



**РУКОВОДЯЩИЙ НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ**

## **АППАРАТЫ ВЫПАРНЫЕ**

**Нормы и методы расчета на прочность**

**РД 26-01-55-84**

**Издание официальное**

УТВЕРЖДЕН Начальником Союзхиммаша

ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ ПРИКАЗОМ по Всесоюзному промышленному  
объединению № 53 от "23" мая 1984 г.

ИСПОЛНИТЕЛИ П.С.Марченко (руководитель разработки)  
Н.Д.Шарапова  
В.Н.Нелюба  
Д.Г.Ряузов

СОГЛАСОВАН НИИХИММАШ

## РУКОВОДЯЩИЙ НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ

АППАРАТЫ ВЫПАРНЫЕ

РД 26-01-55- 84

Нормы и методы расчета  
на прочность

Взамен РТМ 26-01-55-73

---

Приказом по Всесоюзному промышленному объединению  
от "23" мая 1984 г. № 53                      срок введения  
установлен                                      с 01.01.1986

Настоящий руководящий технический материал устанавливает нормы и методы расчета на статическую и малоцикловую прочность сборных единиц и деталей выпарных и опреснительных установок на ЭВМ.

Расчеты на прочность производят для различных состояний, которые могут иметь место при монтаже, пуске, эксплуатации или испытаниях выпарного аппарата с целью выявления максимальных напряжений и определения условных упругих напряжений, необходимых для оценки малоциклового прочностного материала применен при соблюдении требований ГОСТ 14249-80, ОСТ 26-291-79 и ОСТ 26-01-112-79.

---

Издание официальное

Перепечатка воспрещена

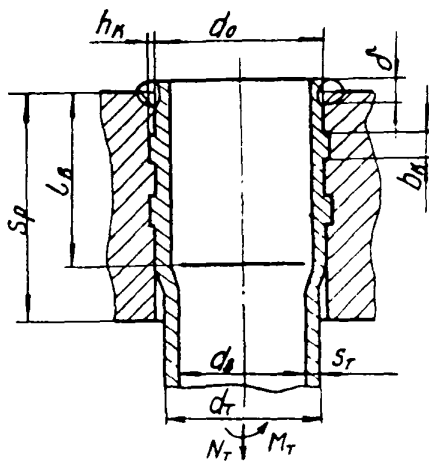
## I. РАСЧЕТ ГРЕЮЩИХ КАМЕР

## I.I. Исходные данные

## I.I.I. Общие

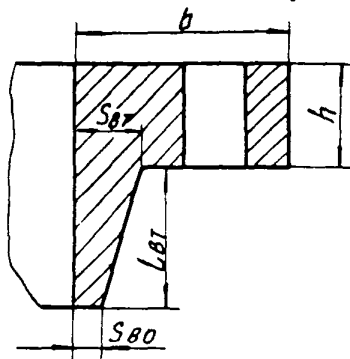
- $D$  - внутренний диаметр кожуха ( $D = 2a$ ), мм;  
 $S_K$  - толщина стенки кожуха, мм;  
 $S_1$  - толщина стенки кожуха в зоне присоединения к решетке, мм;  
 $L$  - длина теплообменных труб, мм;  
 $l_n$  - максимальное расстояние от решетки до перегородки, мм;  
 $l_{np}$  - приведенная длина, мм ( $l_{np} = l_n/3$  - если есть перегородки по межтрубному пространству;  $l_{np} = l/2$  - если нет перегородок);  
 $d_T$  - наружный диаметр теплообменной трубы, мм;  
 $S_T$  - толщина стенки теплообменной трубы, мм;  
 $d_B$  - внутренний диаметр теплообменной трубы, мм;  
 - ( $d_B = d_T - 2S_T$  или принимается конструктивно);  
 $f_T$  - площадь сечения теплообменной трубы, мм<sup>2</sup>  
 ( $f_T = \pi(d_T - S_T)S_T$  или принимается конструктивно);  
 $t$  - шаг расположения отверстий в трубной решетке, мм;  
 $f_i$  - площадь трубной решетки, приходящаяся на одну трубу, мм<sup>2</sup>  
 ( $f_i = \sqrt{3} t^2/2$  - при треугольном размещении труб;  
 $f_i = t^2$  - при квадратном);  
 $d_o$  - диаметр отверстий в решетке, мм;  
 $n_K$  - число канавок в отверстии под теплообменную трубу в том случае, если вальцуются трубы в отверстия с канавками (черт. I);  
 $b_K$  - ширина канавок, мм;  
 $h_K$  - глубина канавок, мм;  
 $S_p$  - толщина трубной решетки, мм;  
 $l_B$  - глубина развальцовки труб, мм;  
 $\chi_B$  - расстояние от плоскости вальцевания до средней плоскости решетки (черт. 3), мм;  
 $\delta$  - высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке, мм;

Крепление теплообменной трубы к трубной решетке



Черт. 1

Фланец с конической втулкой



Черт. 2

$S_{np}$  - приведенная глубина, мм ( $S_{np} = \delta$  - при креплении труб развальцовкой или приваркой с развальцовкой;  $S_{np} = \delta$  - при креплении труб приваркой ) ;

$\sigma_r$  - расчетный радиус перфорированной части трубной решетки, мм.

Принимается равным расстоянию от оси аппарата до оси наиболее удаленной трубы в трубном пучке ( черт.4 ) ;

$[y]$  - допустимый прогиб теплообменных труб, мм. Принимается меньше зазора между трубами с учетом начальной погнуи труб ( $[y] = 0,5... 0,9 (t - d_T)$  ) ;

$c$  - сумма необходимых прибавок к расчетной толщине на возможные утонения при изготовлении и эксплуатации, мм. Задается для каждой из рассчитываемых деталей ;

$t_0$  - начальная температура, °С ( $t_0 = 20$  °С ) ;

$\sigma_T, \sigma_{TT}$  - предел текучести материалов решетки и труб при начальной температуре, МПа ;

$\alpha_D, \alpha_T, \alpha_K$  - коэффициенты линейного расширения материалов решетки, труб и кожуха ,  $1/^\circ\text{C}$  ;

$E_D, E_T, E_K$  - модули продольной упругости материалов решетки, труб и кожуха , МПа.

Для каждого из расчетных режимов задается:

$P_T, P_M$  - давление избыточное ( наружное со знаком минус ) в трубном и межтрубном пространствах, МПа ;

$t_{PT}, t_{PM}$  - температуры решетки со стороны трубного и межтрубного пространства, °С ;

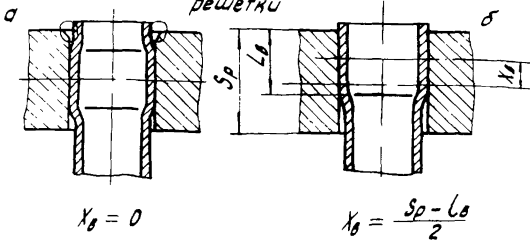
$t_P, t_T, t_K$  - средние значения температуры решетки, труб и кожуха, °С ;

$N$  - число циклов нагружения ( повторений данного расчетного режима ) за весь период эксплуатации ;

$[\sigma]$  - допустимое напряжение, МПа. Принимается по ГОСТ 14249-80 или другой руководящей нормативной документации для каждой из рассчитываемых деталей ;

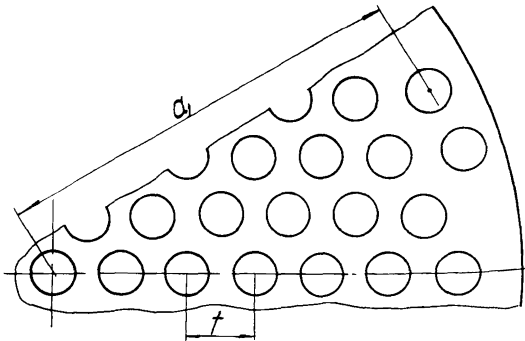
$\nu$  - коэффициент Пуассона ( $\nu = 0,3$  ) .

Схемы для определения расстояния от плоскости вальцевания до срединной плоскости решетки



черт. 3

Схема для определения расчетного радиуса перфорированной части трубной решетки



При равномерном заполнении площади решетки трубами  $a_1 \approx \sqrt{t f_i / \pi}$

черт. 4

I.1.2. Для греющих камер черт.8. . .I2.

$S_2$  - толщина стенки камеры, мм. Отдельные конструкции вместо камеры имеют днище, циркуляционную трубу или другие детали, образующие трубное пространство;

$S_2$  - толщина стенки камеры в месте присоединения к трубной решетке или фланцу, мм;

$\alpha_2$  - коэффициент линейного расширения материала камеры,  $1/^\circ\text{C}$

$E_2$  - модуль продольной упругости материала камеры, МПа;

$t_2$  - расчетная температура камеры в месте присоединения к решетке или фланцу,  $^\circ\text{C}$ .

I.1.3. Для греющих камер черт.9...II, содержащих фланцевые разъемы

$h_1, h_2$  - толщина кольца фланца кожуха и камеры, мм;

$b_1, b_2$  - ширина кольца фланца кожуха и камеры, мм;

$R_1, R_2$  - средние радиусы поперечных сечений колец фланцев кожуха и камеры, мм;

$S_1, S_2$  - толщины стенок кожуха и камеры в местах присоединения к фланцу кожуха и камеры, мм. Для фланцев с коническими втулками (черт.2) значения  $S_1$  и  $S_2$  принимаются равными  $S_3$ :

$$S_3 = \mathcal{L} S_{80}; \quad \mathcal{L} = 1 - \frac{(l_{BT} - 1) \chi_{BT}}{\chi_{BT} + l_{80} + 1}; \quad \chi_{BT} = \frac{4 l_{BT}}{\sqrt{D} S_{80}}; \quad j = \frac{S_{BT}}{S_{80}};$$

$S_{BT}, S_{80}$  - толщины стенок конической втулки в месте присоединения к кольцу фланца и оболочке, мм;

$l_{BT}$  - высота конической втулки, мм;

$R_n$  - радиус средней окружности прокладки;

$S_n$  - толщина прокладки, мм;

$b_n$  - ширина прокладки в зоне скатывания, мм. Для резиновых прокладок принимается приведенная ширина по ОСТ 26-373-78;

$E_n$  - модуль упругости материала прокладки, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78 или другой руководящей нормативной документации;



$Y_n$  - линейная податливость прокладки, мм/Н ( $Y_n = S_n / 2\pi R_n b_n E_n$ );

$q, [q]$  - минимальное и допускаемое удельное давление на прокладку, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78;

$m$  - прокладочный коэффициент. Принимается по ОСТ 26-373-78;

$N_b$  - количество болтов или шпилек;

$R_b$  - радиус болтовой окружности, мм;

$d_b$  - диаметр болта или шпильки, мм;

$f_b$  - площадь поперечного сечения болта или шпильки, мм<sup>2</sup>. Определяется по внутреннему диаметру резьбы;

$L_b$  - расчетная длина болта ( $L_b = h_1 + h_2 + S_n + 0,3 d_b$ ) или шпильки ( $L_b = h_1 + h_2 + S_n + 0,6 d_b$ ), мм;

$E_b$  - модуль продольной упругости материала болтов или шпилек, МПа;

$Y_b$  - линейная податливость болтов или шпилек, мм/Н ( $Y_b = L_b / E_b f_b n_b$ );

$\alpha_b$  - коэффициент линейного расширения материала болтов или шпилек, 1/°С;

$t_b$  - расчетная температура болтов или шпилек, °С;

$[\sigma]_b^{20}, [\sigma]_b^t$  - допускаемое напряжение для материала болтов или шпилек при 20 °С и при расчетной температуре, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78 или другой руководящей нормативной документации;

$Q_b^0$  - усилие затяжки болтов, Н/мм ( $Q_b^0 \leq f_b [\sigma]_b^{20} / 2\pi R_b$ );

$t_f (t_{f1}, t_{f2})$  - расчетная температура фланца, °С;

$\alpha_f (\alpha_{f1}, \alpha_{f2})$  - коэффициент линейного расширения материала фланца, 1/°С;

$E_f (E_{f1}, E_{f2})$  - модули продольной упругости материала фланца, МПа;

$\lambda_f (\lambda_{f1}, \lambda_{f2})$  - приведенные значения податливости фланцев, мм/Н

$$(\lambda_{f1} = \delta R_1 (R_b - R_n) D / E_{f1} b_1 h_1^3;$$

$$\lambda_{f2} = \delta R_2 (R_b - R_n) D / E_{f2} b_2 h_2^3).$$

1.1.4. Для греющей камеры черт. II

$D_H$  - наружный диаметр трубной решетки, мм;

$S_{PI}$  - толщина решетки в зоне присоединения к кожуху, мм.

1.1.5. Для греющей камеры с кольцевой полостью для отвода конденсата (черт. I2)

$L_K$  - длина кожуха, мм;

$L_0$  - длина цилиндрической обечайки в зоне образования полости для отвода конденсата, мм;

$S_0$  - толщина стенки цилиндрической обечайки, мм;

$d_0$  - радиус цилиндрической обечайки, мм;

$S_{пл}$  - толщина кольцевой пластины, мм;

$\alpha_0, \alpha_{пл}$  коэффициент линейного расширения материалов цилиндрической обечайки и кольцевой пластины,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$E_0, E_{пл}$  модули продольной упругости материалов цилиндрической обечайки и кольцевой пластины, МПа.

1.2. Определение возможности развальцовки труб в решетке

1.2.1. Остаточное давление определяется по формуле

$$P_{ост} = \min \left\{ P_{от}; \frac{1}{B_c} \left[ (B_c - 1) P_{аз} - P_{от} \right] \right\},$$

где  $d_3 = \sqrt{\frac{6\sqrt{3}}{\pi} f^2 - 2d_0^2}$  при треугольном размещении труб;

$$d_3 = \sqrt{\frac{8f^2}{\pi} - d_0^2} \quad \text{при квадратном размещении труб;}$$

$$\lambda_T = \frac{d_0}{d_0 - 2S_T}; \quad B_T = \frac{\lambda_T^2 + 1}{\lambda_T^2 - 1} - 0,43;$$

$$\lambda_3 = \frac{d_3}{d_0}; \quad B_3 = \frac{\lambda_3^2 + 1}{\lambda_3^2 - 1} + 0,43;$$

$$K_3 = \min \{ \ln \lambda_3; 1 \}; \quad B_c = \frac{\lambda_T^2 - 1}{2} \left( B_T + \frac{E_T}{E_P} B_3 \right);$$

$$P_{от} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{TT} \ln \lambda_T; \quad P_{аз} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{TP} K_3.$$

1.2.2. Условие возможности развальцовки труб в решетке\*

$$\text{Рост} > 0.$$

1.2.3. Условие применимости расчетных формул

$$d_3 \leq 1,2(2t - d_0).$$

1.2.4. Требуемая степень развальцовки теплообменных труб рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = (I \dots I, 5) \frac{(d_{BB} - d_B) - (d_0 - d_T)}{d_0} \cdot 100\%.$$

где

$$d_{BB} = d_0 \left\{ 1 + \frac{1}{E_p} [\sqrt{3} \lambda_3^2 \sigma_{TP} + 0,91 B_3 (P_{ост} - P_{оз})] \right\};$$

$$\lambda_K = \sqrt{1 + \frac{n_K b_K \left[ \frac{(d_0 + 2h_K)^2}{d_0^2} - 1 \right]}{l_B}}; \quad d_{BB} = \sqrt{(\lambda_K d_{об})^2 - \frac{4f_T}{\pi}}.$$

1.3. Определение минимальной толщины трубной решетки

Толщина трубной решетки назначается конструктивно.

1.3.1. Принятая толщина трубной решетки должна удовлетворять условию прочности беструбной зоны:

$$S_p \geq 0,5 D_E \sqrt{\frac{P_T - P_M}{[\sigma]}} + C,$$

$$\text{где } D_E = \max \{ D'_E, D''_E, \dots \};$$

$D'_E, D''_E$  - диаметры окружностей, вписанных в беструбные зоны решетки (черт.5).

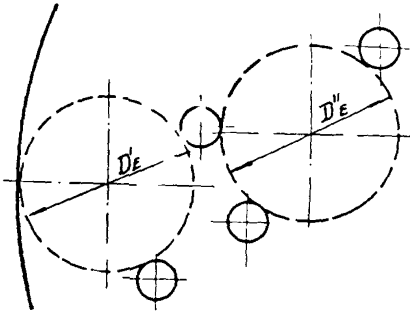
1.3.2. Для решеток, у которых крепление теплообменных труб производится развальцовкой или развальцовкой с обваркой, принятая толщина трубной решетки должна удовлетворять:

- условию возможности развальцовки

$$S_p \geq l_B, \quad l_B \geq 3,5 \sqrt{(d_T - S_T) S_T};$$

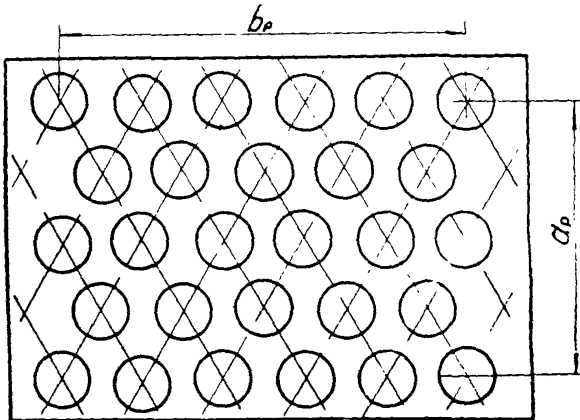
\* Отклонения размеров и свойств материалов даже в допустимых по руководящей нормативной документации пределах могут привести к тому, что не будет выполняться это условие. Поэтому гарантированная прочность вальцовых соединений достигается при выполнении технических требований к развальцовке труб, например по ОСТ 26-17-01-83.

Схема для определения диаметра окружности,  
вписанной в максимальную беструбную зону решетки



Черт. 5

Схема для определения расстояния между осями  
крайних труб у прямоугольной решетки



Черт. 6

- условия устойчивости решетки при развальцовке\*

$$S_p \geq 0,655 a, \sqrt{\frac{10,92 A_4 P \text{ ост}}{\psi_p E_{p2}}} \quad \text{для круглой решетки;}$$

$$S_p \geq 0,655 \left(1,3 - 0,45 \frac{a_p}{b_p^2}\right) \frac{a_p}{2} \sqrt{\frac{10,92 A_4 P \text{ ост}}{\psi_p E_p}} \quad \text{для прямо-угольной.}$$

Здесь  $A_4 = \frac{1}{\lambda_p} + \psi_p \frac{1,3 - 0,7 \lambda_p}{1,3 + 0,7 \lambda_p^2}$ ;  $\lambda_p = \frac{l}{d_0}$ ;

$a_p, b_p$  - расстояния между осями крайних труб на меньшей и большей стороне прямоугольной решетки (черт.6);

$\psi_p, \psi_p$  - коэффициенты прочности и жесткости трубной решетки. Принимаются по п.2 приложения I.

I.3.3. Для решетки, выполненной заодно с фланцем, принятая толщина должна быть не менее толщины кольца ответного фланца. Допускается уменьшение толщины решетки по сравнению с толщиной кольца ответного фланца при условии подтверждения плотности и прочности фланцевого соединения расчетом по п. I.8.

#### I.4. Расчет нагрузок

##### I.4.1. Грейная камера погружного типа (черт.7)

Такая камера состоит из двух трубных решеток (1), соединенных между собой теплообменными трубами и кожухом (2). Камера помещается внутри выпарного аппарата. Грейный пар поступает в нее через штуцер А. Через штуцер Б сливают конденсат. Помимо расчета характеристик трубной решетки по п.2 приложения I производится расчет коэффициентов  $B_{II}$ ,  $B_{I2}$ ,  $B_{22}$  по п.3 приложения I при  $S = S_1$ ,  $R = a$ .

Нагрузки  $Q_1, M, N$  определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений:

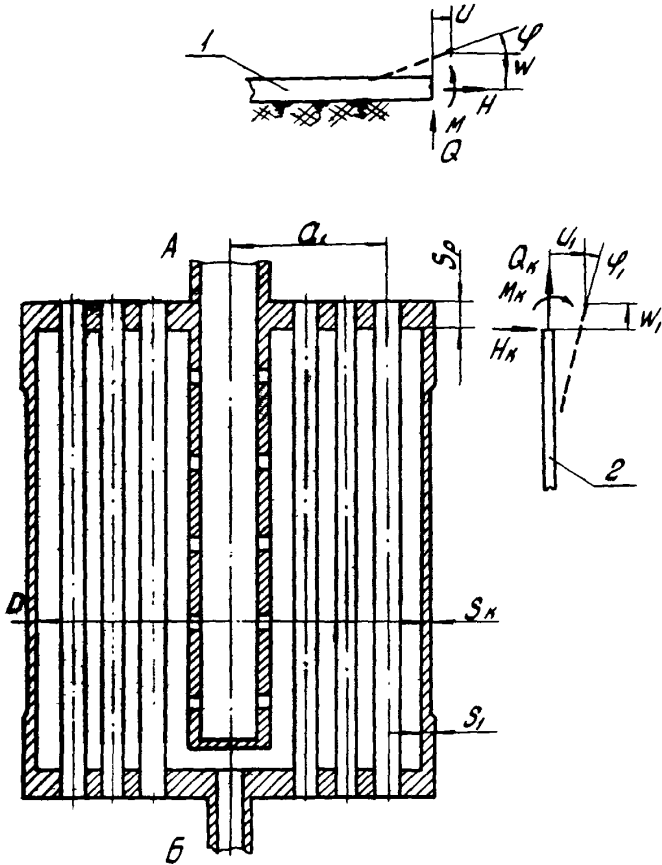
$$\left. \begin{aligned} a_{11} Q a + a_{12} M &= P_1, \\ a_{21} Q a + a_{22} M + a_{23} H S_1 &= P_2, \\ a_{31} Q a + a_{32} M + a_{33} H S_1 &= P_3, \end{aligned} \right\}$$

где

$$Q_1 = \frac{D_p L}{2 E_k S_k a^3}; \quad Q_2 = \frac{D_p}{E_k S_1^2 a}; \quad Q_3 = \frac{S_p}{2 S_1};$$

\* Допускается применение решеток меньшей толщины при использовании специальных приемов вальцевания труб, препятствующих выпучиванию (потере устойчивости) трубных решеток.

Греющая камера погружного типа



черт. 7

$$a_{11} = T_{11} + P_1; a_{12} = a_{21} = T_{12}; w_T = \frac{1}{K}(\alpha_T P_M - \alpha P_T) + \frac{0,3L}{4E_T S_T} (d_T P_M - d_B P_T);$$

$$P_1 = [\alpha_K(t_K - t_0) - \alpha_T(t_T - t_0) - \frac{2W_T}{L} \frac{D_P L}{2\sigma^2} + (0,3P_1 - T_{13}) / (P_T - P_M) \sigma^2];$$

$$a_{22} = T_{22} + P_2 B_{11}^k; a_{23} = -P_2 (B_{12}^k + P_3 B_{11}^k); P_2 = T_{23} (P_M - P_T) \sigma^2;$$

$$a_{31} = 0,3; a_{32} = B_{12}^k + P_3 B_{11}^k; a_{33} = -B_{22}^k - \frac{E_K a T_{33}}{E_P S_P} - P_3 (2B_{12}^k + P_3 B_{11}^k);$$

$$P_3 = (\alpha_P - \alpha_K) / (t_K - t_0) E_K S_1 a + (P_T - P_M) \sigma^2$$

Нагрузки остальных деталей определяются по формулам:

$$Q_K = -Q; M_K = M - 0,5HS_P; N_K = -N.$$

#### 1.4.2. Гретьная камера с решетками, сваренными в кожух (черт. 6)

Рассматриваемая гретьная камера состоит из двух трубных решеток (I) кожуха (2) и днищ, или других деталей выпарного аппарата (3). Помимо расчета характеристик трубной решетки по п.2 приложения I производится расчет коэффициентов  $B_{11}^k, B_{12}^k, B_{22}^k, K_q, K_p$  по п.3 приложения I при  $S = S_1, R = a$ . Значения коэффициентов  $B_{11}^d, B_{12}^d, B_{22}^d$  принимаются по п.3 приложения I при  $S = S_2, R = a$ .

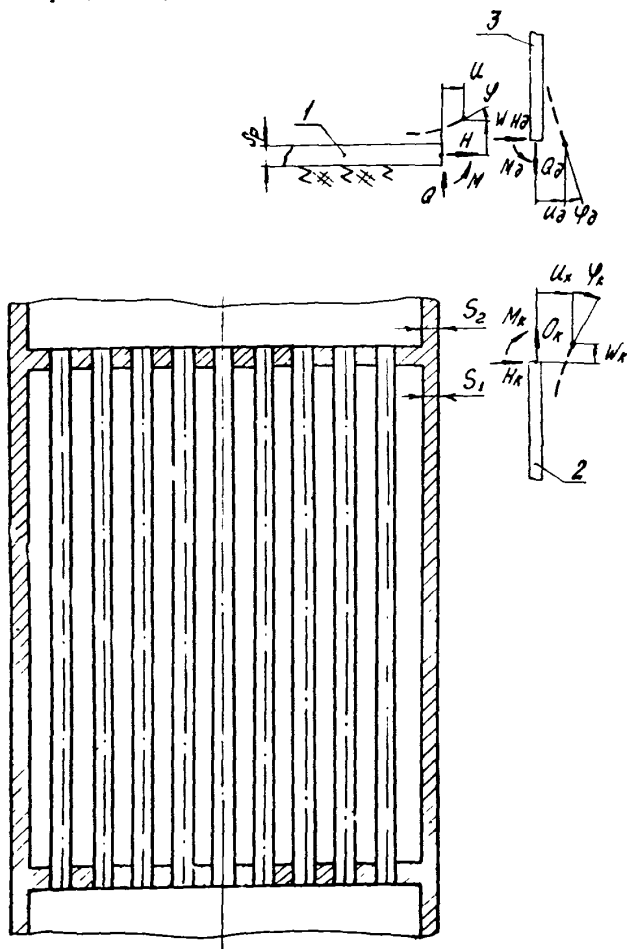
Нагрузки  $Q, M, N$  определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} Q a + a_{12} M &= P_1, \\ a_{21} Q a + a_{22} M + a_{23} HS_1 &= P_2; \\ a_{31} Q a + a_{32} M + a_{33} HS_1 &= P_3, \end{aligned} \right\}$$

где  $P_1 = \frac{D_P L}{2E_K S_K a^3}; P_2 = \frac{D_P}{E_K S_1^2 a}; P_3 = \frac{S_P}{2S_1};$

$$P_4 = \frac{E_K S_1}{E a S_2}; P_5 = \frac{S_P}{2S_2};$$

Греющая камера с решетками, сваренными в кожух



Черт. 8



$$B_{11}^K = B_{11}^K + \rho_4 \frac{S_1 B_{11}^0}{S_2};$$

$$\bar{B}_{12}^K = B_{12}^K - \rho_4 \left( B_{12}^0 + \frac{B_{11}^0 S_P}{S_2} \right);$$

$$\bar{B}_{21}^K = B_{12}^K - \rho_4 B_{12}^0 + \frac{B_{11}^K S_P}{S_1};$$

$$\bar{B}_{22}^K = B_{22}^K + \frac{B_{12}^K S_P}{S_1} + \frac{\rho_4}{S_1} \left( B_{12}^0 S_P + B_{22}^0 S_2 \right);$$

$$\Delta = \bar{B}_{11}^K \bar{B}_{22}^K - \bar{B}_{12}^K \bar{B}_{21}^K;$$

$$\Delta_{11} = \frac{\bar{B}_{11}^K}{\Delta};$$

$$\Delta_{12} = \frac{\bar{B}_{12}^K}{\Delta};$$

$$\Delta_{21} = \frac{\bar{B}_{21}^K}{\Delta};$$

$$\Delta_{22} = \frac{\bar{B}_{22}^K}{\Delta};$$

$$\bar{B}_{11}^0 = \rho_4 \frac{B_{11}^0 S_1}{S_2};$$

$$\bar{B}_{12}^0 = \rho_4 \left( B_{12}^0 + \rho_5 B_{11}^0 \right);$$

$$\bar{B}_{21}^0 = \rho_4 B_{12}^0;$$

$$\bar{B}_{22}^0 = \rho_4 \left( B_{22}^0 + \rho_5 B_{12}^0 \right);$$

$$P_4 = (\alpha_a - \alpha_k)(t_p - t_0) E_k S_1 a + (0,15 + 0,85 \rho_4) P_T a^2 - P_M a^2;$$

$$\Delta_{2M} = \Delta_{12} \bar{B}_{21}^0 + \Delta_{22} \bar{B}_{11}^0; \quad \Delta_{2H} = \frac{S_2}{S_1} \Delta_{12} \bar{B}_{22}^0 + \Delta_{22} \bar{B}_{12}^0;$$

$$\Delta_{3M} = \Delta_{11} \bar{B}_{21}^0 + \Delta_{21} \bar{B}_{11}^0; \quad \Delta_{3H} = \frac{S_2}{S_1} \Delta_{11} \bar{B}_{22}^0 + \Delta_{21} \bar{B}_{12}^0;$$

$$a_{11} = T_{11} + \rho_1 K q; \quad a_{12} = T_{12}; \quad w_T = \frac{1}{K} (\alpha_1 P_M - \alpha_P P_T) + \frac{0,3L}{4E_T S_T} (d_1 P_M - d_2 P_T);$$

$$P_T = [\alpha_k (t_k - t_0) - \alpha_T (t_T - t_0) - \frac{2w_T}{L}] \frac{D_0 L}{2a^2} + \rho_1 (0,5 K q P_T - 0,3 K_P P_M) a^2 + T_{13} (P_M - P_T) a^2;$$

$$a_{21} = T_{12} + 0,3 \rho_2 (B_{11}^K \Delta_{12} - B_{12}^K \Delta_{11}); \quad a_{22} = T_{22} + \rho_2 (B_{11}^K \Delta_{2M} - B_{12}^K \Delta_{3M}); \quad a_{23} = \rho_2 (B_{11}^K \Delta_{2H} - B_{12}^K \Delta_{3H});$$

$$P_2 = T_{23} (P_M - P_T) a^2 + \rho_2 (B_{11}^K \Delta_{12} - B_{12}^K \Delta_{11}) P_4;$$

$$a_{31} = 0,3 [\Delta_{11} (B_{22}^K + \rho_5 B_{12}^K) - \Delta_{12} (B_{12}^K + \rho_5 B_{11}^K) - 1]; \quad a_{32} = \Delta_{3M} (B_{22}^K + \rho_5 B_{12}^K) - \Delta_{2M} (B_{12}^K + \rho_5 B_{11}^K);$$

$$a_{33} = \frac{E a T_{33}}{E_P S_P} - \Delta_{2H} (B_{12}^K + \rho_5 B_{11}^K) + \Delta_{3H} (B_{22}^K + \rho_5 B_{12}^K);$$

$$P_3 = (\alpha_k - \alpha_P)(t_P - t_0) E_k S_1 a + P_M a^2 - 0,15 P_T a^2 + [\Delta_{11} (B_{22}^K + \rho_5 B_{12}^K) - \Delta_{12} (B_{12}^K + \rho_5 B_{11}^K)] P_4.$$

Нагрузки остальных деталей определяются по формулам:

$$Q_k = 0,5 P_T a - Q; \quad M_k = \Delta_{12} (0,3 Q a - P_4) + \Delta_{2M} M + \Delta_{2H} H S_1;$$

$$H_k = \frac{1}{\bar{B}_{12}^0 S_1} (\bar{B}_{11}^0 M + \bar{B}_{12}^0 H S_1 - \bar{B}_{11}^K M_k); \quad Q_0 = \frac{P_4 a}{2};$$

$$M_0 = M_k - H_k S_P - M - 0,5 H S_P; \quad H_0 = -H - H_k.$$

1.4.3. Гретьяя камера с решетками, выполненными заодно с плоскими фланцами ( черт.9 )

Такая камера состоит из трубных решеток ( 1 ), кожуха ( 2 ), днищ ( 3 ) и фланцев кожуха ( 4 ) и днища ( 5 ). Помимо расчета характеристик трубной решетки по п.2 приложения I производится расчет коэффициентов  $V_{II}^K, V_{I2}^K, V_{22}^K, K_q, K_p$  по п.3 приложения I при  $S = S_1, R = a$ . Значения коэффициентов  $V_{II}^0, V_{I2}^0, V_{22}^0$  принимаются по п. 3 приложения I при  $S = S_2, R = a$ .

Начальные значения  $Q^0, M^0, H^0$ , возникающие при затяжке болтов фланцевого разьема, определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} a_{11} Q^0 + a_{12} M^0 &= 0, \\ a_{21} Q^0 + a_{22} M^0 + a_{23} H^0 S_1 &= 0, \\ a_{31} Q^0 + a_{32} M^0 + a_{33} H^0 S_1 &= \frac{R_5 - R_0}{a} Q_5^0 R_5. \end{aligned} \right\}$$

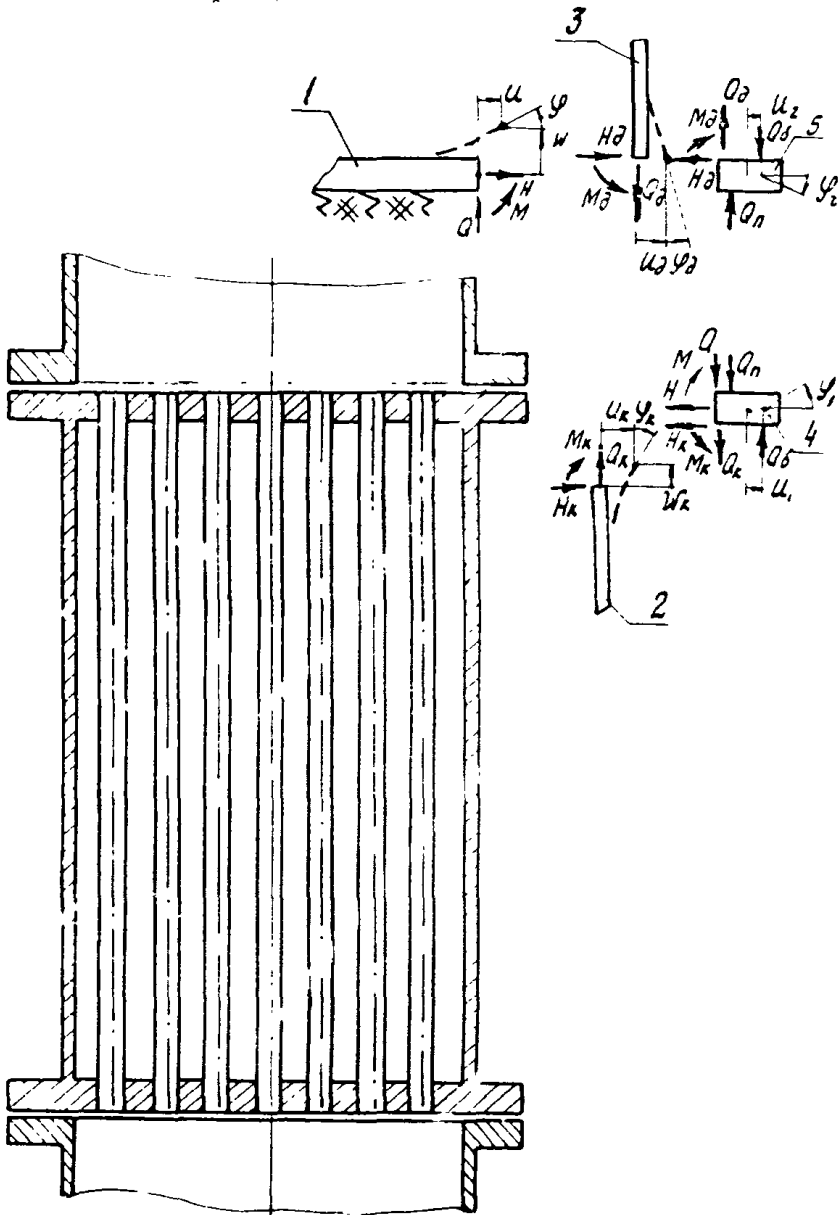
Приращения нагрузок  $Q', M', H'$ , возникающие при разогреве и подаче давлений в трубное и межтрубное пространства, определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} Q' + a_{12} M' &= P_1, \\ a_{21} Q' + a_{22} M' + a_{23} H' S_1 &= P_2, \\ \bar{a}_{31} Q' + \bar{a}_{32} M' + \bar{a}_{33} H' S_1 &= P_3. \end{aligned} \right\}$$

Здесь  $P_1 = \frac{DpL}{2EK\alpha a^3}; P_2 = \frac{Dp}{EK S_1^2 a}; P_3 = \frac{Sp}{2S_1}; P_4 = \frac{h_2}{2S_2};$

$$P_5 = 1 + \frac{b_1 h_1}{R_1 S_p} T_{33}; P_6 = \frac{E_p b_1 h_1^3}{12R_1 D_p}; P_7 = \frac{E_{p2} b_2 h_2^3}{12E_2 R_2 S_2^2 a}; P_8 = \frac{E a R_2 a}{E_{p2} b_2 h_2};$$

Греющая камера с решетками, выполненными заодно с плоскими фланцами



Чер. 9

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= T_n + P_1 K_0, \quad a_{12} = T_{12}, \quad w_T = \frac{1}{K} (\alpha_1 P_{11} - \alpha P_T) + \frac{0,3L}{4E_T S_T} (\alpha_T P_{11} - d_0) \\
 P_1 &= [\alpha_K (t_K - t_0) - \alpha_T (t_T - t_0) - \frac{2W_T}{L}] \frac{D_P L}{2\sigma^2} + T_{13} (P_M - P_T) \sigma^2 + P_1 (0,5K_0 P_T - 0,3A) \\
 a_{51} &= \frac{1}{B_{12}^K + P_3 B_{11}^K}, \quad a_{53} = a_{5K} \frac{[E_K \alpha T_{33}]}{E_P S_P} + P_5 (B_{22}^K + P_5 B_{12}^K); \\
 P_5 &= a_{51} [(\alpha_P - \alpha_K)(t_K - t_0) E_K S_1 \sigma + (0,15 P_T - P_M) \sigma^2]; \quad a_{21} = T_{12} - 0,3 P_2 B_{11}^K \\
 a_{22} &= T_{22}; \quad a_{23} = P_2 (B_{11}^K a_{53} - P_5 B_{12}^K); \quad P_2 = T_{23} (P_M - P_T) \sigma^2 - P_2 B_{11}^K P_5; \\
 a_{31} &= P_6 T_{12} + 0,3 a_{51}; \quad a_{32} = 1 + P_6 T_{22}; \quad a_{33} = - (a_{53} + P_5 \frac{h_1}{2S_1}); \\
 \bar{P}_3 &= P_6 T_{23} (P_M - P_T) \sigma^2 + (R_n + \frac{b_1}{2} - R_1) \frac{P_T a}{2} + P_5; \\
 a_{44} &= \frac{B_{12}^2 + P_4 B_{11}^2}{B_{22}^2 + P_4 B_{12}^2 + P_8}; \quad P_6 = \frac{(\alpha_{\varphi 2} - \alpha_{\varphi 1})(t_{\varphi 2} - t_0) E_{\varphi} S_{\varphi} a + (R_2 h_2 S_2 - 0,85 a)}{B_{22}^2 + P_4 B_{12}^2 + P_8} \\
 a_{45} &= \frac{1}{1 + P_7 (B_{11}^2 - a_{44} B_{12}^2) + P_4 a_{44}}; \quad P_7 = a_{45} \left[ (R_n + \frac{b_2}{2} - R_2) \frac{P_T a}{2} + (P_7 B_{12}^2 \right. \\
 \Delta_T &= \alpha_{\varphi 1} h_1 (t_{\varphi 1} - t_0) + \alpha_{\varphi 2} h_2 (t_{\varphi 2} - t_0) - \alpha_3 (h_1 + h_2) (t_{\delta} - t_0); \\
 \lambda_{np} &= \lambda_{\varphi 1} + \lambda_{\varphi 2} [1 - a_{45} (1 + P_4 a_{44})] + \frac{2\pi a (y_{\delta} + y_n)}{R_{\delta} - R_n}; \\
 a_{41} &= \frac{0,3 \lambda_{\varphi 1}}{\lambda_{np}} a_{51}; \quad a_{42} = \frac{\lambda_{\varphi 1}}{\lambda_{np}}; \quad a_{43} = \frac{\lambda_{\varphi 1}}{\lambda_{np}} (a_{53} + P_5 \frac{h_1}{2S_1}); \\
 P_4 &= \frac{1}{\lambda_{np}} \left\{ \Delta_T + [2\pi a y_n - \lambda_{\varphi 1} (R_n + \frac{b_1}{2} - R_1) - \lambda_{\varphi 2} (R_n + \frac{b_2}{2} - R_2)] - \right. \\
 &\left. - \lambda_{\varphi 1} P_5 + \lambda_{\varphi 2} [P_7 + P_4 (P_6 + a_{44} P_7)] \right\}; \quad P_3 = \bar{P}_3 + P_4; \\
 \bar{a}_{31} &= a_{31} - a_{41}; \quad \bar{a}_{32} = a_{32} - a_{42}; \quad \bar{a}_{33} = a_{33} + a_{43}
 \end{aligned}$$

Приращение нагрузки болтов фланцевого разъема определяется по формуле

$$Q'_8 = \frac{a}{R_8(R_8 - R_n)} (P_4 + a_{41} Q'_a + a_{42} M' - a_{43} H'_S)_1$$

В расчетном состоянии нагрузки  $Q$ ,  $M$ ,  $H$ ,  $Q_8$  определяются по формулам:

$$Q = Q^0 + Q'; \quad M = M^0 + M'; \quad H = H^0 + H'; \quad Q_8 = Q_8^0 + Q'_8$$

Нагрузки остальных деталей в расчетном состоянии, их начальные значения или приращения определяются по формулам:

$$\begin{aligned} Q_n &= \frac{1}{R_n} (Q_8 R_8 - 0,5 P_T a^2); & Q_K &= 0,5 P_T a - Q; \\ M_K &= P_5 - 0,3 a_5 (Q a + a_{53} H S_1); & H_K &= -P_5 H; \\ Q_3 &= 0,5 P_T a; & M_0 &= -\left(P_7 + a_{45} \frac{R_8 - R_n}{a} Q_8 R_8\right)_1; \\ H_3 &= \frac{1}{S_2} (P_6 - a_{44} M_0). \end{aligned}$$

Углы поворота фланцев определяются по формулам:

$$\varphi_1 = -\frac{1}{E_K S_1^2} (B_{11}^K M_K + B_{12}^K H_K S_1), \quad \varphi_2 = -\frac{1}{E_a S_2^2} (B_{11}^a M_0 + B_{12}^a H_0 S_2)$$

#### 1.4.4. Грейная камера с решетками, сваренными во фланцы с конической втулкой ( черт.10 )

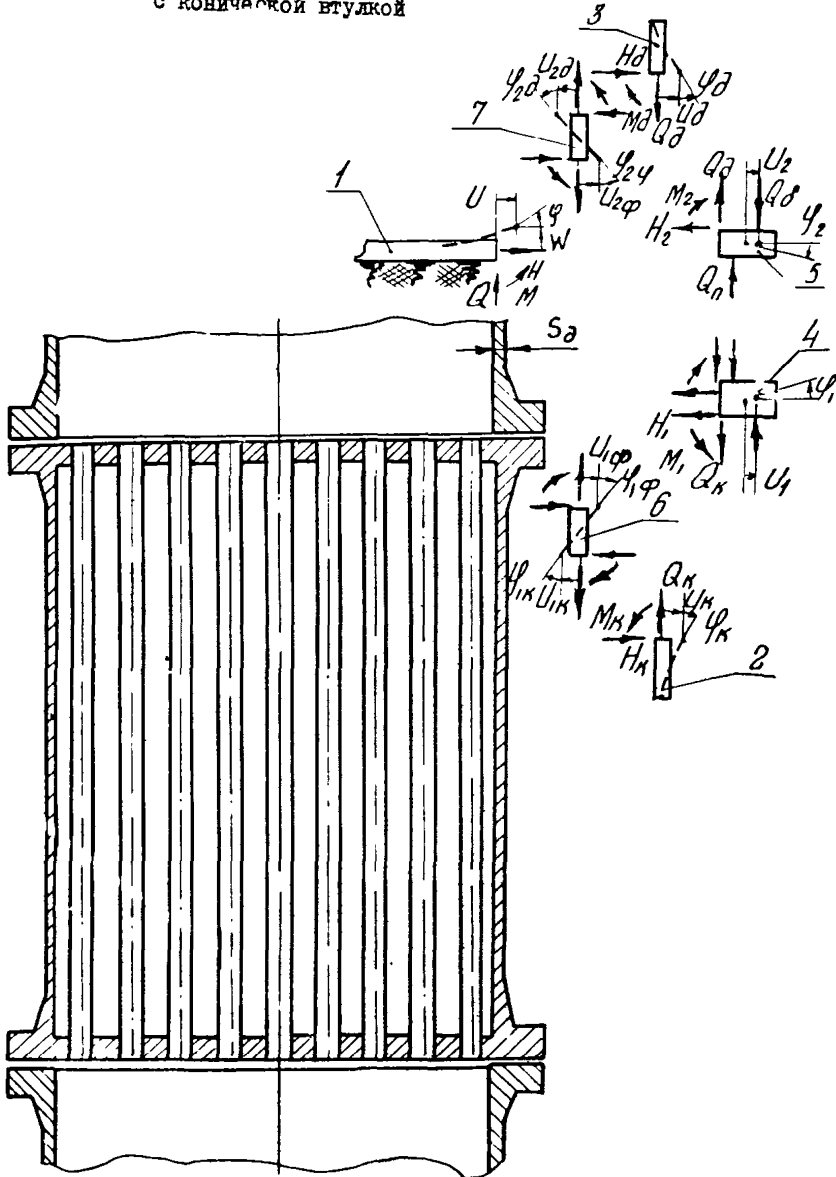
Данная камера состоит из трубных решеток ( 1 ), кожука ( 2 ), днищ ( 3 ), фланца кожука ( 4 ), фланца днища ( 5 ) и втулок ( 6,7 ), выполненных заодно с фланцами. Помимо расчета характеристик трубной решетки по п. 2 приложения I производится расчет коэффициентов  $B_{11}^K, B_{12}^K, B_{22}^K, K_7, K_P$ , по п. 3 приложения I при  $S = S_K, R = a$ .

Значения коэффициентов  $B_{I1}, B_{I2}, B_{I3}, B_{I4}, B_{22}, B_{24}$  принимаются по п. 3 приложения I при  $S = S_3, R = a, L = L_{07}, R = a$ . Значения коэффициентов  $B_{II}^{\partial}, B_{I2}^{\partial}, B_{22}^{\partial}$  принимаются по п. 3 приложения I при  $S = S_{\partial}, R = a$ .

Начальные значения  $Q_k^0, M_k^0, N_k^0, M_1^0, N_1^0, M_2^0, N_2^0, M_{\partial}^0, N_{\partial}^0, M^0, N^0$ , возникающие при затяжке болтов фланцевого разъема, определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 a_{1,1} Q_k^0 & & + a_{1,10} M^0 & = 0, \\
 a_{2,2} M_k^0 + a_{2,3} N_k^0 + a_{2,4} M_1^0 + a_{2,5} N_1^0 & & & = 0, \\
 a_{3,1} Q_k^0 + a_{3,2} M_k^0 + a_{3,3} N_k^0 + a_{3,4} M_1^0 + a_{3,5} N_1^0 & & & = 0, \\
 a_{4,2} M_k^0 + a_{4,3} N_k^0 + a_{4,4} M_1^0 + a_{4,5} N_1^0 & & & \\
 a_{5,1} Q_k^0 + a_{5,2} M_k^0 + a_{5,3} N_k^0 + a_{5,4} M_1^0 + a_{5,5} N_1^0 & & + a_{5,10} M^0 + a_{5,11} N^0 & = -a_{5,12} Q_{\partial}^0, \\
 & & + a_{5,11} N^0 & = 0, \\
 a_{6,6} M_2^0 + a_{6,7} N_2^0 + a_{6,8} M_{\partial}^0 + a_{6,9} N_{\partial}^0 & & & = -a_{6,12} Q_{\partial}^0, \\
 a_{7,6} M_2^0 + a_{7,7} N_2^0 + a_{7,8} M_{\partial}^0 + a_{7,9} N_{\partial}^0 & & & = 0,
 \end{aligned} \right\}$$

Греющая камера с решетками, вваренными во фланцы  
с конической втулкой



Черт. 10

$$\begin{aligned}
 & a_{2,6} M_2^0 + a_{2,7} H_2^0 + a_{2,8} M_0^0 + a_{2,9} H_0^0 = 0 \\
 & a_{2,6} M_2^0 + a_{2,7} H_2^0 + a_{2,8} M_0^0 + a_{2,9} H_0^0 = 0 \\
 a_{10}, Q_k^0 & + a_{10,4} M_4^0 + a_{10,5} H_4^0 & + a_{10,10} M^0 + a_{10,11} H^0 - a_{10,12} Q_6^0 \\
 a_{11}, Q_k^0 & + a_{11,5} H_4^0 & + a_{11,10} M^0 + a_{11,11} H^0 = 0
 \end{aligned}$$

Приращения нагрузок  $Q_R^0, M_K^0, H_K^0, M_I^0, H_I^0, M_2^0, H_2^0, M_0^0, H_0^0, M^0, H^0, Q_6^0$ , возникающие под действием давления и разогрева, определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned}
 a_{1,1} Q_k^0 & + a_{1,10} M^0 = P_1, \\
 a_{2,2} M_K^0 + a_{2,3} H_K^0 + a_{2,4} M_I^0 + a_{2,5} H_I^0 & = 0, \\
 a_{3,1} Q_k^0 + a_{3,2} M_K^0 + a_{3,3} H_K^0 + a_{3,4} M_I^0 + a_{3,5} H_I^0 & = P_3, \\
 a_{4,2} M_K^0 + a_{4,3} H_K^0 + a_{4,4} M_I^0 + a_{4,5} H_I^0 & + a_{4,10} M^0 + a_{4,11} H^0 + a_{4,12} Q_6^0 = P_4, \\
 a_{5,1} Q_k^0 + a_{5,2} M_K^0 + a_{5,3} H_K^0 + a_{5,4} M_I^0 + a_{5,5} H_I^0 & + a_{5,11} H^0 = P_5, \\
 a_{6,6} M_2^0 + a_{6,7} H_2^0 + a_{6,8} M_0^0 + a_{6,9} H_0^0 & + a_{6,12} Q_6^0 = P_6, \\
 a_{7,6} M_2^0 + a_{7,7} H_2^0 + a_{7,8} M_0^0 + a_{7,9} H_0^0 & = P_7, \\
 a_{8,6} M_2^0 + a_{8,7} H_2^0 + a_{8,8} M_0^0 + a_{8,9} H_0^0 & = 0, \\
 a_{9,6} M_2^0 + a_{9,7} H_2^0 + a_{9,8} M_0^0 + a_{9,9} H_0^0 & = P_9, \\
 a_{10,1} Q_k^0 + a_{10,4} M_4^0 + a_{10,5} H_4^0 & + a_{10,10} M^0 + a_{10,11} H^0 + a_{10,12} Q_6^0 = P_{10}, \\
 a_{11,1} Q_k^0 & + a_{11,5} H_4^0 + a_{11,10} M^0 + a_{11,11} H^0 = P_{11}, \\
 a_{12,4} M_4^0 + a_{12,5} H_4^0 + a_{12,10} M^0 + a_{12,11} H^0 + a_{12,12} Q_6^0 & = P_{12}.
 \end{aligned} \right\}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 a_{1,1} &= (T_{11} + Q_1 K_0) a; & a_{1,10} &= -T_{12} & P_1 &= [0,3 Q_1 K_0 - T_{13} + Q_2 \frac{d_1}{S_T} + Q_3 \alpha_1] P_M \sigma^2 \\
 & + \left( \frac{T_{12}}{2} + T_{13} - Q_2 \frac{d_2}{S_T} - Q_3 \alpha \right) P_T \sigma^2 + [a_r (t_r - t_0) - a_k (t_k - t_0)] \frac{D_0 L}{2 \sigma^2}; \\
 a_{2,2} &= B_{11} + Q_4 B_{11}^k \frac{S_2}{S_1}; & a_{2,3} &= (B_{12} - Q_4 B_{12}^k) S_2; & a_{2,4} &= B_{13}; & a_{2,5} &= B_{14} S_2; \\
 a_{3,1} &= 0,3(t - Q_4) a; & a_{3,2} &= B_{12} - Q_4 B_{12}^k; & a_{3,3} &= B_{22} S_2 + Q_4 B_{22}^k S_k; & a_{3,4} &= B_{14}; \\
 a_{3,5} &= B_{24} S_2; & P_3 &= (t - Q_4) P_M \sigma^2 + (a_{\varphi 1} - a_k) (t_k - t_0) E_{\varphi 1} a S_2;
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 a_{4,2} &= \beta_{13}, & a_{4,3} &= \beta_{14} S_3; & a_{4,4} &= \beta_{11} + \varphi_3; & a_{4,5} &= \beta_{12} S_3 - \varphi_3 \frac{h_1}{2}; & a_{4,6} &= -\varphi_3; \\
 a_{4,11} &= \varphi_3 \frac{h_1 S_3}{2}; & a_{4,12} &= \varphi_3 \frac{R_5 - R_n}{\sigma} R_5; & P_4 &= \varphi_3 (R_1 - R_n - \frac{b_1}{2}) \frac{\sigma}{2} P_T; \\
 a_{5,1} &= 0,5 \alpha; & a_{5,2} &= \beta_{14} + \beta_{13} \frac{h_1}{2 S_3}; & a_{5,3} &= \beta_{24} S_3 + \beta_{14} \frac{h_1}{2}; & a_{5,4} &= \beta_{12} + \beta_{11} \frac{h_1}{2 S_3}; \\
 a_{5,5} &= \beta_{22} S_3 + \beta_{12} \frac{h_1}{2} + \frac{\sigma R_1 S_3}{b_1 h_1}; & a_{5,11} &= \frac{\sigma R_1 S_3}{b_1 h_1}; & P_5 &= -\rho_n \alpha^2 \rho_n \frac{R_1 \alpha S_3 (h_1 - S_3)}{b_1 h_1}; \\
 a_{6,5} &= \beta_{11} + \varphi_6; & a_{6,7} &= \beta_{12} S_3 - \varphi_6 \frac{h_2}{2}; & a_{6,8} &= \beta_{13}; & a_{6,9} &= \beta_{14} S_3; \\
 a_{6,12} &= \varphi_6 R_5 \frac{R_5 - R_n}{\sigma}; & P_6 &= \varphi_6 (R_2 - R_n - \frac{b_2}{2}) \frac{\sigma}{2} P_T; \\
 a_{7,6} &= \beta_{12} + \beta_{11} \frac{h_2}{2 S_3}; & a_{7,7} &= \beta_{22} S_3 + \beta_{12} \frac{h_2}{2} + \frac{\sigma R_2 S_3}{b_2 h_2}; & a_{7,8} &= \beta_{14} + \beta_{13} \frac{h_2}{2 S_3}; \\
 a_{7,9} &= \beta_{24} S_3 + \beta_{14} \frac{h_2}{2}; & P_7 &= -0,85 \rho_T \alpha^2 + \frac{R_2 \alpha S_3}{b_2} \rho_T; \\
 a_{8,5} &= \beta_{13}; & a_{8,7} &= \beta_{14} S_3; & a_{8,8} &= \beta_{11} + \varphi_7 \beta_{11}^2 \frac{S_3}{S_3}; & a_{8,9} &= (\beta_{12} - \varphi_7 \beta_{12}^2) S_3; \\
 a_{9,5} &= \beta_{14}; & a_{9,7} &= \beta_{24} S_3; & a_{9,8} &= \beta_{12} - \varphi_7 \beta_{12}^2; & a_{9,9} &= \beta_{22} S_3 + \varphi_7 \beta_{22}^2 S_3; \\
 P_9 &= 0,85 (1 - \varphi_7) P_T \alpha^2 + (\alpha \varphi_7 - \alpha_2) (t_2 - t_0) E \varphi_n \sigma S_3; \\
 a_{10,1} &= -T_{12} \alpha; & a_{10,4} &= -\varphi_8; & a_{10,5} &= \varphi_8 \frac{h_1}{2}; & a_{10,6} &= T_{22} + \varphi_8; & a_{10,11} &= -\varphi_8 \frac{h_1 - S_3}{2}; \\
 a_{10,12} &= -\varphi_8 R_5 \frac{R_5 - R_n}{\sigma}; & P_{10} &= \varphi_8 (\frac{b_1}{2} + R_n - R_4) \frac{\sigma}{2} P_T - \frac{T_{12}}{2} \rho_T \alpha^2 - T_{23} (P_T - P_n) \alpha^2; \\
 a_{11,1} &= -\varphi_9 T_{12} \alpha; & a_{11,5} &= \varphi_{10} \alpha; & a_{11,6} &= \varphi_9 T_{22}; & a_{11,11} &= (T_{33} + \varphi_{10}) \alpha; \\
 P_{11} &= (\alpha \varphi_{11} - \alpha_p) (t_{\varphi 1} - t_0) E_p \alpha S_p - \frac{\varphi_9 T_{12}}{2} \rho_T \alpha^2 - \varphi_9 T_{23} (P_T - P_n) \alpha^2 + \varphi_{10} (h_1 - S_3) P_n \alpha; \\
 a_{12,4} &= \lambda \varphi_1; & a_{12,5} &= -\frac{\lambda \varphi_1 h_1}{2}; & a_{12,6} &= \lambda \varphi_2; & a_{12,7} &= -\frac{\lambda \varphi_2 h_2}{2}; & a_{12,10} &= -\lambda \varphi_1; \\
 a_{12,11} &= \lambda \varphi_1 \frac{h_1 - S_p}{2}; & a_{12,12} &= [2 \pi (y_6 + y_n) \frac{R_5 - R_n}{\sigma} (\lambda \varphi_1 + \lambda \varphi_2)] R_5; \\
 P_{12} &= [2 \pi \alpha y_n - \lambda \varphi_1 (\frac{b_1}{2} + R_n - R_1) - \lambda \varphi_2 (\frac{b_2}{2} + R_n - R_2)] \frac{\sigma}{2} P_T + \alpha \varphi_1 h_1 (t_{\varphi 1} - t_0) + \\
 &+ \alpha \varphi_2 h_2 (t_{\varphi 2} - t_0) - \alpha_s (h_1 + h_2) (t_2 - t_0); \\
 Q_1 &= \frac{D_p L}{2 E_x S_x \sigma}; & Q_2 &= \frac{0,3 D_p L}{4 E_T \sigma^2}; & Q_3 &= \frac{D_p}{K \alpha^4}; \\
 Q_4 &= \frac{E_{\varphi 1} S_3}{E_x S_x}; & Q_5 &= \frac{12 R_1 \sigma S_3^2}{b_1 h_1^3}; & Q_6 &= \frac{12 R_2 \sigma S_3^2}{b_2 h_2^3}; \\
 Q_7 &= \frac{E_{\varphi 2} S_3}{E_2 S_2}; & Q_8 &= \frac{12 R_1 D_p}{E_{\varphi 1} b_1 h_1^3}; & Q_9 &= \frac{E_p S_p \alpha (h_1 - S_p)}{2 D_p}; \\
 Q_{10} &= \frac{E_p S_p R_1}{E_{\varphi 1} b_1 h_1}.
 \end{aligned}$$

Нагрузки остальных частей в расчетном состоянии, их начальные значения или приращения определяются по формулам:

$$Q = \frac{P_T a}{2} - Q_K, \quad Q_D = \frac{P_T a}{2}, \quad Q_n = \frac{Q_D R_D}{R_n} - \frac{P_T a^2}{2 R_n}.$$

Углы поворота фланцев кожуха и днища определяются по формулам

$$\varphi_1 = \frac{12 R_1 a}{E \varphi_1 b_1 h_1^3} \left[ M_1 - M + \frac{b_1}{2} (Q_K + Q) - \frac{h_1}{2} H_1 + \frac{h_1 - S}{2} H + \frac{R_1 - R_n}{a} Q_n R_n + \frac{R_D - R_1}{a} Q_D R_D \right],$$

$$\varphi_2 = \frac{12 R_2 a}{E \varphi_2 b_2 h_2^3} \left( M_2 + \frac{b_2}{2} Q_D - \frac{h_2}{2} H_2 + \frac{R_2 - R_n}{a} Q_n R_n + \frac{R_D - R_2}{a} Q_D R_D \right).$$

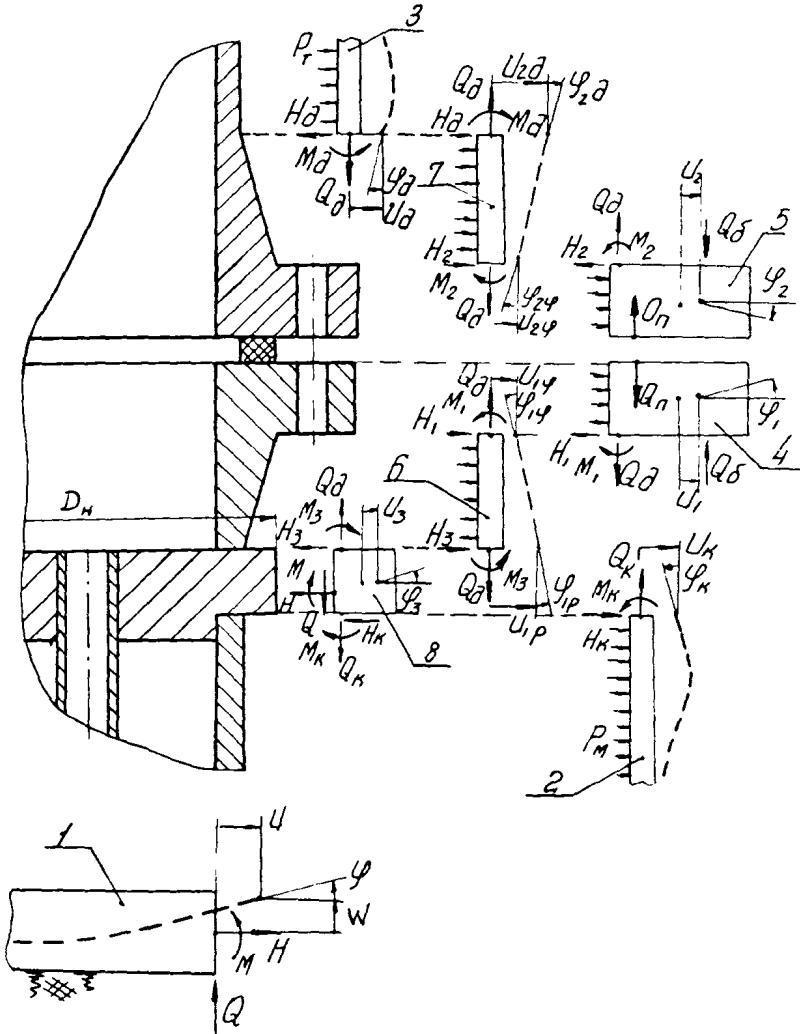
1.4.5. Греющая камера с фланцами с конической втулкой, приваренными втавр к решетке ( черт. II )

Такая камера состоит из решеток (1), кожуха (2), днища (3), фланцев (4, 5) со втулками (6, 7). В месте соединения решетки, кожуха и фланца выделяется тонкое кольцо (8). Помимо расчета вспомогательных величин по п.2 приложения I, производится расчет коэффициентов  $B_{II}^K, B_{I2}^K, B_{22}^K, K_1, K_2$ . по п.3 приложения I при  $S = S_K, R = a$ . Значения коэффициентов  $B_{II}^D, B_{I2}^D, B_{22}^D$  принимаются по п.3 приложения I при  $S = S_D, R = a$ , а значения коэффициентов  $B_{II}, B_{I2}, B_{I3}, B_{I4}, B_{22}, B_{24}$  принимаются при  $S = S_3, L = L_{37}, R = a$

Начальные значения  $Q_K, M_K, H_K, M^0, H^0, M_3^0, H_3^0, M_1^0, H_1^0, M_2^0, H_2^0, M_6^0, H_6^0$  возникающие при затяжке болтов фланцевого разъема, определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений;

$$\begin{aligned} a_{1,1} Q_K + a_{1,4} M^0 &= 0, \\ a_{2,1} Q_K + a_{2,2} M_K + a_{2,3} H_K &= 0, \\ a_{3,1} Q_K + a_{3,2} M_K + a_{3,3} H_K + a_{3,5} H^0 + a_{3,7} H_3^0 &= 0, \\ a_{4,1} Q_K + a_{4,2} M_K + a_{4,3} H_K + a_{4,4} M^0 + a_{4,5} H^0 + a_{4,6} M_3^0 + a_{4,7} H_3^0 &= 0, \\ a_{5,1} Q_K + a_{5,3} H_K + a_{5,4} M^0 + a_{5,5} H^0 + a_{5,7} H_3^0 &= 0, \\ a_{6,2} M_K + a_{6,3} H_K + a_{6,4} M^0 + a_{6,5} H^0 + a_{6,6} M_3^0 + a_{6,7} H_3^0 + a_{6,8} M_1^0 + a_{6,9} H_1^0 &= 0, \\ a_{7,3} H_K + a_{7,5} H^0 + a_{7,6} M_3^0 + a_{7,7} H_3^0 + a_{7,8} M_1^0 + a_{7,9} H_1^0 &= 0, \\ a_{8,6} M_3^0 + a_{8,7} H_3^0 + a_{8,8} M_1^0 + a_{8,9} H_1^0 &= -a_{8,1} Q_K^0 \end{aligned}$$

Элементы грейдной камеры, имеющей фланцы с конической втулкой, приваренные втавр к решетке



Черт. II

$$\begin{aligned}
 a_{96}M'_3 + a_{27}H'_3 + a_{98}M'_1 + a_{99}H'_1 &= 0, \\
 a_{200}M'_2 + a_{201}H'_2 + a_{202}M'_3 + a_{203}H'_3 + a_{204}Q'_6 &= P_6, \\
 a_{205}M'_2 + a_{206}H'_2 + a_{207}M'_3 + a_{208}H'_3 &= 0, \\
 a_{209}M'_2 + a_{210}H'_2 + a_{211}M'_3 + a_{212}H'_3 &= 0, \\
 a_{213}M'_2 + a_{214}H'_2 + a_{215}M'_3 + a_{216}H'_3 &= 0.
 \end{aligned}$$

Приращения нагрузок  $Q'_K$ ,  $M'_K$ ,  $H'_K$ ,  $M'_3$ ,  $H'_3$ ,  $M'_1$ ,  $H'_1$ ,  $M'_2$ ,  $H'_2$ ,  $Q'_6$ ,  $H'_6$ , возникающие под действием давлений и разогрева, определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 a_{11}Q'_K + a_{12}M'_K &= P_1, \\
 a_{21}Q'_K + a_{22}M'_K + a_{23}H'_K + a_{24}M'_3 &= P_2, \\
 a_{31}Q'_K + a_{32}M'_K + a_{33}H'_K + a_{34}H'_3 + a_{35}M'_1 + a_{36}H'_1 &= P_3, \\
 a_{41}Q'_K + a_{42}M'_K + a_{43}H'_K + a_{44}M'_3 + a_{45}H'_3 + a_{46}M'_1 + a_{47}H'_1 &= P_4, \\
 a_{51}Q'_K + a_{52}M'_K + a_{53}H'_K + a_{54}M'_3 + a_{55}H'_3 + a_{56}H'_1 &= P_5, \\
 a_{61}M'_K + a_{62}H'_K + a_{63}M'_3 + a_{64}H'_3 + a_{65}M'_1 + a_{66}H'_1 + a_{67}M'_2 + a_{68}H'_2 &= 0, \\
 a_{71}H'_K + a_{72}H'_3 + a_{73}M'_3 + a_{74}H'_3 + a_{75}M'_1 + a_{76}H'_1 &= P_7, \\
 a_{81}M'_3 + a_{82}H'_3 + a_{83}M'_1 + a_{84}H'_1 + a_{85}Q'_6 &= P_8, \\
 a_{91}M'_3 + a_{92}H'_3 + a_{93}M'_1 + a_{94}H'_1 &= P_9, \\
 a_{100}M'_2 + a_{101}H'_2 + a_{102}M'_3 + a_{103}H'_3 + a_{104}Q'_6 &= P_{10}, \\
 a_{105}M'_2 + a_{106}H'_2 + a_{107}M'_3 + a_{108}H'_3 &= P_{11}, \\
 a_{109}M'_2 + a_{110}H'_2 + a_{111}M'_3 + a_{112}H'_3 &= 0, \\
 a_{113}M'_2 + a_{114}H'_2 + a_{115}M'_3 + a_{116}H'_3 &= P_{13}, \\
 a_{117}M'_2 + a_{118}H'_2 + a_{119}M'_3 + a_{120}H'_3 + a_{121}Q'_6 &= P_{14}.
 \end{aligned}$$

УСЛОВ:

$$\begin{aligned}
 a_{1,1} &= (T_{11} + Q_1 K_0) a; \quad a_{1,4} = -T_{11}; \quad P_1 = (Q_3 Q_4 K_0 - T_{13} + Q_2 \frac{dr}{dr} + Q_3 a_1) P_M a^2 + \\
 &\quad + (\frac{T_{11}}{2} + T_{13} - Q_2 \frac{da}{dr} - Q_3 a) P_M a^2 + [a_1(t_r - t_0) - a_n(t_r - t_0)] \frac{D_0 h_0}{2 \sigma^2}; \\
 a_{2,1} &= T_{12} a; \quad a_{2,2} = Q_4 B_n^*, \quad a_{2,5} = -Q_4 B_n^* S_n; \quad a_{2,4} = -T_{12}; \\
 P_2 &= \frac{T_{12}}{2} P_r a^2 + T_{23} (P_r - P_M) a^2; \\
 a_{3,1} &= -Q_3 a; \quad a_{3,2} = -B_{12}^* - B_{11}^* \frac{S_{P1}}{2 S_n}; \quad a_{3,3} = (B_{22}^* + Q_5) S_n + B_{12}^* \frac{S_{P1}}{2}; \\
 a_{3,5} &= Q_5 S_n; \quad a_{3,7} = Q_5 S_n; \quad P_3 = (a_p - a_n)(t_r - t_0) E_n S_n a - P_M a^2; \\
 a_{4,1} &= T_{12} a; \quad a_{4,2} = -Q_6; \quad a_{4,3} = -Q_6 \frac{S_{P1}}{2}; \quad a_{4,4} = -Q_6 - T_{12}; \quad a_{4,5} = -Q_6 \frac{S_0 - S_{P1}}{2}; \\
 a_{4,6} &= -Q_6; \quad a_{4,7} = Q_6 \frac{S_{P1}}{2}; \quad P_4 = \frac{T_{12}}{2} P_r a^2 + T_{23} (P_r - P_M) a^2; \\
 a_{5,1} &= Q_7 T_{12} a; \quad a_{5,3} = Q_8 a; \quad a_{5,4} = -Q_7 T_{12}; \quad a_{5,5} = (Q_8 + T_{13}) a; \\
 a_{5,7} &= Q_8 a; \quad P_5 = Q_7 [\frac{T_{12}}{2} P_r a^2 + T_{23} (P_r - P_M) a^2]; \\
 a_{6,2} &= 1; \quad a_{6,3} = \frac{S_{P1}}{2}; \quad a_{6,4} = 1; \quad a_{6,5} = \frac{2c - S_{P1}}{2}; \quad a_{6,6} = 1 + Q_9 B_{11}; \quad a_{6,7} = Q_9 B_{11} S_0 - \frac{S_{P1}}{2}; \\
 a_{6,8} &= Q_9 B_{11}; \quad a_{6,9} = -Q_9 B_{11} S_0; \\
 a_{7,3} &= Q_{10} S_0; \quad a_{7,5} = Q_{10} S_0; \quad a_{7,6} = B_{11} \frac{S_{P1}}{2 S_n} + B_{12}; \quad a_{7,7} = (B_{22} + Q_{10}) S_0 + B_{12} \frac{S_{P1}}{2}; \\
 a_{7,8} &= B_{11} \frac{S_{P1}}{2 S_n} + B_{11}; \quad a_{7,9} = B_{24} S_0 - B_{11} \frac{S_{P1}}{2}; \quad P_7 = (a_p - a_n)(t_0 - t_r) [c_{\varphi} S_0 a - Q_{85} P_r a^2]; \\
 a_{8,5} &= B_{11}; \quad a_{8,7} = B_{11} S_0; \quad a_{8,8} = Q_{11} + B_{11}; \quad a_{8,9} = Q_{11} \frac{h_{\varphi}}{2} - B_{12} S_0; \\
 a_{9,4} &= -Q_{11} R_8 \frac{R_0 - R_n}{a}; \quad P_8 = (\frac{b_{\varphi}}{2} + R_n - R_{\varphi}) \frac{a}{2} P_r P_{11}; \\
 a_{9,6} &= B_{11} + B_{13} \frac{h_{\varphi}}{2 S_n}; \quad a_{9,7} = B_{24} S_0 + B_{11} \frac{h_{\varphi}}{2}; \quad a_{9,8} = B_{12} + B_{11} \frac{h_{\varphi}}{2 S_n}; \\
 a_{9,9} &= -(B_{22} + Q_{12}) S_0 - B_{12} \frac{h_{\varphi}}{2}; \quad P_9 = (0,85 a^2 - Q_{12} h_{\varphi} S_0) P_r; \\
 a_{10,10} &= Q_{11} + B_{11}; \quad a_{10,11} = Q_{11} \frac{h_{\varphi}}{2} - B_{12} S_0; \quad a_{10,12} = B_{13}; \quad a_{10,13} = B_{14} S_0; \\
 a_{11,4} &= -Q_{11} R_8 \frac{R_0 - R_n}{a}; \quad P_{10} = (\frac{b_{\varphi}}{2} + R_n - R_{\varphi}) \frac{a}{2} P_r P_{11}; \\
 a_{11,10} &= B_{12} + B_{11} \frac{h_{\varphi}}{2 S_n}; \quad a_{11,11} = -(Q_{12} + B_{22}) S_0 - B_{12} \frac{h_{\varphi}}{2}; \quad a_{11,12} = B_{14} + B_{13} \frac{h_{\varphi}}{2 S_n};
 \end{aligned}$$

$$a_{11,13} = b_{24} S_3 + b_{11} \frac{h_{\varphi}}{2}; \quad P_{11} = (0,85 a^2 - Q_{12} h_{\varphi} S_3) P_T;$$

$$a_{12,10} = b_{13}; \quad a_{12,11} = -b_{11} S_3; \quad a_{12,12} = b_{11} + Q_{13} b_{11}^2 \frac{S_3}{S_2^2}; \quad a_{12,13} = (b_{12} - Q_{13} b_{12}^2) S_3;$$

$$a_{13,10} = -b_{11}; \quad a_{13,11} = b_{24} S_3; \quad a_{13,12} = Q_{13} b_{12}^2 - b_{12}; \quad a_{13,13} = -Q_{13} b_{22}^2 S_3 - b_{22} S_3;$$

$$P_{13} = 0,85(1 - Q_{13}) P_T a^2 + (a_{\varphi} - a_0)(t_0 - t_0) E_{\varphi} S_3 a;$$

$$a_{14,8} = -\lambda_{\varphi}; \quad a_{14,9} = -\lambda_{\varphi} \frac{h_{\varphi}}{2}; \quad a_{14,10} = -\lambda_{\varphi}; \quad a_{14,11} = -\lambda_{\varphi} \frac{h_{\varphi}}{2};$$

$$a_{14,12} = 2[\pi(y_8 + y_n) + \lambda_{\varphi} \frac{R_0 - R_n}{a}] R_0; \quad P_{14} = [a_{\varphi}(t_{\varphi} - t_0) - \alpha_0(t_0 - t_0)](h_1 + h_2) + [\lambda_{\varphi} a (R_{\varphi} - R_n - \frac{b_{\varphi}}{2}) + \pi y_n a^2] P_T;$$

$$Q_1 = \frac{D_p L}{2 E_{\kappa} S_{\kappa} a^3}, \quad Q_2 = \frac{Q_3 D_p L}{4 L_T a^3}, \quad Q_3 = \frac{D_p}{\kappa a^3};$$

$$Q_4 = \frac{D_p}{E_{\kappa} S_{\kappa} a}, \quad Q_5 = \frac{E_{\kappa} R_3 a}{L_p b_3 S_{p1}}, \quad Q_6 = \frac{12 R_0 D_p}{L_p b_3 S_{p1}^2};$$

$$Q_7 = \frac{E_{\varphi} S_{\varphi} (S_{\varphi} - S_{p1}) a}{2 D_p}, \quad Q_8 = \frac{S_{\varphi} R_3}{S_{p1} b_3}, \quad Q_9 = \frac{E_{\varphi} b_3 S_{\varphi}^2}{12 E_{\varphi} R_3 S_3^2 a};$$

$$Q_{10} = \frac{E_{\varphi} R_3 a}{E_{\varphi} b_3 S_{p1}}; \quad Q_{11} = \frac{12 R_{\varphi} S_3^2 a}{b_{\varphi} h_{\varphi}^3}, \quad Q_{12} = \frac{R_{\varphi} a}{b_{\varphi} h_{\varphi}};$$

$$Q_{13} = \frac{E_{\varphi} S_3}{E_{\varphi} S_2}; \quad R_3 = \frac{D_n + D}{4}; \quad b_3 = \frac{D_n - D}{2}.$$

Нагрузки остальных деталей в расчетном состоянии, их начальные значения или приращения определяются по формулам:

$$Q = \frac{P_T a}{2} - Q_{\kappa}, \quad Q_0 = \frac{P_T a}{2}, \quad Q_n = \frac{Q_0 R_0}{R_n} - \frac{P_T a^2}{2 R_n}.$$

Углы поворота фланцев определяются по формулам:

$$\varphi_1 = \frac{12 R_{\varphi} a}{F_{\varphi} b_{\varphi} h_{\varphi}^3} (R_0 - R_{\varphi}) Q_6 R_0 + \frac{R_{\varphi} - R_n}{a} Q_n R_n + \frac{b_{\varphi}}{2} Q_0 - \frac{h_{\varphi}}{2} H_1 - M_1,$$

$$\varphi_2 = \frac{12R\varphi\alpha}{E\varphi b\varphi h\varphi^3} \left( \frac{R_0 - R_0}{\sigma} Q_0 R_0 + \frac{R_0 - R_0}{\sigma} Q_n R_n + \frac{b\varphi}{2} Q_0 - \frac{h\varphi}{2} H_2 - M_2 \right).$$

1.4.6. Грехная камера с кольцевой полостью для отвода конденсата ( черт.12 )

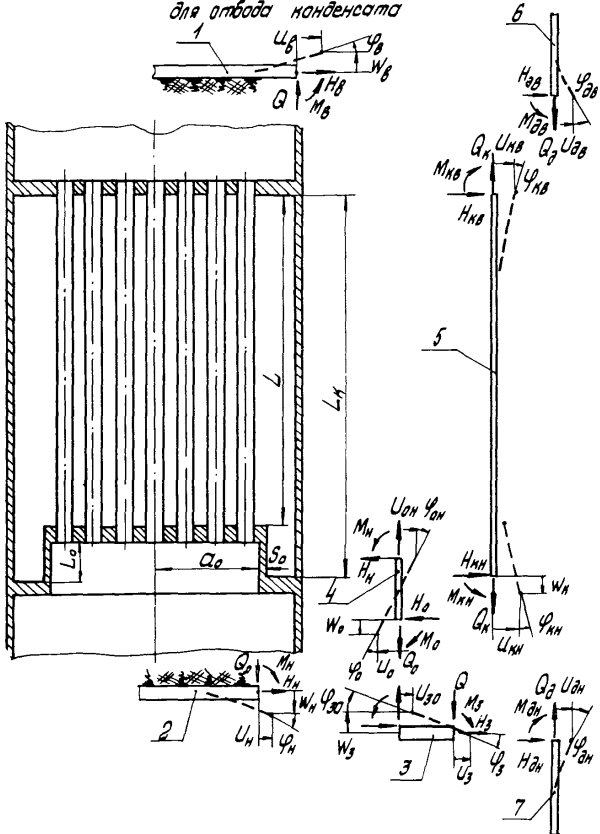
Камера состоит из трубных решеток (1,2) кольцевой пластины (3) и цилиндрических оболочек (4...7). Для такой камеры необходимо определить характеристики трубной решетки по п.2 приложения I для верхней решетки ( при  $\beta_n^B = \frac{a}{a}$  ) и нижней решетки ( при  $\beta_n^K = \frac{a}{a}$  ) раздельно . Кроме того, по п.1 приложения I определяются характеристики кольцевой пластины  $A_{II}, A_{I2}, A_{I3}, A_{I4}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{33}, A_{34}$  при  $\beta_n = a_0/a$  .

По формулам п.3 приложения I вычисляются  $V_{II}, V_{I2}, V_{I3}, V_{I4}, V_{22}, V_{24}$  при  $L = L_0, R = a_0, S = S_0$  ;  $V_{II}^K, V_{I2}^K, V_{22}^K$  при  $S = S_1, R = a$  и  $V_{II}^B, V_{I2}^B, V_{22}^B$  при  $S = S_2, R = a$  .

Нагрузки  $Q_K, M_{KB}, H_{KB}, M_{0B}, H_{0B}, M_{0H}, H_{0H}, M_{KH}, H_{KH}, M_0, H_0, M_H, H_H$  определяются при решении системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} a_{1,1} Q_K + a_{1,2} M_{KB} + a_{1,3} H_{KB} + a_{1,4} M_{0B} + a_{1,5} H_{0B} + a_{1,6} M_{0H} + a_{1,7} H_{0H} + a_{1,8} M_{KH} + a_{1,9} H_{KH} + a_{1,10} M_0 + a_{1,11} H_0 + a_{1,12} M_H + a_{1,13} H_H &= P_1, \\ a_{2,1} Q_K + a_{2,2} M_{KB} + a_{2,3} H_{KB} + a_{2,4} M_{0B} + a_{2,5} H_{0B} &= P_2, \\ a_{3,1} Q_K + a_{3,2} M_{KB} + a_{3,3} H_{KB} + a_{3,5} H_{0B} &= P_3, \\ a_{4,2} M_{KB} + a_{4,3} H_{KB} + a_{4,4} M_{0B} + a_{4,5} H_{0B} &= 0, \\ a_{5,3} H_{KB} + a_{5,4} H_{0B} + a_{5,5} H_{0H} &= P_5, \\ a_{6,5} M_{0H} + a_{6,7} H_{0H} + a_{6,8} M_{KH} + a_{6,9} H_{KH} &= 0, \\ a_{7,5} M_{0H} + a_{7,7} H_{0H} + a_{7,9} H_{KH} + a_{7,11} H_0 &= P_7, \\ + a_{8,6} M_{0H} + a_{8,7} H_{0H} + a_{8,8} M_{KH} + a_{8,9} H_{KH} + a_{8,10} M_0 + a_{8,11} H_0 &= P_8, \\ + a_{9,7} H_{0H} + a_{9,8} M_{KH} + a_{9,9} H_{KH} + a_{9,11} H_0 &= P_9, \\ + a_{10,5} M_{0H} + a_{10,7} H_{0H} + a_{10,8} M_{KH} + a_{10,9} H_{KH} + a_{10,10} M_0 + a_{10,11} H_0 + a_{10,12} M_H + a_{10,13} H_H &= P_{10}, \\ + a_{11,7} H_{0H} + a_{11,9} H_{KH} + a_{11,10} M_0 + a_{11,11} H_0 + a_{11,12} M_H + a_{11,13} H_H &= P_{11}, \\ + a_{12,10} M_0 + a_{12,11} H_0 + a_{12,12} M_H + a_{12,13} H_H &= P_{12}, \\ + a_{13,10} M_0 + a_{13,11} H_0 + a_{13,12} M_H + a_{13,13} H_H &= P_{13}, \end{aligned} \right\}$$

Греющая камера с кольцевой полостью для отвода конденсата





Здесь

$$\begin{aligned}
 a_{00} &= (T_n^0 + \beta_n^0 T_n^* + 2Q_1 K_0 + Q_4 + Q_5 A_n) a; & a_{12} &= -T_n^0; & a_{13} &= T_n^0 \frac{S_p}{2}; \\
 a_{14} &= T_{12}^0; & a_{15} &= -T_{12}^0 \frac{S_p}{2}; & a_{16} &= Q_5 A_0; & a_{17} &= -Q_5 A_0 \frac{S_m}{2}; & a_{18} &= -Q_5 A_{10}; \\
 a_{19} &= Q_5 A_{10} \frac{S_m}{2}; & a_{1,10} &= Q_5 A_{12}; & a_{1,11} &= -Q_5 A_{12} \frac{S_m}{2}; & a_{1,12} &= \beta_n^0 T_n^0; & a_{1,13} &= \beta_n^0 T_n^* \frac{S_p}{2}; \\
 P_1 &= T_n^0 \frac{a^2}{2} P_1^* + 0,6 Q_1 K_0 P_n \sigma^2 + (\beta_n^0 T_n^* + Q_4 + Q_5 A_n) \left( \frac{\sigma^2 - a^2}{2} P_n + \frac{a^2}{2} P_1^* \right) + \\
 &+ (T_{10}^0 + \beta_n^0 T_{10}^* - 0,3 \beta_n^0 Q_4 + A_n Q_5) (P_1 - P_n) \sigma^2 + 2 Q_2 \sigma^2 \left( \frac{d}{S_r} P_n - \frac{d_0}{S_r} P_1^* \right) + \\
 &+ 2 Q_3 \sigma^2 (a_1 P_n - a P_1) - [a_k (t_k - t_0) L_k - (a_1 L + a_0 L_0) (t_r - t_0)] \frac{D_0}{a^2}; \\
 a_{21} &= -T_{12}^0 a; & a_{22} &= T_{12}^0 + Q_6 B_n^k; & a_{23} &= Q_6 B_n^k S_1 - T_{12}^0 \frac{S_p}{2}; & a_{24} &= -T_{12}^0; \\
 a_{25} &= T_{12}^0 \frac{S_p}{2}; & P_2 &= T_{13}^0 (P_n - P_1) \sigma^2 - T_{12}^0 \frac{a^2}{2} P_1^*; \\
 a_{31} &= -0,3 a; & a_{32} &= B_{12}^k + B_n^k \frac{S_p}{2 S_1}; & a_{33} &= (B_{12}^k + Q_7 T_{13}^0) S_1 + B_{12}^k \frac{S_p}{2}; \\
 a_{34} &= Q_7 T_{13}^0 S_1; & P_3 &= (a_p - a_0) (t_k - t_0) E_n S_1 \sigma - P_n \sigma^2; \\
 a_{41} &= B_n^k; & a_{43} &= B_{12}^k S_1; & a_{44} &= Q_8 B_n^0; & a_{45} &= Q_8 B_{12}^0 S_2; \\
 a_{53} &= Q_9 T_{13}^0 S_2; & a_{54} &= B_{12}^0 + B_n^0 \frac{S_p}{2 S_2}; & a_{55} &= (B_{12}^0 + Q_9 T_{13}^0) S_2 + B_{12}^0 \frac{S_p}{2}; \\
 P_4 &= (a_p - a_0) (t_0 - t_0) E_0 S_2 \sigma - 0,85 P_4 \sigma^2; \\
 a_{66} &= Q_9 B_n^0; & a_{67} &= Q_9 B_{12}^0 S_2; & a_{68} &= B_{11}^k; & a_{69} &= B_{12}^k S_1; \\
 a_{76} &= B_{12}^0 + B_n^0 \frac{S_{m0}}{2 S_2}; & a_{77} &= (B_{12}^0 + Q_{10} A_{33}) S_2 + B_{12}^0 \frac{S_m}{2}; & a_{79} &= Q_{10} A_{33} S_2; \\
 a_{81} &= -Q_{10} A_{23} S_2; & P_7 &= (a_{10} - a_0) (t_0 - t_0) E_0 S_2 \sigma + Q_{10} A_{23} S_1 S_m P_7 - 0,85 P_7 \sigma^2; \\
 a_{81} &= A_{13} a; & a_{86} &= A_{33}; & a_{87} &= -A_{33} \frac{S_{m0}}{2}; & a_{88} &= -(A_{33} + Q_{11} B_n^k); \\
 a_{89} &= A_{33} \frac{S_{m0}}{2} - Q_{11} B_{12}^k S_1; & a_{910} &= A_{23}; & a_{911} &= -A_{23} \frac{S_{m0}}{2}; & P_8 &= A_{11} \left( \frac{\sigma^2 - a^2}{2} P_n + \frac{a^2}{2} P_1^* \right) - A_{11} (P_n - P_1) \sigma^2; \\
 a_{91} &= -0,3 a; & a_{97} &= Q_{12} A_{33} S_1; & a_{98} &= B_{12}^k + B_n^k \frac{S_{m0}}{2 S_1}; & a_{99} &= (B_{12}^k + Q_{12} A_{33}) S_1 + B_{12}^k \frac{S_m}{2}; \\
 a_{911} &= -Q_{12} A_{23} S_1; & P_9 &= (a_{10} - a_0) (t_k - t_0) E_n S_1 \sigma + Q_{12} A_{23} S_1 S_m P_9 - P_n \sigma^2;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{101} &= A_{22} \alpha; & a_{102} &= A_{23}; & a_{107} &= -A_{23} \frac{S_{21}}{2}; & a_{108} &= -A_{23}; & a_{109} &= A_{23} \frac{S_{21}}{2}; \\
 a_{1210} &= A_{22} + \rho_{13} \beta_{11}; & a_{1211} &= \rho_{13} \beta_{22} S_0 - A_{22} \frac{S_{21}}{2}; & a_{1212} &= -\rho_{13} \beta_{13}; & a_{1215} &= -\rho_{13} \beta_{11} S_0; \\
 P_{10} &= A_{22} \left( \frac{U^2 - U_0^2}{2} P_{11} + \frac{U_0^2}{2} P_1 \right) - A_{24} (P_{11} - P_1) \alpha^2; \\
 a_{111} &= Q_3 \alpha; & a_{117} &= \rho_{14} A_{23} S_0; & a_{119} &= \rho_{14} A_{23} S_0; & a_{1110} &= -\beta_{12} - \beta_{11} \frac{S_{21}}{2 S_0}; \\
 a_{1111} &= -(\beta_{22} + \rho_{14} A_{22}) S_0 - \beta_{12} \frac{S_{21}}{2}; & a_{1112} &= \beta_{11} + \beta_{13} \frac{S_{21}}{2 S_0}; & a_{1115} &= -\beta_{24} S_0 + \beta_{11} \frac{S_{21}}{2}; \\
 P_{11} &= (\alpha_{11} - \alpha_0) (I_1 - I_0) E_0 S_0 \alpha_0 + (P_{11} - P_1) \alpha_0^2 + Q_3 \left( \frac{U^2 - U_0^2}{2} P_{11} + \frac{U_0^2}{2} P_1 \right) + \rho_{14} A_{22} S_0 S_{21} \rho_{11}; \\
 a_{121} &= -\rho_{15} I_{22} \alpha; & a_{1210} &= -\beta_{15}; & a_{1211} &= -\beta_{14} S_0; & a_{1212} &= \beta_{11} + \rho_{15} I_{22} \alpha; \\
 a_{1215} &= -\beta_{12} S_0 - \rho_{15} I_{22} \frac{S_1}{2}; & P_{12} &= \rho_{15} \left[ I_{22} (P_{11} - P_1) \alpha_0^2 - I_{22} \left( \frac{U^2 - U_0^2}{2} P_{11} + \frac{U_0^2}{2} P_1 \right) \right]; \\
 a_{131} &= Q_3 \alpha; & a_{1310} &= -\beta_{11} + \beta_{13} \frac{S_1}{2 S_0}; & a_{1311} &= -\beta_{11} S_0 + \beta_{11} \frac{S_1}{2}; & a_{1315} &= -\beta_{12} - \beta_{11} \frac{S_1}{2 S_0}; \\
 a_{1315} &= -(\beta_{22} + \rho_{15} I_{22}) S_0 - \beta_{12} \frac{S_1}{2}; & P_{13} &= (\alpha_{11} - \alpha_0) (I_1 - I_0) E_0 S_0 \alpha + Q_3 \left( \frac{U^2 - U_0^2}{2} P_{11} + \frac{U_0^2}{2} P_1 \right) + (P_{11} - P_1).
 \end{aligned}$$

$$\rho_1 = \frac{D_p L x}{2 E_x S_x \alpha^2}; \quad \rho_2 = \frac{Q_3 D_p L}{4 E_x \alpha^4}; \quad \rho_3 = \frac{D_p}{K \alpha^4};$$

$$\rho_4 = \frac{D_p L_0}{E_0 S_0 \alpha_0 \alpha^2}; \quad \rho_5 = \frac{10.92 D_p \beta_1^2}{E_{m1} S_{m1}};$$

$$\rho_6 = \frac{D_p}{E_x S_1^2 \alpha}; \quad \rho_7 = \frac{E_x \alpha}{E_p S_p}; \quad \rho_8 = \frac{E_x S_1^2}{E_0 S_0^2};$$

$$\rho_9 = \frac{E_0 \alpha}{E_p S_p}; \quad \rho_{10} = \frac{Q_3 \beta_{11} \alpha_0 E_0}{E_{m1} S_{m1}}; \quad \rho_{11} = \frac{E_{m1} S_{m1}^3}{10.92 \beta_{11} E_x S_1^2 \alpha_0};$$

$$\rho_{12} = \frac{Q_3 E_x \alpha_0 \beta_{11}}{E_{m1} S_{m1}}; \quad \rho_{13} = \frac{E_{m1} S_{m1}^3}{10.92 E_0 S_0^2 \alpha_0}; \quad \rho_{14} = \frac{Q_3 E_0 \alpha_0}{E_{m1} S_{m1}};$$

$$\rho_{15} = \frac{E_0 S_0 \alpha_0}{D_0}; \quad \rho_{16} = \frac{E_0 \alpha_0}{E_p S_p}$$

Нагрузки остальных деталей определяются по формулам:

$$Q = \frac{a}{2} P_T - Q_K; \quad Q_0 = \frac{a}{2} P_T;$$

$$Q_0 = \frac{\sigma^2 - \sigma_0^2}{2\sigma_0} (P_M - P_T) + \frac{a}{\sigma_0} Q; \quad Q_0 = \frac{a}{a_1} Q + \frac{\sigma^2 - \sigma_1^2}{2\sigma_1} (P_M - P_T);$$

$$M_0 = M_{K0} - M_{00} + \frac{S_0}{2} (H_{00} - H_{K0}); \quad H_0 = -(H_{00} + H_{K0});$$

$$M_3 = M_{KH} - M_{0H} - \frac{S_{00}}{2} (H_{KH} - H_{0H}); \quad H_3 = -(H_{0H} + H_{KH});$$

$$M_0^0 = \frac{1}{A_{22}^0} [A_{20}^0 Q_0 a_1 + A_{23}^0 M_0 + A_{24}^0 (P_T - P_M) a_1^2];$$

$$M_0^H = \frac{1}{A_{22}^H} [A_{20}^H Q_0 a_1 + A_{23}^H (M_0 - \frac{S_0}{2} H_{00}) + A_{24}^H (P_T - P_M) a_1^2];$$

$$H_0^0 = \frac{A_{23}^0 H_0}{A_{22}^0 + \frac{1}{1,346}}; \quad H_0^H = \frac{A_{23}^H H_0}{A_{22}^H + \frac{1}{1,346}};$$

$$N_T^0 = f_1 (a_1 P_M - a P_T) + \frac{f_1}{a_1} (\varphi_1 Q_0 + \varphi_2 \beta M_0^0);$$

$$M_T^0 = \frac{E_T J_T \beta}{K a_1 L_{cp}} (\varphi_2 Q_0 + \varphi_3 \beta M_0^0);$$

$$N_T^H = f_1 (a_1 P_M - a P_T) + \frac{f_1}{a_1} (\varphi_1 Q_0 + \varphi_2 \beta M_0^H);$$

$$M_T^H = \frac{E_T J_T \beta}{K a_1 L_{cp}} (\varphi_2 Q_0 + \varphi_3 \beta M_0^H);$$

$$M_0 = \max \{ |M_0^0|; |M_0^H| \} \text{ sign } M_0;$$

$$H_0 = \max \{ |H_0^0|; |H_0^H| \} \text{ sign } H_0;$$

$$N_T = \max \{ |N_T^0|; |N_T^H| \} \text{ sign } N_T;$$

$$M_T = \max \{ |M_T^0|; |M_T^H| \} \text{ sign } M_T .$$

### 1.5. Расчет трубных решеток

#### 1.5.1. Расчет прочности трубных решеток

Расчет напряжений, возникающих в области закрепления труб и в месте сращения решетки с кожухом или фланцем, производится по формулам п.2.3 приложения I при  $S = S_p - c$  или  $S = S_{p1} - c$

Условия прочности трубных решеток:

$$\sigma_M \leq 1,3[\sigma], \quad \sigma \leq 2,5[\sigma]$$

где  $\sigma = \max[\sigma_1]; \quad \sigma_1 = \sigma_M + \sigma_H$

Для конструкций 4,5,7 (черт.13) требуется проверка условия прочности приварки решетки к кожуху или фланцу по формуле

$$\tau < 0,5[\sigma]$$

Оценка малоциклового прочностного ресурса трубной решетки в зоне соединения ее с кожухом или фланцем производится по ГОСТ 25859-83 при  $\sigma_1 = \sigma_M + \sigma_H, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ . Значения  $K_\sigma$  принимаются по черт.13.

#### 1.5.2. Расчет жесткости трубной решетки

Условие жесткости трубной решетки

где  $W \leq [W]$

$$W = \max\{[W_1]; [W_0]; [W_1 + W_0]\}; \quad [W] = 0,2 S_p;$$

$$W_1 = \frac{a^2}{D_p} [T_{11} Q a + T_{12} M + T_{13} (P_T - P_M) a^2];$$

$W_0 = 0$  - если  $l_B = S_p$  или  $l_B < S_p$  и  $X_B = 0$  (вальцевание производится симметрично срединной плоскости решетки (черт.3,а);

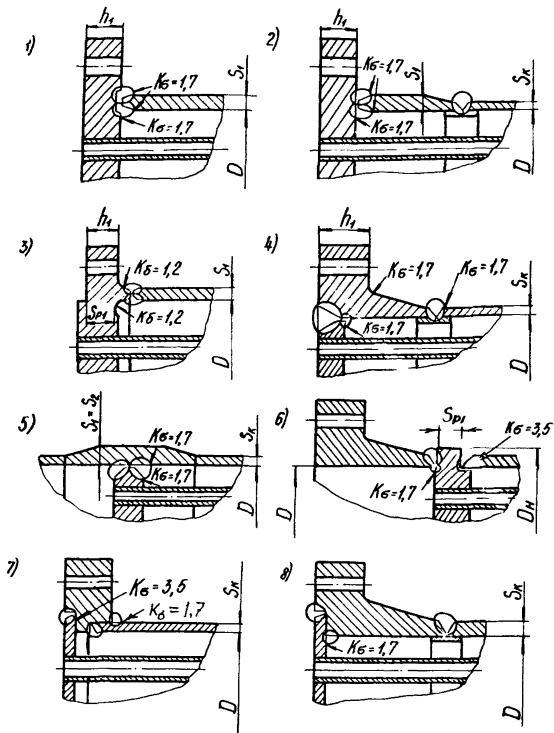
$W_0 = \frac{X_B}{\Phi}$  - если  $l_B < S_p$  и  $X_B \neq 0$  (вальцевание производится несимметрично срединной плоскости решетки, черт.3,б).

Значения коэффициента  $\Phi$  принимаются по табл. I в зависимости

от  $\alpha_\Phi = \frac{A_5 a_1}{S_p} \sqrt{\frac{l_B}{S_p}}$ ,

где  $A_5 = \sqrt{\frac{10,92 A_4 P_{ост.}}{\psi_p E_p}}$

Схемы присоединения трубных решеток к кожуху или фланцу



Черт. 13)

Таблица I

Коэффициенты  $\Phi$

$\alpha_e$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$\Phi$	259,34	64,34	28,23	15,59	9,74	6,56	4,65	3,41

Продолжение табл. I

$\alpha_e$	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
$\Phi$	2,555	1,947	1,498	1,157	0,892	0,683	0,515	0,378

Продолжение табл. I

$\alpha_e$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,02	2,04	2,048	$\geq 2,05$
$\Phi$	0,265	0,1725	0,0943	0,0284	0,0165	0,00498	0,00047	0

В тех случаях, когда к жесткости трубных решеток предъявляются дополнительные требования, определение  $[W]$  производится по ОСТ 26-1185-81.

### 1.6. Расчет теплообменных труб

Помимо давления в трубном и межтрубном пространствах на теплообменные трубы воздействуют осевая нагрузка  $N_T$  и изгибающий момент  $M_T$ , максимальные (по абсолютной величине) значения которых определяются по формулам:

$$N_T = f_i(\alpha, P_M - \alpha P_T) + \frac{f_i}{a_i}(\varphi_1 Q_a + \varphi_2 \beta M_a), \quad M_T = \frac{E_T J_T B}{K a_i L_{np}}(\varphi_2 Q_a + \varphi_3 \beta M_a).$$

1.6.1. Расчет прочности теплообменных труб

Оценка прочности теплообменных труб производится по формулам

$$\sigma_{M1} \leq 1,3[\sigma], \quad \sigma_{M2} \leq [\sigma], \quad \sigma \leq 2,5[\sigma],$$

где 
$$\sigma_{M1} = \frac{[N_T]}{f_T}; \quad \sigma_{M2} = \frac{(d_B + S_T) [P_T - P_M]}{2S_T};$$

$$\sigma = \frac{[N_T]}{f_T} + \frac{d_T [M_T]}{2J_T}$$

Оценка малоциклового прочностного теплообменных труб производится по ГОСТ 25859-83 при

$$\sigma_1 = \frac{[N_T]}{f_T} + \frac{d_T [M_T]}{2J_T}, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0, \quad K_\sigma = 1$$

1.6.2. Расчет жесткости теплообменных труб.

При  $N_T < 0$  производится оценка жесткости теплообменных труб по формулам:

где 
$$\begin{aligned} y &\leq [y], & \lambda &\leq 1, \\ \lambda &= \frac{[N_T] l_{np}^2}{E_T J_T}; & y &= A_6 \frac{[M_T]}{[N_T]}; \\ A_6 &= \frac{1 - \cos \sqrt{\lambda}}{\cos \sqrt{\lambda}}. \end{aligned}$$

Значения коэффициентов  $A_6$  приведены в табл.2.

Таблица 2

Коэффициенты  $A_6$

$\lambda$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$A_6$	0,05	0,11	0,17	0,24	0,32	0,40	0,49	0,60	0,72	0,85

Допускается изготовление греющих камер, у которых не выполняется условие жесткости теплообменных труб. В этом случае толщина решетки должна быть не менее

$$S_p \geq \frac{D}{4,2} \sqrt{\frac{|P_m - P_r|}{\varphi_p [\sigma]}} + c,$$

где  $P_m$ ,  $P_r$  и  $[\sigma]$  принимается для того расчетного режима, в котором не выполнено условие жесткости теплообменных труб.

1.6.3. Расчет плотности крепления теплообменных труб способом развальцовки

Если  $P_m > 0$ , производится оценка плотности крепления теплообменных труб по формуле:

где  $[P_m] = \frac{P_{расч} + A_T P_r + A_T P_r - A_M P_m}{2,4 (1 + A_M A_T)}$ ;  $A_M = \frac{A_T (d_o - S_T)^2}{4 d_o S_T}$ ;

$$A_T = \frac{1,82 A_T}{\lambda_T^2 - 1}; \quad A_M = 0,3 A_T;$$

$$A_T = \frac{1}{0,91 B_T + \frac{E_T}{E_p} B_p}; \quad P_r = E_T (a_T - a_p) (t_p - t_o);$$

$$P_M = \frac{N_T}{\pi d_o S_T}; \quad B_p = \frac{0,91 (\lambda_p^2 - 1)}{1,3 + 0,7 \lambda_p^2}.$$

Значения коэффициентов  $A_T$  принимаются по табл. 3.



Таблица 3

Коэффициенты  $A_T$   
Размеры, мм

Способ развальцовки трубы	Толщина трубы	Коэффициент $A_T$ при наружном диа- метре трубы			
		20	25	38	57
Без канавок	1,5	1,000	1,000	1,000	1,000
	2,0	1,000	1,000	1,000	1,000
С одной канавкой	1,5	0,785	0,802	0,834	0,846
	2,0	0,825	0,843	0,878	0,894
С двумя и более канавками	1,5	0,208	0,255	0,354	0,437
	2,0	0,282	0,333	0,429	0,504

1.6.4. Расчет прочности крепления теплообменных труб  
способом развальцовки

Оценка прочности крепления труб производится по формуле:

$$|N_T| \leq [N_T],$$

где

$$[N_T] = N_0 + n_K N_K; \quad N_K = \min \{ N_{cm}; N_{cp} \};$$

$$N_{cm} = \pi (d_0 + \frac{h_k}{2}) h_k [\sigma]; \quad N_{cp} = 0,5 \pi d_0 b_k [\sigma];$$

$$N_0 = \frac{A_2}{2,4} (P_{act} + A_T P_T + A_T P_T - A_3 P_M).$$

При  $N_T > 0$ :

$$A_2 = \frac{\pi d_0 S_T}{0,3 A_T} (1 - e^{-\omega_T}); \quad \omega_T = \frac{0,3 \alpha_{TP} A_T L_0}{S_T};$$

$$A_3 = A_M \omega_T \frac{(\omega_T + \omega_b)(e^{\omega_T} - e^{-\omega_b}) + \omega_b e^{\omega_b} \sin \omega_b}{(e^{\omega_T} - 1)[(\omega_T + \omega_b)^2 + \omega_b^2]}; \quad \omega_b = \frac{1,295 L_0}{\sqrt{(d_0 - S_T) S_T}};$$

$\alpha_{TP} = 0,4 + 0,5$  - при развальцовке стальных труб в стальные решетки;

$\alpha_{TP} = 0,1 + 0,15$  - при развальцовке латунных труб в стальные или латунные решетки.

При  $N_T < 0$ :

$$A_2 = \frac{\pi d_0 S_T}{0,3 A_T} (e^{\omega_T} - 1);$$

$$A_3 = A_M \omega_T \frac{(\omega_T - \omega_B) [e^{(\omega_T - \omega_B)} \cos \omega_B - 1] + \omega_B e^{(\omega_T - \omega_B)} \sin \omega_B}{(e^{\omega_T} - 1) [(\omega_T - \omega_B)^2 + \omega_B^2]}$$

1.6.5. Расчет прочности крепления теплообменных труб способом приварки

Оценка статической прочности крепления труб способом приварки производится по формуле:

$$\tau \leq [\tau] .$$

где 
$$\tau = \frac{N_T / d_T + 4 / M_T}{\pi d_T^2 \delta} , \quad [\tau] = 0,5 [\sigma] .$$

Оценка малоцикловой прочности крепления труб способом приварки производится по формуле

$$\tau_a \leq [\tau_a] ,$$

где 
$$\tau_a = \frac{1}{2} |\tau - \tau_0| ; \quad [\tau_a] = \frac{\varphi_c}{2} [\sigma] ;$$

$\tau$  - напряжение в сварном соединении при максимальной нагрузке цикла, МПа;

$\tau_0$  - напряжение в сварном соединении при минимальной нагрузке цикла, МПа;

$\varphi_c$  - коэффициент уменьшения циклической прочности сварных соединений труб с решетками. При  $N \leq 50000$  вычисляется по формуле

$$\varphi_c = 0,95 - 0,2 \lg N .$$

Если несколько расчетных режимов циклически повторяются, должно выполняться условие

$$\frac{N_1}{[N_1]} + \frac{N_2}{[N_2]} \dots \leq 1 ,$$

где  $N_1, N_2, \dots$  - число циклов нагружения каждого типа ;

$[N_1], [N_2], \dots$  - допускаемое число циклов нагружения каждого типа.

Принимается  $[N] \leq 50000$  по формуле

$$[N] = 5 \left( 0,95 - \frac{\tau_0}{[\sigma]} \right)$$

1.6.6. Расчет прочности крепления теплообменных труб способом приварки с развальцовкой

Оценка прочности крепления труб способом приварки с развальцовкой производится по формуле

$$\frac{[T]}{T} + 0,6 \frac{[N_T]}{N_T} \geq 1.$$

1.7. Расчет прочности обечаек

Расчет напряжений, возникающих в цилиндрических оболочках 2 (черт.7), 2,3 (черт.8,9), 2,3,6,7 (черт.10,11), 4,5,6,7 (черт.12), производится по формулам п.3.3 приложения I с учетом фактического направления действия нагрузок и толщины  $S = S_j - C$ , где  $S_j$  - толщина соответствующей оболочки.

Помимо расчета прочности обечаек по ГОСТ 14249-80 или другой аналогичной руководящей нормативной документации, производится оценка прочности соединения обечаек с решеткой, фланцем или другими деталями по формулам:

$$\sigma_M \leq 1,3[\sigma] \qquad \sigma \leq 2,5[\sigma]$$

где 
$$\sigma_M = \max\{[\sigma_{Mx}]; [\sigma_{My}]; [\sigma_{Mx} - \sigma_{My}]\} \quad \sigma = \max\{[\sigma_1]; [\sigma_2]; [\sigma_1 - \sigma_2]\};$$

$$\sigma_1 = \sigma_{Mx} + \sigma_{My}; \qquad \sigma_2 = \sigma_{My} + \sigma_{Mx}.$$

Оценка прочности приварки оболочки к другим деталям производится по формуле  $T \leq 0,5[\sigma]$  0,5

Оценка малоцикловой прочности производится по ГОСТ 25859-83 при  $\sigma_1 = \sigma_{Mx} + \sigma_{My}$ ,  $\sigma_2 = \sigma_{My} + \sigma_{Mx}$ ,  $\sigma_3 = 0$ . Значения  $K_\sigma$  принимаются по черт.13,18 в зависимости принятого конструктивного исполнения.

1.8. Расчет деталей фланцевого разъема

1.8.1. Условие прочности болтов или шпилек  $\sigma_b^t \leq [\sigma]_b^t$ ,

где 
$$\sigma_b^t = \frac{2\pi R_b Q_b}{n_b f_b}$$

1.8.2. Условие прочности прокладки  $q_{max} \leq [q]$ ,

где 
$$q_{max} = \max\{q_o, q_n\}; \quad q_o = \frac{Q_o^o}{b_n}; \quad q_n = \frac{Q_n}{b_n}.$$

1.6.3. Условие предварительного обжатия прокладки

$$q_0 \geq q .$$

1.8.4. Условие плотности фланцевого соединения

$$q_n \geq m p_r .$$

1.8.5. Условие жесткости фланцев

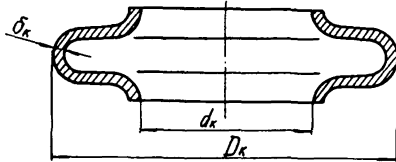
$$\varphi_{max} \leq 0,013 ,$$

## 2. РАСЧЕТ ОСЕВЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

### 2.1. Исходные данные

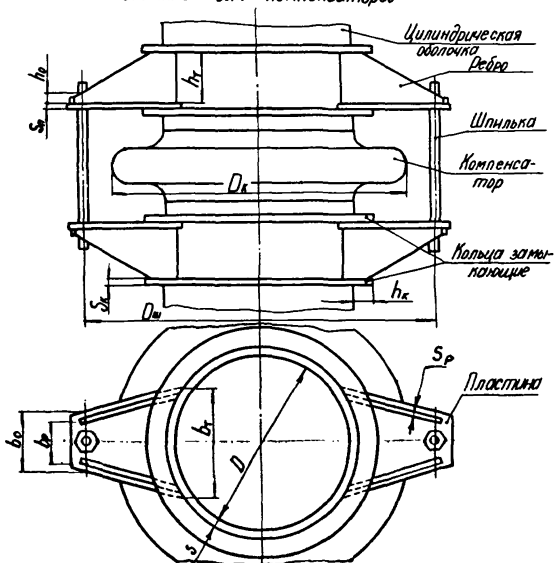
- $D$  - внутренний диаметр цилиндрической оболочки, на которой уста-  
новлен компенсатор, мм ;
- $d_k$  - внутренний диаметр компенсатора ( черт. I4 ) ,мм ;
- $D_k$  - наружный диаметр компенсатора, мм ;
- $P$  - расчетное давление ( абсолютное значение), МПа;
- $P_u$  - давление при испытаниях, МПа ;
- $\delta_k$  - толщина компенсатора ( уточняется при расчете), мм ;
- $C$  - сумма необходимых прибавок к расчетной толщине на возможные  
утонения при изготовлении и эксплуатации, мм ;
- $E$  - модуль продольной упругости при расчетной температуре, МПа.  
Принимается по ГОСТ I4249-80 или другой руководящей норматив-  
ной документации ;
- $\nu$  - коэффициент Пуассона (  $\nu = 0,3$  ) ;
- $\sigma_T$  - предел текучести при расчетной температуре, МПа;
- [ $\sigma$ ] - допускаемое напряжение при расчетной температуре, МПа. При-  
нимается по ГОСТ I4249-80 или другой руководящей нормативной  
документации для каждой из рассчитываемых деталей ;
- $N$  - число циклов нагружения компенсатора ;
- $\Delta$  - осевое смещение, которое необходимо скомпенсировать данным  
компенсатором ( абсолютное значение ), мм;
- $N_{ком}$  - число волн компенсатора ( уточняется при расчете ) ;
- $N_{ш}$  - число шпилек ( стяжек ) линзового компенсатора ( черт. I5 ) ;
- $d_3$  - внутренний диаметр резьбы шпильки, мм. Принимается по  
ГОСТ II708-66;
- $D_{ш}$  - диаметр окружности расположения шпилек, мм ;
- $S$  - толщина цилиндрической оболочки в месте установки стяжек, мм;
- $S_n, S_p, S_k$  - толщина пластин, ребер и колец, мм ;
- $b_o, b_r, b_p$  - ширина пластин в месте установки шпилек, в месте привар-  
ки к трубопроводу и расстояние между осями ребер в месте  
установки шпилек, мм ;

Компенсатор линзовый



Черт. 14

Стяжки для компенсаторов



Черт. 15

$h_0; h_T, h_K$  - высота ребра в месте установки шпилек, в месте приварки к трубопроводу и высота колец, мм.

2.2. Расчет линзовых компенсаторов

2.2.1. Расчетная толщина компенсатора  $\delta_R$  определяется по давлению при испытаниях  $P_u$  и соответствующей температуре ( $20^\circ\text{C}$ ) по формуле:

$$\delta_K = \lambda d_K \sqrt{\frac{3,1 P_u}{\sigma_T}},$$

где  $\lambda = \sqrt{\frac{(1-\beta_K)(1-\beta_K^2)}{8\beta_K^2(3+\beta_K)}}, \quad \beta_K = \frac{d_K + \delta_K}{D_K - \delta_K}.$

Исполнительная толщина компенсатора  $\delta_K$  (черт.14) назначается с учетом прибавки С по формуле

$$\delta_K \geq \delta_R + C$$

2.2.2. Компенсирующая способность одной волны компенсатора принимается в зависимости от расчетного числа циклов нагружения  $N$  по формуле

где  $\Delta_1 = \frac{2Ed_K^2}{A_1 \delta_K},$

$$A_1 = \frac{8\sqrt{1-\nu+\nu^2}}{3(1-\nu^2)} \cdot \frac{\beta_K^2 (1-\beta_K^2) + 2\beta_K^4 L_n \beta_K}{(1-\beta_K^2)^2 - 4\beta_K^2 L_n^2 \beta_K} \quad \text{при } \beta_K \leq 0,9;$$

$$A_1 \approx \frac{4\sqrt{1-\nu+\nu^2}}{(1-\nu^2)(1-\beta_K)}^2 \left[ 1 - \frac{7}{3}(1-\beta_K) + \frac{97}{60}(1-\beta_K)^2 - \frac{11}{45}(1-\beta_K)^3 \right] \quad \text{при } \beta_K > 0,9;$$

$$E = \frac{0,0225}{K_c \sqrt{N}} ;$$

$K_c$  - коэффициент запаса. Для углеродистых и низколегированных сталей и титановых сплавов  $K_c = 1,5$ , для легированных сталей аустенитного класса  $K_c = 1,1$ .

Если в расчете должна учитываться ползучесть материала или в условиях эксплуатации недопустима работа материала линзы в области пластических деформаций, или в исходных данных для расчета не оговоре-

но число циклов нагружения, допускаемую амплитуду интенсивности деформаций  $\epsilon$  необходимо ограничить величиной

$$\epsilon = 1,3 \frac{L_0}{E}$$

2.2.3. Число валов компенсатора определяется по формуле  $n_{ком} \geq \frac{\Delta}{\Delta_1}$ .

Если при эксплуатации будет иметь место только сжатие компенсатора, то при установке рекомендуется предварительно растянуть его на величину  $\Delta_p \approx \Delta/2$ . Если только растяжение - предварительно сжать на эту же величину.

2.2.4. Условие применимости формул  $\epsilon_{max} \leq 0,002$ ,

где 
$$\epsilon_{max} = \frac{\Delta \delta_k A_1}{2 n_{ком} d_k^2} + \frac{\rho d_k^2 B_1}{E (\delta_k - C)^2};$$

$$B_1 = \frac{3\sqrt{1-\nu} + \nu^2}{64 \beta_k^2} \left[ 2 - (1-\beta_k^2) \frac{2 \beta_k^2 (3\beta_k^2) L_n \beta_k + (1-\beta_k^2)(1+3\beta_k^2)}{(1-\beta_k^2)^2 - 4 \beta_k^2 L_n^2 \beta_k} \right] \text{ при } \beta_k \leq 0,9;$$

$$B_1 \approx \frac{\sqrt{1-\nu} + \nu^2}{16} (1-\beta_k)^2 \left[ 1 + \frac{9}{5} (1-\beta_k) + \frac{31}{12} (1-\beta_k)^2 + \frac{3533}{1050} (1-\beta_k)^3 \right] \text{ при } \beta_k > 0,9.$$

2.2.5. Местность компенсатора  $K_k$  (усилие, возникающее при осевом растяжении или сжатии его на единицу длины) определяется по формуле:

$$K_k = \frac{E \delta_k^3 A_2}{n_{ком} d_k^2},$$

где 
$$A_2 = \frac{8\pi}{3(1-\nu^2)} \frac{\beta_k^2 (1-\beta_k^2)}{(1-\beta_k^2)^2 - 4 \beta_k^2 L_n^2 \beta_k} \text{ при } \beta_k \leq 0,9.$$

$$A_2 \approx \frac{4\pi}{(1-\nu^2)(1+\beta_k)^3} \left[ 1 - \frac{5}{2} (1-\beta_k) + \frac{61}{30} (1-\beta_k)^2 - \frac{11}{20} (1-\beta_k)^3 \right] \text{ при } \beta_k > 0,9.$$

2.2.6. Температурный распор компенсатора  $P_1$  (абсолютное значение) определяется по формуле:

$$P_1 = K_k (\Delta - \Delta_n).$$

2.2.7. Усилие в компенсаторе, вызванное воздействием давления на линзу компенсатора  $P_2$  (абсолютное значение), определяется по формуле

$$P_2 \approx \frac{\pi (D_k^2 - d_k^2) P}{8}.$$

2.2.8. Значения коэффициентов  $\lambda, A_1, B_1, A_2$  при  $\nu = 0,3$  приведены в табл. 4.



Таблица 4

Коэффициенты  $\lambda$ ,  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$

$\beta_k$	$\lambda$	$A_1$	$B_1$	$A_2$
0,65	0,1280	11,8	0,01490	113
0,66	0,1230	13,0	0,01350	128
0,67	0,1170	14,3	0,01270	145
0,68	0,1120	15,6	0,01170	164
0,69	0,1060	17,3	0,01040	188
0,70	0,1030	18,9	0,01010	212
0,71	0,0980	21,1	0,00872	245
0,72	0,0935	23,3	0,00792	281
0,73	0,0891	25,9	0,00719	324
0,74	0,0847	28,9	0,00650	375
0,75	0,0805	32,1	0,00586	436
0,76	0,0764	35,9	0,00527	509
0,77	0,0724	40,3	0,00473	597
0,78	0,0684	45,4	0,00423	704
0,79	0,0646	51,3	0,00376	834
0,80	0,0608	58,2	0,00333	996
0,81	0,0572	66,4	0,00294	1200
0,82	0,0536	76,1	0,00258	1450
0,83	0,0501	87,7	0,00225	1770
0,84	0,0466	102,0	0,00195	2190
0,85	0,0433	119,0	0,00168	2740
0,86	0,0400	140,0	0,00143	3460
0,87	0,0367	167,0	0,00121	4450
0,88	0,0336	202,0	0,00101	5820
0,89	0,0305	246,0	0,00083	7770
0,90	0,0274	306,0	0,00067	10600

### 2.3. Расчет стержней для линзовых компенсаторов

В отдельных случаях для предотвращения растяжения компенсатора при испытаниях устанавливает специальные стержни ( черт. 15), расчет которых производится для условий испытаний при соответствующей температуре.

#### 2.3.1. Расчет шпилек

Условие прочности шпилек

где 
$$\sigma_{ш} = \frac{4 N_{ш}}{\pi d_s^3} ; \quad \sigma_{ш} \leq [\sigma]_{ш} , \quad N_{ш} = \frac{\pi (D_k^2 + D^2) P_{ш}}{8 n_{ш}} ; [\sigma]_{ш} = \frac{\sigma_T}{2} .$$

#### 2.3.2. Расчет пластины и ребра

С целью выяснения максимальных напряжений расчет производится для нескольких сечений при  $0 < x \leq L_n ;$

где 
$$L_n = \frac{D_{ш} - D}{2}$$

В этих сечениях вычисляются

$$h_p = h_0 + \frac{h_T - h_0}{L_n} x ; \quad b_n = b_0 + \frac{b_T - b_0}{L_n} x ;$$

$$F_p = h_p S_p ; \quad F_n = b_n S_n ;$$

$$Z_p = \frac{(h_p + S_n) F_n}{2(2F_p + F_n)} ; \quad Z_n = \frac{h_p + S_n}{2} - Z_p ;$$

$$I_p = \frac{S_p h_p^3}{12} ; \quad I_n = \frac{b_n S_n^3}{12} ;$$

$$\bar{I} = 2I_p + 2Z_p^2 F_p + I_n + Z_n^2 F_n ;$$

$$W_p = \frac{2\bar{I}}{h_p + 2Z_p} ; \quad W_n = \frac{2\bar{I}}{S_n + 2Z_n} ;$$

$$\sigma_p = \frac{N_{ш} x}{W_p} ; \quad \sigma_n = \frac{N_{ш} x}{W_n} .$$

Условие прочности ребра

$$\sigma_p^{max} = \max \{ |\sigma_p| \} \leq [\sigma] .$$

Условие прочности пластины

$$\sigma_n^{max} = \max \{ |\sigma_n| \} \leq [\sigma] .$$

Границы применимости формул

$$h_T \leq 20 S_P . \quad b_P \leq 20 S_n .$$

### 2.3.3. Расчет колец замыкающих

Силы, действующие на кольцо, определяются по формуле

$$N_K = \frac{N_H L_n}{2h} .$$

где  $h = h_T + S_n + S_K .$

Вспомогательные величины

$$l_0 = \min \{ h ; (S_K + 1, 1\sqrt{DS}) \} ;$$

$$F_K = S_K h_K ;$$

$$F_0 = S l_0 ;$$

$$Z_0 = \frac{(h_K + S) F_K}{2(F_K + F_0)} ;$$

$$R_K = \frac{D+S}{2} + Z_0 .$$

При  $F_0 \geq F_K$  :

$$Z = \frac{F_0 + F_K}{2l_0} ; \quad W_K = F_K \left( \frac{h_K}{2} + S - Z \right) + \frac{l_0}{2} [Z^2 + (S-Z)^2] .$$

При  $F_K > F_0$  :

$$Z = \frac{F_0 + F_K}{2S_K} ; \quad W_K = \frac{S_K}{2} [(h_K - Z)^2 + Z^2] + F_0 \left( \frac{S}{2} + h_K - Z \right) .$$

Условие прочности кольца  $\sigma_K \leq [\sigma]$  ,

где

$$\sigma_K = \frac{N_K R_K}{2,2 W_K} \left( 1 - \frac{b_T}{2R_K} \right) .$$

## 2.4. Расчет и конструирование пружинных компенсаторов

### 2.4.1. Описание конструкции

Компенсатор пружинный ( черт. 16 ) , устанавливаемый под опору-лапу, состоит из нескольких винтовых цилиндрических пружин (1) , устанавливаемых между опорной (2) и нажимной (3) плитами. Опоры-лапы устанавливаются на нажимные плиты компенсаторов так, чтобы отжимные винты попадали в посадочные гнезда ( 4 ). Опорная плита устанавливается на проектную отметку так, чтобы было обеспечено полное прилегание, и кре -

пится двумя болтами через отверстия (5). К нажимной плите приваривается ограничительная втулка (6), а в опорную плиту заворачиваются направляющие стержни (7). Втулки (6) служат для ограничения максимального сжатия пружин и контроля остаточной деформации пружин путем замера расстояния между нижним торцом втулки и плоскостью опорной плиты в рабочем состоянии. Перед установкой аппарата на пружинные компенсаторы не допускается сжимать пружины шпильками (8). Они предназначены для сборки самих пружинных компенсаторов и демонтажа одного из них при эксплуатации.

Пружинные компенсаторы используются в тех случаях, когда по условиям эксплуатации нельзя применить листовые или волнистые компенсаторы. Кроме того, они позволяют более равномерно распределить нагрузку между всеми опорами-лапами. Границы применимости пружинных компенсаторов соответствуют границам применимости винтовых цилиндрических пружин по ГОСТ 13764-88.

#### 2.4.2. Определение размеров

Определение размеров винтовых цилиндрических пружин производится по ГОСТ 13765-68. Исходными величинами являются рабочий ход  $h$ , равный разности температурных удлинений, которую необходимо скомпенсировать. Сила пружины при предварительной деформации  $P_I$  определяется по формуле

$$P_I = \frac{G_M}{n_{оп} n_n} ,$$

где  $G_M$  - вес аппарата, устанавливаемого на пружинные опоры при монтаже;

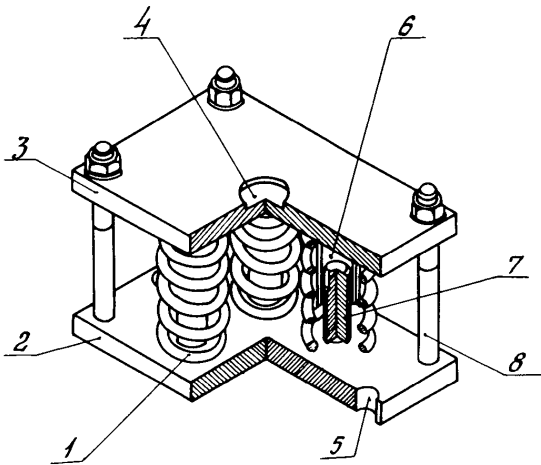
$n_{оп}$  - число опор-лап на аппарате ;

$n_n$  - число пружин в каждом пружинном компенсаторе.

Чтобы скомпенсировать заданную разность температурных удлинений  $h$  необходимо, чтобы сила пружины при рабочей деформации  $P_2$  была близка к значению, определяемому по формуле

$$P_2 = \frac{G_P}{n_{оп} n_n} ,$$

*Компенсатор пружинный*



*черт. 16*

где  $G_p$  - вес аппарата в рабочем состоянии с учетом веса обрабатываемого продукта.

Размеры пружин подбираются такими, чтобы

$$P_3 \approx (1,5 \dots 2,0) P_2 ; \quad n \geq 2,5 ; \quad H_0 \leq 5 (D - d) ,$$

где  $H_0$  - высота пружины в свободном состоянии ;

$n$  - число рабочих витков пружины ;

$P_3, d, D$  - сила пружины при максимальной деформации, диаметр проволоки и наружный диаметр пружины (принимается по ГОСТ 13766-68 ... ГОСТ 13776-68).

Высоту ограничительной втулки (6) выбирают такой, чтобы предотвратить соприкосновение витков при максимальном сжатии:

$$H_B \geq H_0 - n f_3 ,$$

где  $H_B$  - высота ограничительной втулки 6 (черт. 16) ;

$f_3$  - наибольший прогиб одного витка (принимается по ГОСТ 13766-68... ГОСТ 13776-68).

Жесткость опорного устройства, состоящего из пружинных компенсаторов, устанавливаемых под все опоры лапы, определяется по формуле

$$Z_{оп} = Z n_{оп} n_n$$

где  $Z = \frac{Z_1}{n}$  ,

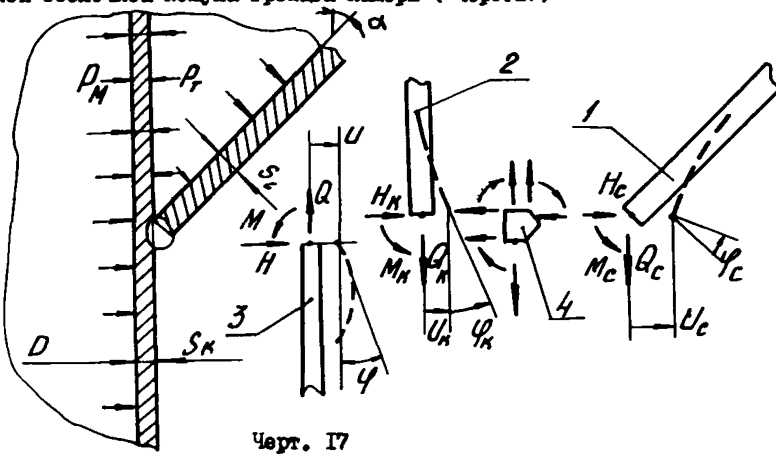
$Z$  - жесткость одной пружины ;

$Z_1$  - жесткость одного витка пружины (принимается по ГОСТ 13766-68... ГОСТ 13776-68) ;

$Z_{оп}$  - жесткость опорного устройства (сила, под действием которой аппарат проседает на пружинной опоре на единицу длины).

3. РАСЧЕТ МЕСТ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНО  
НАГРУЖЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ

3.1. Место пересечения конической оболочки сепаратора с цилиндрической оболочкой кожуха греющей камеры ( черт. I7)



Черт. I7

3.1.1. Исходные данные

$D, S_k$  - внутренний диаметр и толщина цилиндрической оболочки кожуха греющей камеры, мм ;

$S_c$  - толщина конической оболочки сепаратора, мм ;

$\alpha_c$  - половина угла при вершине конической оболочки, град ;

$t$  - расчетная температура, °C ;

$t_0$  - начальная температура, °C (  $t_0 = 20$  °C ) ;

$\chi_k, \alpha_c$  - коэффициент линейного расширения материалов кожуха и сепаратора,  $1/^\circ\text{C}$  ;

$E_k, E_c$  - модули продольной упругости материалов кожуха и сепаратора, МПа ;

$P_r, P_n$  - давление в трубном и межтрубном пространствах, МПа ;

$Q_k, Q_c$  - осевые нагрузки кожуха и сепаратора, отнесенные к единице длины рассматриваемого сечения, Н/мм ;

$[\sigma]$  - допускаемое напряжение, МПа. Принимается по ГОСТ 14249-80 или другой руководящей нормативной документации для каждой из рассчитываемых деталей.

3.1.2. Вспомогательные величины

3.1.2.1. Для цилиндрической оболочки

$$R = \frac{D+S_K}{2}; \quad S = S_K; \quad \omega = \sqrt[4]{\frac{2,73R^2}{S^2}};$$

$$B_{11} = \frac{4S}{R}\omega^3; \quad B_{12} = 2\omega^2; \quad B_{22} = \frac{2R}{S}\omega$$

3.1.2.2. Для конической оболочки

$$R_1 = \frac{D}{2} + S_K + \frac{S_K \cos \alpha}{2}; \quad S = S_K; \quad \omega_1 = \sqrt[4]{\frac{2,73R_1^2}{S^2}};$$

$$B_{11} = 4\sqrt{\frac{2,73}{\cos \alpha}}; \quad B_{12} = 2; \quad B_{22} = 2\sqrt{\frac{\cos \alpha}{2,73}};$$

$$C_{11} = B_{11}\omega_1; \quad C_{12} = C_{21} = B_{12}\omega_1^2; \quad C_{15} = \text{tg} \alpha (\frac{1}{\cos \alpha} + C_{12});$$

$$C_{16} = -\frac{2R_1 \text{tg} \alpha}{S \cos \alpha}; \quad C_{22} = B_{22}\omega_1^3; \quad C_{25} = \text{tg} \alpha C_{22} - \frac{0,3R_1}{S \cos \alpha};$$

$$C_{26} = \frac{R_1^2}{S^2 \cos \alpha}.$$

3.1.3. Нагрузки

3.1.3.1. Для определения  $N_0, N_C, M_K, H_K$  необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} a_{11}M_C + a_{12}H_C S_C + a_{13}M_K + a_{14}H_K S_K = B_1, \\ a_{21}M_C + a_{22}H_C S_C + a_{23}M_K + a_{24}H_K S_K = B_2, \\ a_{31}M_C + a_{32}H_C S_C + a_{33}M_K + a_{34}H_K S_K = B_3, \\ a_{42}H_C S_C + a_{43}M_K + a_{44}H_K S_K = B_4, \end{cases}$$

где  $a_{11} = C_{11}; \quad a_{12} = a_{21} = C_{12}; \quad a_{13} = -A_1 B_{11}; \quad a_{14} = -A_1 B_{12};$   
 $B_1 = -C_{15} Q_C S_C - C_{16} P_T S_C^2;$



$$\begin{aligned}
 a_{22} &= C_{22}; & a_{23} &= -A_2(B_{12} + A_3 B_{11}); & a_{24} &= -A_2(B_{22} + A_3 B_{12}); \\
 b_2 &= (\alpha_K - \alpha_C)(1 - t_0) E_C S_C R - Q_3 A_2 Q_K R - C_{25} Q_C S_C + A_2 (P_M - P_T) R^2 - C_{26} Q_T S_C^2; \\
 a_{31} &= \frac{R_1}{R}; & a_{32} &= \frac{R_1 \sin \alpha}{2R} - \frac{R_1}{R} \left( \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{B_{12} S_K}{B_{11} S_C} \right); & a_{33} &= 2; & a_{34} &= -A_4; \\
 b_3 &= \frac{R_1}{R} (R_1 - R) Q_C; & b_4 &= Q_T R^2 - Q_3 Q_C R_1; \\
 a_{42} &= \frac{R_1 S_K}{R S_C} \left( B_{22} - \frac{B_{12}^2}{B_{11}} \right); & a_{43} &= 2B_{12} + A_4 B_{11}; & a_{44} &= 2B_{22} + A_4 B_{12}; \\
 A_1 &= \frac{E_C S_C^2}{E_K S_K^2}; & A_2 &= \frac{E_C S_C}{E_K S_K}; & A_3 &= \frac{S_C \sin \alpha}{2S_K}; & A_4 &= \frac{S_C}{S_K \sin \alpha}.
 \end{aligned}$$

3.1.3.2. Остальные нагрузки определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 M &= -M_K + \frac{S_C H_K}{\sin \alpha} - \frac{R_1}{R} M_C + \left( \frac{R_1}{R \sin \alpha} - \frac{R_1 \sin \alpha}{2R} \right) S_C H_C + \frac{R_1}{R} (R_1 - R) Q_C, \\
 H &= -H_K - \frac{R_1}{R} H_C; \\
 Q &= Q_K + \frac{R_1}{R} Q_C.
 \end{aligned}$$

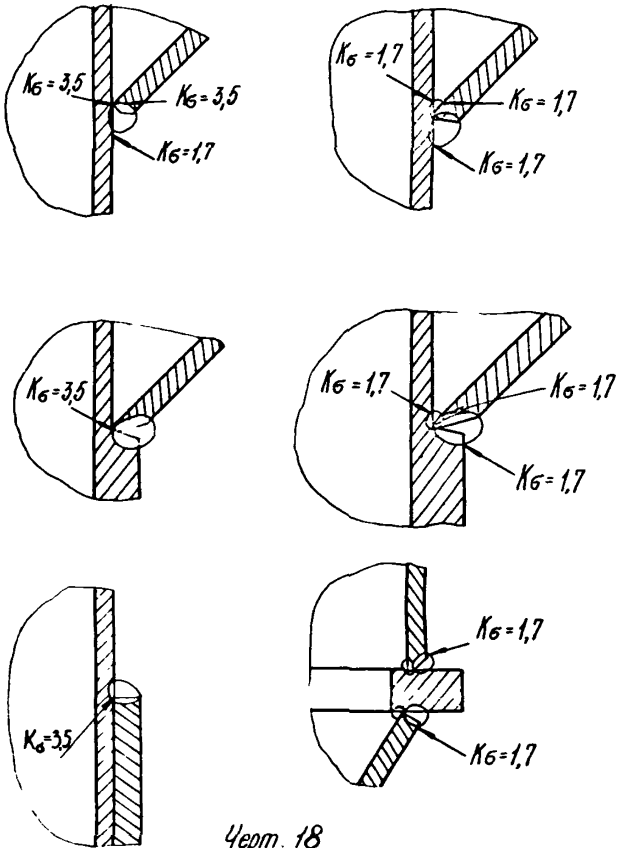
### 3.1.4. Расчет прочности

Расчет напряжений, возникающих в конической оболочке (I), производится по формулам п.4.3., а в цилиндрических оболочках (2,3) - по формулам п.3.3 приложения I с учетом фактического направления действия нагрузок и толщины  $S = S_i - C$ .

Оценка прочности обечаек производится по формулам п.1.7.

Значения коэффициентов  $K_\sigma$  принимаются по черт.18 в зависимости от принятого конструктивного исполнения.

Схемы соединения оболочек вращения



Черт. 18

3.2. Место пересечения конической оболочки сепаратора с цилиндрической оболочкой кожуха греющей камеры, подкрепленное ступенчатой цилиндрической оболочкой ( черт. 19 )

На кожухе греющей камеры  $Q$  установлено опорное кольцо  $\delta$ , к которому приваривается нижняя часть сепаратора  $\beta$ . При расчете прочности этого узла выделены отдельные элементы 1...9.

3.2.1. Исходные данные

$D$  - внутренний диаметр кожуха греющей камеры, мм ;

$\delta_1 \cdot \delta_4 \cdot \delta_5 \cdot \delta_6$  - толщины оболочек кожуха, верхней и нижней частей, опорного кольца и сепаратора в месте соединения с кожухом, мм ;

$l_3 \cdot l_4 \cdot l_5$  - высота опорного кольца, его верхней и нижней частей, мм ;

$\alpha$  - половина угла при вершине конической обечайки сепаратора, град ;

$P_m, P_T$  - давления в межтрубном и в трубном пространствах, МПа ;

$t_k \cdot t_y \cdot t_c \cdot t_0$  - средние температуры стенок кожуха, опорного кольца и сепаратора и начальная температура, °С, ( $t_0 \approx 20$  °С) ;

$\alpha_k \cdot \alpha_y \cdot \alpha_c$  - коэффициенты линейного расширения материалов кожуха, опорного кольца и сепаратора, 1/°С ;

$E_k \cdot E_y \cdot E_c$  - модули продольной упругости материалов кожуха, опорного кольца и сепаратора, МПа ;

$Q_k \cdot Q_c$  - осевые нагрузки кожуха и сепаратора, распределенные по средним окружностям, Н/мм ;

$[\sigma]$  - допускаемое напряжение, МПа. Принимается по ГОСТ 14249-80 или другой руководящей нормативной документации для каждой из рассчитываемых деталей.



3.2.2. Вспомогательные величины

3.2.2.1. Для цилиндрических оболочек (  $i = 1, 2$  )

$$R_1 = R_2 = \frac{D + S_i}{2} ; \quad S_1 = S_2 ; \quad \omega_i = \sqrt[4]{\frac{2,73 R_i^2}{S_i^2}} ;$$

$$B_{11}^{(i)} = \frac{4 S_i}{R_i} \omega_i^3 ; \quad B_{12}^{(i)} = 2 \omega_i^2 ; \quad B_{22}^{(i)} = \frac{2 R_i}{S_i} \omega_i .$$

3.2.2.2. Для цилиндрических оболочек (  $i = 3, 4, 5$  )

$$R_3 = R_1 ; \quad S_3 = S_1 ;$$

$$R_4 = \frac{D + 2 S_1 + S_3}{2} ; \quad R_5 = \frac{D + 2 S_1 + S_5}{2} ;$$

$$B_{11}^{(i)} = \frac{4 S_i \omega_i^3}{R_i} \varphi_{11}^{(i)} ; \quad B_{12}^{(i)} = 2 \omega_i^2 \varphi_{12}^{(i)} ;$$

$$B_{13} = \frac{4 S_i \omega_i^3}{R_i} \varphi_{13}^{(i)} ; \quad B_{14} = 4 \omega_i^2 \varphi_{14}^{(i)} ;$$

$$B_{22} = \frac{2 R_i \omega_i}{S_i} \varphi_{22}^{(i)} ; \quad B_{24} = \frac{2 R_i \omega_i}{S_i} \varphi_{24}^{(i)} ,$$

где  $\omega_i = \sqrt[4]{\frac{2,73 R_i^2}{S_i^2}} ; \quad \lambda_i = l_i \sqrt[4]{\frac{2,73}{R_i^2 S_i^2}} ;$

$$\varphi_{11}^{(i)} = \frac{sh \lambda_i ch \lambda_i + sin \lambda_i cos \lambda_i}{sh^2 \lambda_i - sin^2 \lambda_i} ; \quad \varphi_{12}^{(i)} = \frac{sh^2 \lambda_i + sin^2 \lambda_i}{sh^2 \lambda_i - sin^2 \lambda_i}$$

$$\varphi_{13}^{(i)} = \frac{sh \lambda_i cos \lambda_i + ch \lambda_i sin \lambda_i}{sh^2 \lambda_i - sin^2 \lambda_i} ; \quad \varphi_{14}^{(i)} = \frac{sh \lambda_i sin \lambda_i}{sh^2 \lambda_i - sin^2 \lambda_i} ;$$

$$\varphi_{22}^{(i)} = \frac{sh \lambda_i ch \lambda_i - sin \lambda_i cos \lambda_i}{sh^2 \lambda_i - sin^2 \lambda_i}$$

$$\varphi_{24}^{(i)} = \frac{ch \lambda_i sin \lambda_i - sh \lambda_i cos \lambda_i}{sh^2 \lambda_i - sin^2 \lambda_i} .$$

3.2.2.3. Для конической оболочки (  $i = 6$  )

$$R_6 = \frac{D}{2} + S_1 + S_5 ; \quad S_6 = \frac{S_5 \cos \alpha}{2} ;$$

$$\begin{aligned} \omega_6 &= \sqrt[4]{\frac{273 R_6^2}{S_6^2}}; & B_{11} &= 4\sqrt{\frac{273}{\cos \alpha}}; & B_{12} &= 2; \\ B_{22} &= 2\sqrt{\frac{\cos \alpha}{273}}; & C_{11}^{(6)} &= B_{11} \omega_6; & C_{12}^{(6)} &= C_{21}^{(6)} = B_{12} \omega_6^2; \\ C_{15}^{(6)} &= \lg \alpha \left( \frac{1}{\cos \alpha} + C_{12} \right); & C_{16}^{(6)} &= \frac{2 R_6 \lg \alpha}{S_6 \cos \alpha}; & C_{22}^{(6)} &= B_{22} \omega_6^3; \\ C_{25}^{(6)} &= \lg \alpha C_{22} - \frac{0,3 R_6}{S_6 \cos \alpha}; & C_{26}^{(6)} &= \frac{R_6^2}{S_6^2 \cos \alpha}. \end{aligned}$$

### 3.2.3. Нагрузки

Для определения нагрузок  $M_1, H_1, M_2, H_2, M_{37}, H_{37}, M_{38}, H_{38}, M_{47}, H_{47}, M_{49}, H_{49}, M_{59}, H_{59}, M_{58}, H_{58}, M_6, H_6, Q_3, Q_4, Q_5$  необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений, состоящую из 21 уравнения:

$$\begin{aligned} & ) \quad M_4 + M_{37} - S_4 H_{37} + M_{47} - S_4 H_{47} + (R_4 - R_7) Q_4 = 0; \\ & ) \quad H_1 - H_{37} - H_{47} = S_4 (R_4 - R_7); \\ & ) \quad M_2 - M_{38} + S_5 H_{38} - M_{58} + S_5 H_{58} + (R_3 - R_2) Q_5 = 0; \\ & ) \quad H_2 + H_{38} + H_{58} = S_5 P_M; \\ & ) \quad \frac{B_{11}^{(1)}}{S_1^2} M_1 + \frac{B_{12}^{(1)}}{S_1} H_1 - \frac{B_{13}^{(1)}}{S_3^2} M_{37} - \frac{B_{14}^{(1)}}{S_3} H_{37} - \frac{B_{15}^{(1)}}{S_3^2} M_{38} - \frac{B_{16}^{(1)}}{S_3} H_{38} = 0; \\ & ) \quad \left( \frac{B_{22}^{(1)}}{S_1} + \frac{B_{21}^{(1)} S_4}{S_1^2} \right) M_1 + \left( B_{22}^{(1)} + \frac{B_{21}^{(1)} S_4}{S_1} \right) H_1 + \frac{B_{23}^{(1)}}{S_3} M_{37} + B_{22}^{(1)} H_{37} + \frac{B_{24}^{(1)}}{S_3} M_{38} + \\ & \quad + B_{23}^{(1)} H_{38} + \frac{0,3 R_3}{S_3} Q_3 = \frac{0,3 R_7}{S_1} Q_4 + \frac{R_7^2}{S_1} P_7; \\ & ) \quad \frac{B_{11}^{(2)}}{S_2^2} M_2 + \frac{B_{12}^{(2)}}{S_2} H_2 + \frac{B_{13}^{(2)}}{S_3^2} M_{37} + \frac{B_{14}^{(2)}}{S_3} H_{37} + \frac{B_{15}^{(2)}}{S_3^2} M_{38} + \frac{B_{16}^{(2)}}{S_3} H_{38} = 0; \\ & ) \quad \left( \frac{B_{22}^{(2)}}{S_2} + \frac{B_{21}^{(2)} S_5}{S_2^2} \right) M_2 + \left( B_{22}^{(2)} + \frac{B_{21}^{(2)} S_5}{S_2} \right) H_2 - \frac{B_{23}^{(2)}}{S_3} M_{37} - B_{22}^{(2)} H_{37} - \frac{B_{24}^{(2)}}{S_3} M_{38} - B_{22}^{(2)} H_{38} + \\ & \quad + \frac{0,3 R_3}{S_3} Q_3 = \frac{0,3 R_2}{S_2} (Q_4 + \frac{R_6 Q_6}{R_2}); \end{aligned}$$

- 9)  $\frac{E_y B_{11}^{(1)}}{E_x S_1^2} M_1 + \frac{E_y B_{12}^{(1)}}{E_x S_1} H_1 - \frac{B_{21}^{(1)}}{S_4^2} M_{47} - \frac{B_{22}^{(1)}}{S_4} H_{47} - \frac{B_{23}^{(1)}}{S_4} H_{49} - \frac{B_{24}^{(1)}}{S_4^2} M_{49} = 0;$
- 10)  $\left(\frac{B_{12}^{(1)}}{S_1} + \frac{B_{11}^{(1)} S_4}{S_1^2}\right) \frac{E_y}{E_x} M_1 + \left(B_{22}^{(1)} + \frac{B_{21}^{(1)} S_4}{S_1}\right) \frac{E_y}{E_x} H_1 + \frac{B_{22}^{(1)}}{S_4} M_{47} + B_{22}^{(1)} H_{47} + \frac{B_{23}^{(1)}}{S_4} M_{49} + B_{23}^{(1)} H_{49} +$   
 $+ \frac{Q_3 R_3}{S_4} Q_4 - \frac{Q_3 R_1 E_y}{S_1 E_x} Q_4 - \frac{R_1^2 E_y (P_1 - P)}{S_1 E_x} + [\alpha_y (t - t_0) R_4 - \alpha_c (t_c - t_0) R_1] E_y - \frac{R_4^2}{S_4} P_1;$
- 11)  $\frac{C_{11}^{(1)} E_y}{S_6^2 E_c} M_6 + \frac{C_{12}^{(1)} E_y}{S_6 E_c} H_6 - \frac{B_{12}^{(1)}}{S_4^2} M_{47} - \frac{B_{13}^{(1)}}{S_4} H_{47} - \frac{B_{14}^{(1)}}{S_4^2} M_{49} - \frac{B_{15}^{(1)}}{S_4} H_{49} - \frac{C_{15}^{(1)} E_y}{S_6 E_c} Q_6 - \frac{C_{16}^{(1)} E_y}{E_c} P_1;$
- 12)  $\left(\frac{C_{21}^{(1)} - S_5 - S_4}{S_6} C_{11}^{(1)}\right) \frac{E_y}{E_c} M_6 + \left(\frac{C_{22}^{(1)} - S_5 - S_4}{2 S_6} C_{12}^{(1)}\right) \frac{E_y}{E_c} H_6 - \frac{B_{12}^{(1)}}{S_4} M_{47} - B_{21}^{(1)} H_{47} - \frac{B_{12}^{(1)}}{S_4} M_{49} - B_{21}^{(1)} H_{49} +$   
 $+ \frac{Q_3 R_3}{S_4} Q_4 - \left(\frac{S_5 - S_4}{2 S_6} C_{15}^{(1)} - C_{25}^{(1)}\right) \frac{E_y}{E_c} Q_6 - \left(C_{21}^{(1)} S_6 - \frac{S_5 - S_4}{2} C_{16}^{(1)}\right) \frac{E_y}{E_c} P_1 - \frac{R_4^2}{S_4} P_1 +$   
 $+ [\alpha_y (t - t_0) R_4 - \alpha_c (t_c - t_0) R_1] E_y;$
- 13)  $\frac{C_{11}^{(1)} E_y}{S_6^2 E_c} M_6 + \frac{C_{12}^{(1)} E_y}{S_6 E_c} H_6 - \frac{B_{11}^{(1)}}{S_5^2} M_{59} - \frac{B_{12}^{(1)}}{S_5} H_{59} - \frac{B_{13}^{(1)}}{S_5^2} M_{59} - \frac{B_{14}^{(1)}}{S_5} H_{59} - \frac{C_{15}^{(1)} E_y}{S_6 E_c} Q_6 - \frac{C_{16}^{(1)} E_y}{E_c} P_1;$
- 14)  $\left(\frac{C_{21}^{(1)} + S_5 - S_4}{S_6} C_{11}^{(1)}\right) \frac{E_y}{E_c} M_6 + \left(C_{22}^{(1)} + \frac{S_5 - S_4}{2 S_6} C_{12}^{(1)}\right) \frac{E_y}{E_c} H_6 + \frac{B_{12}^{(1)}}{S_5} M_{59} + B_{21}^{(1)} H_{59} +$   
 $+ \frac{B_{13}^{(1)}}{S_5} M_{59} + B_{21}^{(1)} H_{59} + \frac{Q_3 R_3}{S_5} Q_5 - \left(\frac{S_5 - S_4}{2 S_6} C_{15}^{(1)} + C_{25}^{(1)}\right) \frac{E_y}{E_c} Q_6 -$   
 $- \left(\frac{S_5 - S_4}{2} C_{16}^{(1)} + C_{26}^{(1)} S_6\right) \frac{E_y}{E_c} P_1 + [\alpha_y (t - t_0) R_5 - \alpha_c (t_c - t_0) R_3] E_y;$

$$15) \frac{B_{11}^{(2)} E_Y}{S_2^2 E_K} M_2 + \frac{B_{12}^{(2)} E_Y}{S_2 E_K} H_2 + \frac{B_{13}^{(5)}}{S_5^2} M_{59} + \frac{B_{14}^{(5)}}{S_5} H_{59} + \frac{B_{11}^{(5)}}{S_5^2} M_{58} + \frac{B_{12}^{(5)}}{S_5} H_{58} = 0 ;$$

$$16) \left( \frac{B_{12}^{(2)}}{S_2} + \frac{B_{11}^{(2)} S_5}{S_2^2} \right) \frac{E_Y}{E_K} M_2 + \left( B_{22}^{(2)} + \frac{B_{12}^{(2)} S_5}{S_2} \right) \frac{E_Y}{E_K} H_2 - \frac{B_{14}^{(5)}}{S_5} M_{59} - B_{24}^{(5)} H_{59} - \frac{B_{12}^{(5)}}{S_5} M_{58} - B_{22}^{(5)} H_{58} + \frac{Q_3 R_5}{S_5} Q_5 = \frac{E_Y R_2}{E_K S_2} \left[ Q_3 \left( Q_K + \frac{R_6 Q_C}{R_2} \right) \rho_{EM} \right] + \left[ \alpha_Y (t_Y - t_0) R_2 - \alpha_X (t_K - t_0) R_2 \right] E_Y ;$$

$$17) M_{49} + M_{59} - (S_5 - S_6) H_{59} + M_6 + \frac{S_5 \cdot S_4}{2} H_6 + (R_5 - R_4) Q_5 = (R_6 - R_4) Q_C ;$$

$$18) H_{49} - H_{59} + H_6 = 0 ;$$

$$19) \frac{L_3 E_Y}{S_3 E_K} Q_3 - \frac{L_4}{S_4} Q_4 - \frac{L_5}{S_5} Q_5 = Q_3 \left( \frac{L_3 R_3 E_Y}{S_3 E_K} \rho_{EM} + \frac{L_4 R_4}{S_4} \rho_{EM} \right) + \left[ \alpha_Y (t_Y - t_0) - \alpha_X (t_K - t_0) \right] L_3 E_Y ;$$

$$20) R_3 Q_3 + R_4 Q_4 = R_1 Q_K ;$$

$$21) R_5 Q_5 - R_4 Q_4 = R_6 Q_C .$$

$$Q_2 = Q_K + \frac{Q_C R_6}{R_1} .$$

### 3.2.4. Расчет прочности

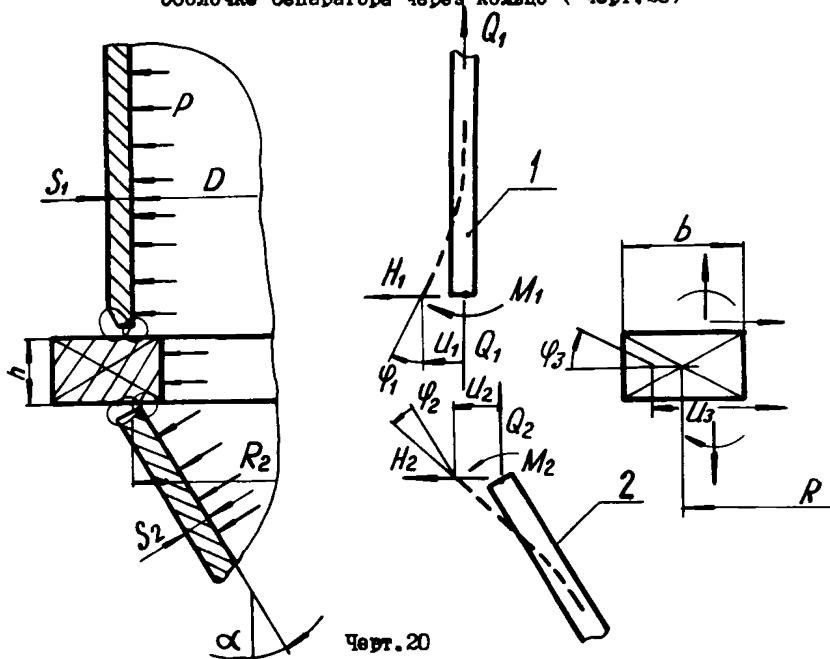
Расчет напряжений, возникающих в цилиндрических оболочках I, 2, 3, 4, 5 ( черт. I.9), производится по формулам п.3.3, а в конической 6- по формулам п.4.3. приложения I с учетом фактического направления действия нагрузок и толщины  $S = S_j - C$  .

Оценка прочности обечаек производится по формуле п. I.7.

Значения коэффициента  $K_\sigma$  принимаются по черт. I.8 в зависимости от принятого конструктивного исполнения.



3.3. Место крепления конической оболочки к цилиндрической оболочке сепаратора через кольцо ( черт.20)



Черт.20

3.3.1. Исходные данные

- $D, S_1$  - внутренний диаметр и толщина цилиндрической оболочки кокуха греющей камеры, мм;
- $S_2$  - толщина конической оболочки сепаратора, мм;
- $\alpha$  - половина угла при вершине конической оболочки,
- $R_2$  - радиус средней поверхности в основании конической оболочки, мм;
- $Q_1$  - осевая нагрузка цилиндрической оболочки, отнесенная к единице длины рассматриваемого сечения, н/мм;

- $h, b, R$  - высота, ширина и средний радиус кольца, мм ;  
 $t$  - расчетная температура, °С ;  
 $t_0$  - начальная температура, °С (  $t_0 = 20$  °С );  
 $a_u, a_c, a_k$  - коэффициенты линейного расширения материалов цилиндрической оболочки, конической оболочки, сепаратора и кольца,  
 $E_u, E_c, E_k$  - модули продольной упругости материалов цилиндрической оболочки, конической оболочки сепаратора и кольца, МПа;  
 $P$  - расчетное давление, МПа;  
 $[\sigma]$  - допускаемое напряжение, МПа. Принимается по ГОСТ 14249-80 или другой руководящей нормативной документации для каждой из рассчитываемых деталей.

3.3.2. Вспомогательные величины

3.3.2.1. Для цилиндрической оболочки 1 :

$$R_I = \frac{D + S_1}{2} ; \quad \omega_I = \sqrt[4]{\frac{2,73 \cdot R_1^2}{S_1^2}} ;$$

$$B_{II} = \frac{4 \cdot S_1}{R_1} \omega_I^3 ; \quad B_{I2} = 2 \omega_I^2 ; \quad B_{2I} = B_{I2} ; \quad B_{22} = \frac{2 R_1}{S_1} \omega_I .$$

3.3.2.2. Для конической оболочки 2 :

$$\omega_2 = \sqrt[4]{\frac{2,73 \cdot R_2^2}{S_2^2}} ; \quad C_{33} = 4 \omega_2 \sqrt{\frac{2,73}{\cos \alpha}} ; \quad C_{34} = 2 \omega_2^2 ;$$

$$\bar{C}_{35} = (C_{34} + \frac{1}{\cos \alpha}) t g \alpha ; \quad \bar{C}_{36} = \frac{2 R_2 t g \alpha}{S_2 \cos \alpha} ; \quad C_{44} = 2 \omega_2^3 \sqrt{\frac{\cos \alpha}{2,73}} ;$$

$$\bar{C}_{45} = C_{44} t g \alpha + \frac{0,3 R_2}{S_2 \cos \alpha} ; \quad \bar{C}_{46} = \frac{R_2^2}{S_2^2 \cos \alpha} .$$

3.3.3. Нагрузки

3.3.3.1. Для определения  $M_1, M_2, H_1, H_2$  необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений :

$$a_{11} M_1 + a_{12} M_2 + a_{13} H_1 S_1 + a_{14} H_2 S_2 = b_1 ,$$

$$a_{21} M_1 + a_{22} M_2 + a_{23} H_1 S_1 + a_{24} H_2 S_2 = b_2 ,$$

$$a_{31} M_1 + a_{33} H_1 S_1 + a_{34} H_2 S_2 = b_3 ,$$

Где

$$a_{42} M_2 + a_{43} H_1 S_1 + a_{44} H_2 S_2 - b_4 ,$$

$$a_{11} = 1 + A_1 B_{11} ; \quad a_{12} = -\frac{R_2}{R_1} ; \quad a_{13} = A_1 B_{12} - \frac{h}{2S_1} ;$$

$$a_{14} = \frac{R_2 h}{2R_1 S_2} ; \quad b_1 = (R_1 - R_2) \left( Q_1 - \frac{R_1^2 - R_2^2}{4R_1} \rho \right) ;$$

$$a_{21} = A_2 B_{11} ; \quad a_{22} = C_{33} ; \quad a_{23} = A_2 B_{12} ;$$

$$a_{24} = C_{34} ; \quad b_2 = \frac{\bar{C}_{35} S_2}{R_2} Q_1 R_1 - \left( \bar{C}_{36} + \frac{R_1^2 - R_2^2}{2R_2 S_2} \bar{C}_{35} \right) \rho S_2^2 ;$$

$$a_{31} = B_{12} + \frac{h}{2S_1} B_{11} ; \quad a_{33} = A_3 + B_{22} + \frac{h}{2S_1} B_{12} ; \quad a_{34} = A_3 \frac{R_2 S_1}{R_1 S_2} ;$$

$$b_3 = E_4 R_1 S_1 (\alpha_k - \alpha_0) (t - t_0) + A_3 \frac{2R-b}{2R_1} h S_1 \rho - R_1^2 \rho + 0,3 Q_1 R_1 ;$$

$$a_{42} = C_{34} + \frac{h}{2S_2} C_{33} ; \quad a_{43} = A_4 \frac{R_1 S_2}{R_2 S_1} ; \quad a_{44} = A_4 + C_{44} + \frac{h}{2S_2} C_{34} ;$$

$$b_4 = E_c R_2 S_2 (\alpha_k - \alpha_c) (t - t_0) + \frac{R_1 S_2}{R_2} \left( \bar{C}_{45} + \frac{h}{2S_2} \bar{C}_{35} \right) Q_1 +$$

$$+ \left[ A_4 \frac{2R-b}{2R_2} \frac{h}{S_2} - \bar{C}_{46} - \frac{h}{2S_2} \bar{C}_{36} - \frac{R_1^2 - R_2^2}{2R_2 S_2} \left( \bar{C}_{45} + \frac{h}{2S_2} \bar{C}_{35} \right) \right] \rho S_2^2 ;$$

$$A_1 = \frac{E_k b h^3}{12 E_4 R R_1 S_1^2} ; \quad A_2 = \frac{E_c S_2^2}{E_4 S_1^2} ; \quad A_3 = \frac{E_4 R R_1}{E_k b h} ; \quad A_4 = \frac{E_c R R_2}{E_k b h} .$$

### 3.3.3.2. Остальные нагрузки

$$Q_2 = \frac{R_1}{R_2} Q_1 - \frac{R_1^2 - R_2^2}{2R_2} \rho .$$

### 3.3.4. Расчет прочности

Расчет напряжений, возникающих в цилиндрической оболочке I (черт. 20), производится по формулам п. 3.3, а в конической оболочке 2- по формулам п. 4.3 приложения I с учетом фактического направления действия нагрузок и толщины  $S = S_i - C$  .

Оценка прочности обечеек производится по формулам п.1.7.

Значения коэффициента  $K_{\sigma}$  принимаются по черт. 18 в зависимости от принятого конструктивного исполнения.

## 4. РАСЧЕТ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

## 4.1. Фланцевое соединение сепаратора с кожухом греющей камеры ( черт. 2I )

При расчете на прочность выделяются кольца прямоугольного поперечного сечения ( 1,2 ), цилиндрические оболочки (3,4) и коническая оболочка ( 5 ).

## 4.1.1. Исходные данные

$R_1, R_2, R_n, R_k, R_c, R_f$  - средние радиусы фланцевых колец, прокладок, кожуха греющей камеры, конической оболочки сепаратора в месте присоединения к фланцевому кольцу и радиус болтовой окружности, соответственно, мм;

$b_1, b_2$  - ширина фланцевых колец, мм ;

$h_1, h_2$  - высота фланцевых колец, мм ;

$S_k, S_c, S_B$  - толщина цилиндрической оболочки кожуха ( 3 ), конической оболочки сепаратора ( 5 ) и верхней части кожуха ( 4 ), разделяющей трубное и межтрубное пространства, мм ;

$\alpha$  - половина угла при вершине конической оболочки сепаратора, град ;

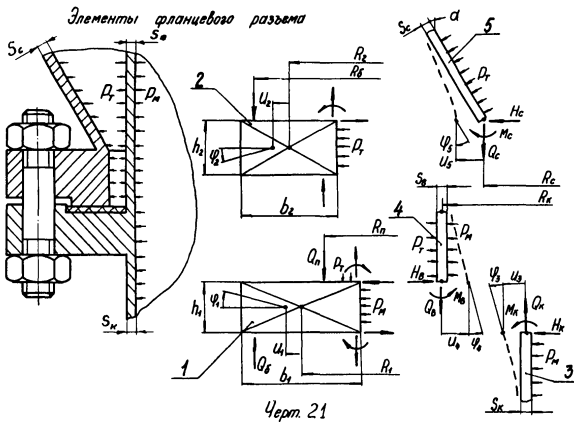
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_k, \alpha_c, \alpha_B$  - коэффициенты линейного расширения материалов фланцевых колец, болтов или шпилек, кожуха, сепаратора и верхней части кожуха,  $1/^\circ\text{C}$  ;

$t_f, t_B, t_k, t_c, t_B$  - расчетная температура фланцевых колец, болтов или шпилек, кожуха, сепаратора и верхней части кожуха,  $^\circ\text{C}$  ;

$t_0$  - начальная температура,  $^\circ\text{C}$  (  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  ) ;

$P_{T, M}$  - давление избыточное ( наружное со знаком минус ) в трубном и межтрубном пространствах, МПа ;

$E_1, E_2, E_k, E_c, E_B, E_f$  - модуль продольной упругости материалов фланцевых колец, кожуха, сепаратора, верхней части кожуха и болтов МПа. Принимается по ГОСТ 14249-80 или другой руководящей нормативной документации ;



- $Q_a$  - осевая нагрузка верхней части кокула, Н/мм. Определяется при расчете гребней камеры;
- $G_c$  - вес сепаратора, Н;
- $S_n$  - толщина прокладки, мм;
- $b_n$  - ширина прокладки в зоне сжатия, мм. Для резиновых прокладок принимается приведенная ширина по ОСТ 26-373-78;
- $E_n$  - модуль упругости материала прокладки, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78 или другой руководящей нормативной документации;
- $Y_n$  - линейная податливость прокладки, мм/Н ( $Y_n = S_n / 2\pi R_n b_n E_n$ );
- $q, [q]$  - минимальное и допускаемое удельное давление на прокладку, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78;
- $m$  - прокладочный коэффициент. Принимается по ОСТ 26-373-78;
- $n_\delta$  - количество болтов или шпилек;
- $d_\delta$  - диаметр болта или шпильки, мм;
- $l_\delta$  - расчетная длина болта ( $l_\delta = h_1 + h_2 + S_n + 0,3d_\delta$ ) или шпильки ( $l_\delta = h_1 + h_2 + S_n + 0,6d_\delta$ ), мм;
- $f_\delta$  - площадь поперечного сечения болта или шпильки, мм<sup>2</sup>, определяется по внутреннему диаметру резьбы;
- $Y_\delta$  - линейная податливость болтов или шпилек, мм/Н ( $Y_\delta = \frac{1}{2} / E_s f_s n_s$ );
- $[d]_\delta^{\text{20}}, [d]_\delta^t$  - допускаемое напряжение для материала болтов или шпилек при температуре 20° С и при расчетной температуре, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78 или другой руководящей нормативной документации;
- $Q_\delta^0$  - усилие затяжки болтов, Н/мм ( $Q_\delta^0 \leq n_\delta f_\delta [d]_\delta^{\text{20}} / 2\pi R_\delta$ );
- $[d]$  - допускаемое напряжение, МПа. Принимается по ГОСТ 14249-80 или другой руководящей нормативной документации для каждой из рассчитываемых деталей.

4.1.2. Помимо расчета коэффициентов  $V_{II}^K, V_{I2}^K, V_{22}^K$  при  $R = R_K$ ,  $S = S_K$ , коэффициентов  $V_{II}^B, V_{I2}^B, V_{22}^B$  при  $R = R_K$ ,  $S = S_B$  по п.3 приложения I и коэффициентов  $C_{II}, C_{I2}, C_{I5}, C_{I6}, C_{2I}, C_{22}, C_{25}, C_{26}$  по п.4 приложения I при  $R = R_C$ ,  $S = S_C$ , производится вычисление вспомогательных величин :

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \frac{b_1 h_1^3}{12}; & F_1 &= b_1 h_1; \\
 J_2 &= \frac{b_2 h_2^3}{12}; & F_2 &= b_2 h_2; \\
 A_1 &= 1 + \frac{E_1 F_1}{E_K R_K R_I} \left[ \frac{B_{22}^K (B_{II}^K)^2}{B_{II}^K} \right]; & A_2 &= 1 + \frac{E_1 F_1}{E_B R_K R_I} \left[ \frac{B_{22}^B (B_{I2}^B)^2}{B_{II}^B} \right]; \\
 A_3 &= 1 + \frac{E_2 F_2}{E_C R_C R_2} \left( C_{22} - \frac{C_{I2}^2}{C_{II}} \right); & B_1 &= 1 + \frac{2 B_{I2}^K S_K}{B_{II}^K h_1}; \\
 B_3 &= 1 + \frac{2 C_{2I} S_C}{C_{II} h_2}; & B_2 &= 1 + \frac{2 B_{I2}^B S_B}{B_{II}^B h_1}; & C_1 &= \frac{B_1 + A_1 B_2}{1 - A_1 A_2}; \\
 C_2 &= \frac{B_2 + A_2 B_1}{1 - A_1 A_2}; & R_3 &= \frac{R_C + R_K}{2}; \\
 J_{1np} &= J_1 \left[ 1 - \frac{F_1 h_1}{4 J_1} (B_1 C_2 + B_2 C_1) + \frac{R_1 R_K}{E_1 J_1} \left( \frac{E_K S_K^2}{B_{II}^K} + \frac{E_B S_B^2}{B_{II}^B} \right) \right]; \\
 J_{2np} &= J_2 \left[ 1 + \frac{F_2 h_2 B_3}{4 J_2 A_3} \left( 1 + \frac{2 C_{I2} S_C}{C_{II} h_2} \right) + \frac{E_C R_C S_C R_2}{E_2 J_2 C_{II}} \right]; \\
 \lambda_{\delta np} &= 2 \pi \mu_0 (R_\delta - R_n) \left[ \frac{R_1 (R_1 R_2)}{E_1 J_{1np}} + \frac{R_2 (R_2 - R_n)}{E_2 J_{2np}} \right]; \\
 \lambda_{np} &= 2 \pi \mu_n (R_\delta - R_n) \left[ \frac{R_1 (R_1 - R_n)}{E_1 J_{1np}} + \frac{R_2 (R_2 - R_n)}{E_2 J_{2np}} \right].
 \end{aligned}$$

#### 4.1.3. Расчет нагрузок

4.1.3.1. При затяжке болтов фланцевого разема

$$\begin{aligned}
 Q_C^0 &= -\frac{G_C}{2 \pi R_C}; & Q_K^0 &= -\frac{G_C}{2 \pi R_K}; \\
 M_{II}^0 &= -\frac{G_C (R_1 - R_K)}{2 \pi R_1}; & M_{2I}^0 &= -\frac{G_C (R_2 - R_C)}{2 \pi R_2};
 \end{aligned}$$



$$H_{11} = \frac{0,3E_1 F_1 Q_K^0}{E_K S_K R_1};$$

$$H_{21} = 0,$$

$$H_{\text{впр}} = \frac{H_{11} - A_1 H_{21}}{1 - A_1 A_2};$$

$$H_{\text{кпр}} = \frac{A_2 H_{11} - H_{21}}{1 - A_1 A_2};$$

$$M_{12} = M_{11} \frac{R_K h_1}{2R_1} (B_1 H_{\text{кпр}} + B_2 H_{\text{впр}}); \quad H_{\text{ср}} = \frac{E_2 F_2}{A_3 E_C R_C R_2} (C_{25} \frac{C_{21} C_{15}}{C_{11}}) Q_C^0;$$

$$M_{22} = M_{21} \frac{R_C S_C [C_{15} Q_C^0 + (C_{12} + \frac{h_2}{2S_C}) H_{\text{ср}}]}{C_{11}}; \quad Q_n^0 = \frac{R_\delta}{R_n} Q_\delta^0;$$

$$M_{1\text{пр}} = \frac{R_\delta}{R_1} (R_\delta - R_1) Q_\delta^0 + \frac{R_n}{R_1} (R_1 - R_n) Q_n^0 + M_{12}; \quad \varphi_1^0 = \frac{M_{1\text{пр}} R_1^2}{E_1 J_{1\text{пр}}}$$

$$M_{2\text{пр}} = \frac{R_\delta}{R_2} (R_\delta - R_2) Q_\delta^0 + \frac{R_n}{R_2} (R_2 - R_n) Q_n^0 + M_{22}; \quad \varphi_2^0 = \frac{M_{2\text{пр}} R_2^2}{E_2 J_{2\text{пр}}}$$

$$H_K^0 = \frac{E_1 F_1 h_1 C_2 \varphi_1^0 + H_{\text{впр}}}{2R_1 R_K};$$

$$H_B^0 = \frac{E_1 F_1 h_1 C_1 \varphi_1^0 + H_{\text{впр}}}{2R_1 R_K};$$

$$H_C^0 = \frac{E_2 F_2 h_2 B_2 \varphi_2^0 + H_{\text{ср}}}{2R_2 R_C A_3};$$

$$M_C^0 = \frac{1}{C_{11}} (E_C S_C^2 \varphi_2^0 + C_{12} H_C^0 S_C + C_{15} Q_C^0 S_C);$$

$$M_B^0 = \frac{1}{B_1^0} (E_B S_B^2 \varphi_1^0 + B_{12}^0 H_B^0 S_B);$$

$$M_K^0 = \frac{1}{B_{11}^0} (E_K S_K^2 \varphi_1^0 + B_{12}^0 H_K^0 S_K).$$

#### 4.1.3.2. Приращения нагрузок в расчетном состоянии

$$Q_C' = \frac{R_C P_T}{2};$$

$$Q_K' = Q_B + \frac{R_K P_T}{2};$$

$$M_{21}' = \frac{R_C^2 (R_2 - R_C) P_T}{2R_2};$$

$$M_{11}' = \frac{R_K^2 P_T (R_1 - R_K) + R_B P_T (R_C - R_K) (R_1 - R_3)}{2R_1};$$

$$H_{11} = \frac{E_1 F_1 (\alpha_K - \alpha_1) (t_K - t_0)}{R_1} - \frac{0,3E_1 F_1 Q_K'}{E_K S_K R_1} + \left( \frac{E_1 F_1 R_K}{E_K S_K R_1} - h_1 \right) P_M;$$

$$H_{21} = \frac{E_1 F_1 (\alpha_B - \alpha_1) (t_B - t_0)}{R_1} - \frac{E_1 F_1}{E_B S_B R_1} (0,3Q_B - R_K P_M + R_B P_T) - h_1 P_M;$$

$$H_{\text{впр}} = \frac{H_{11} - A_1 H_{21}}{1 - A_1 A_2};$$

$$H_{\text{кпр}} = \frac{A_2 H_{11} - H_{21}}{1 - A_1 A_2};$$

$$H_c = \frac{1}{A_3} \left[ \frac{E_2 F_2}{R_2} (d_2 - d_1) (t - t_0) - \frac{E_2 F_2}{E_c R_c R_2} \left( \frac{C_{15} C_{15}}{C_{11}} \right) Q_c' - \left[ \frac{E_2 F_2 S_c}{E_c R_c R_2} \left( \frac{C_{12} C_{16}}{C_{11}} \right) - h_2 \right] P_T \right];$$

$$M_{12} = M_{11} - \frac{R_x h_1}{2R_1} (B_2 H_{\text{всп}} + B_1 H_{\text{кпр}}); \quad \Delta \bar{f} = (d_1 h_1 + d_2 h_2) / (t_0 - t) - d_3 (h_1 + h_2) / (t_3 - t_0)$$

$$M_{22} = M_{21} - \frac{R_c S_c}{R_2} \left[ \frac{C_{15}}{C_{11}} Q_c' + \frac{C_{16}}{C_{11}} P_T S_c + \left( \frac{C_{12}}{C_{11}} + \frac{h_2}{2S_c} \right) H_{\text{кпр}} \right];$$

$$Q_\delta' = \frac{\Delta t + \lambda_{\text{кпр}} \frac{R_c^2 P_T}{2} - (R_\delta - R_n) \left( \frac{R_1^2 M_{12}}{E_1 J_{1\text{кпр}}} + \frac{R_2^2 M_{22}}{E_2 J_{2\text{кпр}}} \right)}{R_\delta (\lambda_{\delta\text{кпр}} + \lambda_{\text{кпр}})}; \quad Q_n' = \frac{R_\delta Q_\delta'}{R_n} - \frac{R_c^2 P_T}{2R_n};$$

$$M_{1\text{кпр}} = \frac{R_\delta Q_\delta'}{R_1} (R_\delta - R_1) + \frac{R_n Q_n'}{R_1} (R_1 - R_n) + M_{12}; \quad \varphi_1' = \frac{M_{1\text{кпр}} R_1^2}{E_1 J_{1\text{кпр}}};$$

$$M_{2\text{кпр}} = \frac{R_\delta Q_\delta'}{R_2} (R_\delta - R_2) + \frac{R_n Q_n'}{R_2} (R_2 - R_n) + M_{22}; \quad \varphi_2' = \frac{M_{2\text{кпр}} R_2^2}{E_2 J_{2\text{кпр}}};$$

$$H_K' = \frac{E_1 F_1 h_1 C_2}{2R_1 R_K} \varphi_1' + H_{\text{кпр}};$$

$$H_B' = \frac{E_1 F_1 h_1 C_1}{2R_1 R_K} \varphi_1' + H_{\text{всп}};$$

$$H_C' = \frac{E_2 F_2 h_2 B_3}{2R_2 R_C A_3} \varphi_2' + H_{\text{кпр}}; \quad M_B' = -\frac{1}{B_{11}^B} (E_B S_B^2 \varphi_1' + B_{12}^B H_B' S_B);$$

$$M_C' = -\frac{1}{C_n} (E_c S_c^2 \varphi_2' + C_{12} H_C' S_c + C_{15} Q_c' S_c + C_{16} P_T S_c);$$

$$M_K' = -\frac{1}{B_{11}^K} (E_K S_K^2 \varphi_1' + B_{12}^K H_K' S_K).$$

4.1.3.3. Значения нагрузок в расчетном состоянии определяются

по формулам:

$$Q_C = Q_C^0 + Q_C';$$

$$Q_K = Q_K^0 + Q_K';$$

$$Q_\delta = Q_\delta^0 + Q_\delta';$$

$$Q_n = Q_n^0 + Q_n';$$

$$H_C = H_C^0 + H_C';$$

$$H_K = H_K^0 + H_K';$$

$$H_B = H_B^0 + H_B';$$

$$M_C = M_C^0 + M_C';$$

$$M_K = M_K^0 + M_K';$$

$$M_B = M_B^0 + M_B'.$$

4.1.3.4. Углы поворота фланцев в расчетном состоянии определяются по формулам:

$$\varphi_1 = \varphi_1^{\circ} + \varphi_1', \quad \varphi_2 = \varphi_2^{\circ} + \varphi_2'.$$

4.1.4. Расчет деталей фланцевого разъема производится по формулам п.1.8.

4.1.5. Расчет прочности цилиндрических обечеек

Расчет напряжений, возникающих в цилиндрической оболочке (3), производится по формулам п.3.3 приложения I при  $S = S_K - C$ ;

$$Q = Q_K; M_1 = M_K; H_1 = H_K; P = P_M.$$

Расчет напряжений, возникающих в цилиндрической оболочке (1), производится по формулам п.3.3 приложения I при  $S = S_B - C$

$$Q = Q_B; M_1 = -M_B; H_1 = -H_B; P = P_M - P_T.$$

Расчет напряжений, возникающих в конической оболочке (5), производится по формулам п.4.3 приложения I при  $S = S_C - C$ ;

$$Q_1 = Q_C; M_1 = M_C; H_1 = H_C; P = P_T.$$

Оценка прочности обечеек производится по формулам п.1.7.

4.1.6. В случае приварки сепаратора к фланцу через цилиндрическую оболочку достаточно большой длины ( 3, черт.22) изменится ряд расчетных формул в приведенной выше методике.

Для цилиндрической оболочки 5 ( черт.22) по формулам п.3 приложения I имеем:

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{2,73 R_c^2}{S_c^2}}; \quad B_{11}^c = \frac{4 S_c}{R_c} \omega^3;$$

$$B_{12}^c = 2 \omega^2; \quad B_{22}^c = \frac{2 R_c}{S_c} \omega,$$

где  $S_c$  - толщина цилиндрической оболочки 5.

Значения вспомогательных величин:

$$A_3 = 1 + \frac{E_2 F_2}{E_c R_c R_2} \left[ B_{22}^c - \frac{(B_{12}^c)^2}{B_{11}^c} \right] ;$$

$$B_3 = 1 + \frac{2 B_{12}^c S_4}{B_{11}^c \cdot h_2} ;$$

$$J_{2np} = J_2 \left[ 1 + \frac{R_c \cdot R_2 \cdot E_c \cdot S_4^2}{E_2 \cdot B_{11}^c \cdot J_2} + \frac{F_2 \cdot h_2^2 \cdot B_3^2}{4 \cdot A_3 \cdot J_2} \right] .$$

Расчет нагрузок при затяжке болтов фланцевого соединения производится по формулам:

$$H_{c.np.} = \frac{0,3 E_2 \cdot F_2}{A_3 E_c \cdot S_4 R_2} Q_c^0 ;$$

$$M_{22} = M_{21} - \frac{R_c \cdot h_2 \cdot B_3}{2 R_2} H_{c.np.} ;$$

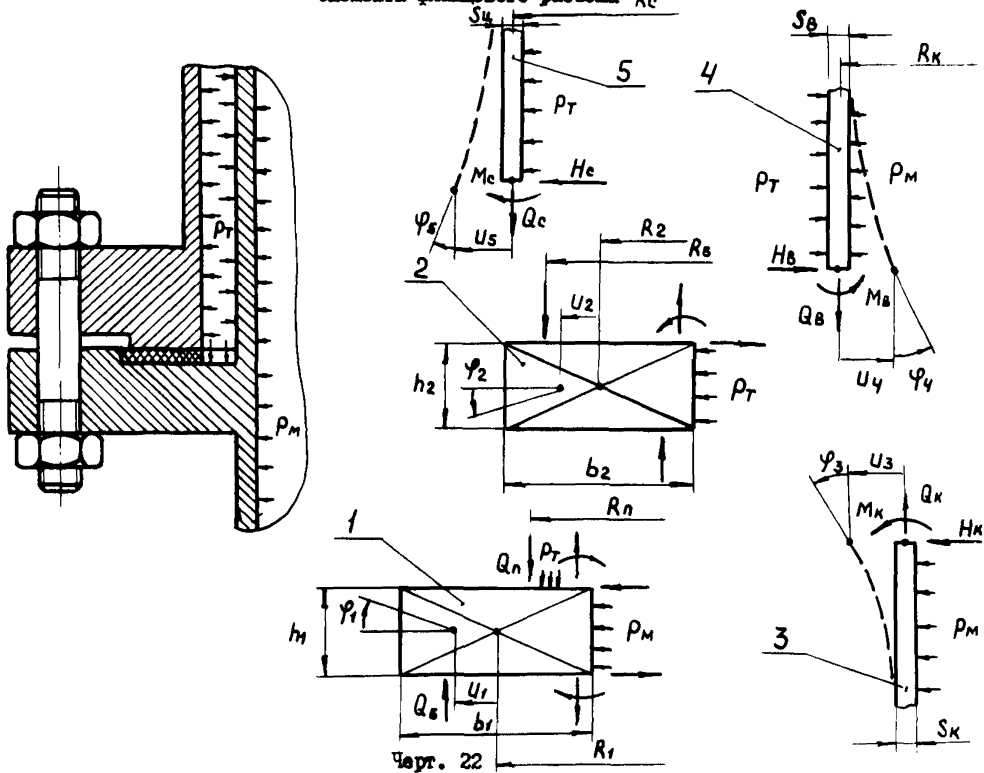
$$M_c^0 = -\frac{1}{B_{11}^c} (E_c \cdot S_4^2 \cdot \varphi_2^0 + B_{12}^c \cdot H_c^0 \cdot S_4) .$$

Приращение нагрузок в расчетном состоянии определяются по формулам

$$H_{cnp} = \frac{1}{A_3} \left[ \frac{E_2 F_2}{R_2} (\alpha_2 - \alpha_c) (t_c - t_0) + \frac{0,3 E_2 \cdot F_2}{E_c \cdot S_4 \cdot R_2} Q_c' + \left( h_2 - \frac{E_2 \cdot F_2 \cdot R_c}{R_2 \cdot E_c \cdot S_4} \right) \cdot P_T \right] ;$$

$$M_{22} = M_{21} - \frac{R_c \cdot h_2 \cdot B_3}{2 R_2} H_{cnp} ;$$

Элементы фланцевого разреза Rc



$$M'_c = -\frac{1}{B_c^c} (E_c S_4^2 \varphi'_2 + B_{12}^c H'_c S_4)$$

Остальные расчетные формулы совпадают с ранее приведенными.

4.1.7. В случае приварки сепаратора к фланцу через короткую цилиндрическую оболочку (черт. 23), в приведенной методике изменяются отдельные расчетные формулы и вводится ряд дополнительных величин.

Для короткой цилиндрической оболочки 6:

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{2,73 R_c^2}{S_4^2}}, \quad \lambda = L \sqrt[4]{\frac{2,73}{R_c^2 S_4^2}},$$

где  $S_4$ ,  $L$  - толщина стенки и высота рассматриваемой цилиндрической оболочки.

При  $0,3 \leq \lambda \leq 3$  :

$$B_{11}^4 = \frac{4S_4 \omega^3}{R_c} \varphi_{11}; \quad B_{12}^4 = 2\omega^2 \varphi_{12};$$

$$B_{13}^4 = \frac{4S_4 \omega^3}{R_c} \varphi_{13}; \quad B_{14}^4 = 4\omega^2 \varphi_{14};$$

$$B_{22}^4 = \frac{2R_c \omega}{S_4} \varphi_{22}; \quad B_{24}^4 = \frac{2R_c \omega}{S_4} \varphi_{24}.$$

Значения коэффициентов  $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}, \varphi_{22}, \varphi_{24}$  приведены в гл. 6 приложения I.

Значения вспомогательных величин :

$$\bar{B}_{11}^4 = -B_{11}^4 - C_{11} \frac{S_4^2}{S_c^2}; \quad \bar{B}_{12}^4 = B_{12}^4 - C_{12} \frac{S_4}{S_c};$$

$$\bar{B}_{21}^4 = -B_{12}^4 + C_{21} \frac{S_4}{S_c}; \quad \bar{B}_{22}^4 = B_{22}^4 + C_{22};$$

$$B_{15}^4 = C_{15} \frac{S_4^3}{S_c^2 R_c}; \quad B_{16}^4 = C_{16} \frac{S_4^2}{R_c^2};$$

$$B_{25}^4 = 0,3 + C_{25} \frac{S_4}{R_c}; \quad B_{26}^4 = 1 - C_{26} \frac{S_4 S_c}{R_c^2};$$



$$\bar{B}_{13}^4 = \frac{-B_{13}^4 \bar{B}_{22}^4 + B_{14}^4 \bar{B}_{12}^4}{\bar{B}_{11}^4 \bar{B}_{22}^4 - \bar{B}_{12}^4 \bar{B}_{21}^4} ; \quad \bar{B}_{23}^4 = \frac{-B_{14}^4 \bar{B}_{11}^4 + B_{13}^4 \bar{B}_{21}^4}{\bar{B}_{11}^4 \bar{B}_{22}^4 - \bar{B}_{12}^4 \bar{B}_{21}^4} ;$$

$$\bar{B}_{14}^4 = \frac{-B_{14}^4 \bar{B}_{22}^4 + B_{24}^4 \bar{B}_{12}^4}{\bar{B}_{11}^4 \bar{B}_{22}^4 - \bar{B}_{12}^4 \bar{B}_{21}^4} ; \quad \bar{B}_{24}^4 = \frac{-B_{24}^4 \bar{B}_{11}^4 + B_{14}^4 \bar{B}_{21}^4}{\bar{B}_{11}^4 \bar{B}_{22}^4 - \bar{B}_{12}^4 \bar{B}_{21}^4} ;$$

$$\bar{B}_{15}^4 = \frac{B_{15}^4 \bar{B}_{22}^4 + B_{25}^4 \bar{B}_{12}^4}{\bar{B}_{11}^4 \bar{B}_{22}^4 - \bar{B}_{12}^4 \bar{B}_{21}^4} ; \quad \bar{B}_{25}^4 = \frac{-B_{25}^4 \bar{B}_{11}^4 - B_{15}^4 \bar{B}_{21}^4}{\bar{B}_{11}^4 \bar{B}_{22}^4 - \bar{B}_{12}^4 \bar{B}_{21}^4} ;$$

$$\bar{B}_{16}^4 = \frac{B_{16}^4 \bar{B}_{22}^4 - B_{26}^4 \bar{B}_{12}^4}{\bar{B}_{11}^4 \bar{B}_{22}^4 - \bar{B}_{12}^4 \bar{B}_{21}^4} ; \quad \bar{B}_{26}^4 = \frac{B_{26}^4 \bar{B}_{11}^4 - B_{16}^4 \bar{B}_{21}^4}{\bar{B}_{11}^4 \bar{B}_{22}^4 - \bar{B}_{12}^4 \bar{B}_{21}^4}$$

$$\bar{A}_1 = B_{12}^4 - B_{14}^4 \bar{B}_{13}^4 + B_{24}^4 \bar{B}_{23}^4 ;$$

$$\bar{A}_2 = B_{22}^4 - B_{14}^4 \bar{B}_{14}^4 + B_{24}^4 \bar{B}_{24}^4 ;$$

$$\bar{A}_3 = -B_{14}^4 \bar{B}_{15}^4 + B_{24}^4 \bar{B}_{25}^4 - 0,3 ;$$

$$\bar{A}_4 = -B_{14}^4 \bar{B}_{16}^4 + B_{24}^4 \bar{B}_{26}^4 + 1 ;$$

$$A_1^* = B_{11}^4 - B_{13}^4 \bar{B}_{13}^4 + B_{14}^4 \bar{B}_{23}^4 ;$$



$$A_2^* = B_{12}^u - B_{13}^u \bar{B}_{14}^u + B_{14}^u \bar{B}_{24}^u ,$$

$$A_3^* = -B_{13}^u \bar{B}_{15}^u + B_{14}^u \bar{B}_{25}^u ;$$

$$A_4^* = -B_{13}^u \bar{B}_{16}^u + B_{14}^u \bar{B}_{26}^u ;$$

$$A_3 = 1 + \frac{E_2 F_2}{E_c R_c R_2} \left( \bar{A}_2 - \frac{\bar{A}_1 A_2^*}{A_1^*} \right) ;$$

$$B_3 = 1 + \frac{2\bar{A}_1 S_4}{A_1^* h_2} ;$$

$$J_{2np} = J_2 \left[ 1 + \frac{E_c S_4^2 R_c R_2}{E_2 J_2 A_1^*} + \frac{F_2 h_2^2 B_3}{4 A_3 J_2} \left( \frac{2 A_2^* S_4}{A_1^* h_2} + 1 \right) \right] .$$

Расчет нагрузок при затяжке болтов фланцевого соединения производится по формулам:

$$H_{4np} = \frac{E_2 F_2}{A_3 E_c S_4 R_2} \left( \frac{\bar{A}_1 A_3^*}{A_1^*} - \bar{A}_3 \right) Q_c^\circ ;$$

$$M_{22} = M_{21} - \frac{R_c}{R_2} \left[ \frac{A_3^* R_c}{A_1^*} Q_c^\circ + \left( \frac{A_2^* S_4}{A_1^*} + \frac{h_2}{2} \right) H_{4np} \right] ;$$

$$H_4^\circ = \frac{E_2 F_2 h_2 B_3}{2 R_2 R_c A_3} \varphi_2^\circ + H_{4np} ;$$

$$M_4^\circ = - \frac{1}{A_1^*} (E_c S_4^2 \varphi_2^\circ + A_2^* H_4^\circ S_4 + A_3^* Q_c^\circ R_c) ;$$

$$H_c^\circ = \frac{1}{S_4} (\bar{B}_{23}^u M_4^\circ + \bar{B}_{24}^u H_4^\circ S_4 + \bar{B}_{25}^u Q_c^\circ R_c) ;$$

$$M_c^\circ = \bar{B}_{13}^u M_4^\circ + \bar{B}_{14}^u H_4^\circ S_4 + \bar{B}_{15}^u Q_c^\circ R_c .$$

Приращение нагрузок в расчетном состоянии определяются по формулам.

$$H_{4np} = \frac{1}{A_3} \left\{ \frac{E_2 F_2}{R_2} (\alpha_2 - \alpha_c)(t_c - t_0) + \frac{E_2 F_2}{E_c R_2 S_4} \left( \frac{\bar{A}_1 A_3^*}{A_1^*} - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -\bar{A}_3) Q'_C + \left[ \frac{E_2 F_2 R_C}{E_C S_4 R_2} \left( \frac{\bar{A}_1 A_4^*}{A_1^*} - \bar{A}_4 \right) + h_2 \right] P_T \Big\} ; \\
 M_{22} &= M_{21} - \frac{R_C}{R_2} \left[ \frac{A_3 R_C}{A_1^*} Q'_C + \frac{A_4 R_C}{A_1^*} P_T + \left( \frac{A_2^* S_4}{A_1^*} + \frac{h_2}{2} \right) H_{4np} \right] ; \\
 H'_4 &= \frac{E_2 F_2 h_2 B_3}{2 R_2 R_C A_3} \varphi'_2 + H_{4np} ; \\
 M'_4 &= -\frac{1}{A_1^*} \left( E_C S_4^2 \varphi'_2 + A_2^* H'_4 S_4 + A_3^* Q'_C R_C + A_4^* P_T R_C^2 \right) ; \\
 H'_C &= \frac{1}{S_4} \left( \bar{B}_{23}^4 M'_4 + \bar{B}_{24}^4 H'_4 S_4 + \bar{B}_{25}^4 Q'_C R_C + \bar{B}_{26}^4 P_T R_C^2 \right) , \\
 M'_C &= \bar{B}_{13}^4 M'_4 + \bar{B}_{14}^4 H'_4 S_4 + \bar{B}_{15}^4 Q'_C R_C + \bar{B}_{16}^4 P_T R_C^2 .
 \end{aligned}$$

Остальные расчетные формулы совпадают с ранее приведенными.

#### 4.2. Двухстороннее фланцевое соединение на шпильках (черт.24)

Рассматриваемая конструкция фланцевого соединения состоит из фланцевых колец (1,2) с привалочными к ним цилиндрическими оболочками и прокладкой (3), зажатой между ними с помощью шпилек (4).

##### 4.2.1. Исходные данные

$R_1, R_2, R_{K1}, R_{K2}, R_{M1}, R_{M2}, R_{\delta}$  — средние радиусы цилиндрических оболочек, фланцевых колец, прокладок в местах их сжатия и радиус болтовой окружности, соответственно, мм ;

$S_1, S_2, S_n$  — толщины цилиндрических оболочек, присоединенных к фланцевым кольцам и прокладки, мм ;

$b_1, b_2, b_{M1}, b_{M2}$  — ширина первого и второго фланцевых колец и прокладок в местах их сжатия, мм ;

$h_1, h_2, h_K$  — высота колец и канавки на кольце для формирования плоскостей обжатия прокладок, мм ;

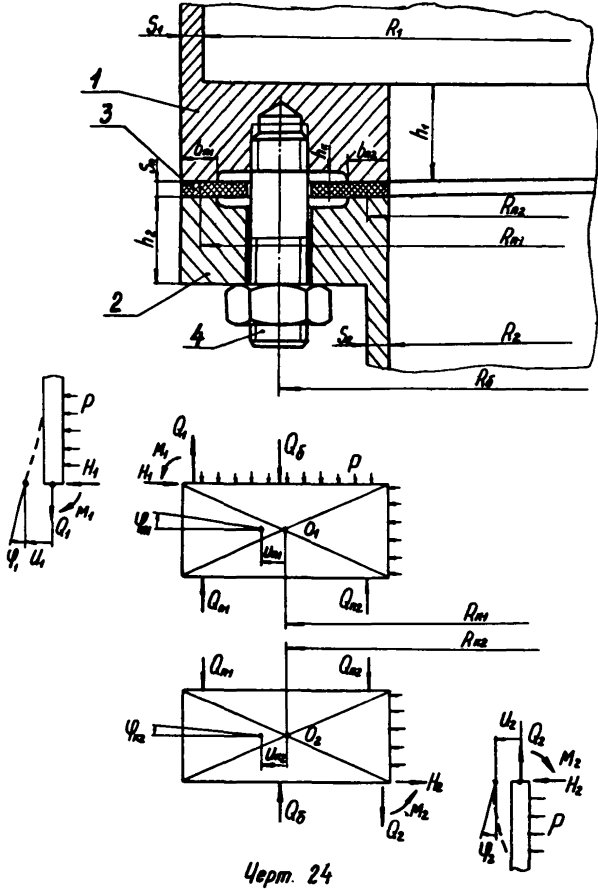
$d_{\delta}$  — диаметр шпильки, мм

$n_{\delta}$  — количество шпилек ;

$f_{\delta}$  — площадь поперечного сечения шпильки, мм<sup>2</sup>. Определяется по внутреннему диаметру резьбы ;

$t_1, t_2, t_{K1}, t_{K2}, t_{\delta}, t_0$  — расчетные температуры цилиндрических оболочек, фланцевых колец, шпилек и начальная температура ( $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ), соответственно,  $^{\circ}\text{C}$  ;

Двухпарное фронтальное соединение на шпильках



Черт. 24

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{K1}, \alpha_{K2}, \alpha_{\delta}$  - коэффициенты линейного расширения материалов цилиндрических оболочек, фланцевых колец и шпилек,  $1/^\circ\text{C}$  ;

$E_1, E_2, E_{K1}, E_{K2}, E_{\delta}$  - модули продольной упругости материалов цилиндрических оболочек, фланцевых колец и шпилек, МПа ;

$E_n$  - модуль упругости материала прокладки, МПа ;

$P$  - расчетное давление, МПа ;

$[\sigma]_{\delta}^{20}, [\sigma]_{\delta}^T$  - допускаемое напряжение для материала шпилек при температуре  $20^\circ\text{C}$  и при расчетной температуре, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78 или другой руководящей нормативной документации ;

$[q]$  - допускаемое удельное давление на прокладку, МПа.  
Принимается по ОСТ 26-373-78 ;

$q$  - минимальное удельное давление, необходимое для обжатия прокладки, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78 ;

$m$  - прокладочный коэффициент. Принимается по ОСТ 26-373-78 ;

$[\sigma]$  - допускаемое напряжение, МПа. Принимается по ГОСТ 14249-80 или другой руководящей нормативной документации для каждой из рассчитываемых деталей.

#### 4.2.2. Вычисление вспомогательных величин

Для цилиндрической оболочки, примыкающей к фланцу I,

$$\omega_1 = \sqrt[4]{\frac{2,73R_1^2}{S_1^2}} ; \quad V_{11}^1 = \frac{4\omega_1 \omega_1^3}{R_1} ;$$

$$V_{12}^1 = 2\omega_1^2 ; \quad V_{22}^1 = \frac{2R_1 \omega_1}{S_1} .$$

Для цилиндрической оболочки, примыкающей к фланцу 2,

$$\omega_2 = \sqrt[4]{\frac{2,73 R_2^3}{S_2^2}}; \quad V_{II}^2 = \frac{4 S_2 \omega_2^3}{R_2};$$

$$V_{I2}^2 = 2 \omega_2^2; \quad V_{22}^2 = \frac{2 R_2 \omega_2}{S_2}.$$

Для колец I<sub>3</sub> и 2

$$I_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12}; \quad F_1 = b_1 h_1;$$

$$I_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12}; \quad F_2 = b_2 h_2.$$

Для шпилек

$$I_5 = h_2 + S_n + h_x + 0,6 d_5; \quad Y_5 = \frac{I_5}{E_5 f_5 n_5}$$

Для прокладок

$$Y_n = \frac{S_n}{2\pi R_{n1} b_{n1} E_n}; \quad Y_{n2} = \frac{S_n}{2\pi R_{n2} b_{n2} E_n}.$$

#### 4.2.3. Расчет нагрузок

4.2.3.1. При затяжке шпилек

$$N_3 \leq n_5 f_5 [\sigma]_5^{20}; \quad Q_{50} = \frac{N_3}{2\pi R_5};$$

$$Q_{n10} = \frac{N_3 (R_5 - R_{n2})}{2\pi R_{n1} (R_{n1} - R_{n2})}; \quad Q_{n20} = \frac{N_3 (R_{n1} - R_5)}{2\pi R_{n2} (R_{n1} - R_{n2})}.$$

4.2.3.2. Расчет нагрузок, возникающих в расчетном состоянии, произ-

водится по формулам:

$$Q_1 = \frac{R_1 P}{2}; \quad Q_2 = \frac{R_2 P}{2};$$

$$Q_{n1} = Q_{n10} + Q_{n11}; \quad Q_{n2} = Q_{n20} + Q_{n21};$$

$$Q_5 = Q_{50} + Q_{51}.$$

Значения приращений нагрузок  $Q_{51}, Q_{n11}, Q_{n21}, M_1, H_1, M_2, H_2$ , возникающих при переходе фланцевого разъема из состояния затяжки в расчетное состояние, определяются при решении следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$1) \quad Q_5 R_5 - Q_{n11} R_{n1} - Q_{n21} R_{n2} = \frac{P R_2^2}{2},$$

$$2) \quad (A_2 + A_3) Y_5 Q_5 R_5 + A_2 Y_{n1} Q_{n11} R_{n1} + A_3 Y_{n2} Q_{n21} R_{n2} = -\frac{A_2 + A_3}{2 J_1} \Delta t;$$

$$3) -A_3 \sqrt{Q_0 R_0} - A_3 \sqrt{R_0} Q_{02} R_{02} B'_{11} M_1 + B'_{12} H_1 S_1 - A_1 B'^2_{11} M_2 + A_1 B'^2_{12} H_2 S_2 = A_3 \Delta_4 / 2 \pi ;$$

$$4) \frac{R_0 - R_{K1}}{R_1} Q_{01} R_0 - \frac{R_{11} - R_{K1}}{R_1} Q_{111} R_{11} + \frac{R_{K1} - R_{12}}{R_1} Q_{221} R_{12} + (1 + A_4 B'_{11}) M_1 + (A_4 B'_{12} - A_0) H_1 S_1 = \frac{R_1 - R_{K1}}{2} P R_1 ,$$

$$5) (B'_{12} + A_0 B'_{11}) M_1 + (B'_{22} + A_0 B'_{12} + \frac{A_0 R_1}{S_1}) H_1 S_1 - E_1 R_1 S_1 (\alpha_{K1} - \alpha_1) (t_1 - t_0) + [A_5 \frac{(2R_{K1} - b_2) h_1}{2R_1^2} - 0,85] P R_1^2 ,$$

$$6) \frac{R_{K2} - R_2}{R_2} Q_{01} R_0 + \frac{R_{11} - R_{K2}}{R_2} Q_{111} R_{11} - \frac{R_{K2} - R_{12}}{R_2} Q_{221} R_{12} + (1 + A_6 B'^2_{11}) M_2 + (A_9 - A_6 B'^2_{12}) H_2 S_2 = \frac{R_{K2} - R_2}{2} P R_2 ,$$

$$7) (B'^2_{12} + A_9 B'^2_{11}) M_2 - (B'^2_{22} + A_9 B'^2_{12} + \frac{A_7 R_2}{S_2}) H_2 S_2 = -E_2 R_2 S_2 (\alpha_2 - \alpha_{K2}) (t_2 - t_0) + [0,85 - A_7 \frac{(2R_{K2} - b_2) h_2}{2R_2^2}] P R_2^2 ,$$

где  $\Delta_1 = [\alpha_0 (t_0 - t_0) - \alpha_{K0} (t_{K0} - t_0)] / h_0 ; \quad A_1 = \frac{E_1 S_1^2}{E_2 S_2^2} ;$

$$A_2 = \frac{E_1 S_1^2}{R_{11} - R_0} 2 \pi ; \quad A_3 = \frac{E_1 S_1^2}{R_0 - R_{12}} 2 \pi ;$$

$$A_4 = \frac{E_{K1} I_1}{E_1 R_1 S_1 R_{K1}} ; \quad A_5 = \frac{E_1 S_1 R_{K1}}{E_{K1} F_1} ;$$

$$A_6 = \frac{E_{K2} I_2}{E_2 R_2 S_2 R_{K2}} ; \quad A_7 = \frac{E_2 S_2 R_{K2}}{E_{K2} F_2} ;$$

$$A_8 = \frac{h_1}{2 \omega_1} ; \quad A_9 = \frac{h_2}{2 \omega_2} .$$

4.2.4. Расчет прочности цилиндрических оболочек производится по формулам п. 1.7. Расчет деталей фланцевого соединения по формулам п. 1.8 при  $P_7 = P$ .

## 4.3. Двухопорное фланцевое соединение на болтах (черт.25)

Рассматриваемая конструкция фланцевого соединения состоит из фланцевых колец (1) с присоединенными к ним цилиндрическими оболочками (2) и прокладки (3), зажатой между кольцами с помощью болтов (4).

## 4.3.1. Исходные данные

$D, D_N, D_{1N}, D_{2N}, D_{1B}, D_{2B}, D_B$  - внутренний диаметр цилиндрической оболочки, наружный диаметр фланцевого кольца, наружный и внутренний диаметры наружной опорной части прокладки, наружный и внутренний диаметры внутренней опорной части прокладки и диаметр болтовой окружности, соответственно, мм ;

$S, S_n$  - толщина цилиндрической оболочки и прокладки, мм ;

$h_\phi, h_k$  - высота фланца и канавки в нем, мм ;

$d_B$  - диаметр болта, мм ;

$n_B$  - количество болтов ;

$t, t_\phi, t_B, t_o$  - расчетная температура цилиндрической оболочки, фланца, болтов и начальная температура, °С  
(  $t_o = 20$  °С ) ;

$\alpha, \alpha_\phi, \alpha_B$  - коэффициенты линейного расширения материалов цилиндрической оболочки, фланца и болтов, 1/°С ;

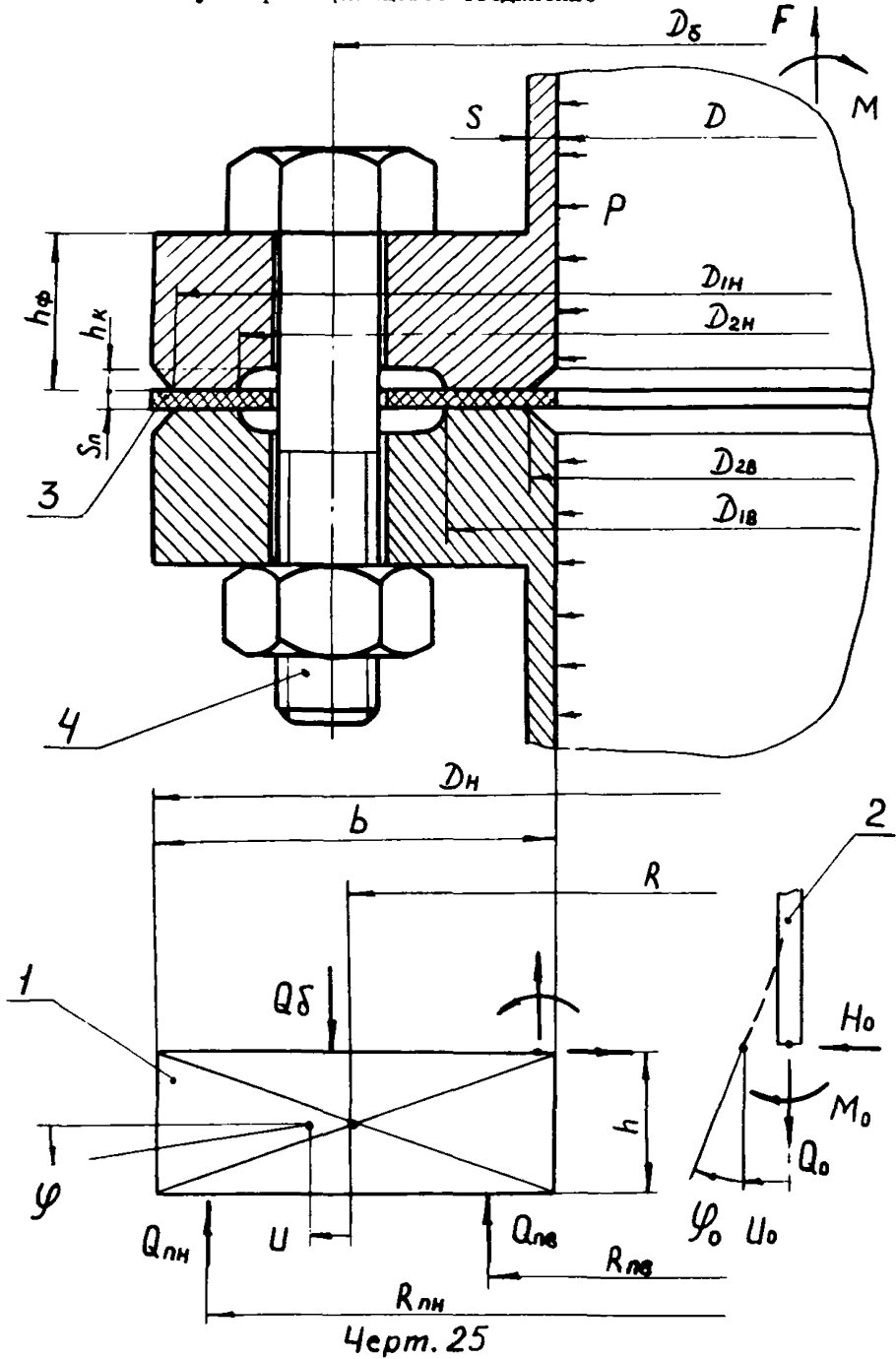
$E, E_\phi, E_B, E_n$  - модули продольной упругости материалов цилиндрической оболочки, фланца, болтов и прокладки, МПа .

Принимается по ГОСТ 14249-80, ОСТ 26-373-78 или другой руководящей нормативной документации ;

$[\sigma]_B^{20}, [\sigma]_B^t$  - допускаемое напряжение для материала болтов при температуре 20 °С и при расчетной температуре, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78 или другой руководящей нормативной документации ;

$[\sigma]$  - допускаемое напряжение, МПа. Принимается по ГОСТ 14249-80 или другой руководящей нормативной документации для каждой из рассчитываемых деталей ;

Двухпорное фланцевое соединение





- $q, [q]$  - минимальное и допускаемое удельное давление на прокладку, МПа. Принимается по ОСТ 26-373-78 ;
- $m$  - прокладочный коэффициент. Принимается по ОСТ 26-373-78;
- $P$  - расчетное давление, МПа ;
- $F$  - внешняя нагрузка, растягивающая фланцевое соединение (сжимающая со знаком минус), Н ;
- $M$  - внешний изгибающий момент, действующий на фланцевое соединение, Н·мм.

#### 4.3.2. Рекомендации по конструированию

При выборе наружного диаметра и толщины фланцевых колец необходимо удовлетворить следующие условия:

$$\frac{D_H}{D} \leq 2, \quad \frac{h}{b} \geq 0,25,$$

где  $h = h_{\phi} - h_K, \quad b = \frac{D_H - D}{2}.$

При выборе болтов и площади прокладки, находящейся в зоне сжатия, необходимо удовлетворить следующие условия:

$$\frac{Q_{\delta}^{\circ} R_{\delta}}{R_{\text{пв}} b_{\text{пв}} + R_{\text{пн}} b_{\text{пн}}} \geq q, \quad \frac{Q_{\delta}^{\circ} R_{\delta}}{R_{\text{пв}} b_{\text{пв}} + R_{\text{пн}} b_{\text{пн}}} \leq [q],$$

где  $Q_{\delta}^{\circ} \leq \frac{n_{\delta} f_{\delta} [\sigma]_{\delta}^{20}}{2\pi R_{\delta}}; \quad f_{\delta} = \frac{\pi d_{\delta}^2}{4}; \quad R_{\delta} = \frac{D_{\delta}}{2};$

$$R_{\text{пв}} = \frac{D_{1B} + D_{2B}}{4}; \quad b_{\text{пв}} = \frac{D_{1B} - D_{2B}}{2};$$

$$R_{\text{пн}} = \frac{D_{1H} + D_{2H}}{4}; \quad b_{\text{пн}} = \frac{D_{1H} - D_{2H}}{2}.$$

#### 4.3.3. Расчет нагрузок

4.3.3.1. При затяжке болтов нагрузки составных деталей фланцевого соединения определяются по формулам:

$$Q_0^{\circ} = 0, \quad H_0^{\circ} = P_3 E S \varphi^{\circ}, \quad M_0^{\circ} = -P_4 E S R_0 \varphi^{\circ},$$

$$Q_{nb}^{\circ} = \frac{b_{nb}}{R_{nb} b_{nb} + R_{nn} b_{nn}} \left[ Q_{\delta}^{\circ} R_{\delta} - \frac{2E_n (R_{nn} - R_{nb}) R_{nb} b_{nn}}{S_n} \varphi^{\circ} \right],$$

$$Q_{nn}^{\circ} = \frac{b_{nn}}{R_{nb} b_{nb} + R_{nn} b_{nn}} \left[ Q_{\delta}^{\circ} R_{\delta} + \frac{2E_n (R_{nn} - R_{nb}) R_{nb} b_{nb}}{S_n} \varphi^{\circ} \right],$$

где  $R = \frac{D+D_n}{4}$ ;  $R_0 = \frac{D+S}{2}$ ;  $\omega = \sqrt[4]{\frac{2,73R_0^2}{S^2}}$ ;

$$\rho_1 = \frac{h\omega}{R_0}; \quad \rho_2 = \frac{ERS}{E_{\varphi} R_0 b}; \quad \rho_3 = \frac{\rho_1 (1 + \rho_1)}{2\omega^2 (\rho_1 + \rho_2)};$$

$$\rho_4 = \frac{\rho_1 (2 + \rho_1) + \rho_2}{4\omega^3 (\rho_1 + \rho_2)}; \quad A_0 = \frac{3\rho_2}{\rho_1^3} \frac{2\rho_1 + 2\rho_1^2 + \rho_1^3 + \rho_2}{\rho_1 + \rho_2};$$

$$A_n = \frac{24E_n R (R_{nn} - R_{nb}) R_{nb} b_{nb} R_{nn} b_{nn}}{E_{\varphi} b h^3 S_n (R_{nb} b_{nb} + R_{nn} b_{nn})}; \quad e_{\delta} = R_{\delta} - \frac{R_{nb}^2 b_{nb} + R_{nn}^2 b_{nn}}{R_{nb} b_{nb} + R_{nn} b_{nn}};$$

$$\varphi^{\circ} = \frac{12RR_{\delta}e_{\delta} Q_{\delta}^{\circ}}{E_{\varphi} b h^3 (1 + A_0 + A_n)}.$$

4.3.3.2. Прямые нагрузки, вызванные внешними воздействиями на фланцевое соединение, определяются по формулам:

$$Q_0' = \frac{P_{np} D^2}{2R_0}, \quad H_0' = \rho_3 ES \varphi' + \rho_5 [0,3Q_0' - (1 - \rho_2) PR_0 + Q_T],$$

$$M_0' = -\rho_4 ESR_0 \varphi' + \rho_6 [(1 - \rho_2) PR_0^2 - 0,3Q_0' R_0 - Q_T R_0],$$

$$Q_{nb}' = \frac{b_{nb}}{f_{np}} \left( \frac{\Delta t - 2e_{\delta} \varphi'}{2\pi \gamma_{\delta}} - Q_0' R_0 \right), \quad Q_{nn}' = \frac{b_{nn}}{f_{np}} \left( \frac{\Delta t + 2e_n \varphi'}{2\pi \gamma_{\delta}} - Q_0' R_0 \right),$$

$$Q_{\delta}' = \frac{\Delta t - 2(R_{\delta} - R_{nb}) \varphi'}{2\pi \gamma_{\delta} R_{\delta}} - \frac{f_{nn} Q_{nb}'}{R_{\delta} b_{nb}},$$

$$\text{где } P_{np} = P + \frac{1}{\pi D^2} (F + \frac{2M}{R_0}); \quad Q_t = (\alpha_\varphi - \alpha) (t - t_0) ES;$$

$$\Delta_t = 2h_\varphi [\alpha_\varphi (t_\varphi - t) - \alpha_\delta (t_\delta - t_0)]; \quad l_\delta = 2h_\varphi + S_n + 0,3 d_\delta;$$

$$y_\delta = \frac{l_\delta}{E_\delta f_\delta m_\delta}; \quad f_{\delta n} = \frac{S_n}{2\pi y_\delta E_n}; \quad f_{np} = f_{\delta n} + R_{n\delta} b_{n\delta} + R_{m\delta} b_{m\delta};$$

$$e_{\delta} = R_\delta - R_{n\delta} + \frac{R_{m\delta} - R_{n\delta} R_{m\delta} b_{m\delta}}{f_{\delta n}}; \quad e_n = R_{m\delta} - R_\delta + \frac{R_{m\delta} - R_{n\delta} R_{m\delta} b_{n\delta}}{f_{\delta n}};$$

$$e_o = \frac{R_{n\delta} b_{n\delta} + R_{m\delta} b_{m\delta} + R_\delta f_{\delta n}}{f_{np}} - R_o; \quad \bar{e}_\delta = \frac{R_{n\delta} b_{n\delta} (R_\delta - R_{n\delta}) - R_{m\delta} b_{m\delta} (R_{m\delta} - R_\delta)}{f_{np}};$$

$$A_\delta = \frac{24 R_\delta [R_{n\delta} b_{n\delta} (R_\delta - R_{n\delta}) + R_{m\delta} b_{m\delta} (R_{m\delta} - R_\delta)]^2}{2\pi y_\delta E_\varphi b h^3 f_{np}}; \quad \bar{A}_n = \frac{24 E_n R (R_{m\delta} - R_{n\delta})^2 R_{n\delta} b_{n\delta} R_{m\delta} b_{m\delta}}{E_\varphi b h^3 S_n f_{np}};$$

$$\beta_\delta = \frac{h}{R_o (\beta_1 + \beta_2)}; \quad \beta_o = \frac{\rho_1}{2\omega^2 (\beta_1 + \beta_2)};$$

$$M' = \beta_\delta (1 + \beta_1) [(1 - \beta_2) P R_o - Q_t - 0,3 Q_o'] R_o^2 + \frac{\bar{e}_\delta \Delta_t}{2\pi y_\delta} + Q_o' R_o e_o,$$

$$\varphi' = \frac{12 R M'}{E_\varphi b h^3 (1 + A_o + \bar{A}_n + A_\delta)}.$$

4.3.3.3. Нагрузки деталей фланцевого соединения в расчетном состоянии определяются по формулам:

$$Q_\delta = Q_\delta^o + Q_\delta'; \quad Q_{n\delta} = Q_{n\delta}^o + Q_{n\delta}'; \quad Q_{m\delta} = Q_{m\delta}^o + Q_{m\delta}';$$

$$Q_o = Q_o'; \quad H_o = H_o^o + H_o'; \quad M_o = M_o^o + M_o'.$$

Угол поворота фланца определяется по формуле

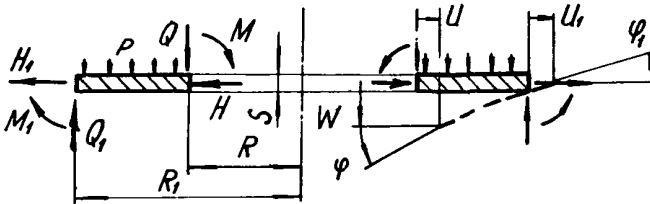
$$\varphi = \varphi^o + \varphi'.$$

4.3.4. Расчет прочности цилиндрической оболочки производится по формулам п. I.7. Расчет деталей фланцевого соединения - по формулам п. I.8 при  $P_t = P$ .

ПРИЛОЖЕНИЕ I  
Обязательное

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ИСПОЛЗУЕМЫХ ДЕТАЛЯХ

I. Кольцевая пластина ( черт. I )



Черт. I

I.1. Деформации:

$$W = \frac{R^2}{D} (A_{11} Q R + A_{12} M + A_{13} M_1 + A_{14} P R_1^2) ,$$

$$\varphi = \frac{R}{D} (A_{12} Q R + A_{22} M + A_{23} M_1 + A_{24} P R_1^2) ,$$

$$\varphi_1 = \frac{R}{D} \beta_n (A_{13} Q R + A_{23} M + A_{33} M_1 + A_{34} P R_1^2) ,$$

$$U = \frac{R}{D_M} (A_{22} H + A_{23} H_1) ,$$

$$U_1 = \frac{R}{D_M} \beta_n (A_{23} H + A_{33} H_1) .$$

I.2. Вспомогательные величины:

$$A_{11} = \frac{(1-\beta_n^2)(\beta+1)(1-\nu)\beta_n^2 + 4A_n^2}{8(1-\nu^2)\beta_n^4} ; \quad A_{12} = \frac{(1-\nu)\beta_n^2 - 2A_n}{2(1-\nu^2)\beta_n^3} ;$$

$$\begin{aligned}
 A_{12} &= \frac{1-\nu-2A_n}{2(1-\nu^2)\beta_n^2}; & A_{14} &= \frac{(1-\beta_n^2)\{(1-\nu)[5+\nu-(7+3\nu)\beta_n^2]-4A_n(3\nu+4A_n)\}}{84(1-\nu^2)\beta_n^2}; \\
 A_{22} &= \frac{1+\nu+(1-\nu)\beta_n^2}{(1-\nu^2)(1-\beta_n^2)}; & A_{23} &= \frac{2}{(1-\nu^2)(1-\beta_n^2)}; \\
 A_{24} &= \frac{3+\nu-(1-\nu)\beta_n^2+4A_n}{8(1-\nu^2)}; & A_{33} &= \frac{1-\nu+(1+\nu)\beta_n^2}{(1-\nu^2)(1-\beta_n^2)\beta_n^2}; \\
 A_{34} &= \frac{1-\nu+\beta_n^2(1+3\nu+4A_n)}{8(1-\nu^2)\beta_n^2}; & A_n &= \frac{(1+\nu)\beta_n^2 L_n \beta_n}{1-\beta_n^2}; \\
 D &= \frac{ES^3}{12(1-\nu^2)}; & D_m &= \frac{ES}{1-\nu^2}; & \beta_n &= \frac{R}{R_1}.
 \end{aligned}$$

Значения коэффициентов  $A_{11} \cdot A_{12} \cdot A_{13} \cdot A_{14} \cdot A_{22} \cdot A_{23} \cdot A_{24} \cdot A_{33} \cdot A_{34}$  при  $\nu = 0,3$  приведены в табл. I.

1.3. Расчет напряжений, возникающих на наружном и внутреннем контурах пластины, производится по формулам:

- мембранные напряжения в радиальном направлении

$$\sigma_m = \frac{H_1}{S}, \quad \sigma_m = -\frac{H}{S};$$

- изгибные напряжения на верхней и нижней поверхностях

$$\sigma_u = \mp \frac{6M}{S^2}, \quad \sigma_u = \pm \frac{6M}{S^2};$$

- касательные напряжения на торцах

$$\tau = \frac{[Q]}{S}, \quad \tau = \frac{[Q]}{S}.$$

Здесь

$$Q_1 = \frac{R}{R_1} Q + \frac{R_1^2 - R^2}{2R_1} P.$$

Таблица I

Значения коэффициентов  $\Lambda_{II}, \Lambda_{I2}, \Lambda_{I3}, \Lambda_{I4}, \Lambda_{22}, \Lambda_{23}, \Lambda_{24}, \Lambda_{33}, \Lambda_{34}$ 

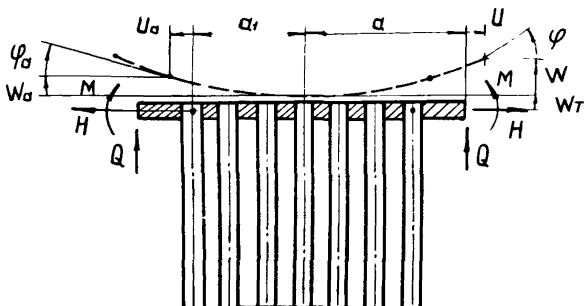
$\beta_n$	$\Lambda_{II}$	$\Lambda_{I2}$	$\Lambda_{I3}$	$\Lambda_{I4}$	$\Lambda_{22}$	$\Lambda_{23}$	$\Lambda_{24}$	$\Lambda_{33}$	$\Lambda_{34}$
Единицы	$\frac{I-\beta_n}{I}$	$\frac{I}{I}$	$\frac{I}{I}$	$\frac{(I-\beta_n)^2}{I}$	$\frac{I}{I}$	$\frac{I}{I}$	$\frac{I-\beta_n}{I}$	$\frac{I}{I}$	$\frac{I-\beta_n}{I}$
$n = 1,00$	0,91	0,91	0,91	1,82	0,91(I- $\beta_n$ )	0,91(I- $\beta_n$ )	1,82	0,91(I- $\beta_n$ )	1,82
0,99	0,0112	I,106	I,114	0,000055	109,70	110,40	0,00549	III,20	0,00553
0,98	0,0227	I,113	I,129	0,000223	54,70	55,50	0,01097	56,30	0,01113
0,97	0,0345	I,121	I,145	0,000506	36,40	37,20	0,01645	38,00	0,01680
0,96	0,0467	I,128	I,161	0,000908	27,30	28,00	0,02190	28,90	0,02260
0,95	0,0593	I,136	I,178	0,001430	21,80	22,50	0,02740	23,40	0,02840
0,94	0,0723	I,144	I,195	0,002080	18,10	18,90	0,03280	19,80	0,03430
0,93	0,0857	I,152	I,212	0,002850	15,50	16,30	0,03830	17,20	0,04030
0,92	0,0996	I,160	I,230	0,003760	13,50	14,30	0,04370	15,20	0,04640
0,91	0,1139	I,168	I,248	0,004800	12,00	12,80	0,04920	13,70	0,05260
0,90	0,1287	I,177	I,267	0,005970	10,80	11,60	0,05460	12,50	0,05890
0,88	0,1597	I,194	I,306	0,008760	8,97	9,74	0,06540	10,70	0,07170
0,86	0,1928	I,212	I,347	0,012140	7,67	8,44	0,07620	9,48	0,08500
0,84	0,2283	I,231	I,391	0,016170	6,70	7,46	0,08700	8,56	0,09880
0,82	0,2662	I,250	I,437	0,020870	5,94	6,71	0,09770	7,85	0,11300
0,80	0,3069	I,270	I,486	0,026300	5,34	6,11	0,10840	7,31	0,12790

Продолжение табл. I

$\beta_n$	$\Lambda_{11}$	$\Lambda_{12}$	$\Lambda_{13}$	$\Lambda_{14}$	$\Lambda_{22}$	$\Lambda_{23}$	$\Lambda_{24}$	$\Lambda_{33}$	$\Lambda_{34}$
0,78	0,351	1,291	1,539	0,0325	4,84	5,61	0,119	6,88	0,143
0,76	0,398	1,313	1,594	0,0395	4,43	5,20	0,130	6,53	0,159
0,74	0,448	1,335	1,653	0,0474	4,09	4,86	0,140	6,26	0,176
0,72	0,503	1,359	1,716	0,0563	3,79	4,56	0,151	6,05	0,194
0,70	0,562	1,384	1,784	0,0662	3,54	4,31	0,161	5,88	0,212
0,68	0,626	1,409	1,857	0,0773	3,32	4,09	0,172	5,75	0,232
0,66	0,695	1,436	1,935	0,0895	3,12	3,89	0,182	5,66	0,253
0,64	0,771	1,464	2,019	0,1031	2,95	3,72	0,193	5,60	0,275
0,62	0,853	1,494	2,110	0,1182	2,80	3,57	0,203	5,57	0,298
0,60	0,943	1,525	2,209	0,1348	2,66	3,43	0,213	5,57	0,323
0,58	1,041	1,557	2,316	0,1533	2,54	3,31	0,224	5,60	0,350
0,56	1,149	1,591	2,433	0,1738	2,43	3,20	0,234	5,65	0,378
0,54	1,269	1,627	2,562	0,1965	2,33	3,10	0,244	5,74	0,410
0,52	1,400	1,665	2,703	0,2217	2,24	3,01	0,254	5,86	0,443
0,50	1,547	1,705	2,859	0,2498	2,16	2,93	0,264	6,01	0,481



2. Трубная решетка ( черт.2 )



Черт. 2

2.1. Деформации наружного контура:

$$W = \frac{a^2}{D_p} [T_{11} Q a + T_{12} M + T_{13} (P_T - P_M) a^2], \quad u = \frac{T_{33} H a}{E_p S_p},$$

$$\varphi = \frac{a}{D_p} [T_{12} Q a + T_{22} M + T_{23} (P_T - P_M) a^2];$$

на расстоянии  $a_1$  от центра:

$$W_a = \frac{1}{\kappa a_1} (\varphi_1 Q a + \varphi_2 \beta M a), \quad U_a = \frac{(1-\nu) H_0 a_1}{\psi_p E_p S_p},$$

$$\varphi_a = \frac{\beta}{\kappa a_1} (\varphi_2 Q a + \varphi_3 \beta M a);$$

трубного пучка :

$$W_T = \frac{1}{\kappa} (\alpha_1 P_M - \alpha P_T) + \frac{\sqrt{L}}{4 E_T S_T} (d_T P_M - d_B P_T).$$

2.2. Вспомогательные величины:

$$\alpha = 1 - \frac{\pi d_0^2}{4 t_i}; \quad \alpha_1 = 1 - \frac{\pi d_T^2}{4 t_i};$$

$$\alpha_\psi = \alpha (0,8 + 0,2 \frac{S_{np}}{S_p}); \quad \psi_0 = \alpha_\psi^2 \sqrt{\alpha_\psi};$$

$$\psi_p = \psi_0 (1 + 0,1 \frac{d_0}{S_p}); \quad \varphi_p = \frac{t - d_0}{t};$$

$$J_T = \frac{\pi}{64} (d_T^4 - d_B^4)$$

$$D_P = \frac{E_P S_P^3}{10,92}$$

Значения коэффициентов  $\psi_0$  приведены в табл.2

Таблица 2

Коэффициенты  $\psi_0$

$\alpha_\psi$	3,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
$\psi_0$	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,37	0,44	0,51	0,59	0,68

$$K = \frac{2E_T f_T}{L f_i}, \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{R}{\psi_P D_P}}, \quad \omega = \beta a_1.$$

Коэффициенты  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  вычисляются по следующим формулам:

$$\varphi_1 = \frac{\omega}{T} [ber^2 \omega + bei^2 \omega + \frac{0,7}{\omega} (ber \omega \cdot bei \omega - bei \omega \cdot ber \omega)],$$

$$\varphi_2 = \frac{\omega}{T} (ber \omega \cdot ber \omega + bei \omega \cdot bei \omega), \quad \varphi_3 = \frac{\omega}{T} (ber^2 \omega + bei^2 \omega),$$

$$T = ber \omega \cdot bei \omega - bei \omega \cdot ber \omega - \frac{0,7}{\omega} (ber^2 \omega + bei^2 \omega);$$

$$ber \omega = 1 - \frac{1}{(2!)^2} \left(\frac{\omega}{2}\right)^4 + \frac{1}{(4!)^2} \left(\frac{\omega}{2}\right)^8 - \dots; \quad bei \omega =$$

$$= \frac{(\omega)^2}{(2!)^2} - \frac{1}{(3!)^2} \left(\frac{\omega}{2}\right)^6 + \frac{1}{(5!)^2} \left(\frac{\omega}{2}\right)^{10} - \dots;$$

$$ber \omega = \frac{1}{2!} \left(\frac{\omega}{2}\right)^3 + \frac{1}{3!4!} \left(\frac{\omega}{2}\right)^7 - \frac{1}{5!6!} \left(\frac{\omega}{2}\right)^{11} + \dots; \quad bei \omega = \frac{\omega}{2} - \frac{1}{2!3!} \left(\frac{\omega}{2}\right)^5 + \frac{1}{4!5!} \left(\frac{\omega}{2}\right)^9 - \dots$$

Значения коэффициентов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$

$\omega$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\Phi_1$	2	2,00	2,06	2,28	2,79	3,58	4,50	5,39
$\Phi_2$	0	0,02	0,19	0,62	1,32	2,16	2,94	3,59
$\Phi_3$	0	0,19	0,76	1,65	2,75	3,76	4,65	5,36
Продолжение табл. 3								
$\omega$	4	5	6	7	8	9	10	10
$\Phi_1$	6,19	7,65	9,08	10,51	11,94	13,36	14,78	2
$\Phi_2$	4,13	5,13	6,15	7,17	8,19	9,20	10,21	
$\Phi_3$	6,03	7,38	8,81	10,24	11,66	13,08	14,50	2

$$\bar{A}_{11} = A_{11} + \frac{\Phi_1}{\psi_p \omega^4};$$

$$\bar{A}_{12} = A_{12} - \frac{\Phi_2}{\psi_p \omega^3};$$

$$\bar{A}_{22} = A_{22} + \frac{\Phi_3}{\psi_p \omega^2};$$

$$T_{11} = \beta_n^2 \left( \bar{A}_{11} - \bar{A}_{12} \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{22}} \right);$$

$$T_{12} = \beta_n^2 \left( A_{13} - A_{23} \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{22}} \right);$$

$$T_{13} = \beta_n^4 \left( A_{14} - A_{24} \frac{\bar{A}_{12}}{\bar{A}_{22}} \right) - \frac{1 - \beta_n^2}{2} T_{11};$$

$$T_{22} = \beta_n^2 \left( A_{33} - A_{23} \frac{A_{23}}{\bar{A}_{22}} \right);$$

$$T_{23} = \beta_n^4 \left( A_{34} - A_{23} \frac{A_{24}}{\bar{A}_{22}} \right) - \frac{1 - \beta_n^2}{2} T_{12};$$

$$T_{33} = 0,91 \beta_n^2 \left( A_{33} - A_{23} \bar{A}_{23} \right);$$

$$\bar{A}_{23} = \frac{A_{23}}{A_{22} + \frac{1}{1,3 \psi_p}}.$$

Коэффициенты  $A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{33}, A_{34}$  вычисляются по формулам п.1 приложения при  $\beta_n = \sigma_1 / \sigma$ .

2.3. Расчет напряжений, возникающих на наружном контуре и в области закрепления труб, производится по формулам:

- мембранные напряжения в радиальном направлении

$$\sigma_M = \frac{H}{S_p},$$

$$\sigma_M = \frac{H_0}{\psi_p S_p};$$

- изгибные напряжения на верхней и нижней поверхностях

$$\sigma_u = \mp \frac{6M}{S_p^2}, \quad \sigma_u = \mp \frac{6M_{max}}{\varphi_p S_p^2} \mp \frac{\varphi_p \alpha_p E_p}{1,3 \varphi_p} (t_{pr} - t_{pm});$$

- касательные напряжения на торцах

$$\tau = \frac{Q}{S_p}, \quad \tau = \frac{Q_0}{\varphi_p S_p}.$$

Здесь  $M_{max} = A \frac{Q_0}{\beta}$   
 $M_{max} = BM_0$

при  $-0,7 \leq m_p = \frac{BM_0}{Q_0} \leq 1;$

при  $0 \leq n_p = \frac{Q_0}{BM_0} < 1;$

$$Q_0 = \frac{1}{\alpha_1} [Q \alpha_1 + \frac{\alpha^2 - \alpha_1^2}{2} (P_m - P_r)], \quad H_0 = \bar{A}_{23} H,$$

$$M_0 = \frac{1}{\bar{A}_{22}} [\bar{A}_{12} Q \alpha_1 + \bar{A}_{23} M + \bar{A}_{24} (P_r - P_m) \alpha_1^2]$$

Коэффициенты  $B$  и  $A$  представляют собой максимальные по абсолютной величине значения функций:

$$B = \frac{0,91}{T} [m_p (f_1(\omega) \operatorname{ber} \chi - f_2(\omega) \operatorname{ber} \chi') + \operatorname{ber} \omega \operatorname{ber} \chi + \operatorname{bei} \omega \operatorname{bei} \chi'],$$

$$A = \frac{0,91}{T} [f_1(\omega) \operatorname{bei} \chi - f_2(\omega) \operatorname{ber} \chi + m_p (\operatorname{ber} \omega \operatorname{ber} \chi + \operatorname{bei} \omega \operatorname{bei} \chi)],$$

где

$$f_1(\omega) = \frac{0,7}{\omega} \operatorname{ber} \omega + \operatorname{bei} \omega; \quad f_2(\omega) = \frac{0,7}{\omega} \operatorname{bei} \omega - \operatorname{ber} \omega;$$

$$\operatorname{ber} \chi = -\operatorname{bei} \chi - \frac{\operatorname{ber} \chi'}{\chi}; \quad \operatorname{bei} \chi = \operatorname{ber} \chi - \frac{\operatorname{bei} \chi'}{\chi}.$$

Максимум отклоняется в интервале  $0 < \chi < \omega$ .

При  $\omega > 3$  в интервале  $(\omega - 3) \leq \chi \leq \omega$ .

Значения коэффициентов В приведены в табл. 4, А - в табл. 5.

Таблица 4

Коэффициенты В

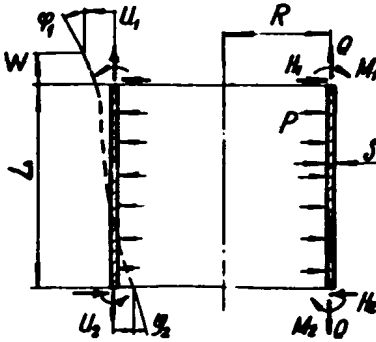
Pr	Коэффициенты В при $\omega$							10,0 и более
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	
0,9	0,82	0,93	1,00	0,95	0,94	1,00	1,04	1,08
0,8	0,80	0,91	0,96	0,91	0,91	0,97	1,01	1,05
0,7	0,79	0,88	0,92	0,87	0,88	0,94	0,98	1,02
0,6	0,78	0,86	0,88	0,84	0,86	0,92	0,95	0,99
0,5	0,76	0,82	0,84	0,80	0,84	0,89	0,92	0,96
0,4	0,75	0,80	0,80	0,78	0,82	0,87	0,90	0,94
0,3	0,74	0,77	0,76	0,75	0,80	0,85	0,88	0,91
0,2	0,73	0,74	0,73	0,74	0,79	0,84	0,86	0,90
0,1	0,71	0,72	0,71	0,73	0,78	0,82	0,85	0,88
0	0,70	0,70	0,71	0,72	0,78	0,81	0,84	0,87

Таблица 5

Коэффициенты А

m <sub>p</sub>	Коэффициенты А при ω							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	10,0 и более
-0,7	0,52	0,54	0,57	0,60	0,63	0,64	0,64	0,64
-0,6	0,45	0,47	0,50	0,52	0,55	0,55	0,55	0,55
-0,5	0,38	0,40	0,43	0,45	0,47	0,47	0,47	0,46
-0,4	0,31	0,33	0,36	0,38	0,40	0,39	0,39	0,38
-0,3	0,24	0,26	0,29	0,31	0,32	0,31	0,30	0,29
-0,2	0,17	0,19	0,27	0,35	0,31	0,27	0,29	0,31
-0,1	0,10	0,20	0,34	0,40	0,34	0,32	0,34	0,36
0	0,13	0,27	0,40	0,45	0,38	0,37	0,39	0,41
0,1	0,20	0,34	0,46	0,51	0,42	0,43	0,45	0,47
0,2	0,27	0,41	0,53	0,56	0,47	0,48	0,51	0,54
0,3	0,34	0,48	0,59	0,61	0,52	0,55	0,58	0,60
0,4	0,41	0,55	0,66	0,67	0,58	0,61	0,64	0,67
0,5	0,48	0,62	0,72	0,72	0,64	0,68	0,71	0,74
0,6	0,55	0,68	0,78	0,78	0,71	0,72	0,73	0,81
0,7	0,62	0,75	0,85	0,83	0,76	0,81	0,85	0,89
0,8	0,69	0,82	0,91	0,88	0,83	0,88	0,92	0,96
0,9	0,76	0,89	0,98	0,94	0,90	0,96	1,00	1,04
1,0	0,83	0,96	1,04	0,99	0,96	1,03	1,07	1,12

3. Цилиндрическая оболочка ( черт. 3 )



Черт. 3

3.1. Деформации:

$$\varphi_1 = \frac{1}{ES^2} (B_{11}M_1 + B_{12}H_1S + B_{13}M_2 + B_{14}H_2S),$$

$$U_1 = \frac{1}{ES} (B_{21}M_1 + B_{22}H_1S + B_{23}M_2 + B_{24}H_2S - \nu QR + pR^2),$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{ES^2} (B_{31}M_1 + B_{32}H_1S + B_{33}M_2 + B_{34}H_2S),$$

$$U_2 = \frac{1}{ES} (B_{41}M_1 + B_{42}H_1S + B_{43}M_2 + B_{44}H_2S + \nu QR - pR^2),$$

$$W = \frac{L}{ES} (K_Q Q - \nu K_P pR).$$

3.2. Вспомогательные величины:

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{2,73 R^2}{S^2}}, \quad \lambda = L \sqrt[4]{\frac{2,73}{R^2 S^2}}.$$

Для очень короткой оболочки  $\lambda < 0,3$

$$B_{11} = B_{13} = \frac{12 R^2 S}{L^3};$$

$$B_{12} = B_{14} = \frac{6 R^2}{L^2};$$

$$B_{22} = \frac{4 R^2}{LS};$$

$$B_{24} = \frac{2 R^2}{LS}.$$

Для короткой оболочки  $0,3 \leq \lambda \leq 3$ :

$$\begin{aligned}
 B_{II} &= \frac{4S\omega^3}{R} \Phi_{II} & B_{I2} &= 2\omega^2 \Phi_{I2}, \\
 B_{I3} &= \frac{4S\omega^3}{R} \Phi_{I3}, & B_{I4} &= 4\omega^2 \Phi_{I4}, \\
 B_{22} &= \frac{2R\omega}{S} \Phi_{22}; & B_{24} &= \frac{2R\omega}{S} \Phi_{24}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Phi_{II} &= \frac{sh\lambda \cdot ch\lambda + Sin\lambda \cdot Cos\lambda}{sh^2\lambda - Sin^2\lambda}; & \Phi_{I2} &= \frac{sh^2\lambda + Sin^2\lambda}{sh^2\lambda - Sin^2\lambda}; \\
 \Phi_{I3} &= \frac{sh\lambda \cdot Cos\lambda + ch\lambda \cdot Sin\lambda}{sh^2\lambda - Sin^2\lambda}; & \Phi_{I4} &= \frac{sh\lambda \cdot Sin\lambda}{sh^2\lambda - Sin^2\lambda}; \\
 \Phi_{22} &= \frac{sh\lambda \cdot ch\lambda - Sin\lambda \cdot Cos\lambda}{sh^2\lambda - Sin^2\lambda}; & \Phi_{24} &= \frac{ch\lambda \cdot Sin\lambda - sh\lambda \cdot Cos\lambda}{sh^2\lambda - Sin^2\lambda}
 \end{aligned}$$

Для длинной оболочки  $\lambda > 3$ :

$$\begin{aligned}
 B_{II} &= \frac{4S}{R} \omega^3, & B_{I2} &= 2\omega^2 \\
 B_{22} &= \frac{2R}{S} \omega, & B_{I3} &= B_{I4} = B_{24} = 0.
 \end{aligned}$$

Значения коэффициентов  $\Phi_{II}, \Phi_{I2}, \Phi_{I3}, \Phi_{I4}, \Phi_{22}, \Phi_{24}$  приведены в табл.6.

Для оболочки без компенсатора  $Kq = Kp = 1$ . Если на цилиндрической оболочке установлен компенсатор

$$Kq = 1 + \frac{2\pi RES}{LK_K}; \quad Kp = 1 - \frac{\pi(D_k^2 - d_k^2)Es}{24LRK_K},$$

где жесткость компенсатора  $K_K$  принимается по руководящей нормативной документации на компенсаторы. Допускается значение  $K_K$  принимать по разделу 2.

3.3. Расчет напряжений, возникающих в верхнем и нижнем сечениях, производится по формулам:

- мембранные осевые напряжения

$$\sigma_{mx} = \frac{q}{S};$$

- мембранные окружные напряжения

$$\sigma_{m\varphi} = \nu \sigma_{mx} + \frac{U_1 E}{R};$$

$$\sigma_{mx} = \frac{q}{S};$$

$$\sigma_{m\varphi} = \nu \sigma_{mx} - \frac{U_2 E}{R};$$



Коэффициенты  $\Phi_{II}, \Phi_{I2}, \Phi_{I3}, \Phi_{I4}, \Phi_{22}, \Phi_{24}$

$\lambda$	$\Phi_{II}$	$\Phi_{I2}$	$\Phi_{I3}$	$\Phi_{I4}$	$\Phi_{22}$	$\Phi_{24}$
0,3	111,2200	33,3430	111,0700	16,6640	6,6672	3,3329
0,4	47,0240	18,7670	46,8240	9,3700	5,0012	2,4991
0,5	24,1860	12,0260	23,9360	5,9923	4,0024	1,9982
0,6	14,1120	8,3710	13,8120	4,1555	3,3374	1,6636
0,7	9,0061	6,1737	8,6566	3,0461	2,8637	1,4237
0,8	6,1560	4,7544	5,7569	2,3240	2,5097	1,2427
0,9	4,4487	3,7882	4,0003	1,8269	2,2360	1,1008
1,0	3,3700	3,1042	2,8727	1,4693	2,0189	0,9858
1,1	2,6602	2,6050	2,1146	1,2027	1,8433	0,8903
1,2	2,1783	2,2324	1,5851	0,9979	1,6991	0,8091
1,3	1,8431	1,9493	1,2031	0,8366	1,5795	0,7386
1,4	1,6057	1,7315	0,9202	0,7067	1,4795	0,6764
1,5	1,4354	1,5623	0,7056	0,6002	1,3955	0,6205
1,6	1,3121	1,4303	0,5398	0,5113	1,3247	0,5697
1,7	1,2226	1,3269	0,4096	0,4361	1,2650	0,5229
1,8	1,1574	1,2461	0,3059	0,3717	1,2148	0,4793
1,9	1,1102	1,1830	0,2225	0,3160	1,1727	0,4385
2,0	1,0762	1,1341	0,1551	0,2675	1,1376	0,3999
2,1	1,0520	1,0966	0,1003	0,2250	1,1085	0,3634
2,2	1,0350	1,0680	0,0557	0,1876	1,0845	0,3288
2,3	1,0233	1,0467	0,0197	0,1546	1,0650	0,2958
2,4	1,0154	1,0310	-0,0094	0,1255	1,0493	0,2646
2,5	1,0104	1,0198	-0,0325	0,0999	1,0368	0,2350
2,6	1,0072	1,0119	-0,0504	0,0775	1,0270	0,2071
2,7	1,0054	1,0067	-0,0641	0,0579	1,0195	0,1809
2,8	1,0044	1,0033	-0,0739	0,0410	1,0138	0,1565
2,9	1,0039	1,0014	-0,0807	0,0264	1,0096	0,1338
3,0	1,0038	1,0004	-0,0847	0,0141	1,0066	0,1130

- изгибные осевые на наружной и внутренней поверхностях

$$\sigma_{\text{Их}} = \mp \frac{\delta M_1}{S^2} ; \quad \sigma_{\text{Их}} = \pm \frac{\delta M_2}{S^2} ;$$

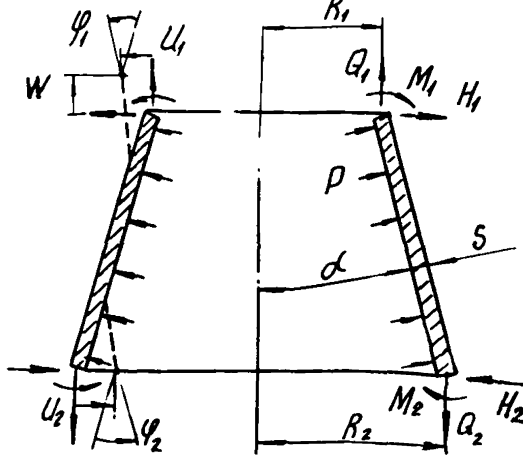
- изгибные окружные на наружной и внутренней поверхностях

$$\sigma_{\text{ИФ}} = \nu \sigma_{\text{Их}} ; \quad \sigma_{\text{ИФ}} = \nu \sigma_{\text{Их}} ;$$

- касательные напряжения на торцах

$$\tau = \frac{|H_1|}{S} ; \quad \tau = \frac{|H_2|}{S} .$$

4. Коническая оболочка ( черт. 4 )



Черт. 4

4.1. Деформации:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{ES^2} (C_{11} M_1 + C_{12} H_1 S + C_{13} M_2 + C_{14} H_2 S + C_{15} Q_1 S + C_{16} \rho S^2) , \\ U_1 &= \frac{1}{ES} (C_{21} M_1 + C_{22} H_1 S + C_{23} M_2 + C_{24} H_2 S + C_{25} Q_1 S + C_{26} \rho S^2) , \\ \varphi_2 &= \frac{1}{ES^2} (C_{31} M_1 + C_{32} H_1 S + C_{33} M_2 + C_{34} H_2 S + C_{35} Q_1 S + C_{36} \rho S^2) , \\ U_2 &= \frac{1}{ES} (C_{41} M_1 + C_{42} H_1 S + C_{43} M_2 + C_{44} H_2 S + C_{45} Q_1 S + C_{46} \rho S^2) , \\ W &= \frac{1}{ES} (C_{51} M_1 + C_{52} H_1 S + C_{53} M_2 + C_{54} H_2 S + C_{55} Q_1 S + C_{56} \rho S^2) . \end{aligned}$$

Для неуловченной конической оболочки:

$$\varphi_2 = \frac{1}{ES^2} (C_{33} M_2 + C_{34} H_2 S + C_{35} Q_1 S - C_{36} \rho S^2) ,$$

$$U_2 = \frac{1}{ES} (C_{34} M_2 + C_{44} H_2 S + \bar{C}_{45} Q_2 S - \bar{C}_{46} \rho S^2) .$$

4.2. Вспомогательные величины

$$\omega_1 = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)R_1^2}{S^2}} ; \quad \omega_2 = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)R_2^2}{S^2}} ;$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{\cos\alpha}}{\sin\alpha} (\omega_2 - \omega_1) ; \quad \lambda_0 = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2R_2 S} ;$$

$$Q_2 = \frac{R_1}{R_2} Q_1 + \lambda_0 \rho S ;$$

$$C_{11} = B_{11} \omega_1 ; \quad C_{12} = C_{21} = B_{12} \omega_1^2 ; \quad C_{13} = B_{13} \omega_1 ;$$

$$C_{14} = C_{32} = B_{14} \omega_1 \omega_2 ; \quad C_{15} = \text{tg} \alpha \left( \frac{1}{\cos \alpha} + C_{12} + \frac{R_1}{R_2} C_{14} \right) ; \quad C_{16} = \text{tg} \alpha \left( \lambda_0 C_{14} - \frac{2R_1}{S \cos \alpha} \right) ;$$

$$C_{22} = B_{22} \omega_1^3 ; \quad C_{23} = B_{23} \omega_1^2 ; \quad C_{24} = B_{24} \omega_1^2 \omega_2 ;$$

$$C_{25} = \text{tg} \alpha \left( C_{22} + \frac{R_1}{R_2} C_{24} \right) - \frac{\nu R_1}{S \cos \alpha} ; \quad C_{26} = \lambda_0 C_{24} \text{tg} \alpha + \frac{R_1^2}{S^2 \cos \alpha}$$

$$C_{31} = B_{31} \omega_2 ; \quad C_{33} = B_{33} \omega_2 ; \quad C_{34} = C_{43} = B_{34} \omega_2^2 ;$$

$$C_{35} = \text{tg} \alpha \left( C_{32} + \frac{R_1}{R_2} C_{34} + \frac{R_1}{R_2} \cos \alpha \right) ; \quad C_{36} = \text{tg} \alpha \left( \lambda_0 C_{34} - \frac{3R_2^2 + R_1^2}{2R_2 S \cos \alpha} \right) ;$$

$$C_{41} = B_{41} \omega_2^2 ; \quad C_{42} = B_{42} \omega_1 \omega_2^2 ; \quad C_{44} = B_{44} \omega_2^3 ;$$

$$C_{45} = \text{tg} \alpha \left( C_{42} + \frac{R_1}{R_2} C_{44} \right) + \frac{\nu R_1}{S \cos \alpha} ; \quad C_{46} = \lambda_0 C_{44} \text{tg} \alpha - \frac{(2-\nu)R_2^2 + \nu R_1^2}{2S^2 \cos \alpha} ;$$

$$C_{51} = \text{tg} \alpha (B_{12} \omega_1^2 + B_{14} \omega_2^2) ; \quad C_{52} = \text{tg} \alpha (B_{22} \omega_1^2 + B_{24} \omega_2^2) \omega_1 ;$$

$$C_{53} = \text{tg} \alpha (B_{32} \omega_2^2 + B_{34} \omega_1^2) ; \quad C_{54} = \text{tg} \alpha (B_{22} \omega_2^2 + B_{24} \omega_1^2) \omega_2 ;$$

$$C_{55} = \text{tg} \alpha \left( C_{32} + \frac{R_1}{R_2} C_{34} \right) + \frac{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}{S \sin \alpha \cos^2 \alpha} ;$$

$$C_{56} = \lambda_0 \left[ C_{34} \text{tg} \alpha - \frac{R_2 (3 \text{tg}^2 \alpha - 1 + 2\nu)}{2S \sin \alpha} \right] - \frac{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}{2S^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha} ;$$

$$\bar{C}_{35} = (C_{34} + \frac{1}{\cos \alpha}) \operatorname{tg} \alpha ;$$

$$\bar{C}_{45} = C_{44} \operatorname{tg} \alpha + \frac{\nu R_2}{S \cos \alpha} ;$$

Для очень короткой оболочки

$$B_{11} = B_{13} = \frac{R_2}{\lambda^3} \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{\cos \alpha}} ;$$

$$B_{22} = \frac{4}{\lambda} \sqrt{\frac{\cos \alpha}{3(1-\nu^2)}} ;$$

Для короткой оболочки

$$B_{11} = 4\Phi_{11} \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{\cos \alpha}} ;$$

$$B_{12} = 2\Phi_{12} ;$$

$$B_{22} = 2\Phi_{22} \sqrt{\frac{\cos \alpha}{3(1-\nu^2)}} ;$$

$$\bar{C}_{36} = \frac{2R_2 \operatorname{tg} \alpha}{S \cos^2 \alpha} ;$$

$$\bar{C}_{46} = \frac{R_2^2}{S^2 \cos \alpha} .$$

$$\lambda < 0,3 ;$$

$$B_{12} = B_{14} = \frac{6}{\lambda^2} ;$$

$$B_{24} = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{\cos \alpha}{3(1-\nu^2)}} .$$

$$0,3 \leq \lambda < 3 :$$

$$B_{13} = 4\Phi_{13} \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{\cos \alpha}} ;$$

$$B_{14} = 4\Phi_{14} ;$$

$$B_{24} = 2\Phi_{24} \sqrt{\frac{\cos \alpha}{3(1-\nu^2)}} .$$

Расчетные формулы для определения коэффициентов  $\Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_{13}, \Phi_{14}$

$\Phi_{22}, \Phi_{24}$  приведены в п.3

Для длинной оболочки

$$B_{11} = 4\sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{\cos \alpha}} ;$$

$$B_{12} = 2 ;$$

$$\lambda > 3$$

$$B_{22} = 2\sqrt{\frac{\cos \alpha}{3(1-\nu^2)}} ;$$

$$B_{13} = B_{14} = B_{24} = 0 .$$

4.3. Расчет напряжений, возникающих в верхнем и нижнем сечениях, производится по формулам:

- мембранные осевые напряжения

$$\sigma_{mx} = \frac{1}{S}(Q_2 \cos \alpha - H_2 \sin \alpha) ; \quad \sigma_{mx} = \frac{1}{S}(Q_2 \cos \alpha - H_2 \sin \alpha) ;$$

- мембранные окружные напряжения

$$\sigma_{m\varphi} = \nu \sigma_{mx} + \frac{U_1 E}{R_1} , \quad \sigma_{m\varphi} = \nu \sigma_{mx} - \frac{U_2 E}{R_2} ;$$

- изгибные осевые на наружной и внутренней поверхностях

$$\sigma_{ix} = \pm \frac{6M_1}{S^2} , \quad \sigma_{ix} = \pm \frac{6M_2}{S^2}$$

- изгибные окружные на наружной и внутренней поверхностях

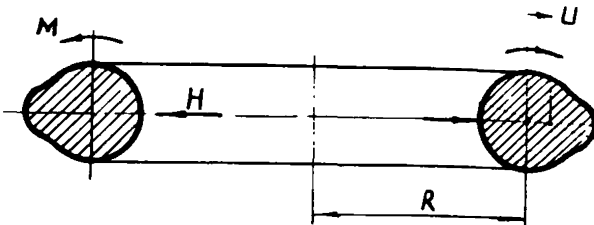
$$\sigma_{\text{изп}} = \nu \sigma_{\text{изх}} ,$$

$$\sigma_{\text{изп}} = \nu \sigma_{\text{изх}} ;$$

- касательные напряжения на торцах

$$\tau = \frac{|H_1 \cos \alpha + Q_1 \sin \alpha|}{S} , \quad \tau = \frac{|H_2 \cos \alpha + Q_2 \sin \alpha|}{S} .$$

5. ТОНКОЕ КОЛЬЦО ( черт. 5,6 )



Черт.5

5.1. Деформации:

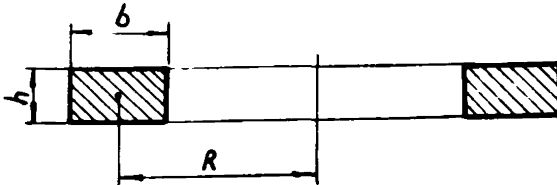
$$\varphi = \frac{MR^2}{EI} , \quad u = \frac{HR^2}{EF} ,$$

где  $M, H$  - крутящий момент,  $H$ , и радиальная нагрузка,  $H/\text{мм}$ , отнесенные к единице длины срединной окружности кольца радиусом  $R$  ;

$I, F$  - минимальный момент инерции,  $\text{мм}^4$ , и площадь,  $\text{мм}^2$  поперечного сечения кольца.

5.2. Для тонкого кольца прямоугольной формы (черт.6) имеем:

$$I = \frac{bh^3}{12} , \quad F = bh .$$



Черт.6

Границы применимости расчетных формул:

$$\frac{2R+b}{2R-b} \leq 2 , \quad \frac{h}{b} \geq 0,25$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2  
Справочное

АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ

1. Коэффициенты  $\Phi$ , приведенные в табл.1, вычисляются по формуле

где 
$$\Phi = \frac{J_0 - \frac{0,7}{\alpha_e} J_1}{1 - J_0},$$

$$J_0 = 1 - \left(\frac{\alpha_e}{2}\right)^2 + \frac{1}{(1.2)^2} \left(\frac{\alpha_e}{2}\right)^4 - \frac{1}{(1.2.3)^2} \left(\frac{\alpha_e}{2}\right)^6 + \dots ;$$

$$J_1 = \frac{\alpha_e}{2} \left[ 1 - \frac{1}{1.2} \left(\frac{\alpha_e}{2}\right)^2 + \frac{1}{(1.2)^2 \cdot 3} \left(\frac{\alpha_e}{2}\right)^4 - \frac{1}{(1.2.3)^2 \cdot 4} \left(\frac{\alpha_e}{2}\right)^6 + \dots \right].$$

2. Коэффициенты  $A_1$ , приведенные в табл.3, принимаются равными единице, если развальцовка теплообменных труб производится в отверстия без канавок.

Если развальцовка труб производится в отверстии с одной канавкой, то коэффициент  $A_1$  вычисляется по формуле

$$A_1 = \frac{(1+B_4 C_3)(1+2C_1+C_2) - B_4 C_4 (C_2+C_3)}{(1+C_1)(1+C_3) - 0,5(1-C_2)^2},$$

где  $R_T = \frac{1}{2}(d_0 - S_T); \quad R_K = R_T + 0,5 h_K; \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{2,73}{R_T^2 S_T^2}};$

$$\omega_K = \beta b_K; \quad F_K = b_K (h_K + S_T); \quad J_K = \frac{b_K (h_K + S_T)^3}{12};$$

$$B_1 = \frac{10,92 J_K}{\beta S_T^3 R_T R_K}; \quad B_2 = \frac{2 \beta R_T F_K}{S_T R_K}; \quad B_3 = \frac{b_K (d_0 + 2 h_K)}{2 R_T d_0} - \frac{d_0 F_K}{4 R_T S_T R_K};$$

$$B_4 = \frac{8 \beta R_T^2}{d_0}; \quad B_0 = (1+B_1)(2+B_2) + B_2(1+\omega_K)^2;$$

$$C_1 = \frac{2+B_2}{B_0}; \quad C_2 = \frac{1}{B_0} [2+(4+B_2)\omega_K];$$

$$C_3 = \frac{1}{B_0} [1+B_1+0,5 B_2 \omega_K^2 + (1+2\omega_K)^2]; \quad C_4 = \frac{2 B_3}{B_0} (1+\omega_K);$$

$$C_5 = \frac{B_3}{B_0} [1+B_1 + (1+\omega_K)(1+2\omega_K)].$$

Если развязка труб производится в отрезках с двумя или более канавками, то коэффициент  $A_T$  вычисляется по формуле

$$A_T = \frac{2B_4}{\Delta_0} [(C_2 - 2\omega_K C_1) \Delta_{11} + (C_3 - \omega_K C_2) \Delta_{21}] ,$$

где  $\lambda = \beta L_K$  ;  $\varphi_n = \frac{\text{sh}\lambda \cdot \text{ch}\lambda + \text{sin}\lambda \cdot \text{cos}\lambda}{\text{sh}^2\lambda - \text{sin}^2\lambda}$  ;

$$\varphi_{12} = \frac{\text{sh}^2\lambda + \text{sin}^2\lambda}{\text{sh}^2\lambda - \text{sin}^2\lambda} ; \quad \varphi_{13} = \frac{\text{sh}\lambda \cdot \text{cos}\lambda + \text{ch}\lambda \cdot \text{sin}\lambda}{\text{sh}^2\lambda - \text{sin}^2\lambda} ;$$

$$\varphi_{14} = \frac{\text{sh}\lambda \cdot \text{sin}\lambda}{\text{sh}^2\lambda - \text{sin}^2\lambda} ; \quad \varphi_{22} = \frac{\text{sh}\lambda \cdot \text{ch}\lambda - \text{sin}\lambda \cdot \text{cos}\lambda}{\text{sh}^2\lambda - \text{sin}^2\lambda}$$

$$\varphi_{24} = \frac{\text{ch}\lambda \cdot \text{sin}\lambda - \text{sh}\lambda \cdot \text{cos}\lambda}{\text{sh}^2\lambda - \text{sin}^2\lambda} ; \quad a_n = 2(C_1 + \varphi_{11}) ;$$

$$a_{12} = C_2 - \varphi_{12} ; \quad a_{13} = 2\varphi_{13} ; \quad a_{14} = -2\varphi_{14} ;$$

$$a_{22} = C_3 + \varphi_{22} ; \quad a_{24} = \varphi_{24} ; \quad \Delta_0 = a_{11} a_{22} - a_{12}^2 ;$$

$$\Delta_1 = a_{12} a_{14} - a_{13} a_{22} ; \quad \Delta_2 = a_{12} a_{24} - a_{14} a_{22} ;$$

$$\Delta_3 = a_{22} C_4 - a_{12} C_5 ; \quad \Delta_4 = a_{12} a_{13} - a_{11} a_{14} ;$$

$$\Delta_5 = a_{12} a_{14} - a_{11} a_{24} ; \quad \Delta_6 = a_{11} C_5 - a_{12} C_4 ;$$

$$A_{11} = a_{11} + \frac{a_{13} \Delta_1 + a_{14} \Delta_4}{\Delta_0} ; \quad A_{12} = a_{12} + \frac{a_{13} \Delta_2 + a_{14} \Delta_5}{\Delta_0} ;$$

$$A_{22} = a_{22} + \frac{a_{14} \Delta_2 + a_{24} \Delta_5}{\Delta_0} ; \quad C_{41} = -\frac{a_{13} \Delta_3 + a_{14} \Delta_6}{\Delta_0} ;$$

$$C_{51} = \frac{1}{B_4} - \frac{a_{14} \Delta_3 + a_{24} \Delta_6}{\Delta_0} ; \quad \Delta_{01} = A_{11} A_{22} - A_{12}^2 ;$$

$$\Delta_{11} = A_{22} C_{41} - A_{12} C_{51} ; \quad \Delta_{21} = A_{11} C_{51} - A_{12} C_{41} ;$$

$L_K$  - расстояние между канавками.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

I. Расчет греющих камер .....	2
I.1. Исходные данные .....	2
I.2. Определение возможности развальцовки труб в решетке .....	8
I.3. Определение минимальной толщины трубной решетки....	9
I.4. Расчет нагрузок .....	11
I.5. Расчет трубных решеток .....	34
I.6. Расчет теплообменных труб.....	36
I.7. Расчет прочности обечаек.....	41
I.8. Расчет деталей фланцевого разъема.....	41
2. Расчет осевых компенсаторов .....	43
2.1. Исходные данные .....	43
2.2. Расчет линзовых компенсаторов .....	45
2.3. Расчет стяжек для линзовых компенсаторов.....	48
2.4. Расчет и конструирование пружинных компенсаторов...	49
3. Расчет мест пересечения осесимметрично нагруженных оболочек вращения .....	53
3.1. Место пересечения конической оболочки сепаратора с цилиндрической оболочкой кокуха греющей камеры.....	53
3.2. Место пересечения конической оболочки сепаратора с цилиндрической оболочкой кокуха греющей камеры, подкрепленное ступенчатой цилиндрической оболочкой....	57
3.3. Место крепления конической оболочки к цилиндрической оболочке сепаратора через кольцо .....	63
4. Расчет фланцевых соединений .....	67
4.1. Фланцевое соединение сепаратора с кокухом греющей камеры .....	67
4.2. Двухопорное фланцевое соединение на шпильках.....	80
4.3. Двухопорное фланцевое соединение на болтах.....	85



Приложение 1. Обязательное. Деформации и напряжения  
в используемых деталях ..... 91

Приложение 2 . Справочное . Алгоритмы для вычисления  
коэффициентов ..... 108

УкрНИИХиммаш

Зам. директора к.т.н.

Л.П.Периев

Зав.отделом стандартизации

В.И.Станденко

Зав.отделом прочности

В.И.Стогний

Руководитель разработки  
к.т.н.

П.С.Марченко

Исполнители

Н.Д.Шарапова

В.Н.Нелюба

Д.Г.Ряузов

СОГЛАСОВАНО:

НИИХиммаш

Зам. директора

П.Ф.Серб



**П Е Р Е Ч Е Н Ь**  
документов, на которые даны ссылки в руководящем  
техническом материале

ГОСТ 14249-80 . Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.

ГОСТ 13764-68- ГОСТ 13776-68. Пружины винтовые, цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения.

ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузениях.

ОСТ 26-291-79. Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические требования.

ОСТ 26-373-78. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность фланцевых соединений.

ОСТ 26-01-112-79. Аппараты выпарные трубчатые стальные. Общие технические условия.

ОСТ 26-1185-81. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Элементы теплообменных аппаратов.

ОСТ 26-17-01-83. Аппараты теплообменные и аппараты воздушного охлаждения стандартные. Технические требования к развальцовке труб с ограниченным крутящим моментом.

Заказ № 312

Тираж 100 экз.

Ротапринт УкрНИИхиммаша, г. Харьков, ул. Маршала Конева, 21