,48 \text{ кН} \cdot \text{м}^3 \end{aligned}$$

$$\int \bar{M}_2^2 r d\alpha = \int r^2 \sin^2 \alpha \cdot r d\alpha = r^3 \pi = 0,7^3 \cdot 3,14 = 1,07 \text{ м}^3$$

$$X_2 = -\frac{\Delta_{2F}}{\delta_{22}} = \frac{42,48}{1,07} = 39,7 \text{ кН.}$$



$$\begin{aligned} \overline{M}_2 &= r \sin \alpha \\ \overline{Q}_2 &= 1 \cdot \cos \alpha \\ \overline{N}_2 &= -1 \cdot \sin \alpha \end{aligned}$$

$$M_F = -\frac{M_{kp}}{2\pi} \left(\alpha - \frac{r}{R} \sin \alpha \right)$$

$$N_F = -\frac{M_{kp}}{2\pi R} \sin \alpha$$

$$Q_F = -\frac{M_{kp}}{2\pi R} (1 - \cos \alpha)$$

Рисунок 18

После вычисления коэффициентов влияния и неизвестного усилия X_2 определяются искомые внутренние усилия для произвольного сечения замкнутого кольца:

$$M_x = M_F + X_2 \overline{M}_2 = -\frac{M_{kp}}{2\pi} \left(\alpha - \frac{r}{R} \sin \alpha \right) + 39,7 \cdot 0,7 \cdot \sin \alpha$$

$$N = N_F - X_2 \sin \alpha = \frac{M_{kp}}{2\pi R} \sin \alpha + 15,02 \cdot \sin \alpha$$

$$Q = Q_F + X_2 \cos \alpha = -\frac{M_{kp}}{2\pi R} (1 - \cos \alpha) + 15,02 \cdot \cos \alpha.$$

Задаваясь углом α , строим эпюры M_x , N , Q для замкнутого шпангоута (рисунок 19)

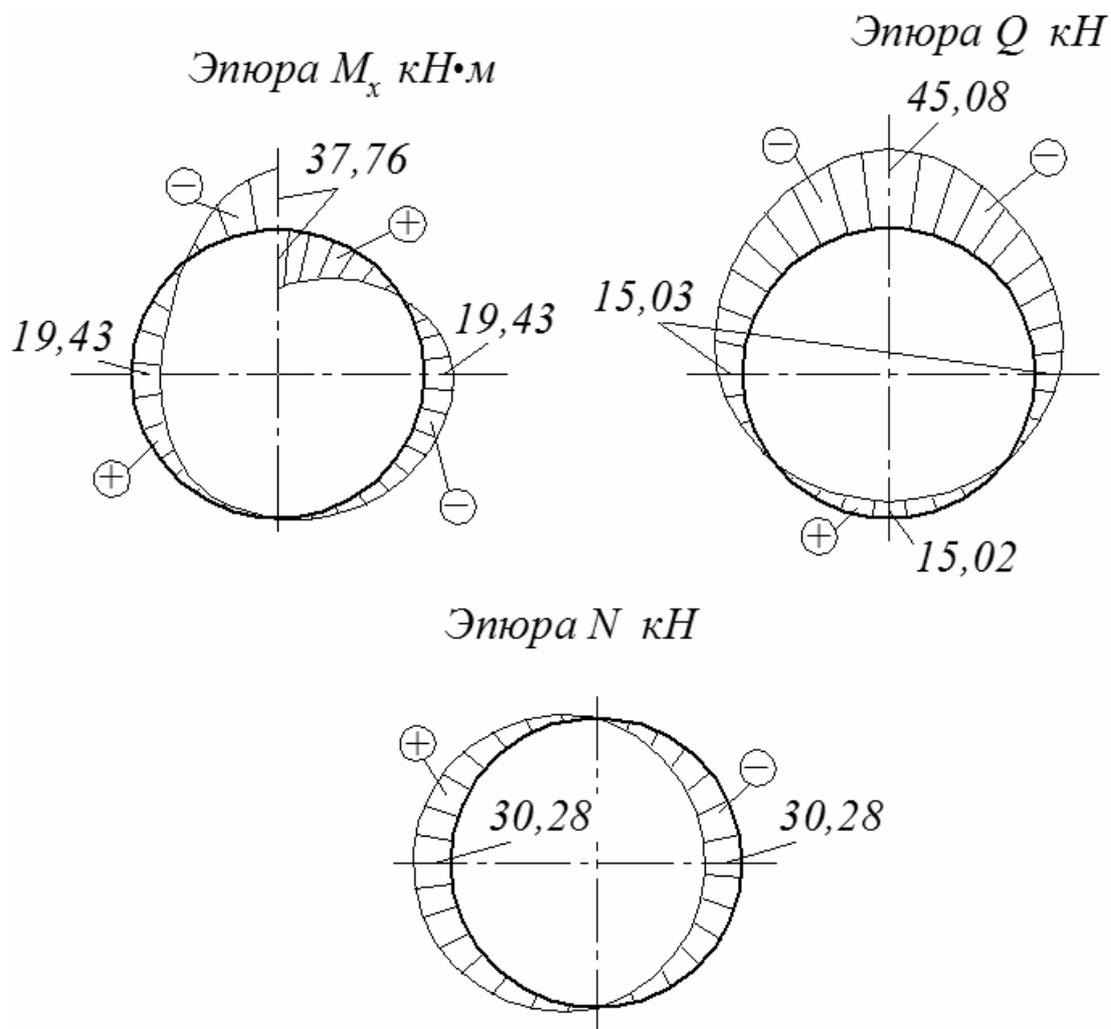


Рисунок 19

$$\alpha = 0 \quad M_x = -\frac{75,52}{6,28}(0-0) + 39,7 \cdot 0,7 \cdot 0 = 0$$

$$N = \frac{75,52}{6,28 \cdot 0,8} \cdot 0 + 15,02 \cdot 0 = 0$$

$$Q = -\frac{75,52}{6,28 \cdot 0,8}(1-1) + 15,02 \cdot 1 = 15,02 \text{ кН}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad M_x = -\frac{75,52}{6,28} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{0,7}{0,8} \cdot 1 \right) + 39,7 \cdot 0,7 \cdot 1 = 19,43 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$N = \frac{75,52}{6,28 \cdot 0,8} \cdot 1 + 15,02 \cdot 1 = 30,23 \text{ кН}$$

$$Q = -\frac{75,52}{6,28 \cdot 0,8} (1 - 0) + 15,02 \cdot 0 = -15,03 \text{ кН}$$

$$\alpha = \pi \quad M_x = -\frac{75,52}{6,28} \left(\pi - \frac{0,7}{0,8} \cdot 0 \right) + 39,7 \cdot 0,7 \cdot 0 = -37,76 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$N = \frac{75,52}{6,28 \cdot 0,8} \cdot 0 + 15,02 \cdot 0 = 0 \text{ кН}$$

$$Q = -\frac{75,52}{6,28 \cdot 0,8} (1 + 1) + 15,02 \cdot (-1) = -45,08 \text{ кН.}$$

Эпюры M_x , N , Q — для схемы нагружения, представленной на рисунке 17(б), получим, уменьшив ординаты эпюр на рисунке 13 пропорционально нагрузкам F_i . Полученные эпюры представлены на рисунке 20.

Суммарные В.С.Ф. при $\alpha = 180^\circ$

$$M_\Sigma = 37,76 + 6,3 = 44,06 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$Q_\Sigma = 45,08 + 18,8 = 64 \text{ кН}$$

$$N_\Sigma = 3 \text{ кН.}$$

Нормальные усилия на пояса шпангоута:

$$N_{раст} = N_{сж} = \frac{M_\Sigma}{0,9H} + \frac{N_\Sigma}{2} = \frac{44,06}{0,9 \cdot 0,2} + \frac{3}{2} = 246 \text{ кН.}$$

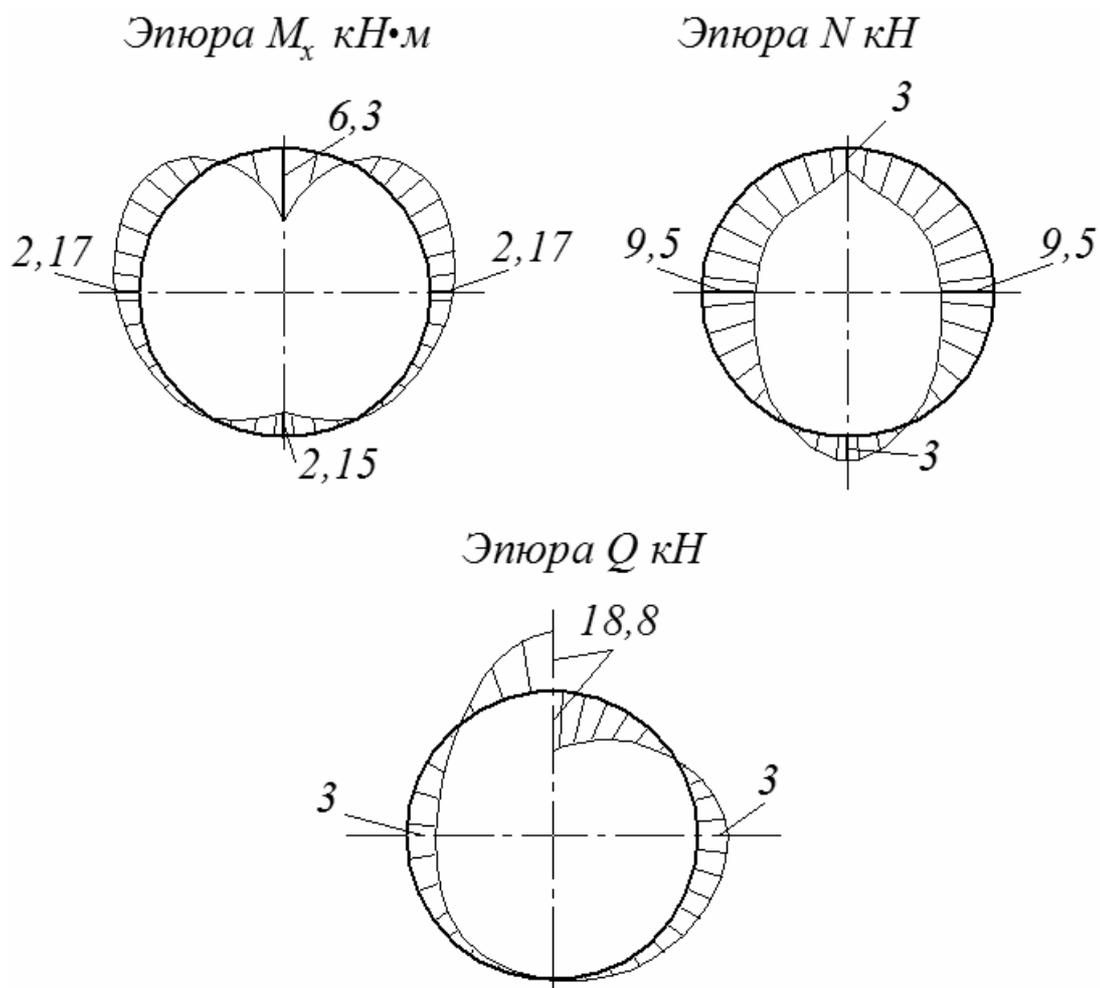


Рисунок 20

Площадь сечения пояса A равна:

$$A = \frac{N_F}{0,95\sigma_u} = \frac{246 \cdot 10^3}{0,95 \cdot 392,4 \cdot 10^6} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Данной площади удовлетворяют два профиля Пр-201 №1. $A = 3,489 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$,
 $2A = 6,978 \cdot 10^{-4} \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Толщину стенки шпангоута определим по формуле:

$$q = \frac{Q_{\Sigma}}{H} = \frac{64 \cdot 10^3}{0,2} = 320 \text{ кН/м}$$

$$\delta_{cm} = \frac{q}{\tau_{cr}} = \frac{320 \cdot 10^3}{63,8 \cdot 10^6} = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Определим τ_{cr} :

$$\tau_{cr} = \tau_u \frac{1+\nu}{1+\nu+\nu^2}; \quad \nu = \frac{\tau_u}{\tau_{\vartheta}}; \quad \tau_u = 0,6\sigma_u$$

$$k = 5,6 + \frac{3,8}{\left(\frac{a}{b}\right)^2} = 9,4 \text{ при } a = b = 0,2 \text{ м}$$

$$\tau_{\vartheta} = \frac{0,9kE}{\left(\frac{b}{\delta}\right)^2} = \frac{0,9 \cdot 9,4 \cdot 0,7 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{\left(\frac{0,2}{0,5 \cdot 10^{-2}}\right)^2} = 363 \text{ МПа}$$

$$\nu = \frac{0,6 \cdot 392,4 \cdot 10^6}{363 \cdot 10^6} = 0,64; \quad \tau_{cr} = 235 \cdot 10^6 \frac{1+0,64}{1+0,64+(0,64)^2} = 188 \text{ МПа};$$

принимая $\tau_{cr} = 188 \text{ МПа}$

$$\delta_{cm} = \frac{320 \cdot 10^3}{188 \cdot 10^6} = 0,17 \cdot 10^{-4} \text{ (м)} \approx 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\tau_{\vartheta} = \frac{0,9 \cdot 9,4 \cdot 0,7 \cdot 10^6}{\left(\frac{0,2}{0,2 \cdot 10^{-4}}\right)^2} = 65 \text{ МПа}$$

$$\nu = \frac{235 \cdot 10^6}{65 \cdot 10^6} = 3,61; \quad \tau_{cr} = 235 \frac{1+3,61}{1+3,61+(3,61)^2} = 61 \text{ МПа};$$

при $\delta = 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

$$\tau_{\vartheta} = \frac{0,9 \cdot 9,4 \cdot 0,7 \cdot 10^6}{\left(\frac{0,2}{0,3 \cdot 10^{-2}}\right)^2} = 148 \text{ МПа}$$

$$\nu = \frac{235}{148} = 1,58; \quad \tau_{cr} = 235 \frac{1+1,58}{1+1,58+(1,58)^2} = 119 \text{ МПа.}$$

Касательные напряжения при $\delta_{cm} = 0,3 \cdot 10^{-2}$ м

$$\tau = \frac{q}{\delta_{cm}} = \frac{320 \cdot 10^3}{0,3 \cdot 10^{-2}} = 106 \text{ МПа.}$$

Запас прочности по τ :

$$n_\tau = \frac{\tau_{cr}}{\tau} = \frac{119}{106} = 1,12.$$

Определим критическую силу стойки, подкрепляющей стенку:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}; \quad F_{cr} = qH = 64 \cdot 10^3 \text{ кН;}$$

$$E = 0,7 \cdot 10^5 \text{ (МПа); } \quad l = H = 0,2 \text{ м;}$$

$$I \geq \frac{F_{cr} l^2}{\pi^2 E} = \frac{64 \cdot 10^3 \cdot (0,2)^2}{(3,14)^2 \cdot 0,7 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,37 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Данному моменту инерции соответствуют два профиля Пр-100 №6:

$$H = 20 \text{ мм; } \quad B = 20 \text{ мм; } \quad \delta = 1,5 \text{ мм; } \quad I_x = 0,222 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Нагрузка на заклепку равна:

$$F_3 = qt = 320 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 8 \text{ кН,}$$

$t = 25$ мм — шаг заклепкою

Срез заклепок происходит по двум плоскостям.

$$\tau_{cp} = \frac{F_3}{2A_3} \leq \tau_u; \quad \tau_u = 0,63\sigma_u.$$

Материал заклепки Д16Т. $\sigma_u = 4000 \text{ кг/см}^2 = 392 \text{ МПа}$. Площадь сечения заклепки:

$$A_3 = \frac{F_3}{2 \cdot 0,63 \cdot \sigma_u} = \frac{8000}{2 \cdot 0,63 \cdot 392 \cdot 10^6} = 0,16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Диаметр заклепки:

$$d_3 \geq \sqrt{\frac{4A}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,16 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 0,45 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Технологически клепка при полученных толщинах затруднена. Устанавливаем заклепки в шахматном порядке в два ряда, $t = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, тогда имеем:

$$F_3 = 407,5 \text{ (кгс)} = 3,994 \text{ кН}; \quad A_3 = 0,08 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,08 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 0,319 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Принимаем $d_3 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, так как несущая способность заклепки выше принятой за счет наклепа при штамповке.

На этом проектировочный расчет силового шпангоута, на принятый расчетный случай, заканчивается. На рисунке 21 представлен эскизный проект шпангоута.

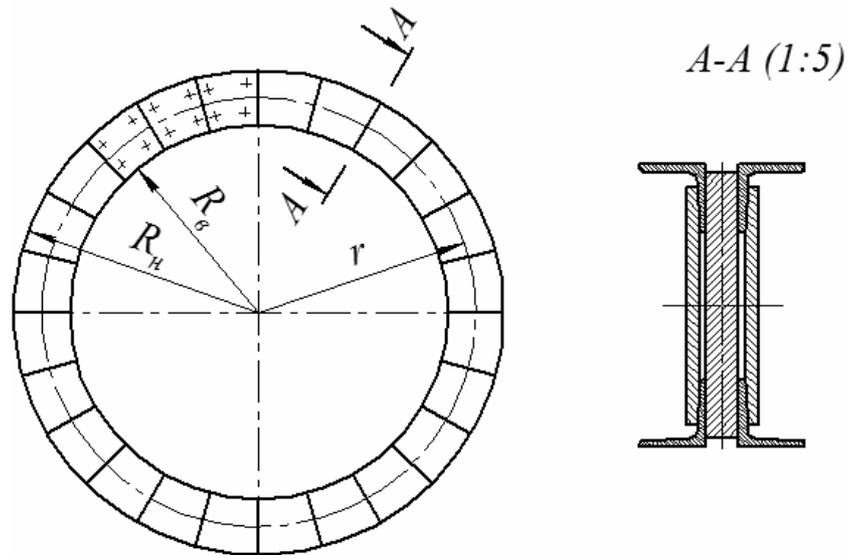


Рисунок 21

3.3 Пример 3

Проектировочный расчет силового статически определимого шпангоута от действия изгибающего момента и подъемной силы крыла.

Исходные данные:

$G = 245$ кН (25 т) — взлетная сила тяжести самолета. Расчетный случай A . Центр давления и перегрузку взять из графиков, приведенных на рисунках 22 и 23. Скорость отрыва от взлетно-посадочной полосы $V_{отр} = 0,4M \approx 480$ км/ч; $f = 1,5$; $G_{кр} = 0,2G$,

$D = 2,4$ м — диаметр фюзеляжа в области крыла.

$F = 3430$ кН/м² (350 кгс/м²) удельная нагрузка на крыло.

$\lambda = 5$ — удлинение крыла, $\eta = 3$ — сужение крыла.

Тип крыла — двухлонжеронный центроплан. Координаты установки переднего и заднего лонжеронов $0,25b(z)$ и $0,7b(z)$ соответственно. Угол стреловидности $\chi = 45^\circ$. Профиль носка по закону квадратичной параболы $y_n = y_в = 2\sqrt{x}$. Профиль средней части по закону синуса.

Определяем по исходным данным геометрию крыла в плане и в расчетном сечении.

$$\text{Площадь крыла } S_{кр} = \frac{G}{F} = \frac{245 \cdot 10^3}{3430} = 71,43 \text{ м}^2$$

$$\text{Размах крыла } l = \sqrt{\lambda S_{кр}} = \sqrt{5 \cdot 71,43} = 18,9 \text{ м}$$

$$\text{Средняя хорда крыла } b_{cp} = \frac{l}{\lambda} = \frac{18,9}{5} = 3,78 \text{ м.}$$

Центральная и концевая хорды крыла:

$$S_{кр} = \frac{b_{к} + b_0}{2} l; \quad b_0 = 3b_{к}$$

$$71,43 = \frac{b_{к} + 3b_{к}}{2} 18,9; \quad 4b_{к} = \frac{71,43 \cdot 2}{18,9} = 7,558 \text{ м}$$

$$b_{к} = 1,89 \text{ (м)}; \quad b_0 = 3b_{к} = 1,89 \cdot 3 = 5,67 \text{ м.}$$

Корневая хорда крыла

$$b_{корн} = b_{к} [(1 - \eta) \bar{z} + \eta] = 1,89 [(1 - 3) \cdot 0,13 + 3] = 5,2 \text{ м}$$

$$\bar{z} = \frac{2D}{2l} = \frac{2,4}{18,9} = 0,13$$

Высота переднего лонжерона

$$y_{в} = y_{н} = 2\sqrt{0,25b(z)};$$

$$H_1 = 2y = 2 \cdot 2\sqrt{0,25b_{корн}} = 2 \cdot 2\sqrt{0,25 \cdot 5,2} = 45,6 \text{ см} = 0,456 \text{ м.}$$

Высота заднего лонжерона

$$H_2 = H_1 \sin \frac{\pi x}{2 \cdot 0,75 \cdot b(z)} = 45,6 \sin \frac{180^\circ}{7,8} 6,24 = 27 \text{ см} = 0,27 \text{ м,}$$

$$x = 0,75b(z) + 0,45b(z) = 0,75 \cdot 5,2 + 0,45 \cdot 5,2 = 3,9 + 2,34 = 6,24 \text{ м.}$$

Координата центра давления по размаху крыла

$$Z_{ц.д} = \frac{0,43l}{2} = \frac{0,43 \cdot 18,9}{2} = 4,06 \text{ м,}$$

0,43 взяли по рисунку 22 при $\eta = 3$, и $\chi = 45^\circ$.

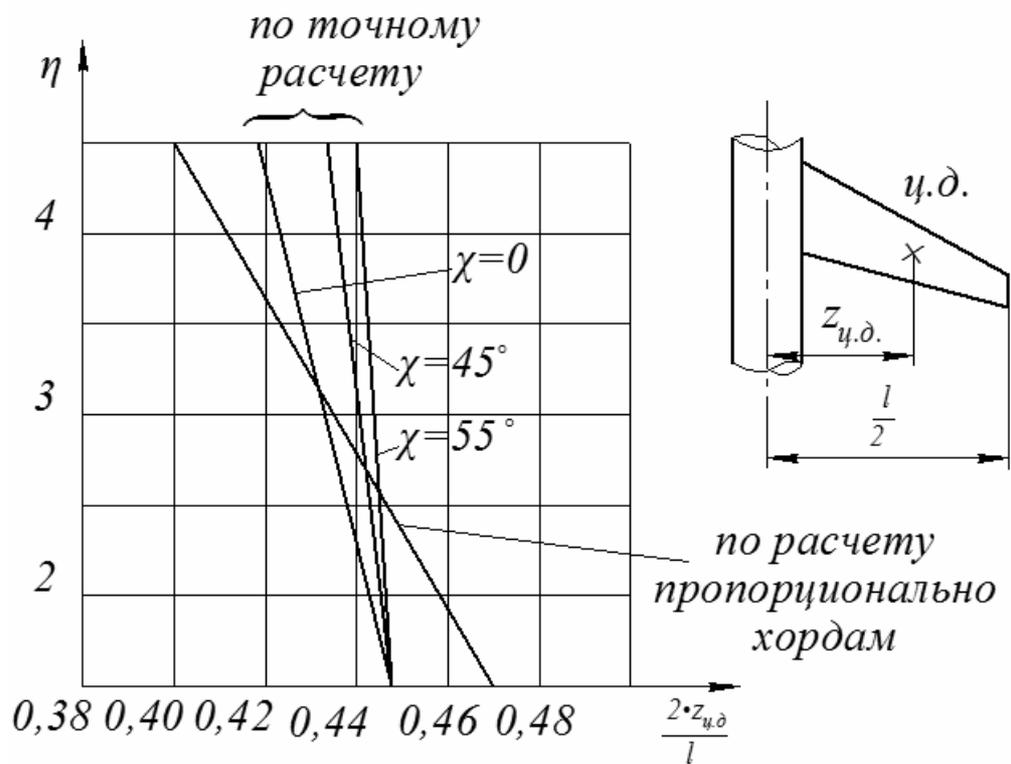


Рисунок 22

По рисунку 23 при $V_{отр} = 0,4M = 480$ км/ч определяем $n_y^3 = 4$

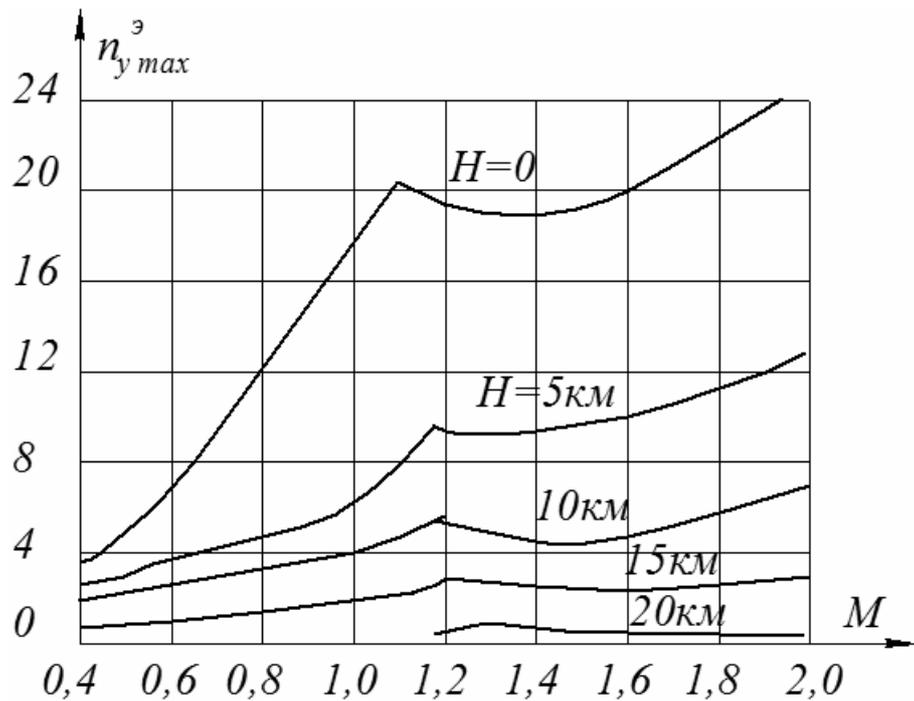


Рисунок 23

Определяем в корневом сечении внутренние силовые факторы:

$$\begin{aligned}
 M_x &= \frac{y_{кр}}{2} \left(z_{ц.д} - \frac{D_\phi}{2} \right) = \frac{fn_y^э (G - G_{кр})}{2} \left(z_{ц.д} - \frac{D_\phi}{2} \right) = \\
 &= \frac{1,5 \cdot 4(245 - 0,2 \cdot 245)}{2} (4,06 - 1,2) = 1682 \text{ кН} \cdot \text{м} \\
 Q_y &= \frac{y_{кр}}{2} = \frac{0,8 \cdot 245 \cdot 4 \cdot 1,5}{2} = 588 \text{ кН}
 \end{aligned}$$

В действительности сила несколько меньше, т.к. не учтена подъемная сила фюзеляжной части крыла.

$$\begin{aligned}
 M_z &= 0,25b(z) \frac{y_{кр}}{2} - 0,45b(z) \cdot 0,2Gfn_y^э = 0,33Gb_{корн} = \\
 &= 0,33 \cdot 245 \cdot 5,2 = 420 \text{ кН} \cdot \text{м}.
 \end{aligned}$$

Распределяем M_x , Q_y и M_z между передним и задним лонжеронами, M_x и Q_y пропорционально высотам:

$$Q_1^y + Q_2^y = Q; \quad Q_2 = \frac{H_2}{H_1} Q_1 = \frac{27}{45,6} Q_1; \quad Q_1^y + 0,59 Q_1 = Q;$$

$$Q_1 = \frac{588}{1,59} = 370 \text{ кН}; \quad Q_2 = 588 - 370 = 218 \text{ кН};$$

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{H_1}{H_2} = 0,59; \quad M_1 + M_2 = M;$$

$$M_1 = \frac{1682}{1,59} = 1058 \text{ кНм}; \quad M_2 = 1682 - 1058 = 624 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

M_z — в виде пары сил воспринимается передним и задним лонжеронами:

$$Y_1^{M_z} = -Y_2^{M_z} = \frac{M_z}{B} = \frac{420}{0,45 \cdot 5,2} = 179 \text{ кН}.$$

$B = 0,45b(z)$ — расстояние между лонжеронами.

Так как $x_{ц.жс.} > x_{ц.д.}$ то передний лонжерон будет догружаться силой $Y_1^{M_z}$, а задний лонжерон — разгружаться силой $Y_1^{M_z}$.

$$y_1 = \sum Q_1^y = Q_1 + Y_1^{M_z} = 370 + 179 = 549 \text{ кН}.$$

Определяем внутренние силовые факторы по периметру переднего шпангоута. Принимаем следующую расчетную схему нагружения (рисунок 24)

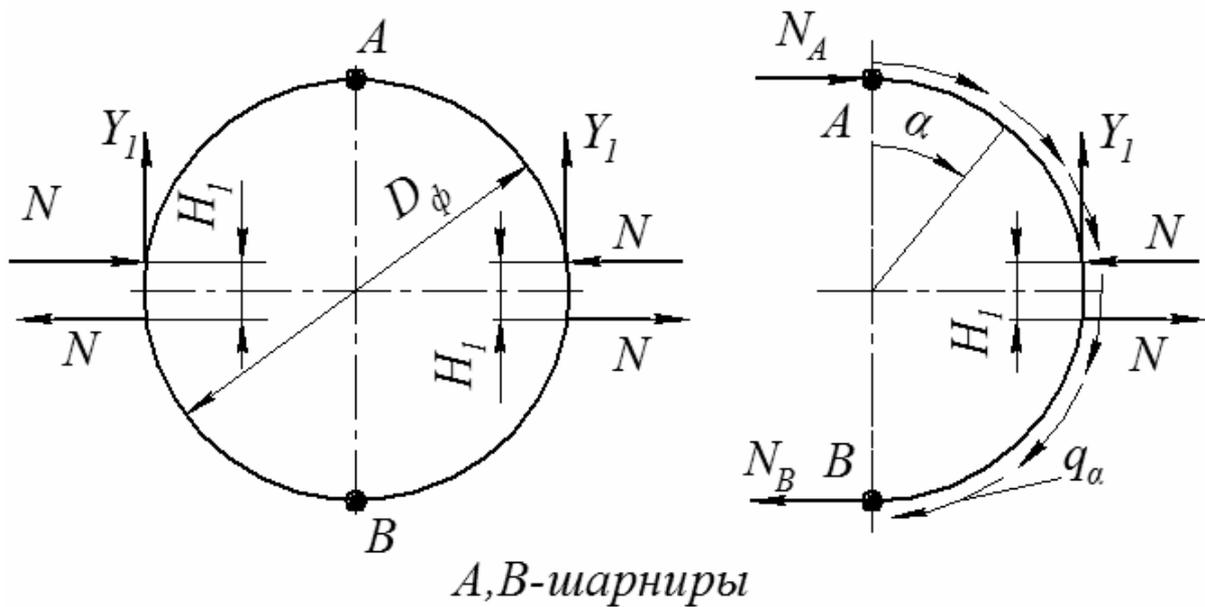


Рисунок 24

Изгибающие моменты $M_1 = 1058 \text{ кН} \cdot \text{м}$ самоуравновешиваются, а y_1 уравновешивается со стороны обшивки потоком касательных усилий, изменяющихся по закону:

$$T_\alpha = \frac{2y_1}{\pi R} \sin \alpha$$

При наличии шарниров в узлах A и B будут действовать только нормальные усилия:

$$N_A = N_B = \frac{M_1}{D_\phi} = \frac{1058}{2,4} = 441 \text{ кН}; \quad N = \frac{1058}{0,456} = 2320 \text{ кН}.$$

Примем следующие расчетные схемы нагружения (рисунок 25)

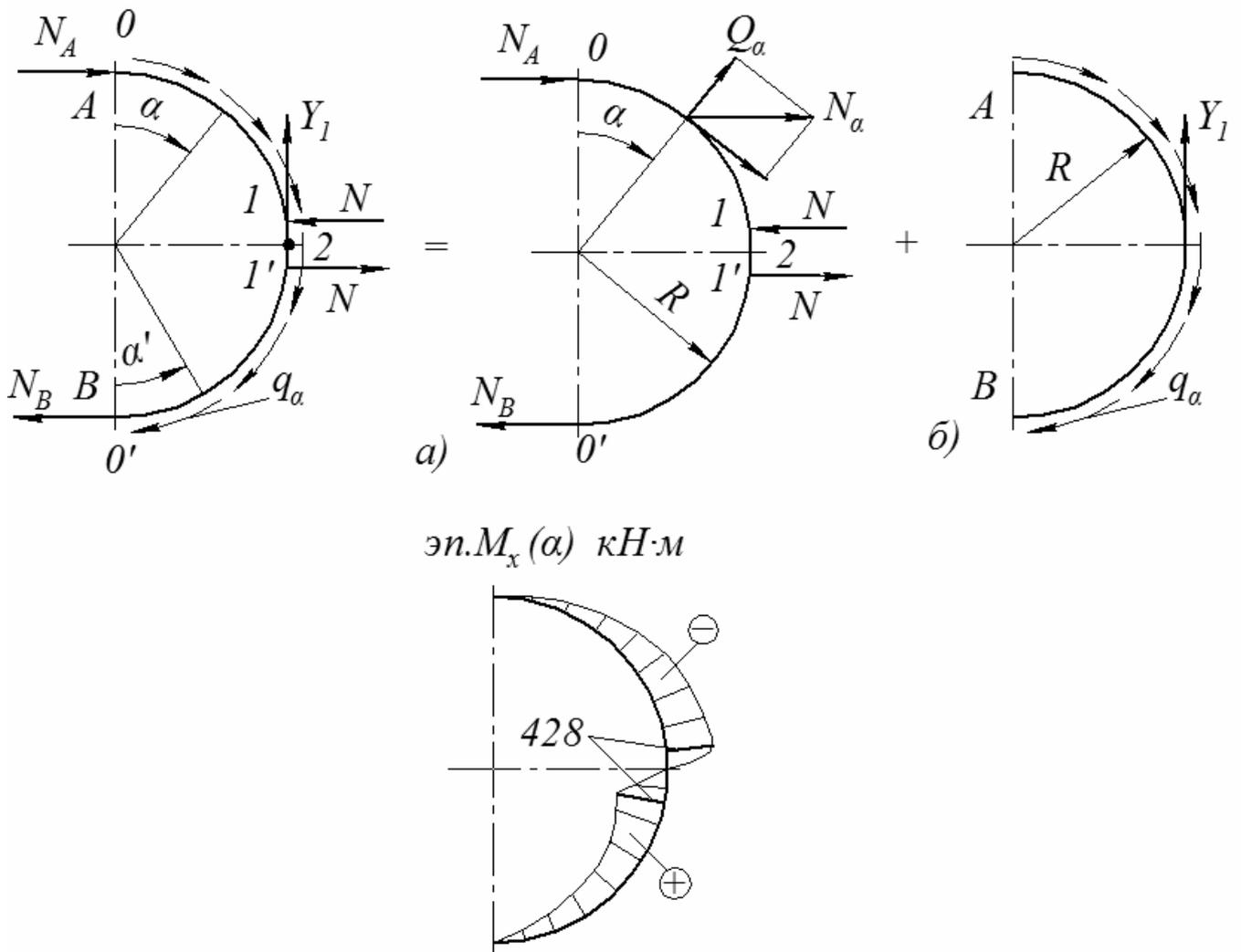


Рисунок 25

Изгибающий момент по участкам для схемы на рисунке 25 а .

Участок 0—1 от N_A

$$M_x = -N_A R (1 - \cos \alpha) \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_1 \quad \alpha_1 = 79^\circ$$

$$\alpha = 0 \quad M_x = 0;$$

$$\alpha = 79^\circ \quad M_x = -441 \cdot 1,2 \cdot 0,809 = -428 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Участок 1—2 от N_A и N

$$M_x = -N_A R(1 - \cos \alpha) + NR \sin(\alpha - 79^\circ) \quad 79^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$\alpha = 79^\circ \quad M_x = -N_A R(1 - \cos \alpha) = -441 \cdot 1,2 \cdot 0,809 = -428 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$\alpha = 90^\circ \quad M_x = -441 \cdot 1,2 \cdot 1 + 2320 \cdot 1,2 \cdot 0,19 = -529 + 529 = 0.$$

Участок 0' - 1'

$$M_x = -N_A R(1 - \cos \alpha) \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_1 \quad \alpha_1 = 79^\circ$$

$$\alpha = 0 \quad M_x = 0;$$

$$\alpha = 79^\circ \quad M_x = 428 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Участок 1' - 2

$$M_x = 0$$

Перерезывающая сила Q_α :

Участок 0—1

$$Q_\alpha = -N_A \sin \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_1 \quad \alpha_1 = 79^\circ$$

$$\alpha = 0 \quad Q_\alpha = 0;$$

$$\alpha = 79^\circ \quad Q_\alpha = -441 \cdot 0,981 = -433 \text{ кН}$$

Участок 1—2

$$Q_\alpha = -N_A \sin \alpha + N \cos(\alpha - 79^\circ) \quad 79^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$\alpha = 79^\circ \quad Q_\alpha = -433 + 2820 \cdot 1 = 1887 \text{ кН};$$

$$\alpha = 90^\circ \quad Q_\alpha = -N_A + N \cos 11^\circ = -441 + 2320 \cdot 0,98 = 1833 \text{ кН}.$$

Участок 0'—1'

$$Q_{\alpha} = -N_A \sin \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_1 \quad \alpha_1 = 79^{\circ}$$

$$\alpha = 0 \quad Q_{\alpha} = 0;$$

$$\alpha = 79^{\circ} \quad Q_{\alpha} = -441 \cdot 0,981 = -433 \text{ кН}$$

Участок 1'—2

$$Q_{\alpha} = -N_A \sin \alpha + N \cos(\alpha - 79^{\circ}) \quad 79^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$$

$$\alpha = 79^{\circ} \quad Q_{\alpha} = -433 + 2820 \cdot 1 = 1887 \text{ кН};$$

$$\alpha = 90^{\circ} \quad Q_{\alpha} = -N_A + N \cos 11^{\circ} = -441 + 2320 \cdot 0,98 = 1833 \text{ кН}.$$

Нормальное усилие по сечениям.

Участок 0—1

$$N_{\alpha} = -N_A \cos \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_1 \quad \alpha_1 = 79^{\circ}$$

$$\alpha = 0 \quad N_{\alpha} = -N_A = -441 \text{ кН};$$

$$\alpha = 79^{\circ} \quad N_{\alpha} = -84 \text{ кН}.$$

Участок 1—2

$$N_{\alpha} = -N_A \cos \alpha + N \cos \alpha \quad 79^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$$

$$\alpha = 79^{\circ} \quad N_{\alpha} = -84 + 440 = 357 \text{ кН};$$

$$\alpha = 90^{\circ} \quad N_{\alpha} = -N_A \cos 90^{\circ} + N \cos 90^{\circ} = 0.$$

Строим эпюры внутренних силовых факторов для схемы нагружения, показанной на рисунке 25 а (рисунок 26)

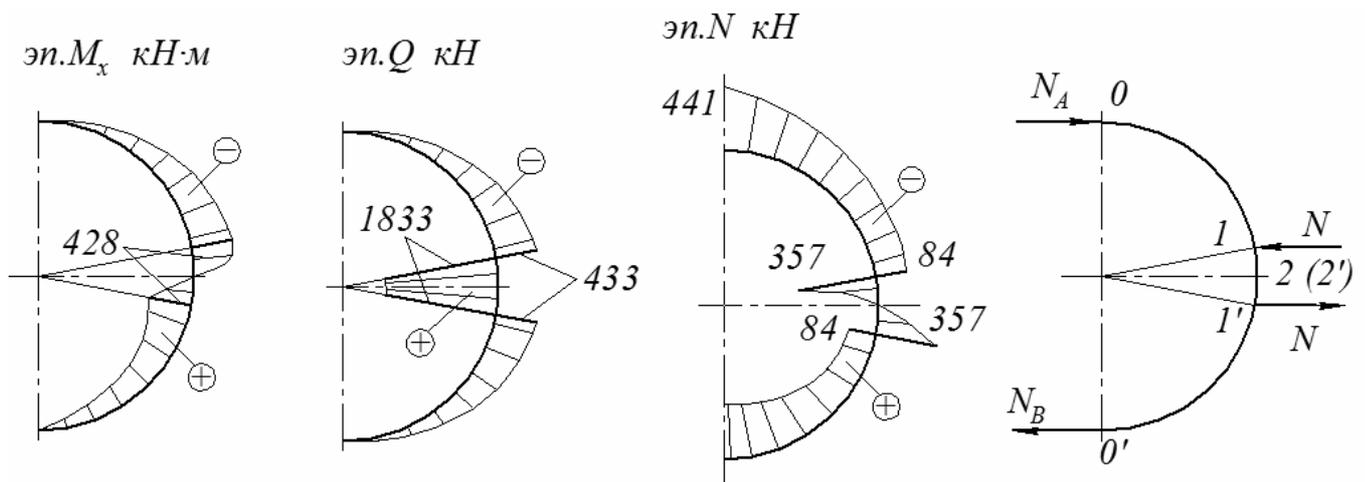


Рисунок 26

Для схемы нагружения, показанной на рисунке 25 б :

$$M_x = \frac{2y_1 R}{2\pi} [2(1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha];$$

$$\alpha = 0^\circ \quad M_x = 0;$$

$$\alpha = 90^\circ \quad M_x = \frac{549 \cdot 1,2}{3,14} 0,43 = 90 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$N_{y_1} = \frac{2y_1}{2\pi} \alpha \sin \alpha;$$

$$\alpha = 0^\circ \quad N_{y_1} = 0;$$

$$\alpha = 90^\circ \quad N_{y_1} = \frac{549}{2} = 274,5 \text{ кН}.$$

$$Q_{y_1} = \frac{2y_1}{2\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha);$$

$$\alpha = 0^\circ \quad Q_{y_1} = 0;$$

$$\alpha = 90^\circ \quad Q_{y_1} = \frac{549}{3,14} = 175 \text{ кН}.$$

Строим эпюры M_x , N_{y_1} и Q_{y_1} (рисунок 27)

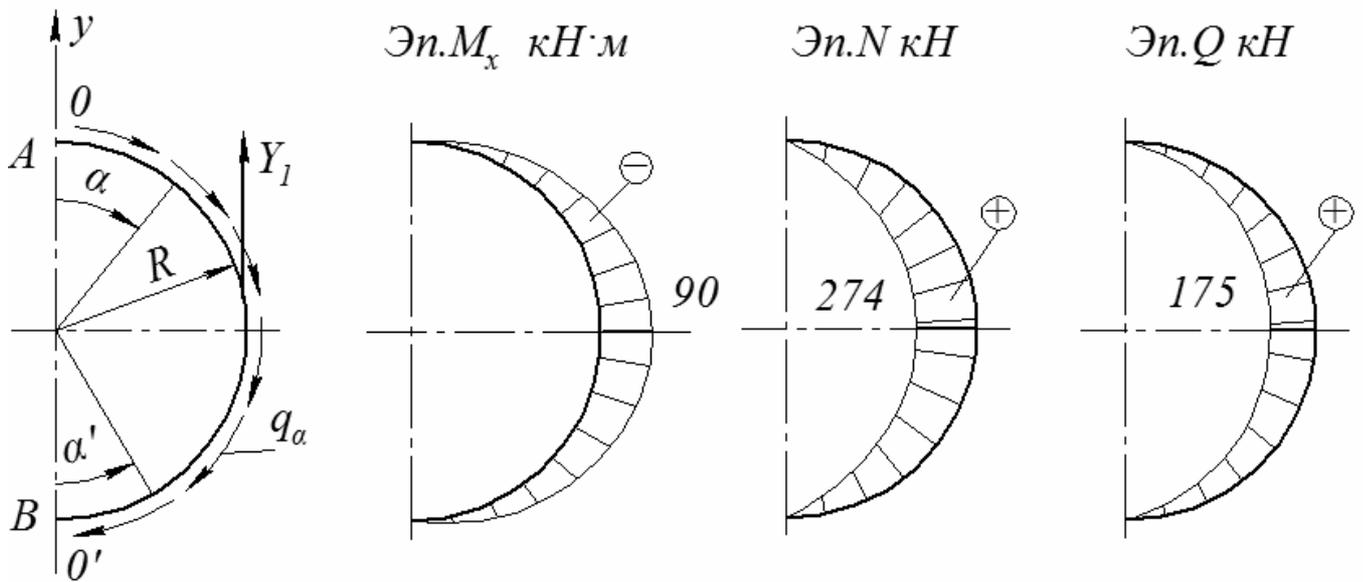


Рисунок 27

Определяем приведенную толщину обшивки фюзеляжа в районе шпангоута:

$$\delta_{np} = \frac{q_{\alpha}}{\tau_{cr}} = \frac{2 \cdot 549 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 1,2 \cdot 100 \cdot 10^6} = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\delta_{np} \approx 3 \text{ мм.}$$

По максимальной перерезывающей силе определяем стенку шпангоута (без учета погонных радиальных усилий от изгиба):

$$\delta_{cm} = \frac{q}{\tau_{cr}}; \quad q = \frac{Q_{\Sigma}^{\max}}{H_1} = \frac{(1833 - 175) \cdot 10^3}{45,6 \cdot 10^{-2}} = 3636 \text{ кН/м}$$

$$H_1 = 45,6 \cdot 10^{-2} \text{ м — высота лонжерона №1}$$

$$\delta_{cm} = \frac{3636 \cdot 10^3}{693 \cdot 10^6} = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 5,4 \text{ мм}$$

$$\tau_{cr} = 0,63\sigma_u = 693 \text{ МПа — материала 30ХГСА.}$$

Площадь пояса в минимально нагруженном сечении (шарнир):

$$A^n = \frac{N}{2\sigma_u} = \frac{441 \cdot 10^3}{2 \cdot 1100 \cdot 10^6} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Высота стенки подбирается из условий технологичности шарнирного соединения. Дополнительные погонные сдвигающие усилия в стенке шпангоута за счет кривизны от изгибающего момента равны:

$$q_{\max} = \frac{M}{0,9HR} = \frac{(428 + 90) \cdot 10^3}{0,9 \cdot 0,456 \cdot 1,2} = 1052 \text{ кН/м}$$

$$\Delta \delta_{ct} = \frac{q_{\max}}{0,63\sigma_u} = \frac{1,052 \cdot 10^6}{693 \cdot 10^6} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,5 \text{ мм.}$$

Суммарная толщина стенки в максимально нагруженном сечении $\alpha = 90^\circ$, т.е. по оси z :

$$\delta_\Sigma = 5,4 \cdot 10^3 + 1,5 \cdot 10^3 \approx 7 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

Минимальный момент инерции стойки между поясами в наиболее нагруженном сечении:

$$I_{\min} = \frac{NH_1^2}{(3,14)^2 E} = \frac{2320 \cdot 10^3 \cdot (0,456)^2}{(3,14)^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 24,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Проектировочный эскиз силового шпангоута переднего лонжерона представлен на рисунке 28.

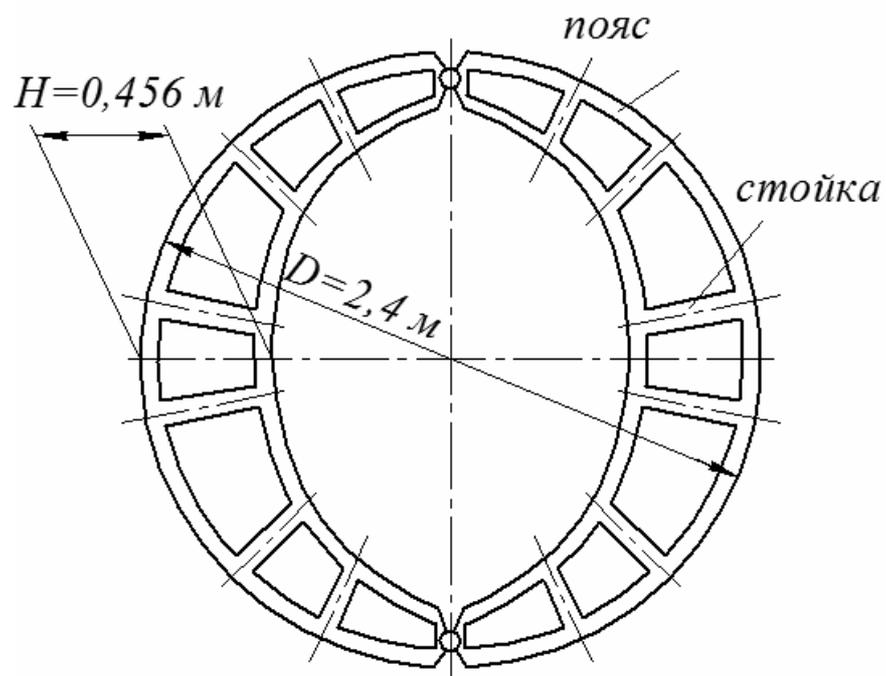


Рисунок 28

3.4 Пример 4

По исходным данным примера 3 построить эпюры внутренних силовых факторов для силового шпангоута, нагруженного по схеме рисунка 29 при $\alpha_0 = 90^\circ$ и $r = 1 м$.

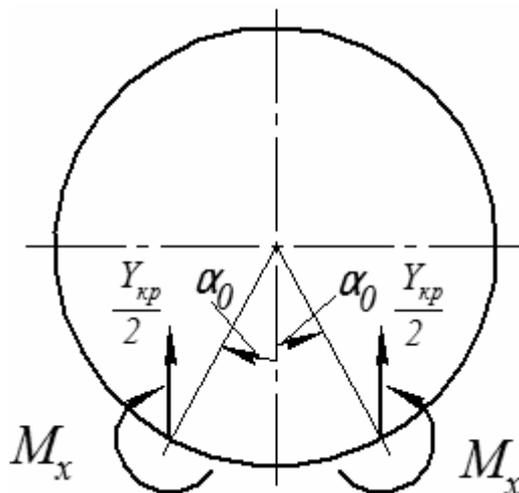


Рисунок 29

Вычисление ведем по участкам, $EI_x = const$:

участок 0–1 $0 \leq \alpha \leq \alpha_0$

$$\begin{aligned} \int_0^{\alpha_0} M_{\Sigma} \overline{M}_1 r d\alpha &= \int_0^{\alpha_0} M_q \overline{M}_1 r d\alpha = \int_0^{\alpha_0} \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] r (1 - \cos \alpha) r d\alpha = \\ &= r^3 \left[\int_0^{\alpha_0} \frac{2FR}{\pi r} (1 - \cos \alpha)^2 d\alpha - \frac{F}{\pi} \int_0^{\alpha_0} (1 - \cos \alpha) \alpha \sin \alpha d\alpha \right] = \\ &= \frac{2r^2 FR}{\pi} \left(\frac{3}{2} \alpha_0 - 2 \sin \alpha_0 + \frac{1}{4} \sin 2\alpha_0 \right) - \frac{Fr^3}{\pi} \left(\sin \alpha_0 - \alpha_0 \cos \alpha_0 - \frac{1}{8} \sin 2\alpha_0 \right) \end{aligned}$$

участок 1–2:

$$\begin{aligned} \int_{\alpha_0}^{\pi} M_{\Sigma} \overline{M}_1 r d\alpha &= \int_{\alpha_0}^{\pi} M_q \overline{M}_1 r d\alpha + \int_{\alpha_0}^{\pi} M_F \overline{M}_1 r d\alpha + \int_{\alpha_0}^{\pi} M \overline{M}_1 r d\alpha \\ \int_{\alpha_0}^{\pi} M_q \overline{M}_1 r d\alpha &= r^3 \left\{ \frac{2FR}{\pi r} \left[\alpha \Big|_{\alpha_0}^{\pi} - 2 \sin \alpha \Big|_{\alpha_0}^{\pi} + \left(\frac{1}{4} \sin 2\alpha + \frac{1}{2} \alpha \right) \Big|_{\alpha_0}^{\pi} \right] - \frac{F}{\pi} \left[(\sin \alpha - \right. \right. \\ &- \alpha \cos \alpha) \Big|_{\alpha_0}^{\pi} - \left. \left. \left(\frac{1}{8} \sin 2\alpha - \frac{1}{4} \alpha \cos 2\alpha \right) \Big|_{\alpha_0}^{\pi} \right] \right\} = r^3 \left\{ \frac{2FR}{\pi r} \left[(\pi - \alpha_0) - 2 \sin \alpha_0 + \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \alpha_0 - \right. \right. \\ &- \left. \left. \frac{1}{4} \sin 2\alpha_0 \right] - \frac{F}{\pi} \left[(-\sin \alpha_0 + \pi + \alpha_0 \cos \alpha_0) - \left(-\frac{1}{8} \sin 2\alpha_0 - \frac{1}{4} \pi + \frac{1}{4} \alpha_0 \cos 2\alpha_0 \right) \right] \right\} \\ \int_{\alpha_0}^{\pi} M_F \overline{M}_1 r d\alpha &= \int_{\alpha_0}^{\pi} Fr (\sin \alpha - \sin \alpha_0) r (1 - \cos \alpha) r d\alpha = r^3 F \left[\int_{\alpha_0}^{\pi} \sin \alpha d\alpha - \int_{\alpha_0}^{\pi} \sin \alpha_0 d\alpha - \right. \\ &- \left. \int_{\alpha_0}^{\pi} \sin \alpha \cos \alpha d\alpha + \sin \alpha_0 \int_0^{\pi} \cos \alpha d\alpha \right] = r^3 F \left[(1 + \cos \alpha_0) + (\alpha_0 - \pi) \sin \alpha_0 - \frac{1}{2} \sin^2 \alpha_0 \right] \end{aligned}$$

$$\int_{\alpha_0}^{\pi} M \overline{M}_1 r d\alpha = -M_x r^2 \int_{\alpha_0}^{\pi} (1 - \cos \alpha) d\alpha = -M_x r^2 (\pi - \alpha_0 + \sin \alpha_0)$$

Определяем $\Delta_{1F} = 2 \int_0^{\pi} \frac{M_{\Sigma} \overline{M}_1}{EI} r d\alpha$.

Переходим к определению $\Delta_{3F} = 2 \int_0^{\pi} \frac{M_{\Sigma} \overline{M}_3}{EI} r d\alpha$

участок 0–1

$$\begin{aligned} \int_0^{\alpha_0} M_q \overline{M}_3 r d\alpha &= \frac{Fr^2}{\pi} \left[\int_0^{\alpha_0} \frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) d\alpha - \int_0^{\alpha_0} \alpha \sin \alpha d\alpha \right] = \\ &= \frac{Fr^2}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (\alpha_0 - \sin \alpha_0) - \sin \alpha_0 + \alpha_0 \cos \alpha_0 \right] \end{aligned}$$

участок 1–2:

$$\int_{\alpha_0}^{\pi} M_{\Sigma} \overline{M}_3 r d\alpha = \int_{\alpha_0}^{\pi} M_q \overline{M}_3 r d\alpha + \int_{\alpha_0}^{\pi} M_F \overline{M}_3 r d\alpha + \int_{\alpha_0}^{\pi} M \overline{M}_3 r d\alpha$$

$$\begin{aligned} \int_{\alpha_0}^{\pi} M_q \overline{M}_3 r d\alpha &= \int_{\alpha_0}^{\pi} \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] r d\alpha = \frac{Fr^2}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (\alpha|_{\alpha_0}^{\pi} - \sin \alpha|_{\alpha_0}^{\pi}) - \right. \\ &\left. - \sin \alpha|_{\alpha_0}^{\pi} + \alpha \cos \alpha|_{\alpha_0}^{\pi} \right] = \frac{Fr^2}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (\pi - \alpha_0 + \sin \alpha_0) + \sin \alpha_0 - \pi - \alpha_0 \cos \alpha_0 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\alpha_0}^{\pi} M_F \overline{M}_3 r d\alpha &= \int_{\alpha_0}^{\pi} Fr (\sin \alpha - \sin \alpha_0) r d\alpha = r^2 F \left[-\cos \alpha|_{\alpha_0}^{\pi} - \sin \alpha_0 \alpha|_{\alpha_0}^{\pi} \right] = \\ &= Fr^2 [1 + \cos \alpha_0 - \sin \alpha_0 (\pi - \alpha_0)] \end{aligned}$$

$$\int_{\alpha_0}^{\pi} M \overline{M_3} r d\alpha = -M_x r (\pi - \alpha_0)$$

Определяем $\Delta_{3F} = 2 \int_0^{\pi} \frac{M_{\Sigma} \overline{M_3}}{EI} r d\alpha$. Неизвестные X_1 и X_3 находим по формулам:

$$X_1 = \frac{1}{\pi r^3} (\Delta_{3F} r - \Delta_{1F})$$

$$X_3 = \frac{1}{\pi r^2} \left(\Delta_{1F} r - \frac{3}{2} r \Delta_{3F} \right)$$

Определяем внутренние силовые факторы (ВСФ) по сечениям кругового шпангоута:

$$M = M_{\Sigma} + X_1 \overline{M_1} + X_3 \overline{M_3}$$

$$N = N_{\Sigma} + X_1 \cos \alpha$$

$$Q = Q_{\Sigma} + X_1 \sin \alpha$$

где M_{Σ} , N_{Σ} , Q_{Σ} – изгибающий момент, осевая сила, поперечная сила от внешних нагрузок в разрезанном шпангоуте по участкам:

участок 0–1:

$$M_{\Sigma} = M_q = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right]$$

$$N_{\Sigma} = N_q = \frac{F}{\pi} \alpha \sin \alpha$$

$$Q_{\Sigma} = Q_q = \frac{F}{\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha).$$

На участке 1–2:

$$M_{\Sigma} = M_q + M_F + M = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] + Fr (\sin \alpha - \sin \alpha_0) - M_x$$

$$N_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} \alpha \sin \alpha - F \sin \alpha$$

$$Q_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) + F \cos \alpha.$$

Построим эпюры ВСФ для центроплана $\alpha_0 = 90^\circ$.

Вычислим интегралы:

участок 0–1:

$$\begin{aligned} \int_0^{\alpha_0} M_{\Sigma} \overline{M}_1 r d\alpha &= \frac{2r^2 FR}{\pi} \left(\frac{3}{2} \frac{\pi}{2} - 2 \cdot 1 \right) - \frac{Fr^3}{\pi} (1) = 0,71 \cdot r^2 RF - 0,32 \cdot r^3 F = \\ &= Fr^2 (0,71R - 0,8r) \end{aligned}$$

участок 1–2:

$$\begin{aligned} \int_{\alpha_0}^{\pi} M_q \overline{M}_1 r d\alpha &= r^3 \left\{ \frac{2RF}{\pi r} \left[\left(\pi - \frac{\pi}{2} \right) + 2 \cdot 1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} \right] - \frac{F}{\pi} \left[-1 + \pi + \frac{1}{4} \pi - \frac{1}{4} \frac{\pi}{2} \right] \right\} = \\ &= r^3 \left\{ \frac{2RF}{\pi r} \left[\frac{\pi}{2} + 2 + \frac{\pi}{4} \right] - \frac{F}{\pi} \left[-1 + \frac{9}{8} \pi \right] \right\} = 2,77 Fr^2 R - 0,8 Fr^3 = \\ &= Fr^2 (2,77R - 0,8r) \end{aligned}$$

$$\int_{\alpha_0}^{\pi} M_F \overline{M}_1 r d\alpha = r^3 F \left[(1 - 0) + \frac{\pi}{2} - \pi - \frac{1}{2} \right] - 1,07 Fr^3$$

$$\int_{\alpha_0}^{\pi} -M_x \overline{M_1} r d\alpha = -M_x r^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2} + 1 \right) = -2,57 M_x r^2$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} M_{\Sigma} \overline{M_1} r d\alpha &= Fr^2 (0,71R - 0,32r + 2,72R - 0,8r - 1,07r - 2,57z_{y0}) = \\ &= Fr^2 (3,43R - 2,35r - 2,57z_{y0}) \end{aligned}$$

участок 0–1:

$$\begin{aligned} \int_0^{\alpha_0} M_q \overline{M_3} r d\alpha &= \frac{Fr^2}{\pi} \left[\frac{2R}{r} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) - 1 \right] = \frac{Fr^2}{\pi} \left(\frac{2R}{r} \cdot 0,57 - 1 \right) = \\ &= 0,36FRr - 0,32Fr^2 \end{aligned}$$

участок 1–2:

$$\begin{aligned} \int_{\alpha_0}^{\pi} M_{\Sigma} \overline{M_3} r d\alpha &= \frac{Fr^2}{\pi} \left[\frac{2R}{r} \left(\pi - \frac{\pi}{2} + 1 \right) + 1 - \pi \right] + Fr^2 \left[1 - 1 \left(\pi - \frac{\pi}{2} \right) \right] - \\ &- Fz_{y0} r \left(\pi - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{Fr^2}{\pi} \left[\frac{2R}{r} \cdot 2,57 - 2,14 \right] + Fr^2 (-0,57) = \\ &= 1,64FRr - 1,25Fr^2 - 1,57Fz_{y0}r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} M_{\Sigma} \overline{M_3} r d\alpha &= 0,36FRr - 0,32Fr^2 + 1,64FRr - 1,25Fr^2 - 1,57Fz_{y0}r = \\ &= 2FRr - 1,57Fr^2 - 1,57Fz_{y0}r. \end{aligned}$$

Вычисляем:

$$\Delta_{1F} = 2 \int_0^{\pi} \frac{M_{\Sigma} \overline{M_1}}{EI_x} r d\alpha = \frac{2Fr^2(3,43R - 2,35r - 2,57z_{y0})}{EI_x}$$

$$\Delta_{3F} = 2 \int_0^{\pi} \frac{M_{\Sigma} \overline{M_3}}{EI_x} r d\alpha = \frac{2Fr(2R - 1,57r - 1,57z_{y0})}{EI_x}$$

$$X_1 = \frac{1}{\pi r^3} (\Delta_{3F} \cdot r - \Delta_{1F}) EI_x$$

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{1}{\pi r^3} \left[2Fr^2(2R - 1,57r - 1,57z_{y0}) - 2Fr^2(3,43R - 2,35r - 2,57z_{y0}) \right] = \\ &= \frac{2F}{\pi r} (-1,43R + 0,78r + z_{y0}) = \frac{F}{r} (-0,91R + 0,5r + 0,64z_{y0}) \end{aligned}$$

$$X_3 = \frac{1}{\pi r^2} \left(\Delta_{1F} - \frac{3}{2} r \Delta_{3F} \right) EI_x$$

$$\begin{aligned} X_3 &= \frac{1}{\pi r^2} \left[2Fr^2(3,43R - 2,35r - 2,57z_{y0}) - 3Fr^2(2R - 1,57r - 1,57z_{y0}) \right] = \\ &= \frac{F}{\pi} (0,86R - 0,43z_{y0}) = F(0,27R - 0,14z_{y0}). \end{aligned}$$

Получили:

$$X_1 = \frac{F}{r} (-0,91R + 0,5r + 0,64z_{y0})$$

$$X_3 = F(0,27R - 0,14z_{y0}).$$

По исходным данным примера 3 имеем:

$$R = 1,2m; z_{y0} = 4,06m; z_{y0} = 3,38R; r = 1m;$$

$$X_1 = \frac{F}{r} (-0,91R + 0,5r + 2,16R) = \frac{F}{r} (1,25R + 0,5r)$$

$$X_3 = F(0,27R - 0,473R) = -0,2FR.$$

Определяем M_Σ , N_Σ , Q_Σ для разрезанного шпангоута по участкам при $\alpha = 0$;
 $\alpha = \alpha_0 = 90^\circ$; $\alpha = 180^\circ$.

участок 0–1 $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$:

$$M_\Sigma = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right]$$

$$\alpha = 0$$

$$M_\Sigma = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - 1) \right] = 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$M_\Sigma = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - 0) - 1,57 \cdot 1 \right] = \frac{Fr}{\pi} \frac{2R}{r} - \frac{1,57}{\pi} Fr =$$

$$= 0,64FR - 0,5Fr = F(0,67R - 0,5r)$$

$$N_\Sigma = N_q = \frac{F}{\pi} \alpha \sin \alpha$$

$$\alpha = 0$$

$$N_\Sigma = 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$N_\Sigma = \frac{F}{\pi} \frac{\pi}{2} \cdot 1 = \frac{F}{2} = 0,5F$$

$$Q_\Sigma = Q_q = \frac{F}{2} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)$$

$$\alpha = 0$$

$$Q_\Sigma = \frac{F}{2} (0 - 0 \cdot 1) = 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$Q_\Sigma = \frac{F}{2} \left(1 - 0 \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 0,32F$$

участок 1–2 $\alpha_0 \leq \alpha \leq \pi$:

$$M_{\Sigma} = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] + Fr (\sin \alpha - \sin \alpha_0) - 4,06F$$

$$\alpha = \alpha_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$M_{\Sigma} = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - 0) - \frac{\pi}{2} \cdot 1 \right] + Fr (1 - 1) - 4,06F = F(0,67R - 0,5r) - 4,06F = \\ = F(0,67R - 0,5r - 4,06)$$

$$\alpha = \pi$$

$$M_{\Sigma} = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 + 1) - \pi \cdot 0 \right] + Fr (0 - 1) - 4,06F = 1,27FR - Fr - 4,06F = \\ = F(1,27R - r - 4,06)$$

$$N_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} \alpha \sin \alpha - F \sin \alpha$$

$$\alpha = 90^{\circ}$$

$$N_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} \frac{\pi}{2} \cdot 1 - F \cdot 1 = -\frac{F}{2}$$

$$\alpha = \pi$$

$$N_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} \pi \cdot 0 - F \cdot 0 = 0$$

$$Q_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) + F \cos \alpha$$

$$\alpha = 90^{\circ}$$

$$Q_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} \left(1 - \frac{\pi}{2} \cdot 0 \right) + F \cdot 0 = \frac{F}{\pi}$$

$$\alpha = \pi$$

$$Q_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} (0 + \pi) - F = 0$$

участок 0–1 $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$:

$$M_{\Sigma} = M_q = -\frac{2Fr}{2\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right]$$

$$\alpha = 0$$

$$M_q = -\frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1-1) - 0 \cdot 0 \right] = 0$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2}$$

$$M_q = -\frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1-0) - \frac{\pi}{2} \cdot 1 \right] = -\frac{2FR}{\pi} - \frac{Fr}{2}$$

$$N_\Sigma = N_q = \frac{2F}{2\pi} \alpha \sin \alpha$$

$$\alpha = 0$$

$$N_q = 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$N_q = \frac{F}{\pi} \frac{\pi}{2} \cdot 1 = \frac{F}{2} = 0,5F$$

$$Q_\Sigma = Q_q = \frac{F}{\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha)$$

$$\alpha = 0$$

$$Q_\Sigma = \frac{F}{\pi} (0 - 0 \cdot 1) = 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$Q_\Sigma = \frac{F}{\pi} \left(1 - 0 \cdot \frac{\pi}{2} \right) = \frac{F}{\pi}$$

участок 1-2 $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$:

$$M_\Sigma = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1 - \cos \alpha) - \alpha \sin \alpha \right] + Fr (\sin \alpha - \sin \alpha_0) + M$$

$$\alpha = \alpha_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$\begin{aligned} M_\Sigma &= \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r} (1-0) - \frac{\pi}{2} \cdot 1 \right] + Fr(1-1) - M_x = -\frac{FR}{\pi} + \frac{Fr}{2} - M_x = \\ &= F \left(\frac{r}{2} - \frac{2R}{\pi} \right) - M_x \end{aligned}$$

$$\alpha = \pi$$

$$M_{\Sigma} = \frac{Fr}{\pi} \left[\frac{2R}{r}(1+1) - \pi \cdot 0 \right] + Fr(0-1) - M_x = -\frac{4FR}{\pi} - Fr - M_x$$

$$N_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} \alpha \sin \alpha - F \sin \alpha$$

$$\alpha = 90^{\circ}$$

$$N_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} \frac{\pi}{2} \cdot 1 - F \cdot 1 = -\frac{F}{2}$$

$$\alpha = \pi$$

$$N_{\Sigma} = \frac{F}{\pi} \pi \cdot 0 - F \cdot 0 = 0$$

$$Q_{\Sigma} = -\frac{F}{\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) - F \cos \alpha$$

$$\alpha = 90^{\circ}$$

$$Q_{\Sigma} = -\frac{F}{\pi} \left(1 - \frac{\pi}{2} \cdot 0 \right) - F \cdot 0 = -\frac{F}{\pi}$$

$$\alpha = \pi$$

$$Q_{\Sigma} = -\frac{F}{\pi} (0 + \pi) - F = -F .$$

Вычисляем M_{Σ} , N_{Σ} , Q_{Σ} для статически неопределимой системы
участок 0–1

$$\alpha = 0$$

$$M = 0 + \frac{F}{r} (0,91R + 0,5r + 4,06 \cdot 0,64)r(1 - \cos \alpha) + F(0,27R - 0,57) = \\ = F(0,27R - 0,57) = -0,25F \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\alpha = 90^{\circ}$$

$$M = F(0,67R - 0,5r) + F(-1,1 + 0,5 + 2,6) - 0,25F = 2,5F \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$N = N_{\Sigma} + X_1 \cos \alpha$$

$$\alpha = 0$$

$$N = 0 + F \cdot 2 \cdot 1 = 2F$$

$$Q = Q_{\Sigma} + X_1 \sin \alpha$$

$$\alpha = 0$$

$$Q = 0 + 2F \cdot 0 = 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$N = \frac{F}{2} + 0 = \frac{F}{2}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$Q = -\frac{F}{\pi} + 2F = 1,68F$$

участок 1–2

$$\alpha = 90^\circ$$

$$\begin{aligned} M &= F(0,67R - 0,5r - 4,06) + \frac{F}{r}(1,25R + 0,5r)r(1 - \cos \alpha) - 0,2FR \cdot 1 = \\ &= F(-3,76 + 2 - 0,24) = -2F \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

$$\alpha = \pi$$

$$\begin{aligned} M &= F(1,27R - r - 4,06) + \frac{F}{r}(1,25R + 0,5r)r \cdot 2 - 0,2FR \cdot 1 = \\ &= F(-3,54 + 4 - 0,24) = 0,22F \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$N = -\frac{F}{2}$$

$$\alpha = \pi$$

$$N = 0 + F \cdot 2 \cdot (-1) = -2F$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$Q = -\frac{F}{\pi} + 2 \cdot 1 = 1,68F$$

$$\alpha = \pi$$

$$Q = -F + 2F \cdot 0 = -F.$$

По полученным данным строим эпюры (рисунок 31)

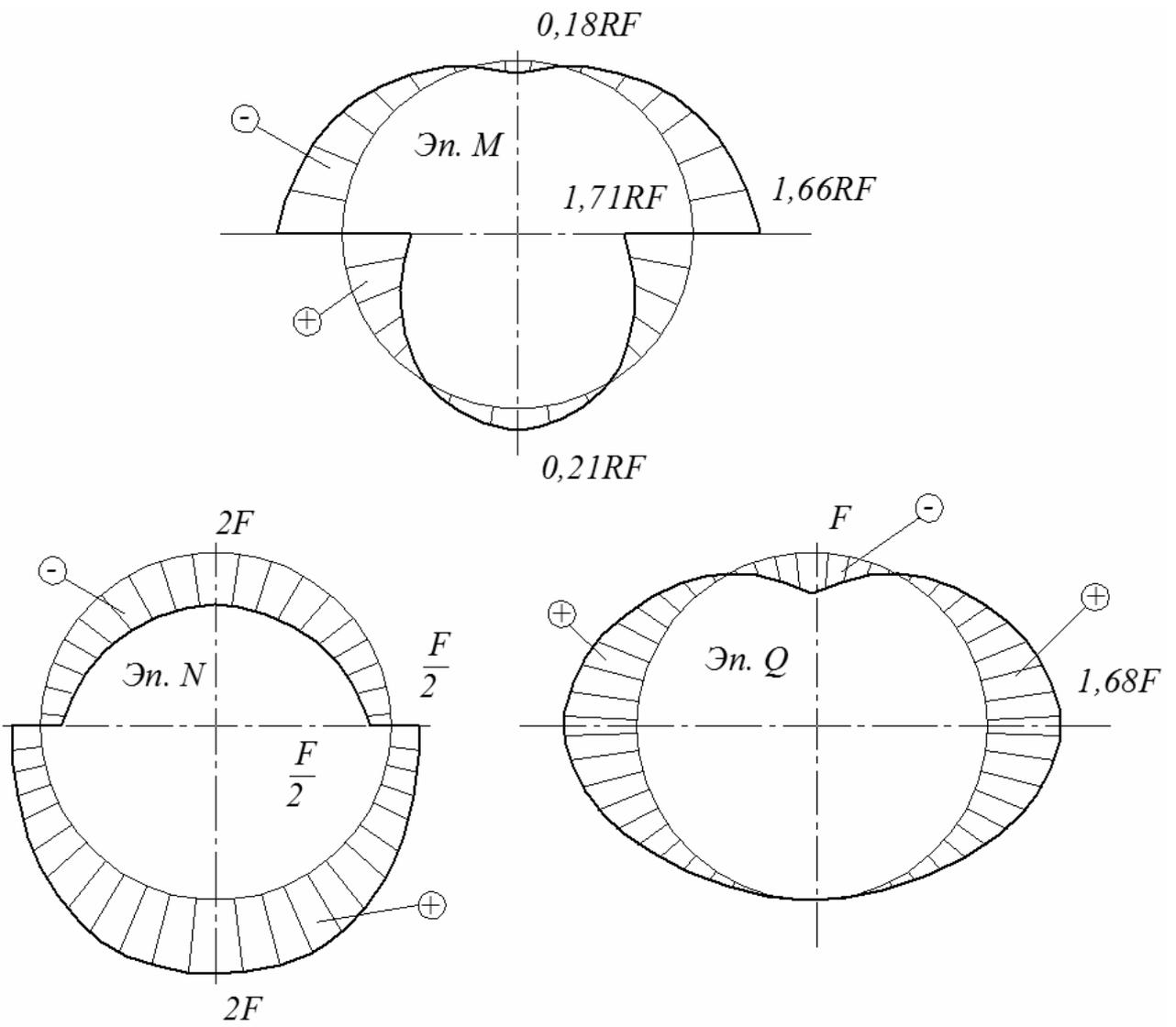


Рисунок 31

4.1. Исходные данные к задаче №1

Таблица 2

Группа	Вариант	R , м	r , м	$L_{ГО}$, м	ε_2 , c^{-2}	i_z , м	G , кН	c , м	d , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	0,8	6,0	3,4	1,9	75	1,5	0,8
	2			6,2	3,5	2,0	80	1,4	0,8
	3			6,4	3,6	2,1	85	1,5	0,9
	4			6,5	3,7	2,2	90	1,6	1,0
	5			6,7	3,8	2,4	95	1,7	1,1
	6			7,0	3,9	2,5	100	1,8	1,2
	7			7,2	4,0	2,7	105	1,9	1,3
	8			7,4	4,1	2,8	110	2,0	1,4
	9			7,5	4,2	3,0	115	2,1	1,5
	10	1	0,85	6,0	3,6	2,1	80	2,1	1,5
	11			6,2	3,7	2,0	85	1,4	0,8
	12			6,5	3,8	2,4	90	1,5	0,9
	13			6,7	3,9	2,2	95	1,6	1,0
	14			7,0	4,0	3,0	100	1,7	1,1
	15			7,2	4,1	2,5	105	1,8	1,2
	16			7,4	4,2	2,7	110	1,9	1,3
	17			7,5	3,5	2,8	115	2,0	1,4
	18			1	0,9	6,0	3,7	2,2	80
	19	6,2	3,8			2,4	85	2,1	1,5
	20	6,5	3,9			2,0	90	1,4	0,8
	21	6,7	4,0			2,1	95	1,5	0,9
	22	7,0	4,1			2,7	100	1,6	1,0
	23	7,2	4,2			3,0	105	1,7	1,1
	24	7,4	3,5			2,5	110	1,8	1,2
	25	7,5	3,6			2,3	115	1,9	1,3
2	1	1,1	0,85			6,0	3,4	1,9	75
	2			6,2	3,8	2,3	80	1,5	0,8
	3			6,4	3,9	2,2	85	1,7	0,9
	4			6,5	4,0	2,1	90	1,6	1,0
	5			6,7	4,1	2,5	95	1,4	1,1
	6			7,0	4,2	2,4	100	2,1	1,2
	7			7,2	3,5	2,8	105	2,0	1,3
	8			7,4	3,6	2,9	110	1,9	1,4
	9			7,5	3,7	2,0	115	1,8	1,5
	10			6,0	3,5	2,0	80	1,4	0,8

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	11			6,2	3,6	2,1	85	1,5	0,9	
	12			6,5	3,7	2,2	90	1,6	1,0	
	13			6,7	3,8	2,4	95	1,7	1,1	
	14			7,0	3,9	2,5	100	1,8	1,2	
	15			7,2	4,0	2,7	105	1,9	1,3	
	16			7,4	4,1	2,8	110	2,0	1,4	
	17			7,5	4,2	3,0	115	2,1	1,5	
	18	1,1	0,95	6,0	3,6	2,1	80	2,1	1,5	
	19			6,2	3,7	2,0	85	1,4	0,8	
	20			6,5	3,8	2,4	90	1,5	0,9	
	21			6,7	3,9	2,2	95	1,6	1,0	
	22			7,0	4,0	3,0	100	1,7	1,1	
	23			7,2	4,1	2,5	105	1,8	1,2	
	24			7,4	4,2	2,7	110	1,9	1,3	
	25			7,5	3,5	2,8	115	2,0	1,4	
	3	1	1,2	0,85	6,0	3,4	1,9	75	1,5	0,8
		2			6,2	3,7	2,2	80	2,0	1,4
3		6,4			3,8	2,4	85	2,1	1,5	
4		6,5			3,9	2,0	90	1,4	0,8	
5		6,7			4,0	2,1	95	1,5	0,9	
6		7,0			4,1	2,7	100	1,6	1,0	
7		7,2			4,2	3,0	105	1,7	1,1	
8		7,4			3,5	2,5	110	1,8	1,2	
9		7,5			3,6	2,3	115	1,9	1,3	
10		1,2	0,9	6,0	3,8	2,3	80	1,5	0,8	
11				6,2	3,9	2,2	85	1,7	0,9	
12				6,5	4,0	2,1	90	1,6	1,0	
13				6,7	4,1	2,5	95	1,4	1,1	
14				7,0	4,2	2,4	100	2,1	1,2	
15				7,2	3,5	2,8	105	2,0	1,3	
16				7,4	3,6	2,9	110	1,9	1,4	
17				7,5	3,7	2,0	115	1,8	1,5	
18		1,2	0,95	6,0	3,5	2,0	80	1,4	0,8	
19				6,2	3,6	2,1	85	1,5	0,9	
20				6,5	3,7	2,2	90	1,6	1,0	
21				6,7	3,8	2,4	95	1,7	1,1	
22				7,0	3,9	2,5	100	1,8	1,2	
23				7,2	4,0	2,7	105	1,9	1,3	
24				7,4	4,1	2,8	110	2,0	1,4	
25				7,5	4,2	3,0	115	2,1	1,5	

4.2. Исходные данные к задаче №2

Таблица 3

Группа	Вариант	R , м	r , м	L_{BO} , м	ε_y , c^{-2}	n_z , g	G , кН	$L_{нос}$, м	l , м	h , м	c , м	d , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	0,8	5,0	1,5	0,8	60	4,0	10	1,5	1,3	0,5
	2			5,2	1,7	1,0	65	4,2	10	1,6	1,3	0,5
	3			5,5	2,0	1,2	70	4,5	11	1,5	1,4	0,5
	4			5,7	2,2	1,4	75	4,7	11	1,7	1,4	0,6
	5			6,0	2,5	1,5	80	5,0	12	1,8	1,5	0,6
	6			6,2	2,7	1,6	85	5,2	12	1,9	1,5	0,6
	7			6,5	3,0	1,7	90	5,5	13	2,0	1,6	0,7
	8			6,7	3,5	1,8	95	5,7	14	2,1	1,7	0,7
	9			7,0	4,0	2,0	100	6,0	15	2,2	1,75	0,7
	10	1	0,85	5,0	1,5	0,8	65	4,0	10	1,5	1,6	0,6
	11			5,2	2,0	0,9	70	4,5	10	1,5	1,6	0,6
	12			5,5	2,2	1,0	75	5,0	11	1,6	1,65	0,7
	13			5,7	2,5	1,1	80	5,5	11	1,6	1,7	0,8
	14			6,0	3,0	1,2	85	6,0	12	1,7	1,75	0,8
	15			6,2	3,2	1,3	90	6,0	12	1,7	1,8	0,9
	16			6,5	3,5	1,4	95	6,5	14	1,8	1,7	1,0
	17			7,0	4,0	1,5	100	7,0	15	1,8	1,85	1,0
	18			1	0,9	5,0	1,5	1,0	65	4,0	11	1,5
	19	5,5	1,7			1,2	70	4,5	10	1,6	1,6	1,0
	20	5,7	2,0			1,4	75	4,5	10	1,5	1,7	1,1
	21	6,0	2,5			1,5	80	5,0	11	1,7	1,8	1,1
	22	6,2	2,7			1,6	85	5,0	12	1,8	1,9	1,2
	23	6,5	3,0			1,7	90	5,5	12	1,8	2,0	1,2
	24	7,0	3,5			1,8	95	5,5	14	1,9	2,1	1,3
	25	5,5	4,0			2,0	100	6,0	15	2,0	2,2	1,3
2	1	1,1	0,8			5,0	1,5	0,9	65	4,0	10	1,6
	2			5,2	1,7	1,0	70	4,5	10	1,5	1,3	0,6
	3			5,5	2,0	1,1	75	4,7	11	1,6	1,4	0,6
	4			5,7	2,2	1,2	80	5,0	11	1,7	1,4	0,7
	5			6,0	2,5	1,3	85	5,5	12	1,8	1,5	0,7
	6			6,2	2,7	1,4	90	5,7	12	1,9	1,5	0,7
	7			6,5	3,0	1,5	95	6,0	13	2,0	1,6	0,8
	8			6,7	3,5	1,6	100	6,5	14	2,1	1,7	0,8
	9			7,0	4,0	1,7	105	7,0	15	2,2	1,75	0,8
	10			5,0	1,5	1,0	65	4,5	10	1,5	1,3	0,6

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
2	11	1,1	0,85	5,2	1,7	1,1	70	4,7	11	1,6	1,4	0,6		
	12			5,5	2,0	1,2	75	5,0	11	1,7	1,4	0,7		
	13			5,7	2,5	1,3	80	5,5	12	1,8	1,5	0,7		
	14			6,0	2,7	1,4	85	5,7	12	1,9	1,5	0,7		
	15			6,2	3,0	1,5	90	6,0	13	2,0	1,6	0,8		
	16			6,5	3,5	1,6	95	6,5	14	2,1	1,7	0,8		
	17			7,0	4,0	1,7	100	7,0	15	2,2	1,75	0,8		
	18			5,0	1,7	1,2	70	4,5	11	1,5	1,5	0,7		
	19	1,1	0,9	5,2	2,0	1,3	75	4,7	11	1,6	1,6	0,7		
	20			5,5	2,5	1,4	80	5,0	12	1,7	1,6	0,8		
	21			5,7	2,7	1,5	85	5,5	12	1,8	1,7	0,8		
	22			6,0	3,0	1,6	90	5,7	13	1,9	1,7	0,9		
	23			6,2	3,5	1,7	95	6,0	14	2,0	1,8	0,9		
	24			6,5	3,7	1,8	100	6,5	14	2,1	1,9	1,0		
	25			7,0	4,0	2,0	105	7,0	15	2,2	2,0	1,0		
	1			5,0	3,0	1,2	65	4,5	11	1,5	1,5	0,7		
	3	2	1,2	0,85	5,0	3,2	1,3	70	4,7	11	1,6	1,6	0,7	
		3			5,5	3,4	1,4	75	5,0	12	1,7	1,6	0,8	
4		5,5			3,5	1,5	80	5,5	12	1,8	1,7	0,8		
5		6,0			3,6	1,6	85	5,7	13	1,9	1,7	0,9		
6		6,5			3,8	1,7	90	6,0	14	2,0	1,8	0,9		
7		6,5			4,0	1,8	95	6,5	14	2,0	1,9	1,0		
8		7,0			4,1	1,9	100	6,7	15	2,1	2,0	1,0		
9		7,0			4,2	2,0	105	7,0	15	2,2	2,1	1,1		
10		5,5			3,7	1,3	70	5,0	10	1,5	1,6	0,7		
11		1,2			0,9	5,5	3,6	1,4	75	5,2	11	1,6	1,6	0,7
12			6,0	3,5		1,5	80	5,5	12	1,7	1,7	0,8		
13			6,0	3,4		1,6	85	5,7	13	1,8	1,7	0,8		
14			6,5	3,3		1,7	90	6,0	14	1,9	1,8	0,9		
15			6,5	3,2		1,8	95	6,2	14	2,0	1,9	0,9		
16			7,0	3,1		1,9	100	6,5	15	2,0	2,0	1,0		
17			7,0	3,0		2,0	105	7,0	15	2,1	2,1	1,0		
18			5,5	3,5		1,1	70	5,2	15	1,6	1,7	0,9		
19			1,2	0,95		5,5	3,6	1,2	75	5,5	14	1,7	1,8	0,9
20						6,0	3,7	1,3	80	5,7	13	1,8	1,9	1,0
21		6,0			3,8	1,4	85	6,0	12	1,9	2,0	1,0		
22		6,5			3,9	1,5	90	6,2	12	2,0	2,1	1,1		
23		6,5			4,0	1,6	95	6,5	11	2,0	2,2	1,2		
24		7,0			4,1	1,7	100	6,7	11	2,1	2,3	1,4		
25		7,0			4,2	1,8	105	7,0	10	2,2	2,4	1,3		

4.3. Исходные данные к задачам № 3, 4

Таблица 4

Группа	Вариант	χ , градус	α_0 , градус	η ,	λ ,	f ,	$G_{кр}$,	D , м	F , кН/м	$V_{опр}$,	G , кН										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12										
1	1	0°	20°	2	4	1,2	0,15 G	1,8	3000	0,3 M	200										
	2								3100												
	3								3200												
	4								3300												
	5								3400												
	6								3500												
	7								3600												
	8								3700												
	9								3800												
	10								3900												
	11								4000												
	12								4100												
	13								4200												
	14								4300												
	15								4400												
	16								4500												
1	17	0°	30°	2	5	1,2	0,15 G	1,9	3000	0,3 M	220										
	18								3100												
	19								3200												
	20								3300												
	21								3400												
	22								3500												
	23								3600												
	24								3700												
	25								3800												
	2								1										3900		
									2										4000		
									3										4100		
									4										4200		
									5										4300		
6		4400																			
7		4500																			
2		8		150°	2	6	1,2	0,15 G	2,0	3000	0,3 M								240		
		9								3100											
		10								3200											

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2	11	0°	150°	2	6	1,2	0,15 G	2,0	3300	0,3 M	240	
	12								3400			
	13								3500			
	14								3600			
	15								3700			
	16								3800			
	17								3900			
	18								4000			
	19								4100			
	20								4200			
	21								4300			
	22								4400			
	23								4500			
	3								24			0°
25		3100										
1		3200										
2		3300										
3		3400										
4		3500										
5		3600										
6		3700										
7		3800										
8		3900										
9		4000										
10		4100										
11		4200										
12		4300										
13		4400										
14		4500										
15		3000	45°	20°	3	5	1,5	0,2 G	1,7	3100	0,3 M	200
16		3200										
17		3300										
18		3400										
19		3500										
20		3600										
21		3700										
22		3800										
23		3900										
24	4000											
25	4000											

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	1	45°	20°	3	5	1,5	0,2 G	1,7	4100	0,3 M	200
	2								4200		
	3								4300		
	4								4400		
	5								4500		
	6	45°	30°	3	6	1,5	0,2 G	1,8	3000	0,4 M	220
	7								3100		
	8								3200		
	9								3300		
	10								3400		
	11								3500		
	12								3600		
	13								3700		
	14								3800		
	15								3900		
	16								4000		
	17								4100		
	18								4200		
	19								4300		
	20								4400		
	21	4500									
	22								3000		
	23								3100		
	24								3200		
	25								3300		
	3400										
5	1	45°	150°	4	5	1,5	0,2 G	1,9	3500	0,4 M	240
	2								3600		
	3								3700		
	4								3800		
	5								3900		
	6								4000		
	7								4100		
	8								4200		
	9								4300		
	10								4400		
	11	4500									
	12										
	13	45°	160°	4	6	1,3	0,2 G	2,0	3000	0,35 M	230
	14								3100		

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	15	45°	160°	4	6	1,3	0,2 G	2,0	3200	0,35 M	230
	16								3300		
	17								3400		
	18								3500		
	19								3600		
	20								3700		
	21								3800		
	22								3900		
	23								4000		
	24								4100		
	25								4200		
6	1	55°	20°	5	4	1,3	0,2 G	1,6	4300	0,4 M	200
	2								4400		
	3								4500		
	4								3000		
	5								3100		
	6								3200		
	7								3300		
	8								3400		
	9								3500		
	10								3600		
	11								3700		
	12								3800		
	13								3900		
	14								4000		
	15								4100		
	16								4200		
	17								4300		
	48								4400		
	49								4500		
	7								20		
21		3100									
22		3200									
23		3300									
24		3400									
25		3500									
7	1								3000		
	2								3100		
	3								3200		

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12										
7	4	55°	30°	5	5	1,3	0,15 G	1,8	3300	0,4 M	210										
	5								3400												
	6								3500												
	7								3600												
	8								3700												
	9								3800												
	10								3900												
	11								4000												
	12								4100												
	13								4200												
	14								4300												
	15								4400												
	16								4500												
	8								17			55°	150°	5	6	1,5	0,15 G	1,7	3000	0,4 M	220
									18										3100		
									19										3200		
20		3300																			
21		3400																			
22		3500																			
23		3600																			
24		3700																			
25		3800																			
8		1	55°	160°	4	6	1,5	0,2 G	2,0	3900	0,3 M								250		
		2								4000											
		3								4100											
		4								4200											
		5								4300											
		6								4400											
		7								4500											
	8	3000																			
	9	3100																			
	10	3200																			
	11	3300																			
	12	3400																			
	13	3500																			
	14	3600																			
	15	3700																			
	16	3800																			
17	3900																				

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	18	55° 55°	160°	4	6	1,5	0,2G	2,0	4000	0,3M	250
	19								4100		
	20								4200		
	21								4300		
	22								4400		
	23								4500		
	24		3000	0,4M	200						
	25		3100								
			30°	4	5	1,5	0,15G	1,6			

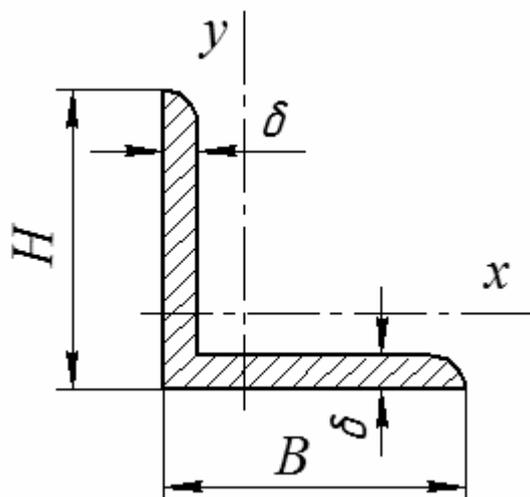
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Кан, С. Н. Расчет самолета на прочность/ С. Н. Кан, И. А. Свердлов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1966. – 519 с.
- 2 Лизин, В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций/ В. Т. Лизин В. А. Пяткин – М. : Машиностроение, 1976. – 408 с.

Приложение А

(Рекомендуемое)

Характеристики прессованных профилей



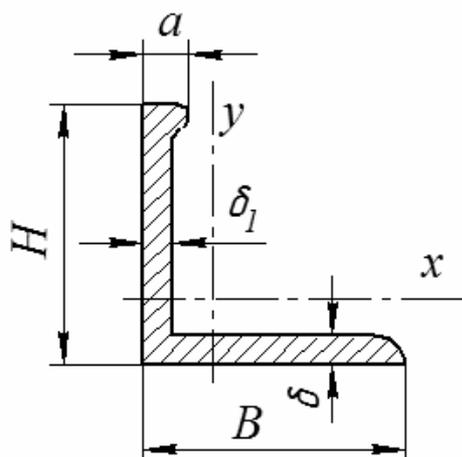
Профиль Пр-100
Материал Д16Т, В95

Таблица А.1

№№ профилей	$H = B,$ мм	$\delta,$ мм	$A,$ см ²	$I_x,$ см ⁴	$W_x,$ см ³
1	2	3	4	5	6
1	12	1	0,234	0,032	0,036
24	12,5	1,6	0,377	0,055	0,045
2	15	1	0,294	0,083	0,057
51	15	1,2	0,353	0,077	0,070
3	15	1,5	0,434	0,091	0,084
4	15	2	0,564	0,114	0,108
52	15	3	0,820	0,163	0,160
27	16	2,4	0,726	0,167	0,149
53	18	1,3	0,524	0,164	0,126
29	19	2,4	0,861	0,280	0,208
30	19	3,2	1,125	0,362	0,275
54	20	1	0,397	0,148	0,100
55	20	1,2	0,473	0,181	0,125
6	20	1,5	0,584	0,222	0,153
7	20	2	0,764	0,284	0,198
8	25	1,5	0,734	0,444	0,243
9	25	2	0,964	0,573	0,317
10	25	2,5	1,180	0,693	0,387
34	25	3,2	1,509	0,875	0,498

Продолжение таблицы А.1

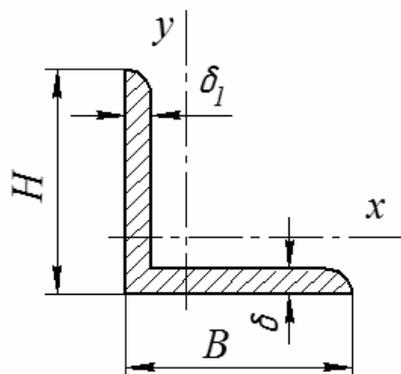
1	2	3	4	5	6
35	25	4	1,857	1,050	0,603
36	25	5	2,242	1,323	0,781
57	30	1,5	0,884	0,788	0,358
10	30	2	1,164	1,011	0,163
36	30	2,5	0,441	1,254	0,580
11	30	3	1,720	1,439	0,670
39	32	3,5	2,131	1,060	0,905
59	32	6,5	3,728	3,427	1,580
60	40	2	1,564	2,490	0,850
61	40	2,5	1,994	3,049	1,050
12	40	3	2,320	3,549	1,224
42	40	3,5	2,694	1,122	1,430
13	40	4	3,057	4,549	1,587
14	45	4	3,457	6,592	2,034
15	45	5	4,277	7,957	2,481
62	50	3	2,920	7,192	1,970
16	50	4	3,857	9,171	2,536
17	50	5	4,777	11,107	3,101
22	50	8	5,655	12,906	3,640
63	50	6,5	8,110	14,200	4,040
18	60	3	5,777	20,00	4,620
23	60	6	6,855	23,011	5,858



Профиль Пр-102
Материал Д16Т, В95

Таблица А.2

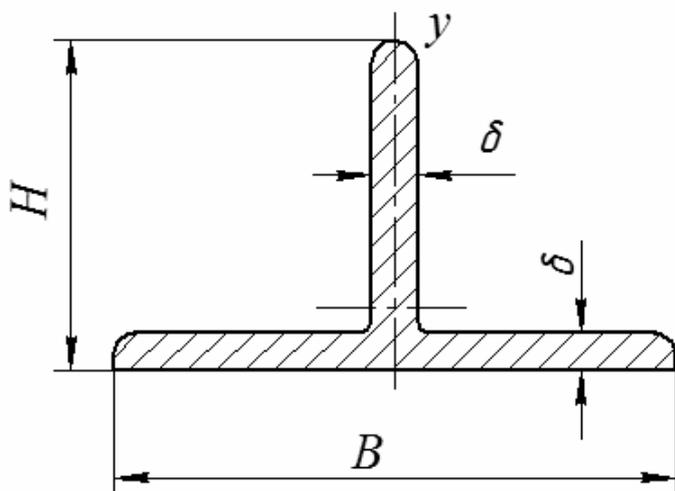
№№ проф.	H, мм	B, мм	δ, мм	δ ₁ , мм	a, мм	A, см ²	I _x , см ⁴	I _y , см ⁴	W _x , см ³	W _y , см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	13	12	1	1	3	0,292	0,064	0,033	0,080	0,037
30	16	15	1	1	3	0,352	0,113	0,066	0,103	0,057
2	20	13	1	1	3	0,372	0,196	0,046	0,162	0,045
35	20	15	1,2	1,2	4	0,505	0,264	0,083	0,206	0,070
3	20	15	1,5	1,5	5	0,651	0,341	0,099	0,300	0,087
31	20	20	1,5	1,5	3,5	0,634	0,292	0,228	0,294	0,150
4	23	13	35	25	4	1,857	1,050	0,603	0,446	0,128
5	25	18	36	25	5	2,242	1,323	0,781	0,464	0,155
7	25	20	57	30	1,5	0,884	0,788	0,358	0,575	0,203
32	25	25	2,5	2,5	6,5	1,348	1,043	0,721	0,602	0,378
33	29	20	1,5	2,5	6	1,161	1,179	0,261	0,648	0,258
18	29	25	1,6	1,8	6	1,118	1,234	0,510	0,660	0,263
8	30	20	1,5	1,5	5	0,876	1,068	0,252	0,606	0,160
9	30	20	2	2	6	1,161	1,360	0,321	0,778	0,208
34	32	25	2,5	2,5	6,5	1,520	1,971	0,764	0,915	0,259
10	35	20	2	2	6	1,261	2,012	0,333	1,000	0,212
11	40	25	2,5	2,5	7	1,825	3,746	0,798	1,583	0,409
19	48,5	30	2,5	2,5	10	2,500	8,072	1,509	2,780	0,627
20	50	23	3	3	10	2,784	8,830	1,008	2,920	0,502
12	50	30	4	4	10	3,533	10,860	2,106	3,698	0,918
21	60	28	3,5	3,5	12	3,875	17,515	1,684	4,950	0,749
13	65	40	5	5	12	5,687	29,363	6,280	7,527	2,046
22	75	30	4	4	14	5,302	37,466	2,480	8,640	1,026
14	75	40	6	6	15	7,650	52,735	7,543	12,226	2,460
23	90	35	4,5	4,5	16	7,093	70,023	4,407	15,100	1,600
24	100	40	5	5	18	8,878	109,160	7,632	21,000	2,438



Профиль Пр-111
Материал Д16Т

Таблица А.3

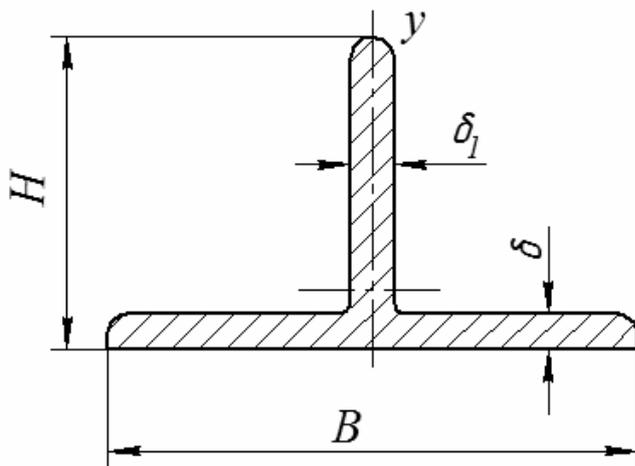
№№ проф.	H , мм	B , мм	δ , мм	δ_1 , мм	A_2 , см ²	I_x , см ⁴	I_y , см ⁴	W_x , см ³	W_y , см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	15	13	1,5	1	0,333	0,065	0,056	0,058	0,062
13	20	15	2	1,5	0,575	0,214	0,119	0,110	0,110
1	25	15	1,5	1	0,467	0,288	0,098	0,160	0,088
30	25	15	1,5	1,5	0,588	0,381	0,108	0,227	0,092
2	25	20	2,5	1,5	0,846	0,456	0,335	0,243	0,242
3	25	20	2,5	2	0,958	0,556	0,354	0,310	0,247
4	25	20	3	2,5	1,101	0,666	0,414	0,378	0,290
31	25	20	5	2	1,393	0,600	0,560	0,317	0,448
5	30	20	2	1,5	0,825	0,733	0,306	0,342	0,207
6	30	20	3	2,5	1,286	1,119	0,437	0,541	0,297
32	31	25	5	2,5	1,903	1,444	1,183	0,620	0,720
33	32	19	5	2	1,498	1,256	0,662	0,527	0,435
34	32	26	3	2,5	1,516	1,521	0,970	0,665	0,520
15	40	20	2	2	1,374	2,236	0,479	0,802	0,318
7	40	25	4	3	2,101	3,233	1,132	1,164	0,618
35	40	28	5	2,5	2,281	3,076	1,848	1,030	0,974
16	48	30	9	4	4,241	7,813	3,813	2,260	1,890
17	50	20	4	3	2,201	5,686	0,651	1,745	0,420
18	50	20	5	3	2,352	5,861	0,750	1,760	1,530
8	50	30	4	3	2,601	6,429	2,043	1,848	0,914
19	50	30	9	4	4,321	8,793	3,787	2,440	1,900
36	50	38	12	8	7,542	15,470	9,657	4,600	3,870
20	50	45	12	4	6,922	9,940	13,781	2,580	5,100
37	52	28	5	2,5	2,581	6,516	1,974	1,720	1,000
38	53	35	6,5	3,5	3,922	9,887	4,797	2,540	1,990
9	65	40	5	4	4,432	18,667	6,128	4,150	2,047
39	90	25	6,5	3,5	4,591	38,790	2,069	6,680	1,060
40	112	29	9	5	7,780	96,880	4,460	13,80	1,990



Профиль Пр-113
Материал Д16Т, В95

Таблица А.4

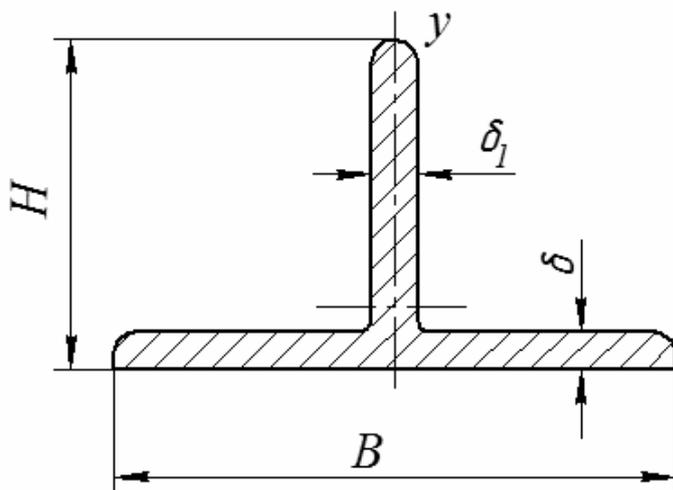
№№ проф.	H , мм	B , мм	δ , мм	A_2 , см ²	I_x , см ⁴	I_y , см ⁴	W_x , см ³	W_y , см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	15	25	1	0,405	0,077	0,130	0,064	0,104
2	20	30	1,5	0,740	0,247	0,333	0,159	0,222
9	25	29	1,6	0,847	0,494	0,327	0,264	0,226
3	25	35	1,5	0,890	0,486	0,530	0,251	0,303
15	25	48	1,5	1,082	0,531	1,391	1,391	0,264
16	25	50	2	1,499	0,706	2,085	0,350	0,833
17	25	50	2,5	1,851	0,865	2,611	0,432	1,040
10	29	38	1,6	1,055	0,822	0,734	0,370	0,386
18	29	58	3,5	2,991	1,835	5,717	0,800	1,975
4	30	40	1,5	1,040	0,843	0,791	0,364	0,395
19	32	45	3	2,259	2,028	2,281	0,832	1,010
20	35	32	1,5	1,000	1,253	0,414	0,491	0,259
11	35	35	4	2,713	3,109	1,449	1,250	0,828
5	35	40	2	1,468	1,685	1,052	0,643	0,526
6	40	45	3	2,479	3,642	2,241	1,228	0,996
7	40	45	4	3,274	4,652	2,979	1,085	0,324
21	45	40	2,2	1,860	4,007	1,179	1,215	0,590



Профиль Пр-109
Материал Д16Т, В95

Таблица А.5

№№ проф.	H , мм	B , мм	δ , мм	δ_1 , мм	A_2 , см ²	I_x , см ⁴	I_y , см ⁴	W_x , см ³	W_y , см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20	30	1,5	2	0,826	0,302	0,334	0,203	0,222
7	20	37	2	2	1,117	0,349	0,851	0,219	0,460
10	24	38	3,5	5	2,462	1,277	1,621	0,230	0,850
2	25	35	2	2,5	1,291	0,730	0,706	0,394	0,403
11	25	70	2,5	5	3,180	2,225	7,177	1,050	2,050
3	30	40	2	3	1,663	1,442	1,058	0,689	0,529
4	35	40	2,5	4	2,345	2,819	1,330	1,163	0,665
12	50	56	3	3,5	3,394	8,367	4,417	2,290	1,580



Профиль Пр-315
Материал Д16Т, В95

Таблица А.6

№№ проф.	H , мм	B , мм	δ , мм	δ_1 , мм	A_2 , см ²	I_x , см ⁴	I_y , см ⁴	W_x , см ³	W_y , см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20	38	2	1,5	1,047	0,277	0,325	0,168	0,485
2	25	66	3	2,5	2,569	0,916	7,253	0,440	2,200
3	26	40	4,5	3	2,472	1,090	2,405	0,535	1,200
4	30	45	6,5	4	3,972	2,186	4,932	0,950	2,180
5	40	50	6,5	3,5	4,491	4,710	6,762	1,490	2,600
6	41	76	4,5	3,5	4,805	5,450	16,51	1,630	4,340
7	42	76	6,5	3,5	6,235	5,740	23,81	1,670	6,250
8	50	76	4,5	3,5	5,120	9,711	16,52	2,430	4,350
9	70	68	8	6,5	9,625	4,111	21,14	7,250	6,210
10	74	50	4	3	4,139	22,80	4,166	4,280	1,670
11	75	41	5	3	4,257	23,69	2,936	4,390	1,430
12	80	65	5	4	6,405	39,80	11,44	6,670	3,520
13	89	14	4	3,5	4,752	48,56	2,860	6,870	1,300
14	102	50	4	3	4,970	52,68	4,172	7,540	1,678

Стандартные значения толщины листов:

$\delta = 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0.$