$ЦНВ1 = 5 \quad ЦНВ2 = 1 \quad ЦНВ3 = 5 \quad ЦНВ4 = 5$

$a = 1.4 \cdot м$

$q = 15 \cdot 10^3 = 1.5 \times 10^4 \cdot \frac{Н}{м}$

$P = q \cdot a \quad = 15 \cdot 10^3 \cdot 1.4 = 2.1 \times 10^4 \cdot \frac{Н}{м}$

$M = 3.5 \cdot q \cdot a^2 = 3.5 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 1.4^2 = 1.029 \times 10^5 \cdot Н \cdot м$

$n = 3.6$

Изгибающие моменты, н*м

Md= 102900

Сосредоточенные силы, Н

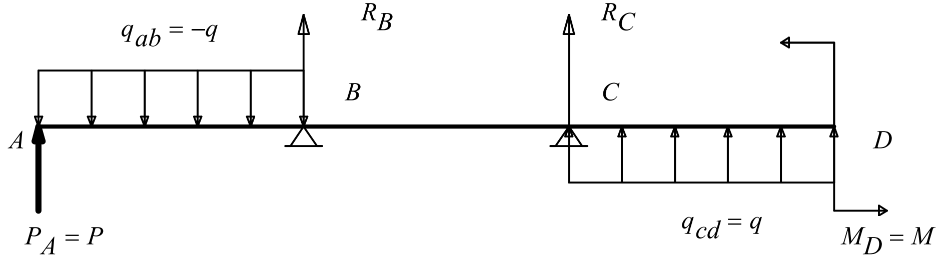
Pa= 21000

Распределенные нагрузки, Н/м

qab= -15000 qcd= 15000

Длины участков, м

lab= 1,4 lbc= 1,4 lcd= 1,4



Решение: Определим реакции опор.

Составим уравнения статики. Сумма момментов относительно опоры B равна 0

ΣMb=0

$$\frac{q_{ab} \cdot l_{ab}^2}{2} - P_a \cdot l_{ab} + M_d + R_c \cdot l_{bc} + l_{cd} \cdot q_{cd} \cdot \left(l_{bc} + \frac{l_{cd}}{2}\right) = 0$$

$$R_c = -\frac{\frac{q_{ab} \cdot l_{ab}^2}{2} - P_a \cdot l_{ab} + M_d + l_{cd} \cdot q_{cd} \cdot \left(l_{bc} + \frac{l_{cd}}{2}\right)}{l_{bc}}$$

$$R_c = -\frac{\frac{15000\cdot 1.4^2}{2} - 21000\cdot 1.4 + 102900 + 1.4\cdot 15000\cdot\left(1.4 + \frac{1.4}{2}\right)}{1.4}$$

$$R_c = -94500.0 = -9.45\times 10^4\cdot H$$

Сумма момментов относительно опоры C равна 0

ΣMc=0 $$\frac{q_{cd}\cdot l_{cd}^2}{2} + M_d - P_a\cdot(l_{ab} + l_{bc}) - R_b\cdot l_{bc} + l_{ab}\cdot q_{ab}\cdot\left(\frac{l_{ab}}{2} + l_{bc}\right) = 0$$

$$R_b = \frac{\frac{q_{cd}\cdot l_{cd}^2}{2} + M_d - P_a\cdot(l_{ab} + l_{bc}) + l_{ab}\cdot q_{ab}\cdot\left(\frac{l_{ab}}{2} + l_{bc}\right)}{l_{bc}}$$

$$R_b = \frac{\frac{15000\cdot 1.4^2}{2} + 102900 - 21000\cdot(1.4 + 1.4) + 1.4\cdot 15000\cdot\left(\frac{1.4}{2} + 1.4\right)}{1.4}$$

$$R_b = 73500.0 = 7.35\times 10^4\cdot H$$

Сделаем проверку расчетов

Сумма сил на ось Y равна 0

$$\Sigma Y = 0$$

$$\Sigma Y = P_a + R_b + R_c - l_{ab}\cdot q_{ab} + l_{cd}\cdot q_{cd} = 0$$

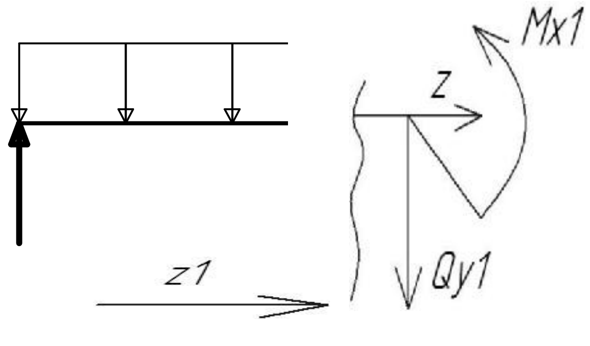
$$\Sigma Y = 21000 + R_b + R_c - 1.4\cdot 15000 + 1.4\cdot 15000 = 0$$

$$\Sigma Y = 21000 + 1.4\cdot 15000 - 1.4\cdot 15000 + 73500 + -94500 = 0$$

Проверка выполнена. Реакции опор найдены правильно

Построим эпюры поперечных сил и изгибающих моментов. Для этого определим поперечные силы и изгибающие моменты на участках

1 участок $0 \le z_1 \le l_{ab}$



при $z_1 = 0$

$$M_{1x} = P_a \cdot z_1 - \frac{q_{ab} \cdot z_1^2}{2}$$

$$Q_{1y} = P_a - q_{ab} \cdot z_1$$

Подставляя числовые значения, получим

$$M_{1x} = 21000 \cdot 0 - \frac{15000 \cdot 0^2}{2} = 0 \cdot H \cdot м$$

$$Q_{1y} = 21000 - 15000 \cdot 0 = 2.1 \times 10^4 \cdot H$$

при $z_1 = \frac{l_{ab}}{2} = 0.7 \cdot м$

$$M'_{1x} = 21000 \cdot 0.7 - \frac{15000 \cdot 0.7^2}{2} = 1.102 \times 10^4 \cdot H \cdot м$$

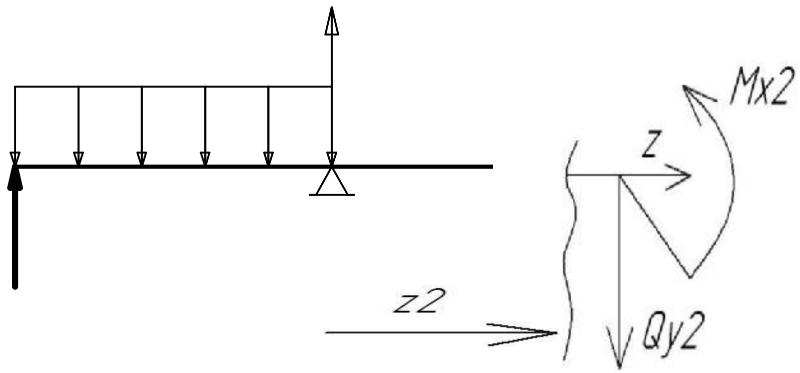
$$Q'_{1y} = 21000 - 15000 \cdot 0.7 = 1.05 \times 10^4 \cdot H$$

при $z_1 = l_{ab} = 1.4 \cdot м$

$$M''_{1x} = 21000 \cdot 1.4 - \frac{15000 \cdot 1.4^2}{2} = 1.47 \times 10^4 \cdot H \cdot м$$

$$Q''_{1y} = 21000 - 15000 \cdot 1.4 = 0 \cdot H$$

2 участок $0 \le z_2 \le l_{bc}$



при $z_2 = 0$

$$M_{2x} = \left(l_{ab} + z_2\right)\cdot P_a + R_b\cdot z_2 - l_{ab}\cdot q_{ab}\cdot\left(\frac{l_{ab}}{2} + z_2\right)$$

$$Q_{2y} = P_a + R_b - l_{ab}\cdot q_{ab}$$

Подставляя числовые значения, получим

$$M_{2x} = (1.4 + 0)\cdot 21000 + 73500\cdot 0 - 1.4\cdot 15000\cdot\left(\frac{1.4}{2} + 0\right) = 1.47\times 10^4\cdot H\cdot м$$

$$Q_{2y} = 21000 + 73500 - 1.4\cdot 15000 = 7.35\times 10^4\cdot H$$

при $z_2 = \dfrac{l_{bc}}{2} = 0.7\cdot м$

$$M'_{2x} = (1.4 + 0.7)\cdot 21000 + 73500\cdot 0.7 - 1.4\cdot 15000\cdot\left(\frac{1.4}{2} + 0.7\right) = 6.615\times 10^4\cdot H\cdot м$$

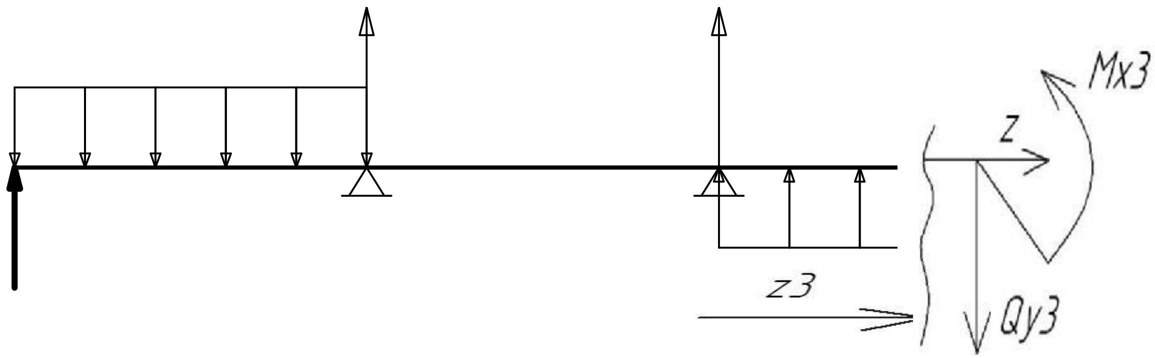
$$Q'_{2y} = 21000 + 73500 - 1.4\cdot 15000 = 7.35\times 10^4\cdot H$$

при $z_2 = l_{bc} = 1.4\cdot м$

$$M''_{2x} = (1.4 + 1.4)\cdot 21000 + 73500\cdot 1.4 - 1.4\cdot 15000\cdot\left(\frac{1.4}{2} + 1.4\right) = 1.176\times 10^5\cdot H\cdot м$$

$$Q''_{2y} = 21000 + 73500 - 1.4 \cdot 15000 = 7.35 \times 10^{4} \cdot H$$

3 участок $0 \le z_3 \le l_{cd}$



при $z_3 = 0$

$$M_{3x} = \left(l_{ab} + l_{bc} + z_3\right) \cdot P_a + \frac{q_{cd} \cdot z_3^{2}}{2} + R_b \cdot \left(l_{bc} + z_3\right) + R_c \cdot z_3 - l_{ab} \cdot q_{ab} \cdot \left(\frac{l_{ab}}{2} + l_{bc} + z_3\right)$$

$$Q_{3y} = P_a + R_b + R_c - l_{ab} \cdot q_{ab} + q_{cd} \cdot z_3$$

Подставляя числовые значения, получим

$$M_{3x} = (1.4 + 1.4 + 0) \cdot 21000 + \frac{15000 \cdot 0^{2}}{2} + 73500 \cdot (1.4 + 0) + -94500 \cdot 0 - 1.4 \cdot 15000 \cdot \left(\frac{1.4}{2} + 1.4 + 0\right) = 1.176 \times 10^{5} \cdot H \cdot м$$

$$Q_{3y} = 21000 + 73500 + -94500 - 1.4 \cdot 15000 + 15000 \cdot 0 = -2.1 \times 10^{4} \cdot H$$

при $z_3 = \frac{l_{cd}}{2} = 0.7 \cdot м$

$$M'_{3x} = (1.4 + 1.4 + 0.7) \cdot 21000 + \frac{15000 \cdot 0.7^{2}}{2} + 73500 \cdot (1.4 + 0.7) + -94500 \cdot 0.7 - 1.4 \cdot 15000 \cdot \left(\frac{1.4}{2} + 1.4 + 0.7\right) = 1.066 \times 10^{5} \cdot H \cdot м$$

$$Q'_{3y} = 21000 + 73500 + -94500 - 1.4 \cdot 15000 + 15000 \cdot 0.7 = -1.05 \times 10^{4} \cdot H$$

при $z_3 = l_{cd} = 1.4 \cdot м$

$$M''_{3x} = (1.4 + 1.4 + 1.4) \cdot 21000 + \frac{15000 \cdot 1.4^2}{2} + 73500 \cdot (1.4 + 1.4) + -94500 \cdot 1.4 - 1.4 \cdot 15000 \cdot \left(\frac{1.4}{2} + 1.4 + 1.4\right) = 1.029 \times 10^5 \cdot Н \cdot м$$

$$Q''_{3y} = 21000 + 73500 + -94500 - 1.4 \cdot 15000 + 15000 \cdot 1.4 = 0 \cdot Н$$

По условию прочности подбираем рациональный профиль из семи заданных ниже форм

Допустимое нормальное напряжение

$$I\sigma I = \frac{\sigma_T \cdot 10^6}{n} = \frac{270 \cdot 10^6}{3.6} = 7.5 \times 10^7 \cdot Па$$

Из условия прочности

$$\sigma_{max} = \frac{|M_{max}|}{W_x} \leq I\sigma I$$

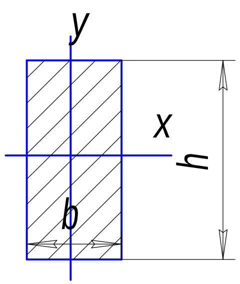
тогда расчетный осевой момент сопротивления сечения балки

$$W_x = \frac{|M_{max}|}{I\sigma I} = \frac{|117600.0|}{0.75 \cdot 10^8} = 0.00157 = 1.57 \times 10^{-3} \cdot м^3$$

$$W_x = 1.569 \times 10^3 \cdot см^3$$

Определяем размеры наиболее распространенных балок

а) прямоугольник



$$h = 2 \cdot b$$

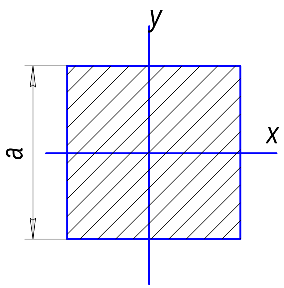
$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{2 \cdot b^3}{3}$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot W_x}{2}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1569.0}{2}} = 13.3 = 13.3 \cdot см$$

$$h = 2 \cdot b = 2 \cdot 13.3 = 26.6 \cdot см$$

$$F_1 = h \cdot b = 26.6 \cdot 13.3 = 354.0 = 354 \cdot см^2$$

б) квадрат

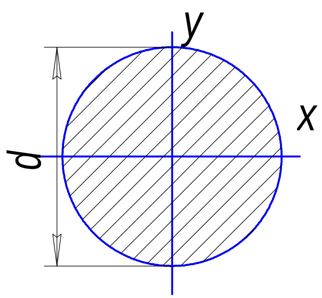


$$W_x = \frac{a^3}{6}$$

$$a = \sqrt[3]{6 \cdot W_x} = \sqrt[3]{6 \cdot 1569.0} = 21.1 = 21.1 \cdot см$$

$$F_2 = a^2 = 21.1^2 = 445.0 = 445 \cdot см^2$$

в) круг

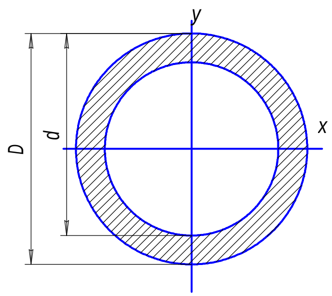


$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot W_x}{3.14}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 1569.0}{3.14}} = 25.2 = 25.2 \cdot см$$

$$F_3 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 25.2^2}{4} = 499.0 = 499 \cdot см^2$$

г) кольцо



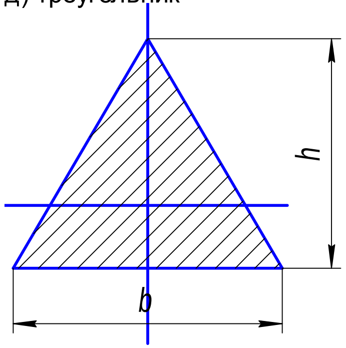
$$D = 2 \cdot d \qquad \alpha = \frac{d}{D} = 0.5 \qquad \alpha = 0.5$$

$$W_x = \frac{\pi D^3}{32}\left(1 - \alpha^4\right)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot W_x}{3.14 \cdot \left(1 - \alpha^4\right)}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 1569.0}{3.14 \cdot \left(1 - 0.5^4\right)}} = 25.7 = 25.7 \cdot см$$

$$F_4 = \frac{\pi}{4} \cdot \left[D^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2\right] = \frac{\pi}{4} \cdot \left[25.7^2 - \left(\frac{25.7}{2}\right)^2\right] = 389.0 = 389 \cdot см^2$$

д) треугольник



при вычислении напряжения в вершине треугольника

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{24}$$

пусть $b = h$

$$W_x = \frac{b^3}{24}$$ тогда

$$b = \sqrt[3]{24 \cdot W_x} = \sqrt[3]{24 \cdot 1569.0} = 33.5 = 33.5 \cdot см$$

$$h = b = 33.5 \cdot см$$

$$F_5 = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{33.5 \cdot 33.5}{2} = 561.0 = 561 \cdot см^2$$

е) швеллер

При требуемом моменте сопротивления $W_x = 1.569 \times 10^3 \cdot см^3$

Выберем:

Номер швеллера - *36*

момент сопротивления швеллера $W_{x.sv} = 601 \cdot см^3$

момент инерции $J_6 = 1.082 \times 10^4 \cdot см^4$

число швеллеров - *три*

Площадь одного швеллера $F_6 = 53.4 \cdot см^2$

ж) двутавр

Выберем:

Номер двутавра *50*

момент сопротивления двутавра $W_{x7} = 1.57 \times 10^3 \cdot см^3$

момент инерции двутавра $J_7 = 3.929 \times 10^4 \cdot см^4$

один

число двутавров *один*

Площадь одного двутавра $F_7 = 97.8 \cdot см^2$

Очевидно , что самое оптимальное сечение у *двутавра*

который имеет минимальное значение совокупной площади поперечного сечения

тогда $J_x = 3.929 \times 10^4 \cdot см^4$ *или* $J_{x'} = 3.929 \times 10^{-4} \cdot м^4$

Оцениваем материалоемкость балок с подобранными сечениями, принимая площадь наимеьшего сечения за 100%

$$\frac{F_1}{F_{min}} = \frac{354}{97.8} = 361.963 \cdot \%$$

$$\frac{F_4}{F_{min}} = \frac{389}{97.8} = 397.751 \cdot \%$$

$$\frac{F_2}{F_{min}} = \frac{445}{97.8} = 455.01 \cdot \%$$

$$\frac{F_5}{F_{min}} = \frac{561}{97.8} = 573.62 \cdot \%$$

$$\frac{F_3}{F_{min}} = \frac{499}{97.8} = 510.225 \cdot \%$$

$$\frac{F_6}{F_{min}} = \frac{160.0}{97.8} = 163.599 \cdot \%$$

$$\frac{F_7}{F_{min}} = \frac{97.8}{97.8} = 100 \cdot \%$$

Для выбранной балки вычисляем максимальное рабочее напряжение

$$max\sigma_{max} = \frac{|M_{max}|}{W_x \cdot 10^{-6}} = \frac{|117600.0|}{1570 \cdot 10^{-6}} = 7.49 \times 10^7 \cdot Па$$

которое меньше допускаемого напряжения на

$$\Delta = \frac{max\sigma_{max} - I\sigma I}{I\sigma I} = \frac{0.749 \cdot 10^8 - 0.75 \cdot 10^8}{0.75 \cdot 10^8} = -0.00133 = -0.133 \cdot \%$$

Наибольшие касательные напряжения возникают в точках нейтралльной линии опасного сечения балки, где

$\left|Q_{max}\right| = 7.35 \times 10^{4}$ Предварительно по таблицам сортамента для *двутавра* *находим*

$J_{x'} = 3.929 \times 10^{-4} \cdot м^{4}$ $S_{xmax} = 9.05 \times 10^{-4} \cdot м^{3}$

проверяем прочность балки по касательным напряжениям $\tau_{max} = \left|\frac{Q_{max} \cdot S_{xmax}}{J_{x.} \cdot d}\right| = \left|\frac{73500.0 \cdot 905 \cdot 10^{-6}}{39290 \cdot 10^{-8} \cdot 9.5 \cdot 10^{-3}}\right| = 1.782 \times 10^{7} \cdot Па$

при $I\tau I = 3.75 \times 10^{7} \cdot Па$

Условие прочности балки по касательным напряжениям выполняется

Выбор опасного сечения.

В рассматриваемом примере опасным являестя сечение где действует момент $M_{max} = 1.176 \times 10^{5} \cdot Н \cdot м$

и действует поперечная сила $Q_{yon} = -2.1 \times 10^{4} \cdot Н$

Построение эпюры нормальных напряжений в опасном сечении.
Нормальные напряжения в опасном сечении вычисляются по формуле

Поскольку в опасном сечении $M_{x.max} = 1.176 \times 10^{5} \cdot Н \cdot м$ > 0 , то слои, рапсположенные выше нейтральной линии, будут испытывать *сжатие*

ниже нейтральной линии - *растяжение*

Построение эпюры касательных напряжений в опасном сечении

Представим условно выбранную фигуру состоящей из трех прямоугольников: двух полок размером $b \cdot t$

- стенки размером $(h - 2 \cdot t) \cdot d$

выбираемыми из таблицы сортамента в расчетных точках определяются по формуле Д.И. Журавского

$$\tau = \frac{Q_{yon} \cdot S_{x.omc}}{I_{x} \cdot b}$$

Размеры профиля: $h = 50$ $см$ $b = 17$ $см$ $t = 1.52$ $см$ $d = 0.95$ $см$

в дальнейших расчетах эти величины переводим в метры, чтобы исключить ошибку.

$h = 0.5 \cdot м \qquad b = 0.17 \cdot м \qquad t = 0.015 \cdot м \qquad d = 9.5 \times 10^{-3} \cdot м$

1. Точка D

$S_{x.отс} = 0$ следовательно

касательное напряжение $\tau_D = 0$

нормальное напряжение $\sigma_D = \dfrac{(M_{x.max}) \cdot \left(\dfrac{h}{2}\right)}{J_x \cdot 10^{-8}} = \dfrac{117600 \cdot \dfrac{0.5}{2}}{39290 \cdot 10^{-8}} = 7.483 \times 10^7 \cdot Па$

2 . Точка E

$$S_x = \frac{b \cdot t \cdot (h - t)}{2} = \frac{0.17 \cdot 0.0152 \cdot (0.5 - 0.0152)}{2} = 0.000626 = 6.26 \times 10^{-4} \cdot м^3$$

$$\tau_E = \frac{Q_{yon} \cdot S_x}{J_x \cdot 10^{-8} \cdot b} = \frac{-21000 \cdot 62.6 \cdot 10^{-5}}{39290 \cdot 10^{-8} \cdot 0.17} = -1.968 \times 10^5 \cdot Па$$

$$\sigma_E = \frac{(M_{x.max}) \cdot \left(\frac{h}{2} - t\right)}{J_x \cdot 10^{-8}} = \frac{117600 \cdot \left(\frac{0.5}{2} - 0.0152\right)}{39290 \cdot 10^{-8}} = 7.028 \times 10^7 \cdot Па$$

3 . Точка F

$$S_x = \frac{b \cdot t \cdot (h - t)}{2} = \frac{0.17 \cdot 0.0152 \cdot (0.5 - 0.0152)}{2} = 0.000626 = 6.26 \times 10^{-4} \cdot м^3$$

$$\tau_F = \frac{Q_{yon} \cdot S_x}{J_x \cdot 10^{-8} \cdot d} = \frac{-21000 \cdot 62.6 \cdot 10^{-5}}{39290 \cdot 10^{-8} \cdot 0.0095} = -3.522 \times 10^6 \cdot Па$$

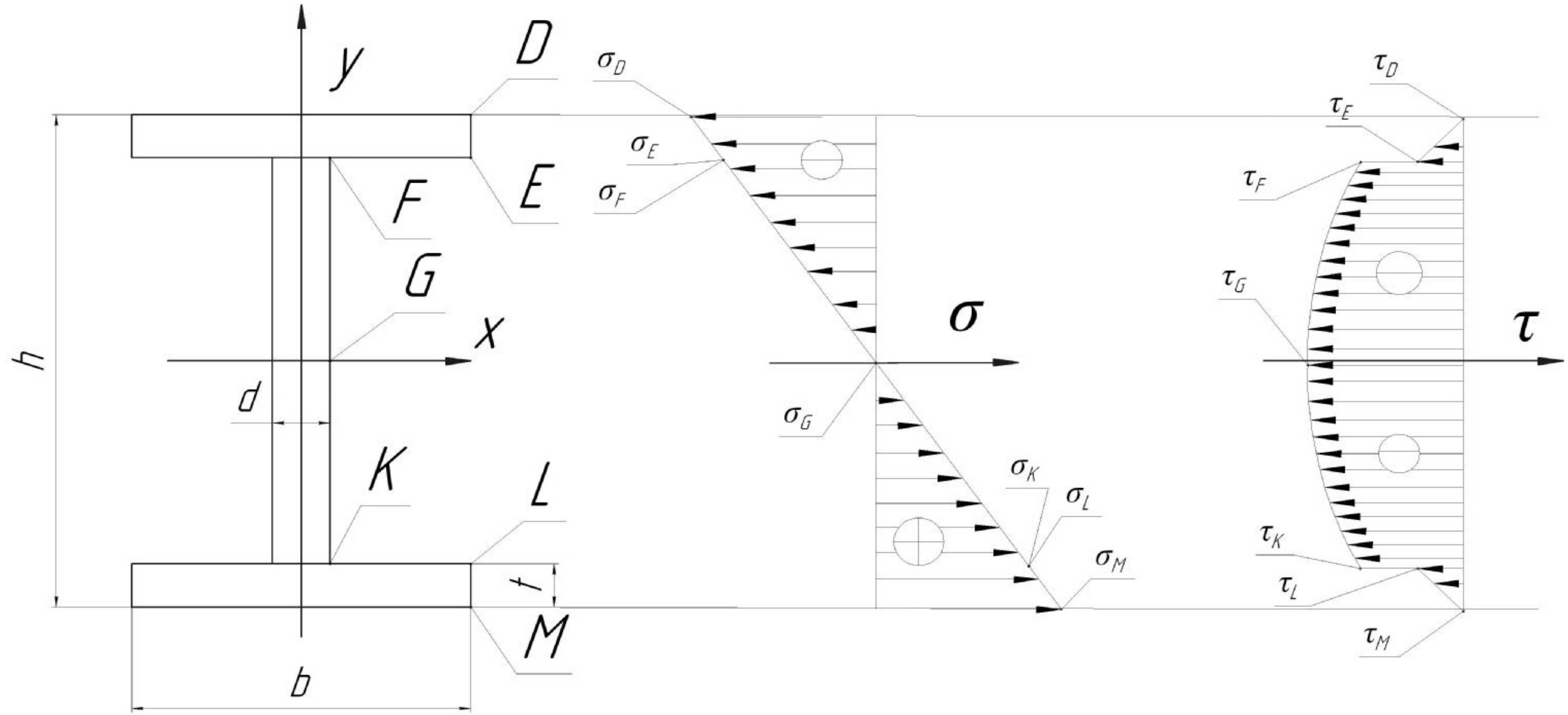
$$\sigma_F = \frac{(M_{x.max}) \cdot \left(\frac{h}{2} - t\right)}{J_x \cdot 10^{-8}} = \frac{117600 \cdot \left(\frac{0.5}{2} - 0.0152\right)}{39290 \cdot 10^{-8}} = 7.028 \times 10^7 \cdot Па$$

4 . Точка G

$$S_x = \frac{b \cdot t \cdot (h - t)}{2} = \frac{0.17 \cdot 0.0152 \cdot (0.5 - 0.0152)}{2} = 0.000626 = 6.26 \times 10^{-4} \cdot м^3$$

$$\tau_G = \frac{Q_{yon} \cdot S_{xmax}}{J_x \cdot 10^{-8} \cdot d} = \frac{-21000 \cdot 905 \cdot 10^{-6}}{39290 \cdot 10^{-8} \cdot 0.0095} = -5.092 \times 10^{6} \cdot Па$$

$$\sigma_G = \frac{\left(M_{x.max}\right) \cdot (0)}{J_x \cdot 10^{-8}} = \frac{117600 \cdot 0}{39290 \cdot 10^{-8}} = 0 \cdot Па$$



поскольку эпюра касательных напряжений τ симметрична оси x и эпюра нормальных напряжений имеет также симметрию (только знак меняется на противоположный), то расчет в точках K,L,M можно не выполнять.

Проверяем прочность балки по эквивалентным напряжениям

Наиболее опасными с точки зрения прочности по эквивалентным напряжениям являются точки F и K. Условие прочности для точки F по третьей теории прочности запишется

$max\sigma = \sqrt{\sigma_F^2 + 4\cdot\tau_F^2} \le I\sigma I$ где $I\sigma I = 7.5\times 10^7\cdot Па$

$$max\sigma = \sqrt{\sigma_F^2 + 4\cdot\tau_F^2} = \sqrt{\left(7.03\cdot 10^7\right)^2 + 4\cdot\left(-0.352\cdot 10^7\right)^2} = 7.065\times 10^7\cdot Па$$

Как видно, условие по третьей теории прочности выполняется, оставляем номер профиля исходным

Составим универсальное уравнение углов поворота

$$\theta = \theta_0 + \frac{q_{ab}\cdot\left('z - l_{ab}\right)^3}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{P_a\cdot 'z^2}{2\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^3\cdot q_{ab}}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_c\cdot\left('z - \left[l_{ab} + l_{bc}\right]\right)^2}{2\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_b\cdot\left('z - l_{ab}\right)^2}{2\cdot E\cdot J_x} + \frac{q_{cd}\cdot\left('z - \left[l_{ab} + l_{bc}\right]\right)^3}{6\cdot E\cdot J_x}$$

$$Y = Y_0 + 'z\cdot\theta_0 + \frac{q_{ab}\cdot\left('z - l_{ab}\right)^4}{24\cdot E\cdot J_x} + \frac{P_a\cdot 'z^3}{6\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^4\cdot q_{ab}}{24\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_c\cdot\left('z - \left[l_{ab} + l_{bc}\right]\right)^3}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_b\cdot\left('z - l_{ab}\right)^3}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{q_{cd}\cdot\left('z - \left[l_{ab} + l_{bc}\right]\right)^4}{24\cdot E\cdot J_x}$$

граничные условия

$'z1 = l_{ab}$ при этом $y = 0$

$'z2 = l_{ab} + l_{bc}$ при этом $y = 0$

получим систему уравнений

$$Y_0 + 1.4\cdot\theta_0 - \frac{0.16\cdot q_{ab}}{E\cdot J_x} + \frac{0.457\cdot P_a}{E\cdot J_x} = 0$$

$$Y_0 + 2.8\cdot\theta_0 + \frac{3.66\cdot P_a}{E\cdot J_x} + \frac{0.457\cdot R_b}{E\cdot J_x} - \frac{2.4\cdot q_{ab}}{E\cdot J_x} = 0$$

упрощаем

$$Y_0 + 1.4\cdot\theta_0 + \frac{7203.0}{E\cdot J_x} = 0$$

$$Y_0 + 2.8\cdot\theta_0 + \frac{74431.0}{E\cdot J_x} = 0$$

тогда начальные параметры ....

$$Y_0 = 7.639\times 10^{-4}\cdot м$$

$$\theta_0 = -6.111\times 10^{-4}\cdot рад$$

Расчитываем прогибы и углы поворота балки

при $'z = 0$

$$Y_1 = Y_0 = 7.639\times 10^{-4}\cdot м$$

$$\theta_1 = \theta_0 = -6.111\times 10^{-4}\cdot рад$$

при $'z = \frac{l_{ab}}{2} = 0.7 = 0.7\cdot м$

$$\theta_2 = \theta_0 + \frac{P_a\cdot 'z^2}{2\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^3\cdot q_{ab}}{6\cdot E\cdot J_x}$$

$$\theta_2 = -0.000611 + \frac{21000\cdot 0.7^2}{2\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} - \frac{0.7^3\cdot 15000}{6\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} = -5.564\times 10^{-4}\cdot рад$$

$$Y_2 = Y_0 + 'z\cdot\theta_0 + \frac{P_a\cdot 'z^3}{6\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^4\cdot q_{ab}}{24\cdot E\cdot J_x}$$

$$Y_2 = 0.000764 + 0.7\cdot -0.000611 + \frac{21000\cdot 0.7^3}{6\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} - \frac{0.7^4\cdot 15000}{24\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} = 3.497\times 10^{-4}\cdot м$$

при $'z = l_{ab} = 1.4 = 1.4 \cdot м$

$$\theta_3 = \theta_0 + \frac{P_a \cdot 'z^2}{2 \cdot E \cdot J_x} - \frac{'z^3 \cdot q_{ab}}{6 \cdot E \cdot J_x}$$

$$\theta_3 = -0.000611 + \frac{21000 \cdot 1.4^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} - \frac{1.4^3 \cdot 15000}{6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} = -4.364 \times 10^{-4} \cdot рад$$

$$Y_3 = Y_0 + 'z \cdot \theta_0 + \frac{P_a \cdot 'z^3}{6 \cdot E \cdot J_x} - \frac{'z^4 \cdot q_{ab}}{24 \cdot E \cdot J_x}$$

$$Y_3 = 0.000764 + 1.4 \cdot -0.000611 + \frac{21000 \cdot 1.4^3}{6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} - \frac{1.4^4 \cdot 15000}{24 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} = 2.645 \times 10^{-7} \cdot м$$

при $'z = l_{ab} + \frac{l_{bc}}{2} = 1.4 + \frac{1.4}{2} = 2.1 = 2.1 \cdot м$

$$\theta_4 = \theta_0 + \frac{q_{ab} \cdot ('z - l_{ab})^3}{6 \cdot E \cdot J_x} + \frac{P_a \cdot 'z^2}{2 \cdot E \cdot J_x} - \frac{'z^3 \cdot q_{ab}}{6 \cdot E \cdot J_x} + \frac{R_b \cdot ('z - l_{ab})^2}{2 \cdot E \cdot J_x}$$

$$\theta_4 = -0.000611 + \frac{15000 \cdot (2.1 - 1.4)^3}{6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} + \frac{21000 \cdot 2.1^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} - \frac{2.1^3 \cdot 15000}{6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} + \frac{73500 \cdot (2.1 - 1.4)^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} = -7.629 \times 10^{-5} \cdot рад$$

$$Y_4 = Y_0 + 'z \cdot \theta_0 + \frac{q_{ab} \cdot ('z - l_{ab})^4}{24 \cdot E \cdot J_x} + \frac{P_a \cdot 'z^3}{6 \cdot E \cdot J_x} - \frac{'z^4 \cdot q_{ab}}{24 \cdot E \cdot J_x} + \frac{R_b \cdot ('z - l_{ab})^3}{6 \cdot E \cdot J_x}$$

$$Y_4 = 0.000764 + 2.1 \cdot -0.000611 + \frac{15000 \cdot (2.1 - 1.4)^4}{24 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} + \frac{21000 \cdot 2.1^3}{6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} - \frac{2.1^4 \cdot 15000}{24 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} + \frac{73500 \cdot (2.1 - 1.4)^3}{6 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 39290 \cdot 10^{-8}} = -2.059 \times 10^{-4} \cdot м$$

при $'z = l_{ab} + l_{bc} = 1.4 + 1.4 = 2.8 = 2.8 \cdot м$

$$\theta_5 = \theta_0 + \frac{q_{ab}\cdot('z - l_{ab})^3}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{P_a\cdot 'z^2}{2\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^3\cdot q_{ab}}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_b\cdot('z - l_{ab})^2}{2\cdot E\cdot J_x}$$

$$\theta_5 = -0.000611 + \frac{15000\cdot(2.8-1.4)^3}{6\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} + \frac{21000\cdot 2.8^2}{2\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} - \frac{2.8^3\cdot 15000}{6\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} + \frac{73500\cdot(2.8-1.4)^2}{2\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} = 7.421\times 10^{-4}\cdot рад$$

$$Y_5 = Y_0 + 'z\cdot\theta_0 + \frac{q_{ab}\cdot('z - l_{ab})^4}{24\cdot E\cdot J_x} + \frac{P_a\cdot 'z^3}{6\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^4\cdot q_{ab}}{24\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_b\cdot('z - l_{ab})^3}{6\cdot E\cdot J_x}$$

$$Y_5 = 0.000764 + 2.8\cdot -0.000611 + \frac{15000\cdot(2.8-1.4)^4}{24\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} + \frac{21000\cdot 2.8^3}{6\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} - \frac{2.8^4\cdot 15000}{24\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} + \frac{73500\cdot(2.8-1.4)^3}{6\cdot 2\cdot 10^{11}\cdot 39290\cdot 10^{-8}} = 4.003\times 10^{-7}\cdot м$$

при $'z = l_{ab} + l_{bc} + \frac{l_{cd}}{2} = 1.4 + 1.4 + \frac{1.4}{2} = 3.5 = 3.5\cdot м$

$$\theta_6 = \theta_0 + \frac{q_{ab}\cdot('z - l_{ab})^3}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{P_a\cdot 'z^2}{2\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^3\cdot q_{ab}}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_c\cdot('z - [l_{ab}+l_{bc}])^2}{2\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_b\cdot('z - l_{ab})^2}{2\cdot E\cdot J_x} + \frac{q_{cd}\cdot('z - [l_{ab}+l_{bc}])^3}{6\cdot E\cdot J_x}$$

$\theta_6 = 1.735\times 10^{-3}$ рад

$$Y_6 = Y_0 + 'z\cdot\theta_0 + \frac{q_{ab}\cdot('z - l_{ab})^4}{24\cdot E\cdot J_x} + \frac{P_a\cdot 'z^3}{6\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^4\cdot q_{ab}}{24\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_c\cdot('z - [l_{ab}+l_{bc}])^3}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_b\cdot('z - l_{ab})^3}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{q_{cd}\cdot('z - [l_{ab}+l_{bc}])^4}{24\cdot E\cdot J_x}$$

$Y_6 = 8.732\times 10^{-4}$ м

при $'z = l_{ab} + l_{bc} + l_{cd} = 1.4 + 1.4 + 1.4 = 4.2 = 4.2\cdot м$

$$\theta_7 = \theta_0 + \frac{q_{ab}\cdot('z - l_{ab})^3}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{P_a\cdot 'z^2}{2\cdot E\cdot J_x} - \frac{'z^3\cdot q_{ab}}{6\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_c\cdot('z - [l_{ab}+l_{bc}])^2}{2\cdot E\cdot J_x} + \frac{R_b\cdot('z - l_{ab})^2}{2\cdot E\cdot J_x} + \frac{q_{cd}\cdot('z - [l_{ab}+l_{bc}])^3}{6\cdot E\cdot J_x}$$

$\theta_7 = 2.663 \times 10^{-3}$ $рад$

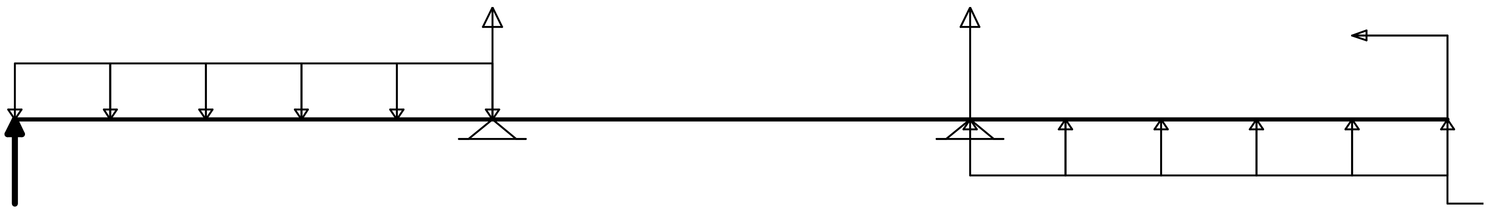
$$Y_7 = Y_0 + 'z \cdot \theta_0 + \frac{q_{ab} \cdot ('z - l_{ab})^4}{24 \cdot E \cdot J_x} + \frac{P_a \cdot 'z^3}{6 \cdot E \cdot J_x} - \frac{'z^4 \cdot q_{ab}}{24 \cdot E \cdot J_x} + \frac{R_c \cdot ('z - [l_{ab} + l_{bc}])^3}{6 \cdot E \cdot J_x} + \frac{R_b \cdot ('z - l_{ab})^3}{6 \cdot E \cdot J_x} + \frac{q_{cd} \cdot ('z - [l_{ab} + l_{bc}])^4}{24 \cdot E \cdot J_x}$$

$Y_7 = 2.414 \times 10^{-3} м$

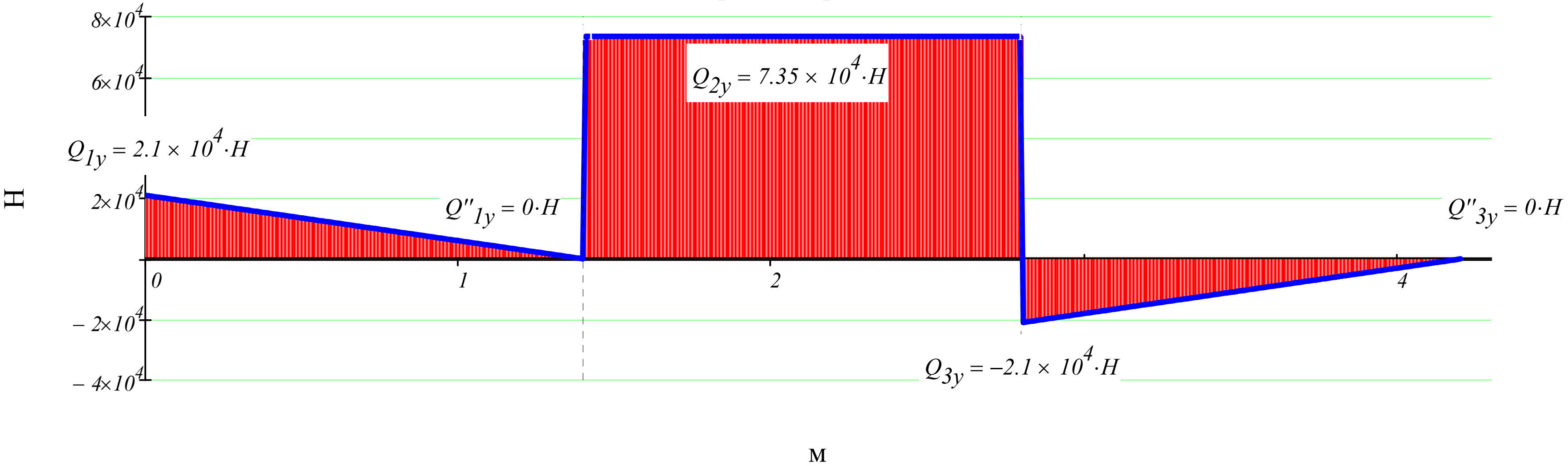
Допустимый прогиб $IyI = 0.002 \cdot (l_{ab} + l_{bc} + l_{cd}) = 0.002 \cdot (1.4 + 1.4 + 1.4) = 0.0084 = 8.4 \times 10^{-3} \cdot м$

Максимальное значение прогиба $Y_{max} = 2.414 \times 10^{-3} \cdot м$

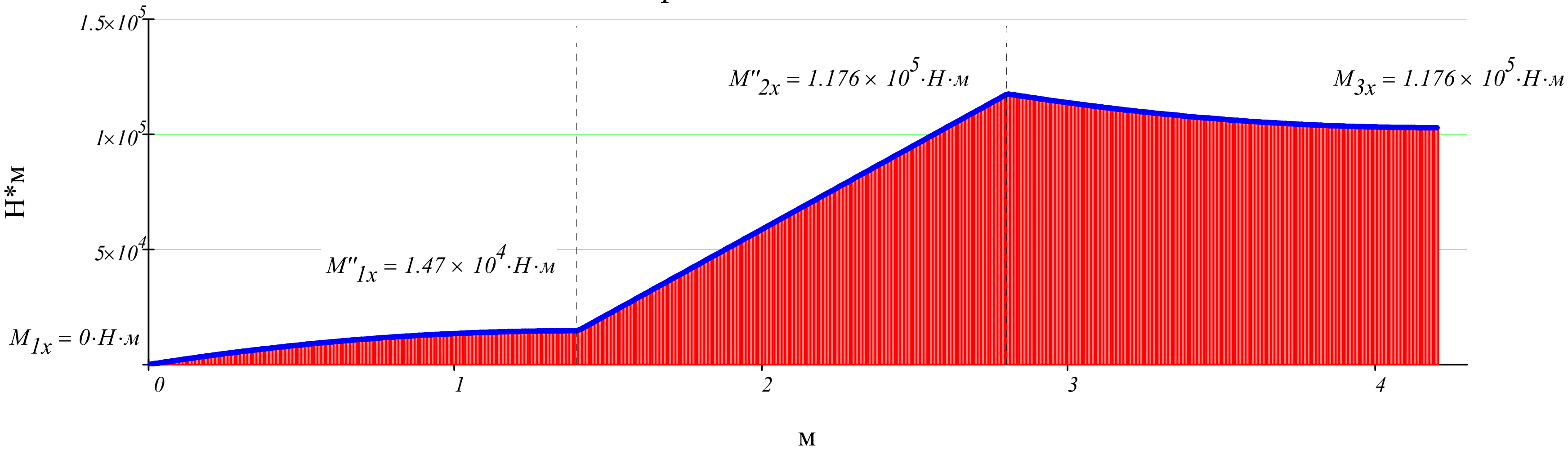
Как видно, условие жесткости выполняется $y_{max} \le IyI$



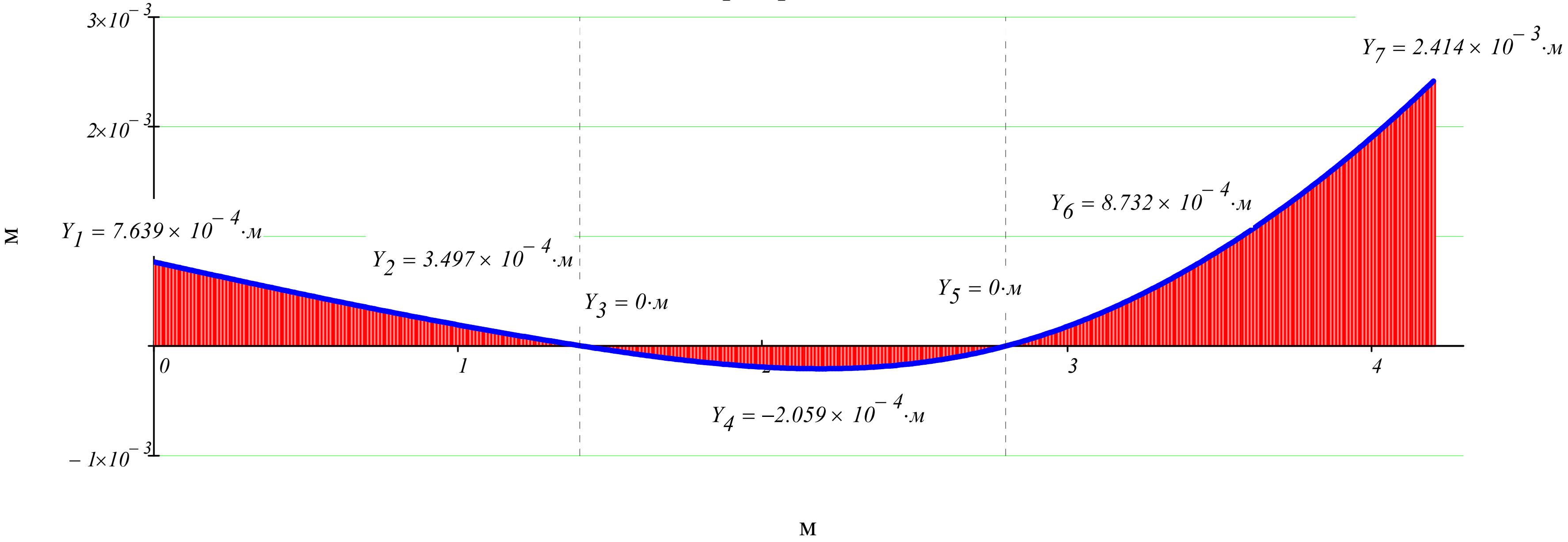
Эпюра поперечных сил



Эпюра изгибающих моментов



Эпюра прогиба балки



Эпюра углов прогиба балки