

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

УДК 539.4:621.039.5

**АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И УСТОЙЧИВОСТИ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ
ТРАВЕРСЫ ШЕСТИЛУЧЕВОЙ ДЛЯ МОНТАЖА ЗАКЛАДНОЙ
ОПОРЫ ФЕРМЫ ОПОРНОЙ КОРПУСА РЕАКТОРА**

© 2014 г. А.Н. Дудченко, С.А. Томилин, М.Э. Пинчук, Э.В. Пинчук

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

В работе представлен проверочный расчет и предложены на его основе рекомендации по дальнейшей оптимизации конструкции траверсы шестилучевой грузоподъемностью 120 т для монтажа закладной опоры фермы опорной корпуса реактора.

Ключевые слова: прочность и устойчивость элементов конструкции, траверса шестилучевая; оптимизация конструкции.

Поступила в редакцию 20.03.2014 г.

В соответствии с планом строительства новых энергоблоков атомных электростанций (АЭС), директивным графиком сооружения блоков №3 и №4 Ростовской АЭС предусмотрен их физический пуск и выход на проектную мощность в 2014 и 2016 годах соответственно. Столь высокие темпы строительства предполагают внедрение новых и прогрессивных методов сооружения зданий и монтажа оборудования. Применение принципа «Open top» («Открытого монтажа») с параллельным сочетанием максимального блочного укрупнения строительных и технологических конструкций, позволяет добиться поточности строительства, оптимального использования трудовых и технических ресурсов. Укрупнение монтажных блоков в условиях цеха и укрупнительных площадок позволяет поддерживать необходимые темпы строительства и уложиться в требуемые сроки пуска и ввода в эксплуатацию блоков АЭС.

Одним из основных элементов здания реакторного отделения является бетонная шахта реактора (рис. 1). Шахта выполняет две основные функции: крепление и удержание в проектном положении корпуса реактора, а также защищает элементы конструкций здания от нейтронного излучения в процессе работы реакторной установки. Для удобства монтажа и с учетом грузоподъемности башенного крана, равной 220 т, шахта реактора разбита на несколько монтажных частей, которые собираются на укрупнительной площадке рядом с блоком и подаются в зону монтажа уже в укрупненном – блочном виде. После установки в проектные положения каждого из блоков производится их поэтапное бетонирование.

В соответствии с правилами монтажа крупногабаритных и тяжеловесных элементов необходимо применение дополнительных такелажных конструкций, обеспечивающих безопасное выполнение монтажных операций. Для монтажа закладной опоры фермы опорной корпуса реактора, исходя из конструктивной особенности и массы блока 120 т, необходимо применение сложной пространственной конструкции – шестилучевой траверсы (рис. 2). Она была задействована на блоке №3

Ростовской АЭС, что вызвало ряд проблем, обусловленных тем, что ее конструкция отличается сложностью, громоздкостью и высокой металлоемкостью. Поэтому при подготовке работ на блоке №4 Ростовской АЭС возникла необходимость пересчета использованной конструкции с целью ее дальнейшей оптимизации или предложения более приемлемого конструктивного варианта, что и было сделано авторами настоящей работы.

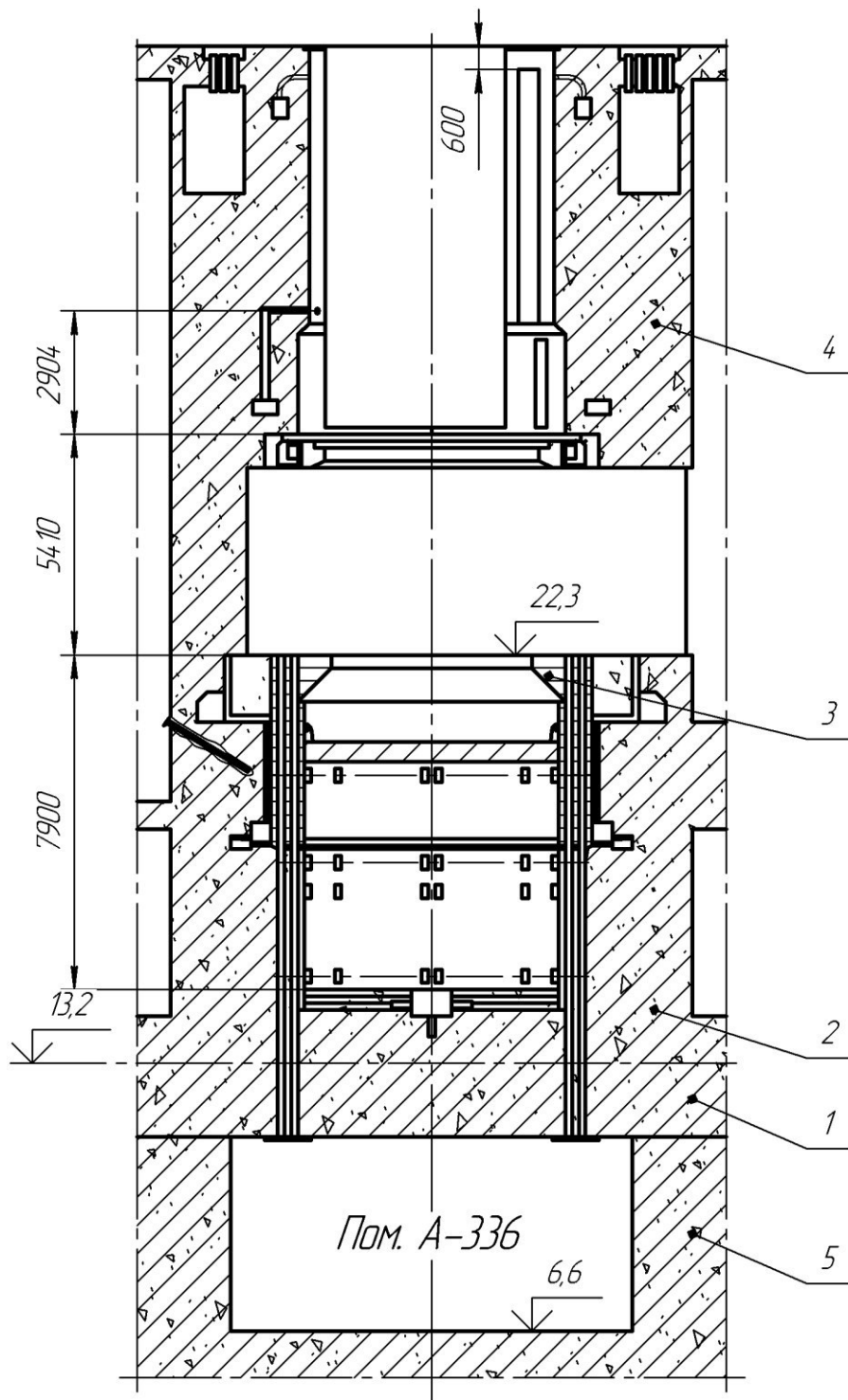


Рис. 1. Бетонная шахта реактора ВВЭР-1000

1 – несущая плита гермозоны реакторного отделения; 2 – закладная опора опорной фермы корпуса реактора; 3 – опорная ферма корпуса реактора; 4 – верхняя конструкция бетонной шахты реактора с кольцом упорным; 5 – фундаментная часть здания реакторного отделения.

Конструкция траверсы шестилучевой показана на рисунке 2. К основным несущим элементам траверсы относятся стойки 1, проушины 2, оси 3 и балки 4. Конструктивную роль играют стойка 5, раскосы 6, связи 7, обечайка 8, кольцо 9 и накладка 10.

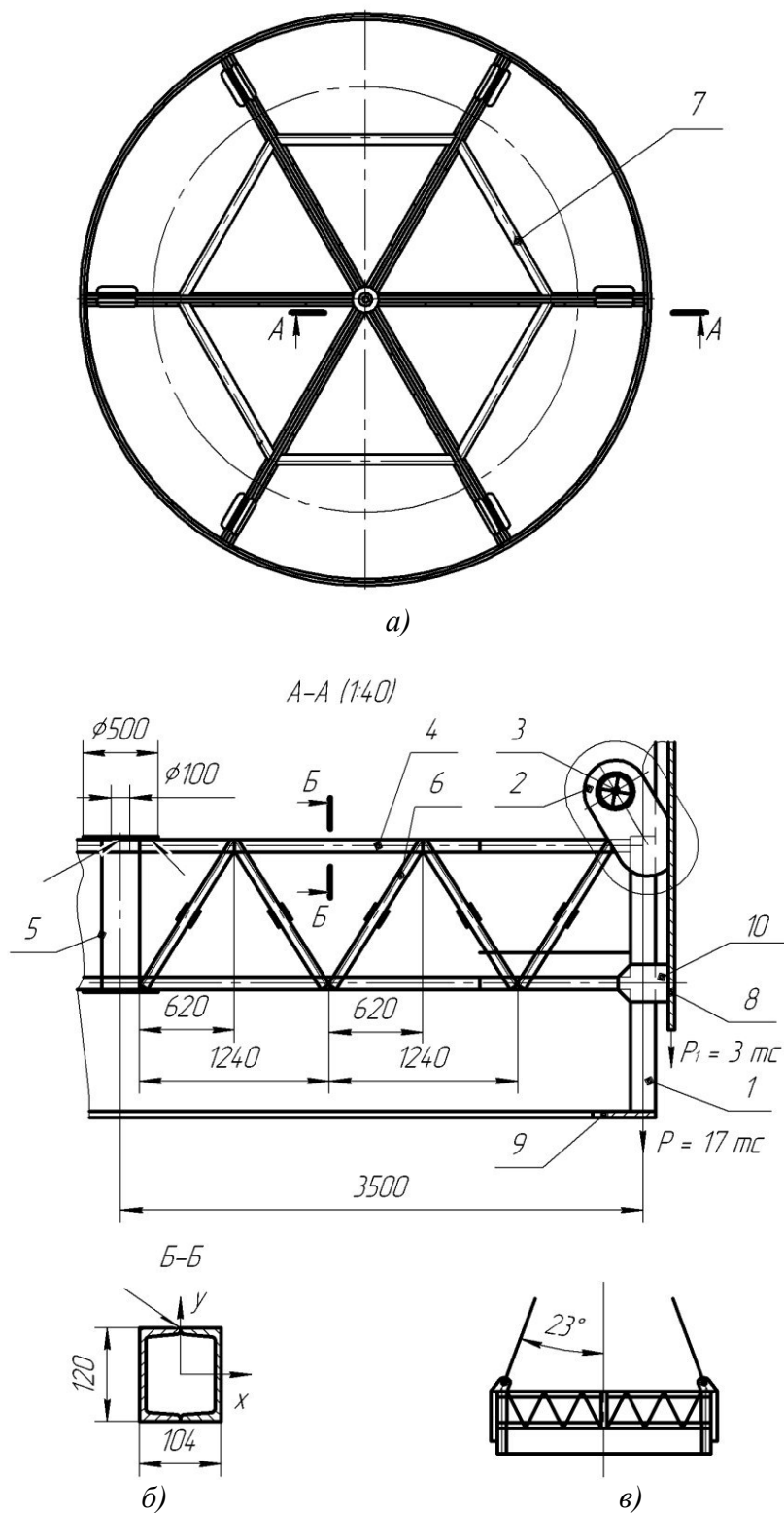


Рис. 2. Конструкция траверсы шестилучевой
a – вид сверху; *б* – профиль луча; *в* – схема строповки.

Переносим вес обечайки с арматурой на оси стоек *1* и учитывая конструктивно-силовую симметрию траверсы, рассмотрим следующую расчетную схему луча (рис. 3).

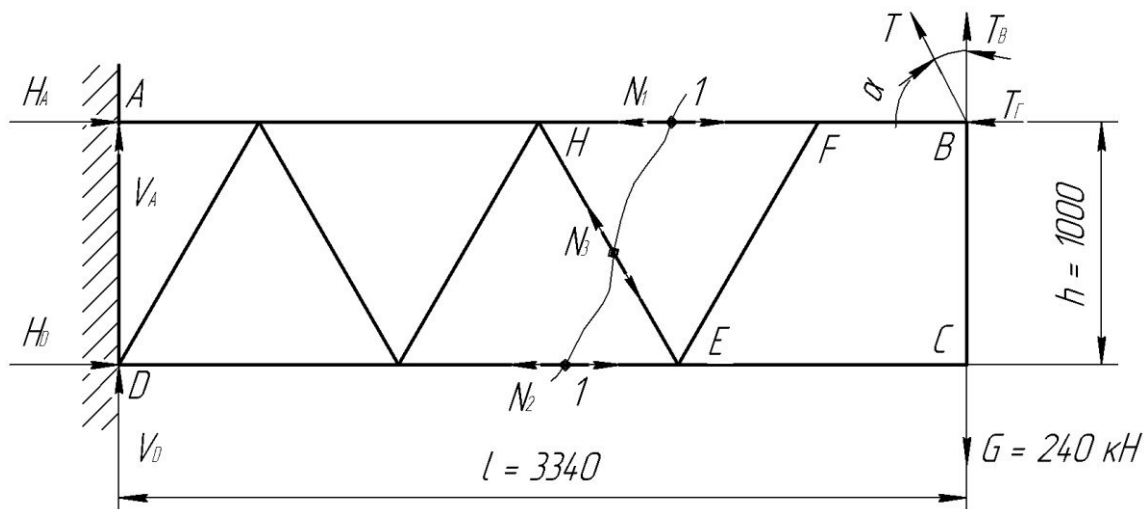


Рис. 3. Расчетная силовая схема фермы луча траверсы

Конструкция представляет собой плоскую ферму, геометрическую неизменяемость отсека *FBCE* которой обеспечивают проушины 2 и накладки 10 (рис. 2, б). Нормативная нагрузка на ферму составляет $G_n = P + P_1 = 20$ тс. Расчетная нагрузка равна:

$$G = G_n \gamma_n \gamma_\delta = 24,4 \text{ тс} \approx 240 \text{ кН},$$

где $\gamma_n = 1,1$ – коэффициент перегрузки;
 $\gamma_\delta = 1,1$ – динамический коэффициент.

Из условий равновесия стойки *BC* находим:

– усилие в строповочном канате

$$T = \frac{G}{\cos \alpha} = 261 \text{ кН};$$

– вертикальная составляющая усилия $T_B = G = 240$ кН;

– горизонтальная составляющая усилия

$$T_G = G \cdot \operatorname{tg} \alpha = 102 \text{ кН}.$$

Для сечения *1-1* (рис. 3) получаем усилия в элементах фермы

$$\sum m_E = 0; \quad N_1 = -T_G = -102 \text{ кН} \text{ – верхний ригель сжат};$$

$$\sum m_H = 0; \quad N_2 = 0 \text{ – нижний ригель не нагружен};$$

$$\sum y = 0; \quad N_3 = 0 \text{ – раскос не нагружен}.$$

Таким образом, нижний пояс и раскосы фермы не работают под нагрузкой, выполняя только конструктивную роль.

Проверим на устойчивость верхний ригель фермы. Из конструкции траверсы (рис. 2, а, б) следует, что более опасным является случай потери устойчивости ригеля из плоскости нагружения. С учетом расстановки связей 7 (рис. 2, а) получаем следующую расчетную схему (рис. 4).

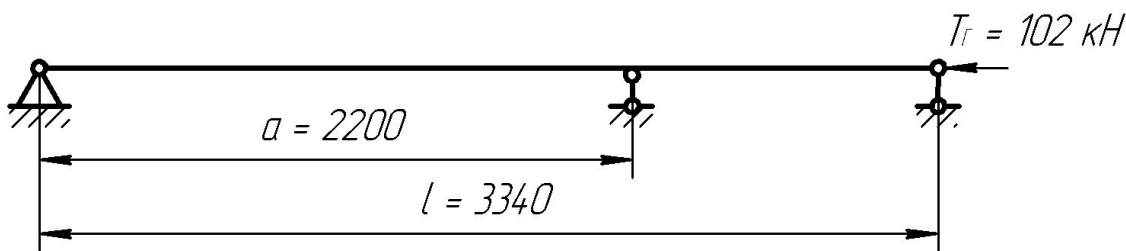


Рис. 4. Расчетная схема продольного изгиба ригеля

Расчет на устойчивость сплошностенчатых элементов (рис. 2, а, сечение Б – Б), подверженных центральному сжатию (рис. 4), выполняем по формуле [1]:

$$\frac{N}{\varphi \cdot A} \leq R_y \gamma_c, \quad (1)$$

где N – сжимающая сила;
 φ – коэффициент продольного изгиба;
 A – площадь сечения;
 R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию и изгибу по пределу текучести;
 γ_c – коэффициент условий работы.

Значение коэффициента φ зависит от приведенной гибкости $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \lambda \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i}$ – гибкость стержня;
 μ – коэффициент приведения длины, зависящий от схемы нагружения;
 l – длина стержня;
 $i = \sqrt{\frac{J}{A}}$ – радиус инерции сечения;
 J – момент инерции сечения относительно оси, перпендикулярной направлению выпучивания;
 E – модуль Юнга.

Для схемы (рис. 4) согласно [2, табл. 45] находим путем линейной интерполяции при отношении $a/l = 0,66$

$$\mu_{0,66} = \mu_{0,6} + 0,6 \cdot (\mu_{0,7} - \mu_{0,6}) = 0,542$$

Вычисляем момент инерции относительно вертикальной оси y составного сечения из двух швеллеров № 12 (рис. 2, б, сечение Б – Б)

$$J = J_{yc} = 2(J_{y, \Gamma} + A_{\Gamma}(b - z_0)^2) = 419 \text{ см}^4.$$

$$\text{Радиус инерции } i = \sqrt{\frac{J}{A}} = 4 \text{ см}; \text{ гибкость ригеля } \lambda = \frac{\mu \cdot l}{i} = 45.$$

Приведенная гибкость определяется по формуле (2) и при $R_y = 215 \text{ МПа}$ и $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ равна $\bar{\lambda} = 1,48$.

Находим коэффициент продольного изгиба при $0 < \bar{\lambda} < 2,5$ [1]:

$$\varphi = 1 - \left(0,073 - 5,53 \frac{R_y}{E} \right) \bar{\lambda} \sqrt{\bar{\lambda}} = 0,88$$

Проверяем прочность верхнего пояса по формуле (1):

$$44 < 183 - \text{четырёхкратный запас прочности.}$$

Рассмотрим теперь проверочный расчет проушины 2 (рис. 2). Схема проушины показана на рисунке 5.

Условие прочности на разрыв по сечению II – II имеет вид:

$$\frac{T}{2A_n} \leq R_y \gamma_c, \tag{3}$$

где $A_n = 1984 \text{ мм}^2$ – площадь сечения при разрыве.

Проверяем прочность на разрыв по формуле (3):

$$66 < 183 - \text{трехкратный запас прочности.}$$

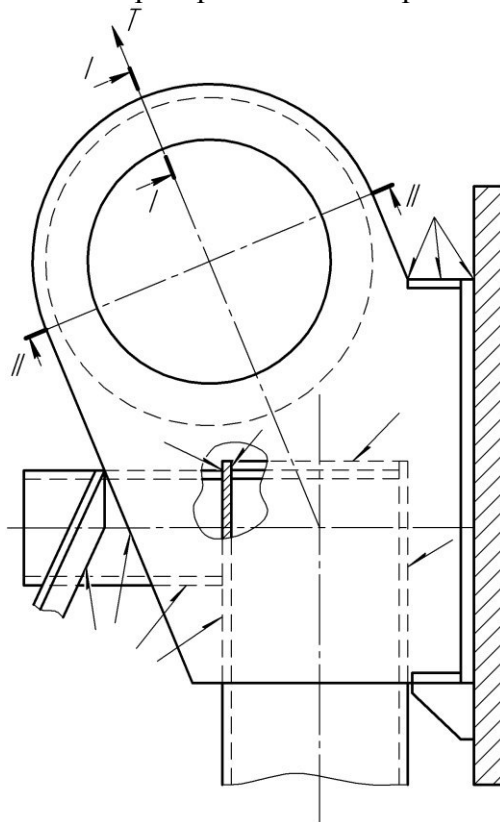


Рис. 5. Схема проушины

Условие прочности на условный срез по сечению I – I имеет вид:

$$\frac{T}{2A_s} \leq 0,58 R_y \gamma_c, \tag{4}$$

где $A_s = \frac{1}{2} A_n = 992 \text{ мм}^2$ – площадь сечения при срезе.

Проверяем прочность на условный срез по формуле (4):

$$132 < 183 - \text{выполняется.}$$

Условие прочности на смятие

$$\frac{T}{2A_p} \leq R_p \gamma_c \quad (5)$$

где $A_p = 4416 \text{ мм}^2$ – площадь смятия;

$$R_p = \frac{R_{un}}{\gamma_m} = 336 \text{ МПа} \text{ – расчетное сопротивление.}$$

Проверяем прочность на смятие по формуле (5):

$$30 < 287 \text{ – десятикратный запас прочности.}$$

Перейдем теперь к рассмотрению оси 3 (рис. 2). Ось работает на поперечный изгиб. Ее конструкция показана на рисунке 6, а. Схема нагружения от усилия в строповочном канате – на рисунке 6, б. Пролет балки принимаем равным расстоянию между центрами проушин $l = 120 \text{ мм}$.

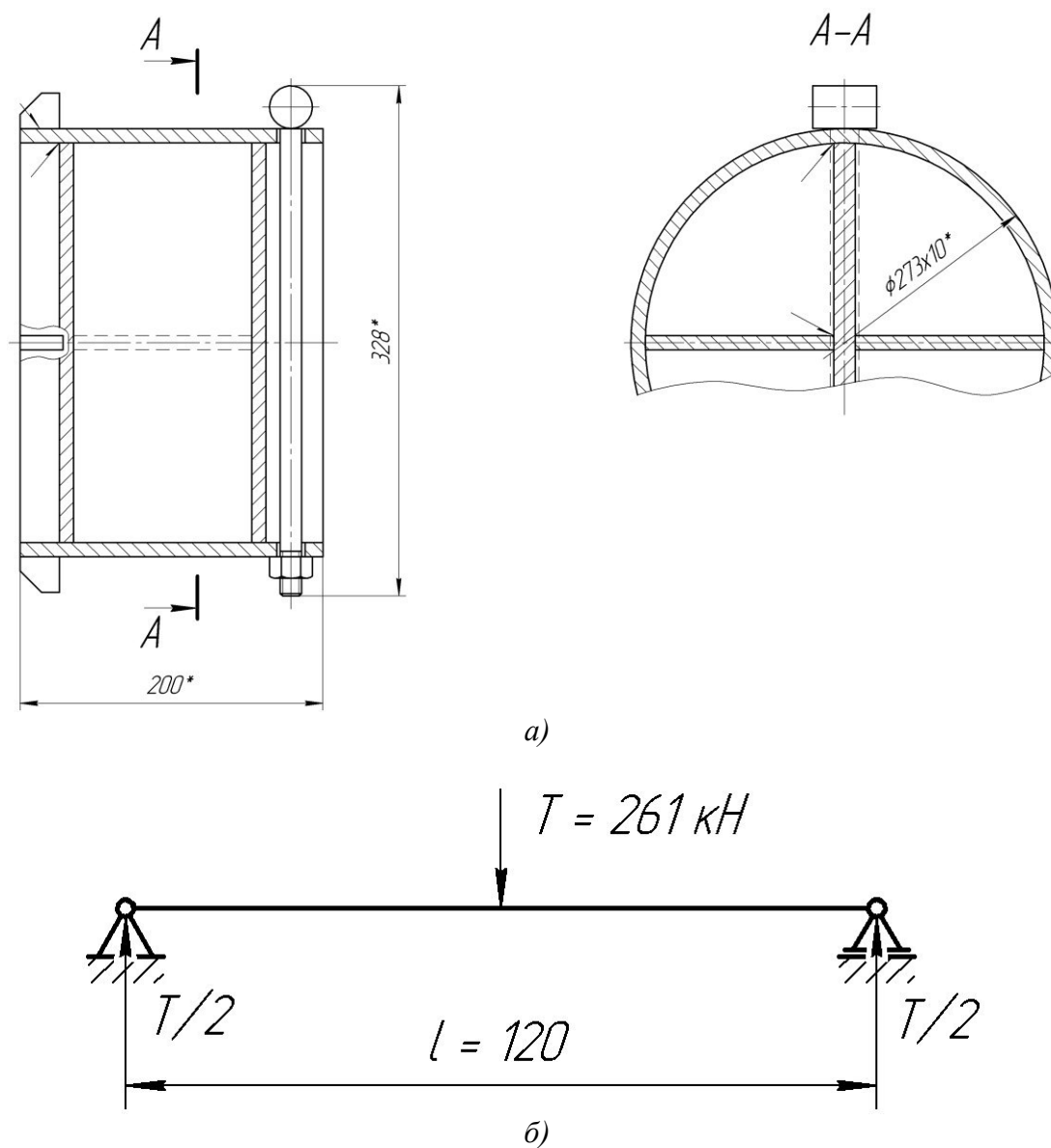


Рис. 6. Строповочная ось
а – конструкция; б – схема нагружения.

Расчетная поперечная сила

$$Q = \frac{T}{2} = 130 \text{ кН.}$$

Расчетный изгибающий момент

$$M = \frac{Tl}{4} = 7,83 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Условие прочности по нормальным напряжениям имеет вид:

$$\frac{M}{W} \leq R_y \gamma_c \quad (6)$$

Учитывая, что момент сопротивления для трубы 273×10 равен $W = 525 \text{ см}^3$, по формуле (6) получаем:

$$15 < 183 - \text{двенадцатикратный запас прочности.}$$

Условие прочности на условный срез имеет вид:

$$\frac{Q}{A} \leq 0,55 R_y \gamma_c \quad (7)$$

Проверяем прочность на условный срез по формуле (7):

$$16 < 100 - \text{шестикратный запас прочности.}$$

На основании приведенных расчетов анализ напряжённого состояния элементов шестилучевой траверсы показывает, что траверса спроектирована и изготовлена с избыточным запасом прочности, и, следовательно, неэкономична. Вес траверсы можно значительно снизить, произведя конструктивный расчет на прочность по требованиям СНиП [1]. Конструктивную схему траверсы можно оптимизировать, используя, например, оболочечную модель со шпангоутами, как наиболее рациональную форму по расходу материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции [Текст]. – М.: ФГУП ЦПП. 2005. – 90 с.
2. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев; Отв. ред. Г.С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1988.— 736 с.

Analysis of Strengthening Characteristic Construction and Components Steadiness of Hexactinal Cross Arm for Bearing Framework Mounting of Support Reactor Carcass

A.N. Dydchenko*, S.A. Tomilin, M.E. Pinchuk***, E.V. Pinchuk******

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

** e-mail: VITkafMPM@mephi.ru ; ** e-mail: SATomilin@mephi.ru
*** e-mail: VITkafTEO@mephi.ru ; **** e-mail: VITkafMPM@mephi.ru*

Abstract – This work is devoted to testing calculation and it also suggests on this basis the recommendations for further optimization of construction of hexactinal cross arm with 120 t. load-carrying ability for bearing framework mounting of support reactor carcass.

Keywords: durability and steadiness of construction, hexactinal cross arm, optimization of construction.

REFERENCES

- [1] SNiP II-23-81*Stalnye konstrukcii [SNR II-23-81. Steelworks]. M. Pub. FGUP CPP [Federal state unitary enterprise "Center of Design Production of Mass Application"]. 2005, 90 p. (in Russian)
- [2] Pisarenko G.S., Jakovlev A.P., Matveev V.V. Spravochnik po soprotivleniju materialov [Reference book on resistance of materials]. Otv. red. G.S. Pisarenko. 2-e izd., pererab. i dop. Kiev: Naukova dumka[Scientific thought]. 1988. 736 p. (in Russian)