

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

[539.4 : 624.012.45.04] : 621.039.538

**АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ
ТРЕХЛУЧЕВОЙ ТРАВЕРСЫ ДЛЯ МОНТАЖА АРМОБЛОКА
БЕТОННОЙ ШАХТЫ РЕАКТОРА**

© 2021 С.А. Томилин, Р.В. Пирожков, Е.А. Цвелик, Э.В. Пинчук, С.Ф. Годунов

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

К надежности и прочности конструкций, используемых при монтаже оборудования атомных электростанций, предъявляются повышенные требования. В то же время излишний запас прочности применяемого оборудования приводит к повышению его габаритов, веса и существенному удорожанию. Вопрос уменьшения металлоёмкости конструкций с сохранением требуемых критериев работоспособности данного оборудования очень актуален. В работе представлена модель оптимизации конструкции трехлучевой траверсы грузоподъемностью 100 т для монтажа армоблока бетонной шахты реактора. Проведен проверочный расчет и предложены на его основе рекомендации по оптимизации конструктивных параметров.

Ключевые слова: прочность, устойчивость, надежность, проверочный расчет, оптимизация конструкции, монтаж, траверса, конструкция атомной станции.

Поступила в редакцию 05.02.2021

После доработки 09.03.2021

Принята к печати 22.03.2021

Для оборудования, используемого при монтаже конструкций атомных станций, предъявляются повышенные требования к критериям работоспособности, в частности к прочности и надежности [1, 2, 11, 12]. В то же время, разумное уменьшение металлоемкости, оптимизация конструкций позволяет существенно сократить расходы и время на изготовление и монтаж, а так же упростить процесс управления данным оборудованием при его использовании [3, 4].

При построении модели поиска оптимальных параметров металлоемкости, которые обеспечат минимальные материальные затраты Z , необходимо учитывать требования к запасу прочности изделия. Затраты Z функционально зависят от диаметра используемых в конструкции траверсы труб $\{d_i\}$, т.е. $Z=f(\{d_i\})$.

В то же время, запас прочности $\Delta\sigma_i$ каждого отдельного i -го элемента траверсы также определяется диаметром трубы этого элемента: $\Delta\sigma_i=g(d_i)$ и должен быть >0 . Математическая модель задачи рационального выбора конструктивных размеров примет вид:

$$\begin{aligned} Z=f(\{d_i\}) \rightarrow \min \\ \begin{cases} \Delta\sigma_1 = g(d_1) > 0 \\ \dots \\ \Delta\sigma_i = g(d_i) > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Проведем проверочный расчет трехлучевой траверсы грузоподъемностью 100 т для монтажа армблока бетонной шахты реактора, и на основе его результатов дадим рекомендации по оптимизации ее конструкции в части сокращения металлоемкости и упрощения некоторых ее элементов [5, 6].

Общий вид траверсы и схема ее нагружения изображены на рисунке 1.

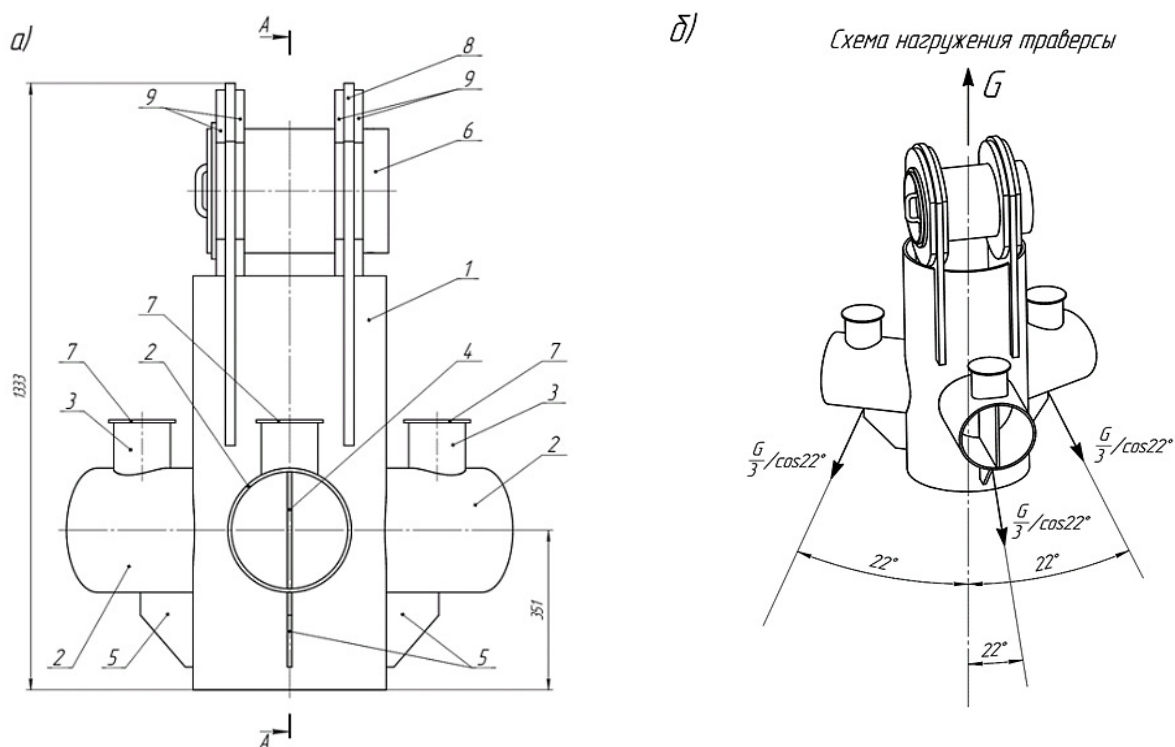


Рисунок 1 – Траверса трёхлучевая: а) – общий вид (1 – рама, 2 – фланец несущий, 3 – фланец упорный, 4, 5 – ребро жёсткости, 6 – палец, 7 – ребро, 8 – проушина, 9 – косынка); б) – схема нагружения
[Three-beam traverse: a) - general view (1 - frame, 2 - bearing flange, 3 - thrust flange, 4, 5 - stiffening rib, 6 - pin, 7 - rib, 8 - eyelet, 9 - kerchief); b) - loading scheme]

Силовая цепь замыкается в последовательности: канаты строповочные (3 шт.) – фланцы несущие (3 шт.) – рама – проушины (2 шт.) – палец – канат подъёмный. Нормативное усилие в канате подъёмном $G_H = 100 \text{ тс} = 980 \text{ кН}$.

Расчётное усилие в канате подъёмном определяется $G = G_H \gamma_H \gamma_D = 980 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1186 \text{ кН}$ (γ_H – коэффициент перегрузки, учитывающий возможное отклонение фактической нагрузки от нормативной; γ_D – коэффициент динамичности, учитывающий повышение нагрузки, связанное с изменением скорости подъёма).

Расчётное усилие в канате строповочном определяется

$$G_{CT} = G_H / (3 \cos 22^\circ) = 426 \text{ кН}.$$

Выполним проверочный расчёт на прочность и устойчивость основных несущих элементов траверсы. На рисунке 2 показан продольный разрез по оси симметрии.

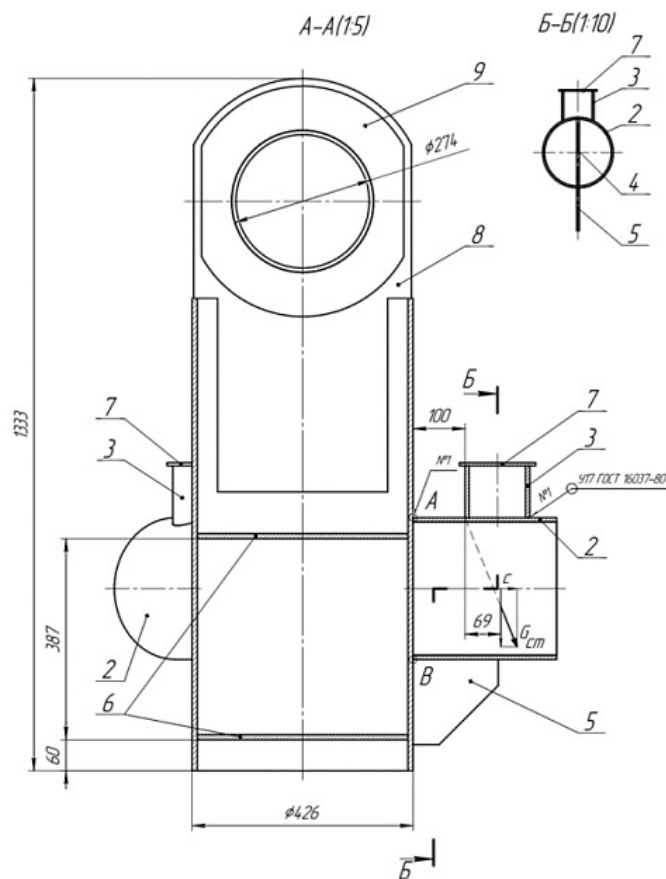


Рисунок 2 – Продольный разрез траверсы [Longitudinal section of the traverse]

Расчёт фланца несущего

Фланец несущий (см. рис. 2, поз. 2) изготовлен из трубы (сталь 20), усиленной двумя рёбрами жёсткости (Ст 3). Длина трубы $L = 326$ мм ; наружный диаметр $D = 273$ мм ; внутренний диаметр $d = 256$ мм ; толщина $t = 8$ мм . Рёбра жёсткости: внутреннее (поз. 4) $b = 10$ мм ; $h = 256$ мм ; внешнее (поз. 5) $b = 10$ мм ; $h = 164$ мм .

На рисунке 3 показано поперечное сечение фланца. Определим его геометрические характеристики как составной фигуры.

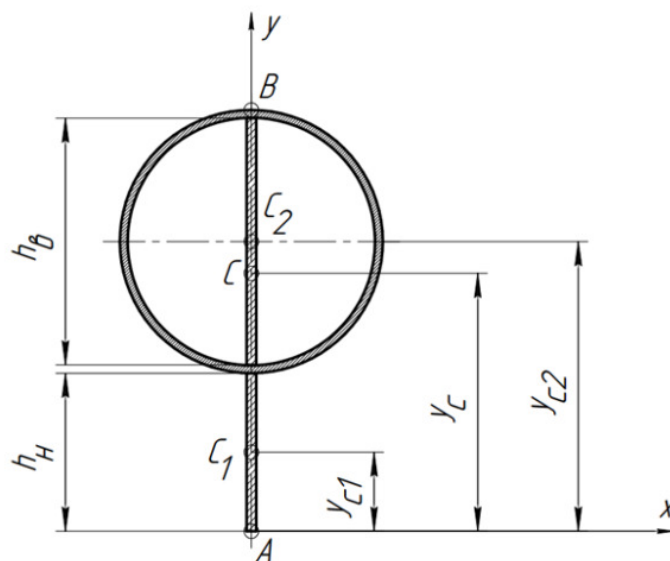


Рисунок 3 – Поперечное сечение фланца с рёбрами жёсткости [Cross-section of a ribbed flange]

Координата центра тяжести сечения фланца с рёбрами определяется по формуле (1):

$$y_c = \frac{y_{c1}A_1 + y_{c2}A_2}{A_1 + A_2} = \frac{82 \cdot 1640 + 300,5 \cdot 9623}{1640 + 9623} = \frac{3026191,5}{11263} = 268 \text{ мм}, \quad (1)$$

где $y_{c1} = \frac{h_n}{2} = \frac{164}{2} = 82 \text{ мм};$

$y_{c2} = \frac{D}{2} + h_n = \frac{273}{2} + 164 = 300,5 \text{ мм}$ координаты центров тяжести отдельных фигур в осях $Y-X$.

Площадь сечения наружного ребра жёсткости определяется $A_1 = bh_n = 10 \cdot 164 = 1640 \text{ мм}^2$.

Площадь сечения внутреннего ребра жёсткости вместе с сечением фланца определяется $A_2 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) + bh_g = \frac{3,14}{4}(273^2 - 256^2) + 10 \cdot 256 = 9623 \text{ мм}^2$.

Момент инерции относительно оси X_c определяется по формуле (2):

$$J_{X_c} = J_{X_{c1}} + A_1 a_1^2 + J_{X_{c2}} + A_2 a_2^2 = 0,3676 \cdot 10^7 + 1640 \cdot 186,7^2 + 7,58 \cdot 10^7 + 9623 \cdot 31,8^2 = 14,64 \cdot 10^7 \text{ мм}^4, \quad (2)$$

где $J_{X_{c1}} = \frac{bh_n^3}{12} = \frac{10 \cdot 164^3}{12} = 3,676 \cdot 10^6 \text{ мм}^4$ – собственный момент инерции наружного ребра жёсткости;

$$J_{X_{c2}} = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) + \frac{bh_g^3}{12} = \frac{3,14}{64}(273^4 - 256^4) + \frac{10 \cdot 256^3}{12} = 6,183 \cdot 10^7 + 1,398 \cdot 10^7 = 7,58 \cdot 10^7 \text{ мм}^4$$

фланца вместе с внутренним ребром жёсткости;

$$a_1 = y_{c1} - y_c = 82 - 268,7 = -186,7 \text{ мм};$$

$$a_2 = y_{c2} - y_c = 300,5 - 268,7 = 31,8 \text{ мм}.$$

Моменты сопротивления сечения при изгибе относительно центральной оси X_c определяется по формулам (3) и (4):

$$W_{X_{c\min}} = \frac{J_{X_c}}{y_{c\max}} = \frac{14,64 \cdot 10^7}{268,7} = 544723 \text{ мм}^3 \quad (3)$$

$$W_{X_{c\max}} = \frac{J_{X_c}}{y_{c\min}} = \frac{14,64 \cdot 10^7}{168,3} = 869875 \text{ мм}^3 \quad (4)$$

где $y_{c\max} = 268,7 \text{ мм}$ – расстояние от центра тяжести сечения до нижнего наружного волокна;

$y_{c \min} = 168,3$ мм – расстояние от центра тяжести сечения до верхнего наружного волокна.

$$\text{Нагрузка на один фланец определяется } G_{CT} = \frac{G}{3 \cdot \cos 22^\circ} = \frac{1186}{3 \cdot \cos 22^\circ} = 426,4 \text{ кН}$$

Разложим силу G_{CT} на составляющие:

$$Q = G_{CT} \cos 22^\circ = 426,4 \cdot \cos 22^\circ = 395,4 \text{ кН};$$

$$N = G_{CT} \sin 22^\circ = 426,4 \cdot \sin 22^\circ = 160 \text{ кН}.$$

Фланец работает при сложном сопротивлении: прямой поперечный изгиб и растяжение.

Нагрузку, действующую на несущий фланец, переносим на ось упорного фланца. Силы Q и N считаем приложенными в центре тяжести сечения. Изгибающий момент, возникающий в заделке (крепление сварными швами несущего фланца к раме), равен $M = Q \cdot (0,1 + 0,069) = 395,4 \cdot 0,169 = 66,8 \approx 67 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Условие прочности имеет вид формулы (5):

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W} = R_y \gamma_c, \quad (5)$$

где $R_y = 215$ – расчётное сопротивление по пределу текучести при растяжении и изгибе принимаем для Ст 3 [1, 2].

Опасное сечение – несимметричное, поэтому в точках A и B разные моменты сопротивления.

$$\text{Для точки } A: W_{X_{C(\max)}} = 869875 \text{ мм}^3.$$

$$\text{Для точки } B: W_{X_{C(\min)}} = 544723 \text{ мм}^3.$$

$$\text{Для точки } A: \sigma_A = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_{X_{C(\max)}}} = \frac{160 \cdot 10^3}{11263,4} + \frac{67 \cdot 10^6}{869875} = 96,38 \text{ МПа}.$$

$$\text{Для точки } B: \sigma_B = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_{X_{C(\min)}}} = \frac{160 \cdot 10^3}{11263,4} - \frac{67 \cdot 10^6}{544723} = -109 \text{ МПа}.$$

$$\text{Проверка: } \sigma_B \leq R_y \gamma_c; \quad 109 < 215 \cdot 0,8 = 172 \text{ МПа}.$$

Запас прочности $\sim 1,58$.

Условие прочности на условный срез по касательным напряжениям [1] имеет вид

$$\frac{Q}{A} \leq R_s = 0,58 R_y \gamma_c, \quad R_s = 0,58 \cdot 215 \cdot 0,8 = 99,76 \approx 100.$$

Проверка:

$$\frac{395,4 \cdot 10^3}{11263,4} = 35,1 < 100$$

Запас прочности $\sim 2,8$.

Расчёт углового сварного шва крепления несущей траверсы к раме

Расчёт производится по металлу шва. При расчёте сварного соединения угловыми швами при одновременном действии продольной силы N , поперечной силы Q и изгибающего момента M должно быть выполнено условие [1, 5, 7], формула (6):

$$\frac{\tau_f}{R_{wf}\gamma_c} \leq 1 \quad (6)$$

где $\tau_f = \sqrt{\tau_Q^2 + (\tau_N + \tau_M)^2}$ – напряжение в расчётной точке сварного соединения по металлу шва; коэффициент условия работы шва γ_{wf} принимается равным 1.

При отсутствии установленных нормами необходимых данных допускается принимать для угловых швов $R_{wf} = 0,44R_{un}$ [1]; $R_{un} = 410$ – временное сопротивление основного металла [1].

Длину шва принимаем равную сумме длины окружности трубы фланца и длины периметра рёбер:

$$l_w = \pi D + 2(h_n + h_e) = 3,14 \cdot 273 + 2(164 + 256) = 1697,6 \approx 1700 \text{ мм}.$$

Касательные напряжения среза от продольной силы:

$$\tau_N = \frac{N}{\beta_F k_f l_w} = \frac{160 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 8 \cdot 1700} = 16,8 \approx 17 \text{ МПа}.$$

Касательные напряжения среза от поперечной силы:

$$\tau_Q = \frac{Q}{\beta_F k_f l_w} = \frac{395,4 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 8 \cdot 1700} = 41,58 \approx 42 \text{ МПа}.$$

Касательные напряжения среза от изгибающего момента:

$$\tau_M = \frac{M}{W_f} = \frac{67 \cdot 10^6}{773395} = 86,8 \approx 87 \text{ МПа} \quad (W_f - \text{момент сопротивления шва в расчётном сечении);}$$

$$y_{cш} = \frac{A_1 y_{c1} + A_2 y_{c2}}{A_1 + A_2} = \frac{2624 \cdot 82 + 11058 \cdot 300,5}{2624 + 11058} = \frac{3538097}{13682} = 258,6 \text{ мм}.$$

Определим составляющие:

– площади угловых швов несущего фланца и внутреннего ребра жёсткости:

$$A_2 = \pi \left(D + \frac{k_f}{2} \right) k_f + 2h_e k_f = 3,14 \left(273 + \frac{8}{2} \right) 8 + 2 \cdot 256 \cdot 8 = 11057,8 \approx 11058 \text{ мм}^2$$

$$A_1 = 2h_n k_f = 2 \cdot 164 \cdot 8 = 2624 \text{ мм}^2; - \text{координаты центра тяжести:}$$

$y_{c2} = 300,5$ – координата центра тяжести углового шва внутреннего ребра жёсткости и фланца;

$y_{c1} = 82$ – координата центра тяжести углового шва наружного ребра жёсткости.

Момент инерции сварного шва определяется по формуле (7):

$$J_{X_u} = J_{X_{u1}} + A_1 a_1^2 + J_{X_{u2}} + A_2 a_2^2 = 9,213 \cdot 10^7 + 2624 \cdot 176,6^2 + 0,588 \cdot 10^7 + 11058 \cdot 41,9^2 = 19,9 \approx 20 \cdot 10^7 \text{ мм}^4 \quad (7)$$

$$\text{где} \quad J_{X_{u2}} = \frac{\pi}{64} (D_u^4 - d_u^4) + \frac{2k_f \cdot h_e^3}{12} = \frac{3,14}{64} (289^4 - 273^4) + \frac{2 \cdot 8 \cdot 256^3}{12} =$$

$= 6,976 \cdot 10^7 + 2,236 \cdot 10^7 = 9,213 \cdot 10^7 \text{ мм}^4$ – собственный момент инерции углового шва несущего фланца и внутреннего ребра жёсткости,

где $D_{ш} = D + 2k_f = 273 + 2 \cdot 8 = 289 \text{ мм}$ – наружный диаметр шва фланца;

$d_{ш} = 273 \text{ мм}$ – внутренний диаметр шва фланца;

$$J_{X_{ш1}} = \frac{2k_f h_n^3}{12} = \frac{2 \cdot 8 \cdot 164^3}{12} = 0,588 \cdot 10^7 \text{ мм}^4 \text{ – собственный момент инерции шва}$$

наружного ребра жёсткости;

$$a_1 = y_{c_{ш1}} - y_c = 82 - 258,6 = -176,6 \text{ мм};$$

$$a_2 = y_{c_{ш2}} - y_c = 300,5 - 258,6 = 41,9 \text{ мм}$$

Момент сопротивления сварного шва в расчётном сечении определяется

$$W_f = \frac{J_{X_{ш1}}}{y_{c_{ш1}}} = \frac{20 \cdot 10^7}{258,6} = 773395 \text{ мм}^3.$$

Напряжение в расчётной точке сварного шва определяется

$$\tau_f = \sqrt{42^2 + (17 + 87)^2} = 112 \text{ МПа}.$$

Получаем условие прочности $112 < 0,44 \cdot 41 \cdot 8,5 = 153 \text{ МПа}$.

Запас прочности $\sim 1,37$.

Расчёт рамы

Рама работает на центральное растяжение [1, 7, 8].

$$\text{Условие прочности } \frac{N}{A_H} \leq R_y \gamma_c.$$

$$\text{Площадь сечения трубы } A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{3,14}{4}(426^2 - 408^2) = 11790 \approx 11800 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Площадь сечения трубы НЕТТО с учётом 4 пазов для проушин ослабляющих сечение } A_H = A - \frac{4\delta t}{\cos \beta} = 118 - \frac{4 \cdot 22 \cdot 9}{\cos 33,9^\circ} = 10846 \text{ мм}^2 ; \quad \beta = \arcsin \frac{120 \cdot 2}{417} = 33,9^\circ$$

– центральный угол между осью параллельной плоскости проушины и пазом, где 120 мм – расстояние от паза до оси трубы; 417 мм – средний диаметр трубы (рис. 4).

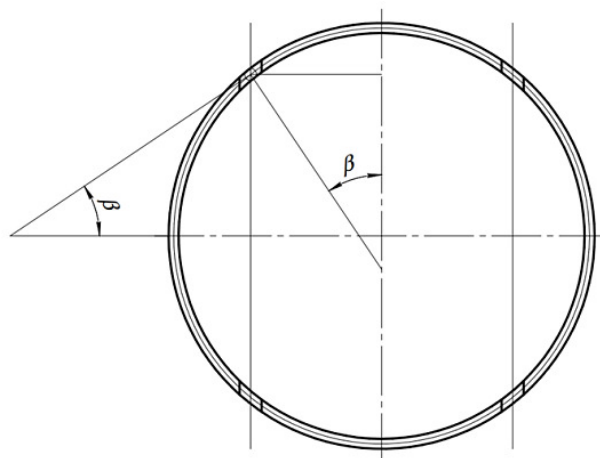


Рисунок 4 – Поперечное сечение трубы рамы [Cross section of frame tube]

Продольная сила равна расчётной нагрузке $N = G = 1186$ кН.

Условие прочности $\frac{1186 \cdot 10^3}{10846} \leq 225 \cdot 0,85$, где $R_y = 225$ МПа – расчётное сопротивление на растяжение по пределу текучести для стали 20 [1]; $\gamma_c = 0,85$ – коэффициент условий работы.

Получаем условие прочности $109 < 190$.

Запас прочности $\sim 1,7$.

Расчёт проушин и косынок

Чертежи проушин (поз. 8), косынок (поз. 9), рамы (поз. 1) представлены на рисунке 5.

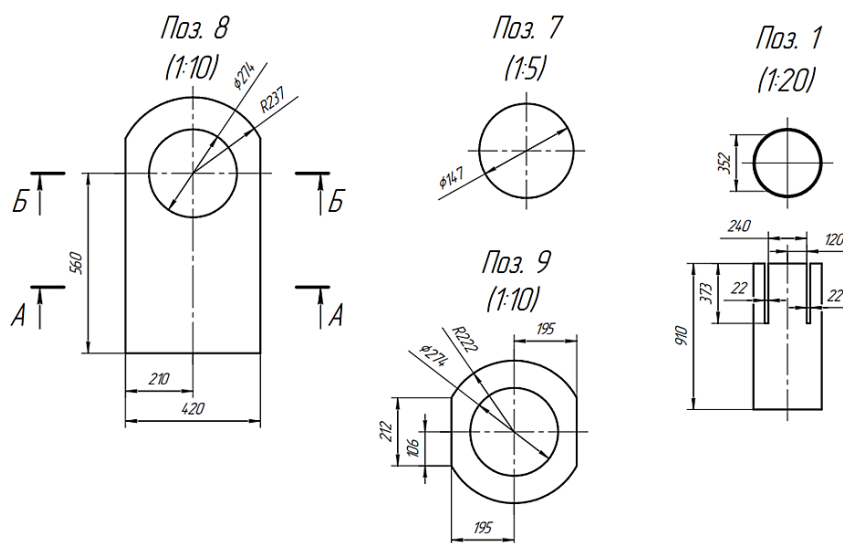


Рисунок 5 – Проушина (поз. 8), косынка (поз. 9), рама (поз. 1) [Eyelet (pos. 8), gusset (pos. 9), frame (pos. 1)]

Условие прочности по нормальным напряжениям при растяжении [1, 9, 10] имеет вид $\frac{N}{A} \leq R_y \gamma_c$.

Продольное усилие, действующее на проушину определяется

$$N = \frac{G}{2} = \frac{1186}{2} = 593 \text{ кН.}$$

Для сечения А–А площадь сечения проушины $A = bh = 420 \cdot 20 = 8400 \text{ мм}^2$. $R_y = 215$ – расчётное сопротивление на растяжение по пределу текучести для стали Ст 3 [1].

Условие прочности $\frac{593 \cdot 10^3}{8400} \leq 215 \cdot 0,85$;

$71 < 183$ – условие прочности выполняется.

Запас прочности $\sim 2,5$.

Условие прочности проушины по сечению В–В, ослабленному отверстием с учётом толщины косынок $\frac{N}{A_H} \leq R_y \gamma_c$.

Площадь сечения НЕТТО определяется по формуле (8):

$$A_H = [(b_{II} - d) + 2(b_K - d)]h = [(420 - 274) + 2 \cdot (390 - 274)] \cdot 20 = 7560 \text{ мм}^2, \quad (8)$$

где $b_H = 420$ мм – ширина проушины;
 $d = 274$ мм – диаметр отверстия в проушине под палец;
 $b_K = 390$ мм – ширина косынки;
 $d = 274$ мм – диаметр отверстия в косынке под палец;
 $h = 20$ мм – толщина косынки и проушины.

$$\text{Условие прочности } \frac{593 \cdot 10^3}{7560} \leq 215 \cdot 0,85;$$

$78,4 < 183$ – условие прочности выполняется.

Запас прочности $\sim 2,3$.

Проверка проушины на смятие проводится по формуле (9):

$$\frac{N}{A_p} \leq R_{ep} \gamma_c, \quad (9)$$

$$\text{где } R_{ep} = 0,5 \frac{R_{un}}{\gamma_m};$$

R_{ep} – расчётное сопротивление на местное смятие в шарнирах;

$R_{un} = 370$ МПа – нормативное сопротивление для стали Ст 3 [1];

$\gamma_m = 1,1$ – коэффициент надёжности по материалу для $\sigma_m < 380$ МПа.

Площадь смятия $A_p = 3hd = 3 \cdot 20 \cdot 274 = 16440 \text{ мм}^2$.

$$\text{Условие прочности } \frac{593 \cdot 10^3}{16440} \leq 0,5 \cdot 336 \cdot 0,85;$$

$36 < 135$ – условие прочности на смятие выполняется.

Запас прочности $\sim 3,7$.

Расчёт на срез проушины проводится по формуле (10):

$$\frac{N}{A_S} \leq R_S, \quad (10)$$

$$\text{где } R_S = 0,58 \frac{R_{yn}}{\gamma_m};$$

R_{yn} – предел текучести для стали принимаемый равным пределу текучести σ_m по государственным стандартам и техническим условиям на сталь;

$R_{yn} = 225$ МПа [1];

$\gamma_m = 1,1$.

$$\begin{aligned} \text{Площадь среза определяется } A_S &= [(D_{II} - d) + 2(D_K - d)]h = \\ &= [473 - 274 + 2(444 - 274)]h = 10780 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Условие прочности } \frac{593 \cdot 10^3}{10780} \leq 0,58 \cdot \frac{225}{1,1};$$

$55 < 118,6$ – условие прочности выполняется.

Запас прочности $\sim 2,1$.

Расчёт угловых швов крепления проушины к трубе

Условие прочности при действии продольной силы определяется по формуле (11):

$$\frac{N}{\rho_f k_f l_w} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c, \quad (11)$$

где $R_{wf} = 0,44 R_{un}$ – расчётное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу шва;

$l_w = 4 \cdot 373 = 1492$ мм – суммарная длина сварных швов.

$$\text{Условие прочности } \frac{593 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 9 \cdot 1492} \leq 410 \cdot 0,44 \cdot 0,85;$$

$63 < 153$ – условие прочности выполняется.

Запас прочности $\sim 2,4$.

Проверяем прочность угловых швов, соединяющих проушины и косынки и обеспечивающих их совместную работу на срез и смятие.

Принимаем катет шва $k_f = 10$ мм.

$$\text{Условие прочности } \frac{593 \cdot 10^3}{0,7 \cdot 10 \cdot 3,14 \cdot 444} \leq 410 \cdot 0,44 \cdot 0,85;$$

$61 < 153$ – условие прочности выполняется.

Запас прочности $\sim 2,5$.

Расчёт центрального ребра пальца на устойчивость

Палец изготовлен из трубы (сталь 20) и имеет следующие параметры (рис. 6): длина $L = 400$ мм; наружный диаметр $D = 273$ мм; внутренний диаметр $d = 257$ мм; толщина стенки $t = 8$ мм. Усилен тремя радиальными рёбрами жёсткости.

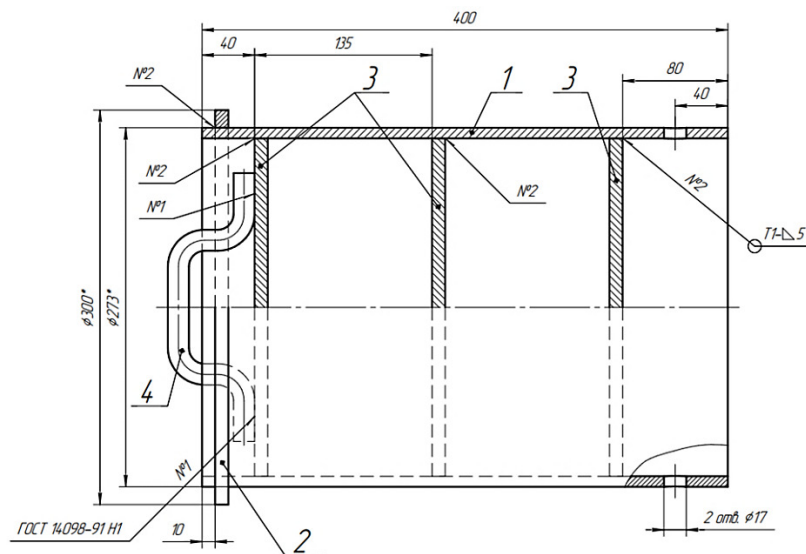


Рисунок 6 – Палец: 1 – труба; 2 – ребро упорное; 3 – ребро силовое
[Finger: 1 - pipe; 2 - stubborn rib; 3 - power rib]

Проверим центральное ребро на устойчивость. Расчётная схема показана на рисунке 7.

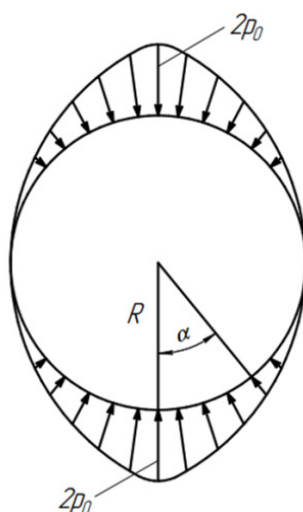


Рисунок 7 – Расчётная схема круговой пластинки [Design scheme of a circular plate]

Принимаем давление со стороны трубы $p = p_0(1 + \cos 2\alpha)$.

Критическое давление $p_{кр} = 2p_0 = 8,387 \frac{D}{R^2}$ (D – цилиндрическая жёсткость пластинки):

$$D = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 10^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} = 18 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2,$$

$$p_{кр} = 8,378 \cdot 18 \cdot 10^6 / 128^2 = 9214 \text{ Н} / \text{мм}.$$

Вычислим равнодействующую давления:

$$\begin{aligned} p &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p \cos \alpha \, ds = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} p_0(1 + \cos 2\alpha) \cos \alpha R \, d\alpha = \\ &= p_0 R \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\cos \alpha + \cos \alpha \cos 2\alpha) \, d\alpha = \\ &= p_0 R \left[\sin \alpha + \frac{1}{12} \sin 3\alpha + \frac{3}{4} \sin \alpha - \frac{1}{3} \sin^3 \alpha \right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = \\ &= p_0 R \left[1 - \frac{1}{12} + \frac{3}{4} - \frac{1}{3} \right] \cdot 2 = \frac{8}{3} p_0 R = \frac{8}{3} \cdot 4607 \cdot 128 = 1573000 = 1573 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Проверка: $G \leq P$; $1186 < 1573$ – устойчивость ребра жёсткости обеспечена.

Заключение

На основании расчета трехлучевой траверсы грузоподъемностью 100 т для монтажа армоблока бетонной шахты реактора предлагаются следующие рекомендации по оптимизации конструкции траверсы.

Анализ прочностных проверочных расчётов показывает, что

1. Прочность несущего фланца по нормальным напряжениям обеспечена с запасом $\Delta\sigma = \frac{183-141}{183} \cdot 100\% = 23\%$. Следовательно, можно уменьшить диаметр трубы, ориентировочно, до 245/8. Экономия в весе фланцев составит 10%.

2. Рама выполнена с большим запасом прочности $\Delta\sigma = \frac{191-110}{191} \cdot 100\% = 42\%$.

Можно уменьшить диаметр трубы, ориентировочно, до 299/8. Экономия в весе рамы составит 40%.

3. Проушины и косынки спроектированы с двукратным запасом прочности. Можно уменьшить как толщину листа, так и габариты изделий.

4. Сварные швы спроектированы с запасом прочности от 30 до 80%. При уменьшении размеров фланцев, рамы, проушин и косынок этот запас также снизится.

Уточнённые размеры траверсы можно получить проектировочным расчётом на прочность.

Конструкцию траверсы можно упростить, упразднив такие элементы как проушины и соответствующие сварные швы. При незначительном увеличении длины рамы удастся получить конструктивно-технологические преимущества, что обеспечит совместно с п.1-4 оптимизацию траверсы по весу и стоимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП П-23-81* Стальные конструкции. – Москва : ФГУП ЦПП. 2005. – 90 с.
2. Пособие к СНиП П-23-81 Пособие по расчёту и конструированию сварных соединений стальных конструкций. – Москва : Стройиздат. 1984. – 18 с.
3. *Шохрина, Н.В.* Основы методики обоснования технических характеристик изделия / Н.В. Шохрина, А.Н. Феофанов, Т.Г. Гришина // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2015. – № 4(35). – С. 113-117.
4. *Кашковский, В.В.* Системный подход к определению состояния технических изделий по характеристикам надёжности / В.В. Кашковский, И.И. Тихий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 4(52). – С. 143-150.
5. Dudchenko A.N., Tomilin S.A., Pinchuk M.E., Pinchuk E.V. The optimization of construction of hexactinal cross arm for bearing framework mounting of support reactor carcass // In the World of Scientific Discoveries, Series B. 2014. Т. 2. № 2. P. 23-28.
6. *Дудченко, А.Н.* Оптимизация конструкции шестилучевой траверсы для монтажа закладной опоры фермы опорной корпуса реактора / А.Н. Дудченко, С.А. Томилин, М.Э. Пинчук, Э.В. Пинчук // В мире научных открытий. – 2014. – № 6-1(54). – С. 586-598.
7. Tomilin S.A., Pinchuk M.E., Pinchuk E.V., Godunov S.F. Analysis of safety characteristics and optimization of traverse structural elements for installation of WSG-1000M steam generators support // In the World of Scientific Discoveries, Series B. 2015. Т. 3. № 2. P. 103-110.
8. *Томилин, С.А.* Анализ прочностных характеристик и оптимизация элементов конструкции траверсы для монтажа опор парогенераторов ПГВ-1000М / С.А. Томилин, М.Э. Пинчук, Э.В. Пинчук, С.Ф. Годунов // В мире научных открытий. – 2014. – № 12-1(60). – С. 494-508.
9. *Дудченко, А.Н.* Анализ прочностных характеристик и устойчивости элементов конструкции траверсы шестилучевой для монтажа закладной опоры фермы опорной корпуса реактора / А.Н. Дудченко, С.А. Томилин, М.Э. Пинчук, Э.В. Пинчук // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 1(10). – С. 32-39.
10. *Томилин, С.А.* Анализ прочности строповочного узла шестилучевой траверсы / С.А. Томилин, Э.В. Пинчук, С.Ф. Годунов, К.А. Егоров, И.И. Коньшев // Материалы и технологии XXI века : сборник статей XII Междунар. науч.-техн. конф., март 2014 г. – Пенза, 2014. – С. 108-113.
11. СТО 1.1.1.02.009.0873-2017 Обеспечение безопасности при эксплуатации зданий и сооружений атомных станций. – Москва : ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2017. – 30 с.
12. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Москва : МИТКС, 2012. – 68 с.

REFERENCES

- [1] SNiP II-23-81 Stal'nyye konstruksii [SNiP II-23-81 Steel Structures]. Moskva: FGUP TSPP [Moscow: FSUE TsPP]. 2005. 90 p. (in Russian).
- [2] Posobiye k SNiP II-23-81 Posobiye po raschotu i konstruirovaniyu svarnykh soyedineniy stal'nykh konstruksiy [Manual to SNiP II-23-81 Manual on Calculation and Design of Welded Joints in Steel Structures]. Moskva: Stroyizdat [Moscow: Stroyizdat]. 1984. 18 p. (in Russian).
- [3] Shokhrina N.V., Feofanov A.N., Grishina T.G. Osnovy metodiki obosnovaniya tekhnicheskikh kharakteristik izdeliya [Fundamentals of the Methodology for Substantiating the Technical Characteristics of the Product] Vestnik MGTU «STANKIN» [Bulletin of MSTU «STANKIN»]. 2015. No 4(35). P. 113-117 (in Russian).
- [4] Kashkovsky V.V., I.I. Tikhyy Sistemnyy podkhod k opredeleniyu sostoyaniya tekhnicheskikh izdeliy po kharakteristikam nadozhnosti [Systematic Approach to Determining the State of Technical Products Based on Reliability Characteristics]. [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2016. No 4(52). P. 143-150 (in Russian).
- [5] Dudchenko A.N., Tomilin S.A., Pinchuk M.E., Pinchuk E.V. The Optimization of Construction of Hexactinal Cross Arm for Bearing Framework Mounting of Support Reactor Carcass // In the World of Scientific Discoveries, Series B. 2014. T. 2. № 2. P. 23-28 (in English).
- [6] Dudchenko A.N., Tomilin S.A., Pinchuk M.E., Pinchuk E.V. Optimizatsiya konstruksii shestiluchevoy traversy dlya montazha zakladnoy opory fermy opornoy korpusa reaktora [Optimization of the Design of the Six-Beam Traverse for the Installation of the Embedded Support of the Truss of the Reactor Support Vessel]. V mire nauchnykh otkrytiy [In the World of Scientific Discovery]. 2014. № 6-1(54). P. 586-598 (in Russian).
- [7] Tomilin S.A., Pinchuk M.E., Pinchuk E.V., Godunov S.F. Analysis of Safety Characteristics and Optimization of Traverse Structural Elements for Installation of WSG-1000M Steam Generators Support // In the World of Scientific Discoveries, Series B. 2015. T. 3. № 2. P. 103-110 (in English).
- [8] Tomilin S.A., Pinchuk M.E., Pinchuk E.V., Godunov S.F. Analiz prochnostnykh kharakteristik i optimizatsiya elementov konstruksii traversy dlya montazha opor parogeneratorov PGV-1000M [Analysis of Strength Characteristics and Optimization of Structural Elements of the Traverse for the Installation of Supports for PGV-1000M Steam Generators]. V mire nauchnykh otkrytiy [In the World of Scientific Discoveries]. 2014. № 12-1(60). P. 494-508 (in Russian).
- [9] Dudchenko A.N., Tomilin S.A., Pinchuk M.E., Pinchuk E.V. Analiz prochnostnykh kharakteristik i ustoychivosti elementov konstruksii traversy shestiluchevoy dlya montazha zakladnoy opory fermy opornoy korpusa reaktora [Analysis of the Strength Characteristics and Stability of Structural Elements of a Six-Beam Traverse for Mounting the Embedded Support of the Reactor Support Vessel Truss]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2014. № 1(10). P. 32-39 (in Russian).
- [10] Tomilin S.A., Pinchuk E.V., Godunov S.F., Egorov K.A., Konyshev I.I. Analiz prochnosti stropovochnogo uzla shestiluchevoy traversy [Analysis of the strength of the slinging unit of a six-beam traverse]. Materialy i tekhnologii XXI veka: sbornik statey XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferencii, mart 2014 g., Penza [Materials and Technologies of the XXI Century: collection of articles of the XII International scientific and technical conference, March 2014, Penza]. 2014. P. 108-113 (in Russian).
- [11] STO 1.1.1.02.009.0873-2017 Obespecheniye bezopasnosti pri ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy atomnykh stantsiy [STO 1.1.1.02.009.0873-2017 Ensuring Safety during the Operation of Buildings and Structures of Nuclear Power Plants]. Moskva: OAO «Kontsern Rosenergoatom» [Moscow: Rosenergoatom Concern OJSC]. 2017. 30 p. (in Russian).
- [12] GOST 31937-2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya [GOST 31937-2011. Buildings and Constructions. Rules for Inspection and Monitoring of Technical Condition]. Moskva: MITKS [Moscow: MITKS]. 2012. 68 p. (in Russian).

Analysis and Optimization of Three-Beam Traverse Structure Elements for Reactor Cavity Reinforced Concrete Block Installation

**S.A. Tomilin¹, R.V. Pirozhkov², E.A. Tsvelik³
E.V. Pinchuk⁴, S.F. Godunov⁵**

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0001-8661-8386

Wos Researcher ID: G-3465-2017

e-mail: SATomilin@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0002-1547-6568

WoS Researcher ID: AAD-3193-2020

e-mail: roman-3.14@yandex.ru

³ORCID iD: 0000-0001-9048-275X

WoS Researcher ID: G-3560-2018

e-mail: stvelik@mail.ru

⁴e-mail: pinchuk.ed@yandex.ru

⁵e-mail: SFGodunov@mephi.ru

Abstract – Increased demands are placed on the reliability and strength of structures used in the installation of equipment for nuclear power plants. At the same time, an excessive safety margin of the equipment used leads to an increase in its dimensions, weight and a significant rise in cost. The issue of reducing the metal consumption of structures while maintaining the required performance criteria for this equipment is very relevant. The paper presents a model for optimizing the design of a three-beam traverse with a carrying capacity of 100 tons for reactor cavity reinforced concrete block installation. A verification calculation is carried out and recommendations on the optimization of design parameters are proposed on its basis.

Keywords: strength, stability, reliability, verification calculation, design optimization, installation, traverse, nuclear power plant design.