

# РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

---

## СОСУДЫ И АППАРАТЫ НОРМЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕПЛО- ОБМЕННЫХ АППАРАТОВ

РД 26-14-88

Издание официальное

ВНИИНЕФТЕМАШ

Москва 1988 г

## РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

СОСУДЫ И АППАРАТЫ. НОРМЫ  
И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧ-  
НОСТЬ.

РД 26-14-88

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ  
АППАРАТОВ.

ОКП

Дата введения 01.07.89

Настоящий руководя-

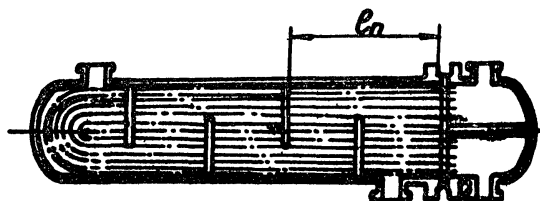
щий документ (далее РД) устанавливает нормы и методы расчета на прочность элементов кожухотрубчатых теплообменных стальных аппаратов с U-образными трубами, плавающей головкой, компенсатором на плавающей головке, неподвижными трубными решетками, компенсатором или расширителем на кожухе.

РД распространяется на оборудование, работающее при статических и повторно-статических нагрузках, и соответствующее требованиям ОСТ 26-291-87, ГОСТ 14249-80.

Схемы аппаратов, компенсатора, узлов крепления решетки к фланцу и схема для определения диаметра окружности, вписанной в максимальную беструбную зону, приведены на черт. 1 ÷ 9.

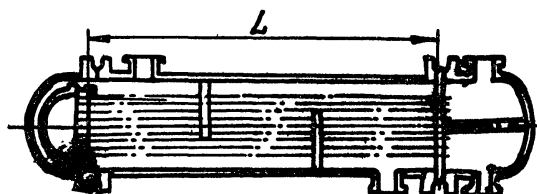
При расчете по настоящему РД следует учитывать все возможные сочетания давлений в трубном и межтрубном пространствах и температур труб и кожуха, которые могут иметь место при пуске, в рабочих условиях, при промывке или испытаниях аппарата, с целью определения экспериментальных значений расчетных характеристик для каждого из элементов аппарата.

Аппарат с U - образными трубами



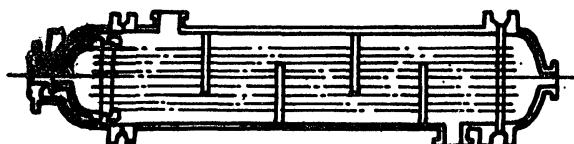
Черт. I

Аппарат с плавачей головкой



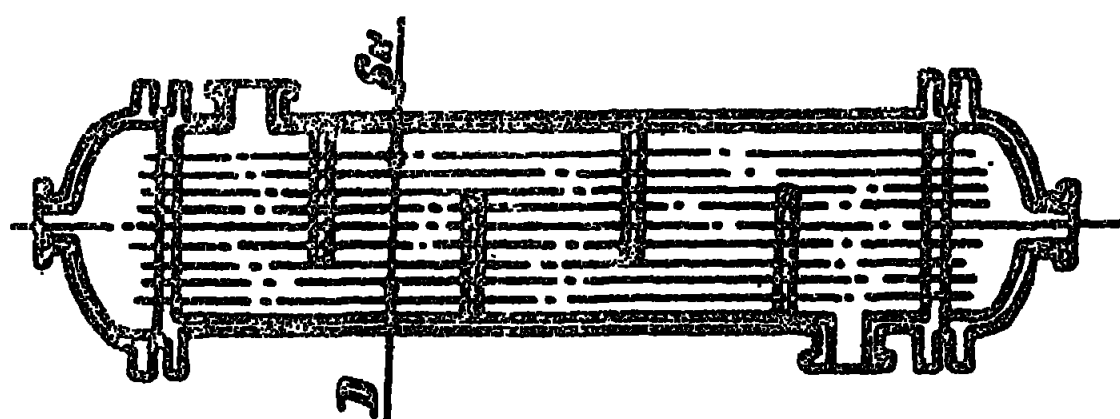
Черт. 2

Аппарат с компенсатором на плавачей головке



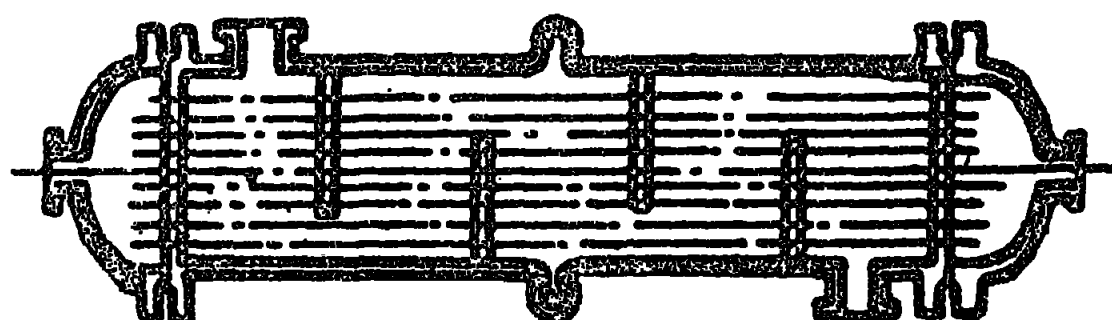
Черт. 3

Аппарат с неподвижными глубокими решетками



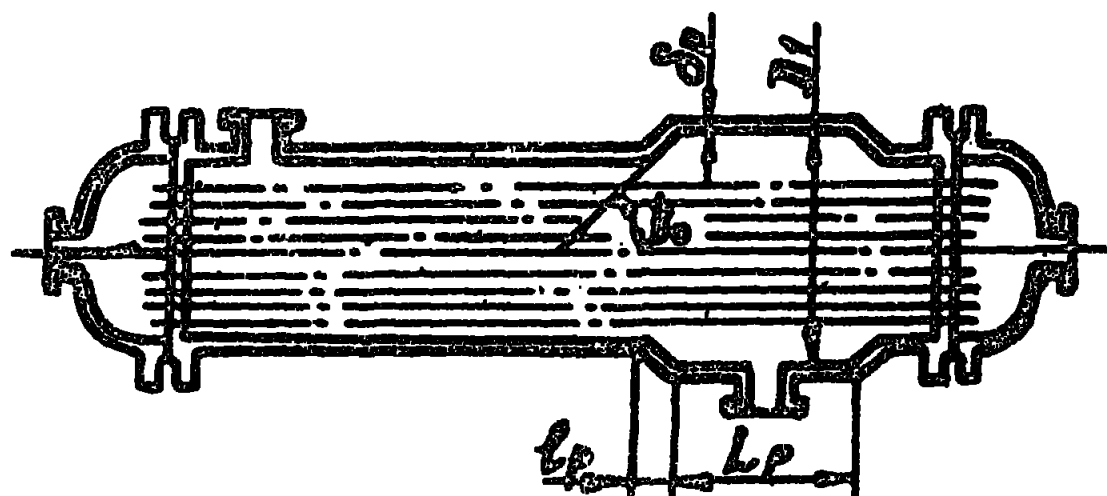
Черт 4

Аппарат с компенсатором на воздухе

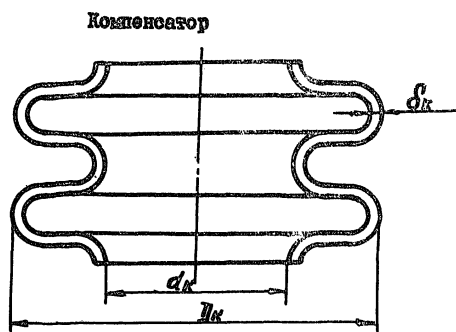


Черт 5

Аппарат с расширителем на воздухе

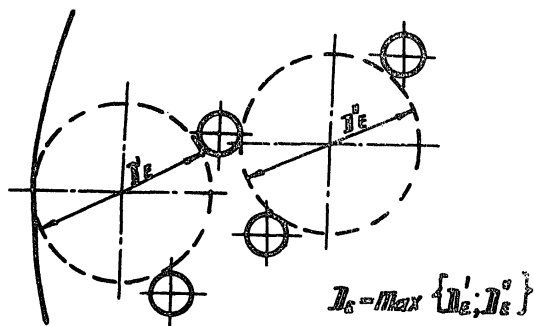


Черт 6



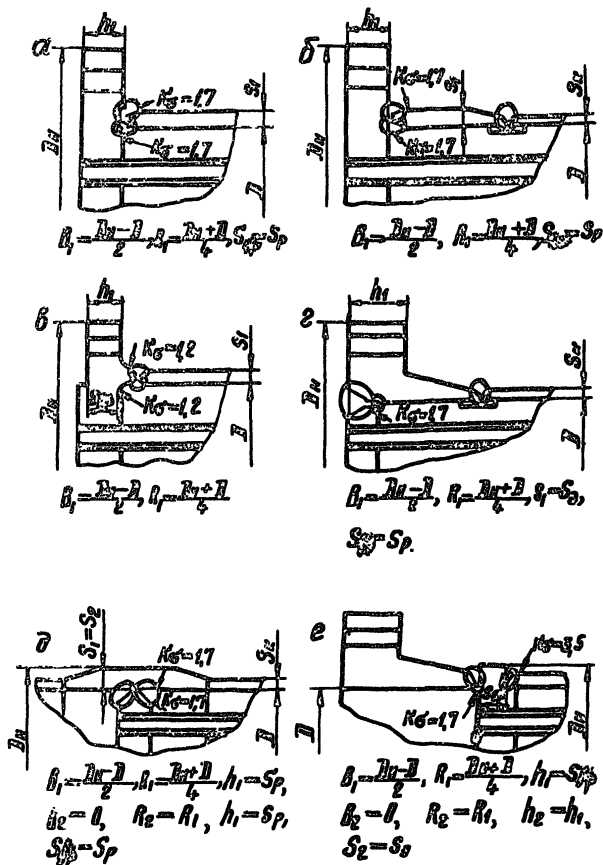
Черт. 7.

Схема для определения диаметра окружности, вписанной в максимальную безтрубную зону



Черт 8

Крошечные решетки и фланцы для воздуха



Черт. 9

# 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТОЛЩИНЕ ТРУБНОЙ РЕШЕТКИ.

1.1. Толщина трубной решетки назначается конструктивно с последующей проверкой по разделам 1,2,3

1.2. Принятая толщина трубной решетки должна обеспечивать возможность крепления труб в решетке. Для решеток, у которых крепление теплообменных труб производится развальцовкой или развальцовкой с обваркой, принятая толщина решетки должна обеспечивать прочность и гарантированное давление разгерметизации вольцовочного соединения, а также некоробление решетки при развальцовке.

Минимальная толщина решеток стандартных теплообменных аппаратов и специальных аппаратов, выпускаемых на базе стандартных, должны отвечать требованиям ОСТ 26-17-01-83 и ОСТ 26-02-1015-85.

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

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

$$S_p \geq 0,5 D_E \sqrt{\frac{P_R}{[\sigma]_p}} + C \quad , \text{ мм(см)} \quad (1)$$

1.5. Принятая толщина трубных решеток аппаратов с неподвижными трубными решетками, с компенсатором или расширителем на кожухе должна отвечать требованиям прочности, приведенным в разделе 2 настоящего РД

Принятая толщина трубных решеток аппаратов с плавающей головкой, компенсатором на плавающей головке и U-образными трубами должна отвечать требованиям прочности, приведенным в разделе 3 настоящего РД.

1.6. Для аппаратов, многоходовых по трубному пространству, толщина трубной решетки в сечении канавки должна быть не менее:

$$S_n \geq S_p \max \left\{ \left[ 1 - \sqrt{\frac{d_o}{t_n} \left( \frac{t_n}{t_p} - 1 \right)} \right]; \sqrt{\varphi_p} \right\} + C, \text{ мм (см)} \quad (2)$$

## 2. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ С НЕПОДВИЖНЫМИ ТРУБНЫМИ РЕШЕТКАМИ, КОМПЕНСАТОРОМ ИЛИ РАСШИРИТЕЛЕМ НА КОЖУХЕ.<sup>\*</sup>

### 2.1. Вспомогательные величины.

#### 2.1.1. Основные параметры трубной решетки.

##### 2.1.1.1. Относительная характеристика беструбного края:

$$m_n = a/a_1 \quad (3)$$

##### 2.1.1.2. Коэффициенты влияния давления на трубную решетку:

$$\eta_m = 1 - \frac{i d_r^2}{4 a_1^2} \quad (4)$$

$$\eta_r = 1 - \frac{i (d_r - 2 s_r)^2}{4 a_1^2} \quad (5)$$

##### 2.1.1.3. Коэффициент ослабления трубной решетки

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_o}{t_p} \quad (6)$$

##### 2.1.1.4. Коэффициент жесткости перфорированной плиты $\psi_o$

определяется по табл. I. в зависимости от  $\eta_r$ :

Таблица I

$\eta_r$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
$\psi_o$	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,37	0,44	0,51	0,59	0,68

<sup>\*</sup> - если теплообменник имеет трубный пучок смещенный относительно центра аппарата или на контуре имеется беструбная область, то следует производить два расчета при максимальном и минимальном значениях  $a_1$  с расчетным числом труб, равным  $i(a_1/a_n)^2$ .



2.1.2. Основные характеристики жесткости элементов теплообменного аппарата.

2.1.2.1. Модуль упругости основания (системы труб):

$$K_y = \frac{E_T(Z_T - Z_M)}{l} \cdot \frac{H}{\text{мм}^3} \left( \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right) \quad (7)$$

2.1.2.2. Приведенное отношение жесткости труб и жесткости кожуха:

$$\beta = \frac{K_y \alpha_1 l}{E_K S_K} \quad (8)$$

2.1.2.3. Коэффициенты изменения жесткости системы трубы-кожух:

$$K_Q = 1 + K_Q^* \quad (9)$$

$$K_P = 1 + K_P^* \quad (10)$$

- для аппаратов с неподвижными трубными решетками  $K_P^* = K_Q^* = 0$ .

- для аппаратов с компенсатором на кожухе, с расширителем на кожухе и с компенсатором на расширителе коэффициенты  $K_Q^*$  и  $K_P^*$  определяются по Приложению I.

2.1.3. Приведенное давление

$$P_0 = [\alpha_K(t_K - t_0) - \alpha_T(t_T - t_0)] K_y l + \\ + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0,5\beta K_Q)] P_T - \\ - [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0,3\beta K_P)] P_M, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (11)$$

где

$$m_{cp} = 0,15 \frac{i(d_T - S_T)^2}{\alpha_1^2} \quad (12)$$

2.2. Определение усилий в элементах аппаратов и расчет на прочность

2.2.1. Для конструкций теплообменных аппаратов, имеющих  $K_y \ll 1,7$  (черт. 9), предназначенных для работы под давлением не более 6,3 МПа (63 кгс/см<sup>2</sup>) и перепаде температур труб и кожуха не более 40°C, при соблюдении условия  $\frac{\alpha - \alpha_1}{S_P} \ll 3$  и отсутствии дополнительных требований к жесткости решетки допускается вместо расчета по п. 2.2. выполнять упрощенный расчет по Приложению 2.

## 2.2.2. Характеристики жесткости элементов конструкции

## 2.2.2.1. Коэффициент системы решетка-трубы:

$$\beta = \frac{1,82}{S_p} \sqrt{\frac{K_y S_p}{\psi_0 E_p}}, \quad \frac{\text{I}}{\text{мм}} \left( \frac{\text{I}}{\text{см}} \right) \quad (13)$$

Для теплообменных аппаратов с двумя отличающимися друг от друга по толщине или модулю упругости решетками, коэффициент следует вычислять по формуле:

$$\beta = 1,53 \sqrt{\frac{K_y}{\psi_0 \left( \frac{1}{E_1 S_{p1}^3} + \frac{1}{E_2 S_{p2}^3} \right)}}, \quad \frac{\text{I}}{\text{мм}} \left( \frac{\text{I}}{\text{см}} \right) \quad (14)$$

2.2.2.2.<sup>x</sup> Коэффициенты системы кожух-решетка и обечайка-

фланец камеры:

$$\beta_1 = \frac{1,3}{\sqrt{a S_1}}, \quad \frac{\text{I}}{\text{мм}} \left( \frac{\text{I}}{\text{см}} \right) \quad (15)$$

$$\beta_2 = \frac{1,3}{\sqrt{a S_2}}, \quad \frac{\text{I}}{\text{мм}} \left( \frac{\text{I}}{\text{см}} \right) \quad (16)$$

2.2.2.3.<sup>x</sup> Жесткость фланцевого соединения при изгибе:

$$K_{\varphi} = K_{\varphi 1} + K_{\varphi 2} \quad (17)$$

где:

$$K_{\varphi 1} = \frac{E_1 h_1^3 B_1}{12 R_1^3} + K_1 \left( 1 + \frac{\beta_1 h_1}{2} \right), \quad \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{мм}} \left( \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}} \right) \quad (18)$$

$$K_{\varphi 2} = \frac{E_2 h_2^3 B_2}{12 R_2^3} + K_2 \left( 1 + \frac{\beta_2 h_2}{2} \right), \quad \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{мм}} \left( \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}} \right) \quad (19)$$

$$K_1 = \frac{\beta_1 \alpha E_k S_1^3}{5,5 R_1}, \quad \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{мм}} \left( \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}} \right) \quad (20)$$

$$K_2 = \frac{\beta_2 \alpha E_k S_2^3}{5,5 R_2}, \quad \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{мм}} \left( \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}} \right) \quad (21)$$

<sup>x</sup> Коэффициенты  $\beta_1, \beta_2, K_{\varphi 1}, K_{\varphi 2}, K_1, K_2, m_1, m_2$  для конструкций по черт. 92, рассчитанные для стандартных фланцев по ОСТ 26-427-80 и по ОСТ 26-428-80, приведены в табл. приложения 4.

2.2.2.4. Коэффициенты влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2 \beta_1^2}, \quad \text{мм}^2 (\text{см}^2) \quad (22)$$

$$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2 \beta_2^2}, \quad \text{мм}^2 (\text{см}^2) \quad (23)$$

2.2.2.5. Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения:

$$\beta_1 = \frac{K_y \cdot Q \cdot Q_1}{\beta^2 R \varphi R_1} \quad (24)$$

2.2.2.6. Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края решетки и поддерживающее влияние труб  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ , определяются по табл. 2.

Значения  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  определяются по таблице в зависимости от  $\omega = \beta Q_1$  (25)

Таблица 2

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	5,35
$\omega$	4	5	6	7	8	9	10	> 10
$\Phi_1$	6,19	7,65	9,08	10,51	11,94	13,36	14,78	$\sqrt{2} \omega$
$\Phi_2$	4,13	5,13	6,15	7,17	8,19	9,20	10,21	$\omega$
$\Phi_3$	6,03	7,38	8,81	10,24	11,66	13,08	14,50	$\sqrt{2} \omega$

2.2.2.7. Значения  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  определяются по табл. 3 в зависимости от  $\omega$  и  $mn$  или по формулам:

$$T_1 = \Phi_1 [mn + 0,5(1 + mn t)(t - 1)] \quad (26)$$

$$T_2 = \Phi_2 t \quad (27)$$

$$T_3 = \Phi_3 mn \quad (28)$$

где:

$$t = 1 + 1,4 \omega (mn - 1) \quad (29)$$

Таблица 3

m <sub>n</sub>	ω														
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
T <sub>I</sub>															
1,0	2,00	2,00	2,06	2,28	2,79	3,58	4,50	5,39	6,19	7,65	9,08	10,5	11,9	13,4	14,8
1,1	2,20	2,35	2,59	3,07	4,02	5,51	7,39	9,44	11,6	16,2	21,6	28,1	35,6	44,3	54,3
1,2	2,40	2,73	3,21	4,04	5,61	8,14	11,5	15,5	19,8	30,2	43,4	60,0	80,4	105	134
1,3	2,60	3,14	3,92	5,22	7,64	11,6	17,1	23,9	31,6	50,8	76,3	109	151	202	263
1,4	2,80	3,59	4,74	6,65	10,2	16,0	24,4	35,0	47,5	79,2	122	179	251	341	450
1,5	3,00	4,07	5,67	8,35	13,3	21,6	33,7	49,3	68,0	116	183	273	387	529	703
T <sub>2</sub>															
1,0	0,00	0,02	0,19	0,62	1,32	2,16	2,94	3,59	4,13	5,13	6,13	7,17	8,19	9,20	10,2
1,1	0,00	0,02	0,22	0,75	1,69	2,92	4,18	5,36	6,46	8,75	11,3	14,2	17,4	20,9	24,6
1,2	0,00	0,02	0,24	0,88	2,06	3,68	5,43	7,13	8,79	12,4	16,6	21,3	26,7	32,5	39,0
1,3	0,00	0,02	0,27	1,01	2,44	4,44	6,67	8,90	11,1	16,0	21,8	28,4	35,9	44,2	53,4
1,4	0,00	0,03	0,30	1,14	2,81	5,21	7,91	10,7	13,4	19,6	27,0	35,5	45,1	55,9	67,8
1,5	0,00	0,03	0,32	1,28	3,18	5,97	9,16	12,4	15,8	23,2	32,2	42,5	54,4	67,6	82,2
T <sub>3</sub>															
1,0	0,00	0,19	0,76	1,65	2,75	3,76	4,65	5,36	6,03	7,38	8,81	10,2	11,7	13,1	14,5
1,1	0,00	0,21	0,84	1,81	3,02	4,14	5,11	5,90	6,63	8,12	9,69	11,3	12,8	14,4	15,9
1,2	0,00	0,23	0,91	1,98	3,30	4,51	5,58	6,43	7,24	8,86	10,6	12,3	14,0	15,7	17,4
1,3	0,00	0,25	0,99	2,14	3,57	4,89	6,04	6,97	7,84	9,59	11,4	13,3	15,2	17,0	18,8
1,4	0,00	0,27	1,06	2,31	3,85	5,26	6,51	7,50	8,44	10,3	12,3	14,3	16,3	18,3	20,3
1,5	0,00	0,28	1,14	2,47	4,12	5,64	6,97	8,04	9,04	11,1	13,2	15,4	17,5	19,6	21,7

## 2.2.3. Усилия в элементах конструкции.

2.2.3.1. Изгибающий момент и перерезывающая сила, распределенные по краю трубной решетки:

$$M = \left( \frac{a_1}{\beta} \right) \cdot \frac{P_1(T_1 + \beta K_q) - P_0 T_2}{(T_1 + \beta K_q)(T_3 + \beta_1) - T_2^2}, \quad \frac{\text{Н.мм}}{\text{мм}} \quad \left( \frac{\text{кгс.см}}{\text{см}} \right) \quad (30)$$

$$Q = a_1 \frac{P_0(T_3 + \beta_1) - P_1 T_2}{(T_1 + \beta K_q)(T_3 + \beta_1) - T_2^2}, \quad \frac{\text{Н}}{\text{мм}} \quad \left( \frac{\text{кгс}}{\text{см}} \right) \quad (31)$$

где  $P_1 = \frac{K_y}{\beta K_{\Phi}} (m_1 P_M - m_2 P_T)$ , МПа (кгс/см<sup>2</sup>) (32)

2.2.3.2. Изгибающий момент и перерезывающие силы, распределенные по периметру перфорированной зоны решетки:

$$M_a = M + (a - a_1)Q, \quad \frac{\text{Н.мм/мм}}{\text{мм}} \quad \left( \frac{\text{кгс.см/см}}{\text{см}} \right) \quad (33)$$

$$Q_a = mnQ, \quad \frac{\text{Н/мм}}{\text{мм}} \quad \left( \frac{\text{кгс/см}}{\text{см}} \right) \quad (34)$$

2.2.3.3.\* Осевая сила и изгибающий момент, действующие на трубу:

$$N_T = \frac{\pi a_1}{i} [(\eta_M P_M - \eta_T P_T) a_1 + \varphi_1 Q_a + \varphi_2 \beta M_a], \quad \text{Н} \quad (\text{кгс}) \quad (35)$$

$$M_T = \frac{E_T J_T \beta}{K_y a_1 l_{\Phi}} (\varphi_2 Q_a + \varphi_3 \beta M_a), \quad \frac{\text{Н.мм}}{\text{мм}} \quad \left( \frac{\text{кгс.см}}{\text{см}} \right) \quad (36)$$

2.2.3.4. Усилия в кожухе

$$Q_K = \frac{a}{2} P_T - Q, \quad \frac{\text{Н/мм}}{\text{мм}} \quad \left( \frac{\text{кгс/см}}{\text{см}} \right) \quad (37)$$

$$M_K = \frac{K_1}{\rho_1 K_{\Phi} \beta} (T_2 Q + T_3 \beta M) - \frac{P_M}{2 \beta_1^2}, \quad \frac{\text{Н.мм/мм}}{\text{мм}} \quad \left( \frac{\text{кгс.см/см}}{\text{см}} \right) \quad (38)$$

$$F = \pi D Q_K, \quad \text{Н} \quad (\text{кгс}) \quad (39)$$

$l_{\Phi}$  определяется по формулам, приведенным в п. 2.2.7.4.

## 2.2.4. Расчетные напряжения в элементах конструкции.

## 2.2.4.1. Расчетные напряжения в трубных решетках.

Напряжения в трубной решетке в месте соединения с кожухом:

$$\text{-- изгибные: } \sigma_{p1} = \frac{6|M|}{(S_p - c)^2}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{):} \quad (40)$$

$$\text{-- касательные: } \tau_{p1} = \frac{|Q|}{(S_p - c)}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (41)$$

Напряжения в перфорированной части трубной решетки:

$$\text{-- изгибные: } \sigma_{p2} = \frac{6 M_{\max}}{\varphi_p (S_p - c)^2}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (42)$$

$$\text{-- касательные: } \tau_{p2} = \frac{|Q_a|}{\varphi_p (S_p - c)}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (43)$$

здесь:  $M_{\max}$  - максимальный расчетный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки

При  $-1,0 \leq \frac{\beta M_a}{Q_a} \leq 1,0$  -  $M_{\max}$  определяется по формуле:

$$M_{\max} = A \frac{|Q_a|}{\beta}, \text{ Н.мм (кгс.см)} \quad (44)$$

где:  $A$  - коэффициент, определяемый по табл. 4, в зависимости от

$$m = \frac{\beta M_a}{Q_a}$$

При  $\frac{\beta M_a}{Q_a} < -1,0$  и  $\frac{\beta M_a}{Q_a} > 1,0$  -  $M_{\max}$  определяется по

формуле:

$$M_{\max} = B |M_a|, \text{ Н.мм (кгс.см)} \quad (45)$$

где:  $B$  - коэффициент, определяемый по табл. 5, в зависимости от

$$n = Q_a / \beta M_a$$

Таблица 4

Коэффициент А

m	$\omega$							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	$\geq 10$
-1,0	0,726	0,754	0,783	0,813	0,858	0,878	0,885	0,898
-0,9	0,656	0,683	0,712	0,740	0,781	0,797	0,802	0,811
-0,8	0,586	0,613	0,641	0,668	0,705	0,716	0,720	0,724
-0,7	0,516	0,543	0,570	0,596	0,628	0,636	0,637	0,637
-0,6	0,446	0,473	0,500	0,524	0,551	0,555	0,554	0,550
-0,5	0,376	0,403	0,429	0,451	0,474	0,474	0,471	0,463
-0,4	0,306	0,333	0,358	0,379	0,397	0,393	0,388	0,376
-0,3	0,236	0,262	0,287	0,307	0,320	0,313	0,305	0,289
-0,2	0,166	0,192	0,214	0,235	0,250	0,243	0,239	0,208
-0,1	0,096	0,116	0,138	0,158	0,173	0,169	0,168	0,159
0	0,144	0,184	0,222	0,261	0,306	0,320	0,322	0,314
0,1	0,214	0,253	0,296	0,341	0,390	0,406	0,408	0,404
0,2	0,284	0,322	0,360	0,407	0,460	0,478	0,479	0,477
0,3	0,354	0,391	0,433	0,478	0,535	0,556	0,556	0,556
0,4	0,424	0,461	0,507	0,555	0,616	0,640	0,641	0,641
0,5	0,494	0,531	0,578	0,628	0,694	0,721	0,720	0,720
0,6	0,564	0,601	0,649	0,699	0,771	0,801	0,800	0,800
0,7	0,634	0,671	0,720	0,771	0,847	0,880	0,879	0,879
0,8	0,704	0,741	0,791	0,843	0,924	0,961	0,960	0,960
0,9	0,773	0,810	0,861	0,914	0,999	1,040	1,039	1,039
1	0,843	0,880	0,931	0,984	1,064	1,100	1,099	1,099

Таблица 5

## Коэффициенты В

П	ω							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	≥10
1,0	0,843	0,972	1,041	0,991	0,964	1,029	1,071	1,117
0,9	0,829	0,943	1,000	0,949	0,940	1,000	1,040	1,083
0,8	0,815	0,914	0,960	0,908	0,910	0,971	1,009	1,051
0,7	0,800	0,886	0,920	0,871	0,884	0,944	0,979	1,020
0,6	0,786	0,858	0,880	0,836	0,860	0,918	0,951	0,990
0,5	0,771	0,829	0,840	0,804	0,839	0,894	0,925	0,963
0,4	0,757	0,801	0,799	0,777	0,819	0,871	0,900	0,938
0,3	0,742	0,773	0,761	0,754	0,802	0,852	0,878	0,915
0,2	0,728	0,744	0,732	0,737	0,789	0,835	0,860	0,896
0,1	0,714	0,716	0,714	0,727	0,780	0,823	0,846	0,882
0	0,700	0,702	0,709	0,725	0,776	0,816	0,837	0,874
-0,1	0,703	0,707	0,716	0,732	0,778	0,815	0,835	0,873
-0,2	0,705	0,712	0,723	0,741	0,787	0,821	0,841	0,876
-0,3	0,708	0,717	0,730	0,750	0,796	0,828	0,846	0,879
-0,4	0,711	0,722	0,738	0,759	0,805	0,835	0,852	0,882
-0,5	0,713	0,728	0,745	0,768	0,814	0,842	0,857	0,884
-0,6	0,716	0,733	0,753	0,777	0,823	0,850	0,863	0,887
-0,7	0,718	0,738	0,760	0,786	0,832	0,857	0,869	0,890
-0,8	0,721	0,743	0,768	0,795	0,841	0,864	0,874	0,893
-0,9	0,723	0,748	0,775	0,804	0,849	0,871	0,880	0,895
-1,0	0,726	0,754	0,783	0,813	0,858	0,878	0,885	0,898



2.2.4.2. Расчетные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке (для конструкций по черт. 9а, б, в, д, е):

- в меридиональном направлении:

- мембранные:

$$\sigma_{mk} = \frac{|Q_k|}{(S_1 - C_k)}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (46)$$

- изгибные:

$$\sigma_{uk} = \frac{6|M_k|}{(S_1 - C_k)^2}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (47)$$

- в окружном направлении:

- мембранные:

$$\sigma_{mq} = \frac{|P_M| a}{(S_1 - C_k)}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (48)$$

- изгибные:

$$\sigma_{uq} = 0,3 \sigma_{uk}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (49)$$

2.2.4.3. Расчетные напряжения в трубах

- в осевом направлении:

$$\sigma_{1T} = \frac{|N_T|}{\pi(d_T - S_T)S_T}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (50)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{1T} + \frac{d_T |M_T|}{2J_T}, \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (51)$$

- окружном направлении:

$$\sigma_{2T} = \frac{(d_T + S_T) \max\{|P_T|; |P_M|; |P_T - P_M|\}}{2 S_T} \text{ МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (52)$$

### 2.2.5. Расчет трубных решеток на прочность и жесткость

#### 2.2.5.1. Условие статической прочности трубной решетки:

$$\max \{ \tau_{p1} ; \tau_{p2} \} \leq 0,5 [\sigma]_p \quad (53)$$

2.2.5.2. Проверка трубной решетки на малоцикловую прочность производится по ГОСТ 25859-83.

В случае, если в расчете должна учитываться ползучесть материала, допускается производить проверку на малоцикловую прочность по Приложению 3.

При проверке трубной решетки на малоцикловую прочность следует принимать:

- в месте соединения с кожухом:

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{p1} ; \Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = 0 \quad (54)$$

$K_\sigma$  - по черт. 9

- в перфорированной части

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{p2} ; \Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = 0 ; K_\sigma = 1 \quad (55)$$

2.2.5.3. Прочность трубных решеток многоходовых по трубному пространству аппаратов в зоне паза под перегородку проверяется по п. 1.6. При этом следует принимать:

$$S_p^p = (S_p - c) \frac{\sigma_{p2}}{2 [\sigma_a]} , \text{ мм (см)} \quad (56)$$

## 2.2.5.4. Проверка жесткости трубных решеток.

Проверка производится в случаях, когда к жесткости трубных решеток предъявляются какие-либо дополнительные требования, например; для аппаратов со стекающей пленкой, с перегородками по трубному пространству - в случае недопустимости перетоков между ходами.

Условие жесткости:

$$w' = \frac{1,2}{K_y q_1} |T_1 Q + T_2 \beta M| \leq [w'] \quad (57)$$

Рекомендуемые максимальные величины прогибов трубных решеток  $[w']$ , мм (см), в зависимости от диаметра аппарата, приведены в табл.6.

Таблица 6

D	D ≤ 0,6 м	0,6 м < D ≤ 1 м	1 м < D ≤ 2 м	D > 2 м
$[w']$	0,7мм(0,07см)	0,9мм(0,09см)	1,1мм(0,11см)	1,2мм(0,12см)

## 2.2.6. Расчет кожуха на прочность и устойчивость.

Проверка прочности кожуха в месте присоединения к решетке производится только для конструкций по черт. 9а, б, в, д, е.

2.2.6.1. Условия статической прочности кожуха в месте присоединения к решетке:

$$\sigma_{мх} \leq 1,3 [\sigma]_к \quad (58)$$

2.2.6.2. Проверка кожуха в месте присоединения к решетке на малоцикловую прочность производится по ГОСТ 25859-83. В случае, если в расчете должна учитываться ползучесть материала, допускается производить проверку на малоцикловую прочность по Приложению 3.

При проверке кожуха на малоцикловую прочность следует принимать:

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{мх} + \sigma_{ух}; \Delta \sigma_2 = \sigma_{мф} + \sigma_{уф}; \Delta \sigma_3 = 0 \quad (59)$$

$K_\sigma$  - по черт. 9

2.2.6.3. Если условие прочности кожуха в месте соединения с решеткой по п. 2.2.6.1. или п. 2.2.6.2. не выполняется, можно установить переходной пояс увеличенной толщиной длиной по мере  $2\sqrt{D\delta_1}$ .

2.2.6.4. В случае, если осевая сила в кожухе  $F < 0$ , следует провести проверку кожуха на прочность устойчивости от действия сжимающей силы  $F$  по ГОСТ 14249-80.

2.2.7. Расчет труб на прочность, устойчивость и жесткость и расчет прогиба труб в решетке.

2.2.7.1. Условие статической прочности труб:

$$\max \{ \sigma_{1T} ; \sigma_{2T} \} \leq [\sigma]_T ; \quad (60)$$

2.2.7.2. Проверка труб на малоцикловую прочность производится по ГОСТ 25859-83. В случае, если при расчете должна учитываться ползучесть материала, допускается производить проверку на малоцикловую прочность по Приложению 3.

При проверке труб на малоцикловую прочность следует принимать:

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_1 ; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 ; \quad K_3 = 1 \quad (61)$$

2.2.7.3. Проверка труб на устойчивость производится в случае, если  $N_T < 0$ . Условие устойчивости:

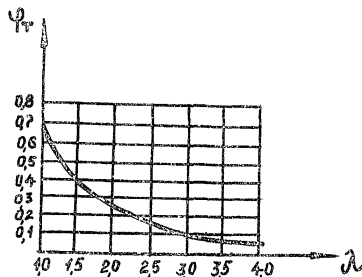
$$\sigma_{1T} \leq \varphi_T [\sigma]_T ; \quad (62)$$

где:  $\varphi_T$  - коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе определяется по черт. 10 в зависимости от  $\lambda$ .

$$\lambda = 1,3 \sqrt{\frac{[G]_T}{E_T}} \cdot \frac{l_R}{(d_T - S_T)} \quad (63)$$

где:  $l_R = l$  - для аппаратов без перегородок в кожухе.

$$l_R = \max \{l_{2R}; 0,7 l_{1R}\}$$



Черт. 10

#### 2.2.7.4. Проверка жесткости труб.

Проверка производится в случаях, когда к жесткости труб предъявляются какие-либо дополнительные требования, например, для аппаратов со стеной пленкой. Проверка жесткости труб производится только при  $N_T < 0$ .

Прогиб трубы:

$$y = A_y \frac{|M_T|}{|N_T|} \quad , \text{ мм (см)} \quad (64)$$

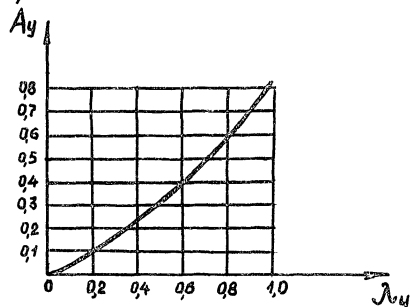
здесь:  $A_y$  - коэффициент, определяемый по графику черт. 11 в зависимости от  $\lambda_y$ :

$$\lambda_y = \frac{|N_T| l_{np}^2}{E_T y_T} \quad (65)$$

где:

$l_{np} = l$  - для аппаратов без перегородок в кожухе.

$l_{np} = l_{1R}/3$  - для аппаратов с перегородками.



Черт. II

Во всех случаях прогиб трубы не должен превышать зазор между трубами в пучке и приводить к их соприкосновению.

2.2.7.5. Проверка прочности крепления трубы в решетке.

В случае крепления труб в решетке с помощью развальцовки, должно выполняться условие:

$$|N_T| \leq [N]_{тр} \quad (66)$$

Допускаемая нагрузка на соединение трубы с решеткой  $[N]_{тр}$  определяется на основании результатов испытаний или по действующей нормативно-технической документации.

При отсутствии данных о прочности вальцовочного соединения, допускается принимать величину  $[N]_{тр}$  по приложению 5.

В случае крепления труб к решетке способом приварки или приварки с подвальцовкой, должно выполняться условие:

$$\tau = \frac{|N_T| d_T + 4 |M_T|}{\pi d_T^2 \delta} \leq \varphi_c \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\} \quad (67)$$

где:

$$\varphi_c = \min\{0,5; (0,95 - 0,2 \lg N)\}$$

$$\text{МПа (кгс/см}^2\text{)} \quad (68)$$

В случае крепления труб к решетке способом развальцовки с обваркой, должно выполняться условие:

$$\frac{\varphi_c \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_P\} + 0,6 \frac{[N]_{TP}}{|N_T|}}{\tau} \geq 1 \quad (69)$$

### 3. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ С ПЛАВАЮЩЕЙ ГОЛОВКОЙ, КОМПЕНСАТОРОМ НА ПЛАВАЮЩЕЙ ГОЛОВКЕ И U - ОБРАЗНЫМИ ТРУБАМИ

3.1. Толщина трубной решетки в зоне перфорации определяется по формуле:

$$S_p \geq S_p^p + C \quad (70)$$

где:

$$S_p^p = \frac{D_{cn}}{4,2} \sqrt{\frac{P_R}{\varphi_E [\sigma]_P}} \quad , \text{ мм(см)} \quad (71)$$

3.2. В случае, если к жесткости трубных решеток аппаратов с U - образными трубами предъявляются специальные требования (недопустим остаточный прогиб решетки), расчетную толщину следует

определять по формуле:

$$S_p^p = 0,82 a_1 \sqrt{\frac{P_R}{\varphi_E [\sigma]_p}} \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{2 a_1 + 1,5 \frac{D_{cn}}{a_1} (D_{cn} - 2 a_1)}{D_{cn} - 2 a_1 (1 - \varphi_E)}} \varphi_E + \frac{P_R}{\varphi_E [\sigma]_p} \right\}$$

мм (см) (72)

3.3. Эффективный коэффициент ослабления  $\varphi_E$  определяется по формуле:

$$\varphi_E = 1 - \frac{d_E}{t} \quad (73)$$

где:

$d_E = d_o - 2 S_T$  - для решеток с трубами, закрепленными на всю толщину решетки;

$d_E = d_o - S_T$  - для решеток с трубами, закрепленными в части толщины решетки;

$d_E = d_o$  - для стальных решеток с трубами из цветных металлов.

3.4. Толщина решетки в месте уплотнения под кольцевую прокладку должна отвечать условию:

$$S_{pn} \geq \max \left\{ 0,71 \sqrt{\frac{P_R}{[\sigma]_p}} (D_{cn} - D_B); 0,5 D_{cn} \frac{P_R}{[\sigma]_p} \right\} + C,$$

, мм(см) (74)



## 4. ПЕРЕГОРОДКИ МЕЖДУ КОДАМИ ПО ТРУБНОМУ ПРОСТРАНСТВУ

Толщина перегородки должна отвечать условию:

$$S_{\text{пер}} \geq 0,71 \delta_{\text{пер}} \sqrt{\frac{\Delta P \cdot f_n}{[\sigma]_n}} + C_n \quad (75)$$

где:

$$f_n = \frac{1}{1 + \frac{b_{\text{пер}}}{L_{\text{пер}}} + \left(\frac{b_{\text{пер}}}{L_{\text{пер}}}\right)^2} \quad (76)$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ I

## Обязательное

Определение коэффициентов изменения жесткости  $K_q^*$  и  $K_p^*$  для аппаратов с компенсатором или расширителем на кожухе.

Коэффициент  $K_q^*$  определяется как отношение осевого перемещения компенсатора (расширителя) при действии растягивающей силы к осевому перемещению краев корпуса межтрубного пространства без компенсатора (расширителя) от действия той же силы.

Коэффициент  $K_p^*$  определяется как отношение осевого перемещения компенсатора (расширителя) при действии внутреннего давления к осевому перемещению краев корпуса межтрубного пространства без компенсатора (расширителя) от действия того же давления.

Коэффициенты  $K_q^*$  и  $K_p^*$  для аппаратов с компенсатором на расширителе допускается определять, как суммы соответствующих величин для аппаратов с компенсатором и расширителем.

При определении коэффициентов  $K_q^*$  и  $K_p^*$  не учитывают влияние трубного пучка и равнодействующую внутреннего давления, действующую на края корпуса в осевом направлении.

Допускается определять значения коэффициентов  $K_q^*$  и  $K_p^*$  с помощью численных методов теории пластин и оболочек.

Для аппаратов с компенсатором на кожухе коэффициенты  $K_q^*$  и  $K_p^*$  могут быть определены по формулам:

$$K_q^* = \frac{\pi a E_k S_k}{l \cdot K_k}$$

$$K_p^* = - \frac{\pi (D_k^2 - d_k^2) E_k \cdot S_k}{4,8 l a K_k}$$

Жесткость компенсатора  $K_K$  следует определять по действующей нормативно-технической документации.

Для ненормализованных компенсаторов допускается определять осевую жесткость по формуле:

$$K_K = \frac{E_{\text{ком}} \cdot S_K^3}{n_{\text{ком}} d_K^2} A_K, \quad \text{Н/мм (кг/см)}$$

где:

$$A_K = \frac{6,8 \beta_K (1 + \beta_K)}{C_f (1 - \beta_K)^3}$$

$$\beta_K = \frac{d_K}{D_K}$$

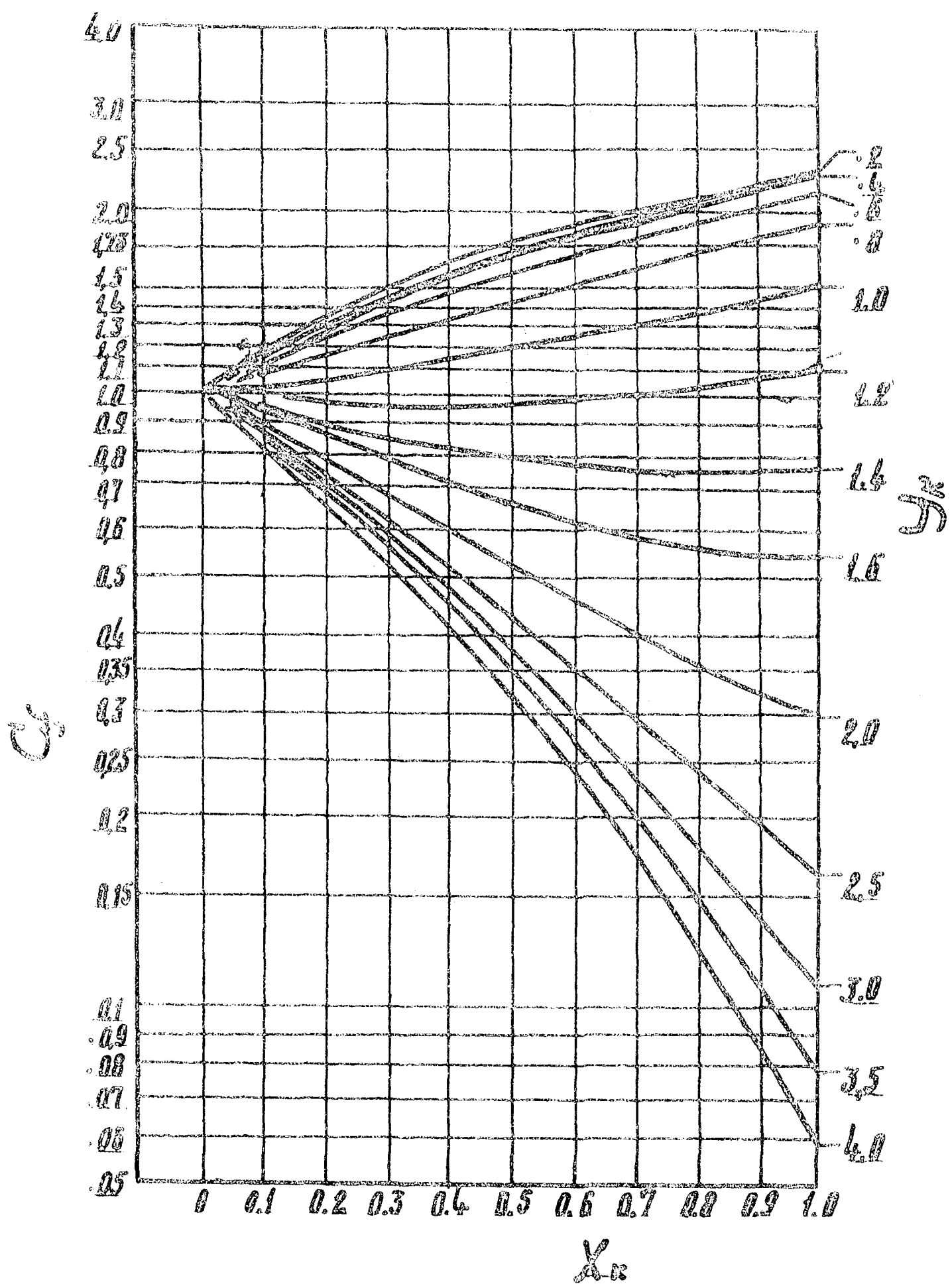
$C_f$  - определяется по графику черт. 12 в зависимости от

$$X_K = \frac{4 \Gamma_K \beta_K}{d_K (1 - \beta_K)} \quad \text{и} \quad Y_K = \frac{2,57 r_K}{\sqrt{d_K S_K (1 + \frac{1}{\beta_K})}}$$

Для аппаратов с расширителем на кожухе при  $\beta_0 = 90^\circ$  коэффициенты  $K_{qf}^*$  и  $K_p^*$  могут быть определены по формулам:

$$K_{qf}^* = \frac{\alpha S_K}{l} \left( \frac{\pi E_K}{K_{\text{рас.}}} + \frac{L_p}{S_p D_1} \right)$$

$$K_p^* = -\frac{\alpha S_K}{l \beta_p^2} \left\{ \frac{(1 - \beta_p^2)}{4,8} \left[ \frac{\pi E_K}{K_{\text{рас.}}} + \frac{L_p}{S_p D_1} \right] - 0,5 \frac{\pi L_p}{S_p D_1} \right\}$$



4e PM. 20.

где:

$$\beta_p = \frac{D}{D_1}$$

$$K_{pac.} = \frac{E_k \delta_p^3}{D^2} A_p$$

$A_p$  - определяется по табл. 7, в зависимости от  $\beta_p$

Таблица 7

Коэффициенты  $A_p$ 

$\beta_p$	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58
$A_p$	23,4	26,0	29,0	32,3	35,9	40,1	44,8	50,0
$\beta_p$	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66
$A_p$	56,0	62,7	70,3	78,9	88,8	100	113	128
$\beta_p$	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74
$A_p$	145	164	187	214	245	281	324	375
$\beta_p$	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82
$A_p$	436	509	597	704	834	996	1197	1451
$\beta_p$	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,9
$A_p$	1770	2190	2740	3460	4450	5820	7770	10600

Для аппаратов с расширителем на кожухе при  $15^\circ \leq \beta_0 \leq 60^\circ$   
коэффициенты  $K_q^*$  и  $K_p^*$  могут быть определены по формулам:

$$K_q^* = \frac{\alpha(A_{p1} + A_{p2} \sqrt{D_1/S_k}) - 0,5(1 - \beta_p)L_p}{\ell}$$

$$K_p^* = \frac{(\beta_{p1} + \beta_{p2} \sqrt{D_1/S_k})\alpha}{\ell}$$

Коэффициенты  $A_{p1}$ ,  $A_{p2}$ ,  $\beta_{p1}$  и  $\beta_{p2}$  определяются по табл. 8, в зависимости от  $\beta_0$  и  $\beta_p$

Вспомогательные коэффициенты, используемые при расчете теплообменных аппаратов с расширителем на кожухе.

Таблица 8

$\beta_p$	$\beta_0$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$\beta_{p1}$	$\beta_{p2}$
0,35	15°	8,695	0,204	-1,452	0,488
	30°	5,60	0,899	-7,650	2,144
	45°	5,939	2,436	-20,866	5,813
	60°	9,698	6,145	-60,596	14,664
0,36	15°	8,462	0,205	-1,525	0,457
	30°	5,449	0,903	-7,278	2,010
	45°	5,779	2,449	-19,675	5,450
	60°	9,438	6,177	-56,996	13,748
0,37	15°	8,235	0,207	-1,586	0,429
	30°	5,303	0,908	-6,932	1,887
	45°	5,624	2,461	-18,575	5,116
	60°	9,185	6,209	-53,677	12,906
0,38	15°	8,014	0,208	-1,636	0,403
	30°	5,160	0,913	-6,608	1,774
	45°	5,473	2,474	-17,557	4,808
	60°	8,938	6,241	-50,609	12,129
0,39	15°	7,799	0,209	-1,677	0,380
	30°	5,022	0,917	-6,306	1,669
	45°	5,327	2,486	-16,612	4,524
	60°	8,698	6,272	-47,768	11,412

Продолжение табл. 8

$\beta_p$	$\beta_0$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,40	15°	7,589	0,210	- 1,709	0,357
	30°	4,887	0,922	- 6,022	1,572
	45°	5,183	2,498	-15,733	4,260
	60°	8,464	6,303	-45,130	10,747
0,41	15°	7,384	0,211	- 1,733	0,337
	30°	4,755	0,926	- 5,755	1,481
	45°	5,044	2,510	-14,914	4,016
	60°	8,236	6,333	-42,678	10,131
0,42	15°	7,185	0,212	- 1,751	0,318
	30°	4,627	0,930	- 5,504	1,398
	45°	4,907	2,522	-14,149	3,789
	60°	8,014	6,363	-40,393	9,558
0,43	15°	6,990	0,213	- 1,762	0,300
	30°	4,501	0,935	- 5,267	1,320
	45°	4,774	2,534	-13,434	3,577
	60°	7,796	6,393	-38,260	9,024
0,44	15°	6,800	0,214	- 1,768	0,284
	30°	4,379	0,939	- 5,043	1,247
	45°	4,644	2,546	-12,764	3,380
	60°	7,584	6,422	-36,266	8,527
0,45	15°	6,613	0,215	- 1,770	0,268
	30°	4,259	0,943	- 4,831	1,179
	45°	4,517	2,557	-12,135	3,196
	60°	7,376	6,451	-34,399	8,062

Продолжение табл. 8

$\beta_p$	$\beta_n$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,46	15°	6,431	0,216	- 1,767	0,254
	30°	4,141	0,947	- 4,631	1,115
	45°	4,393	2,568	-11,544	3,023
	60°	7,173	6,479	-32,647	7,627
0,47	15°	6,253	0,216	- 1,760	0,240
	30°	4,027	0,952	- 4,440	1,056
	45°	4,271	2,580	-10,987	2,862
	60°	6,975	6,508	-31,001	7,220
0,48	15°	6,079	0,217	- 1,750	0,227
	30°	3,914	0,956	- 4,258	1,000
	45°	4,152	2,591	-10,463	2,711
	60°	6,780	6,536	-29,453	6,839
0,49	15°	5,908	0,218	- 1,737	0,216
	30°	3,805	0,960	- 4,085	0,947
	45°	4,035	2,602	- 9,967	2,568
	60°	6,590	6,563	-27,995	6,479
0,50	15°	5,741	0,219	- 1,721	0,204
	30°	3,697	0,964	- 3,920	0,898
	45°	3,921	2,613	- 9,499	2,434
	60°	6,403	6,591	-20,619	6,141
0,51	15°	5,577	0,220	- 1,702	0,194
	30°	3,591	0,968	- 3,763	0,852
	45°	3,809	2,623	- 9,055	2,306
	60°	6,220	6,618	-25,320	5,823



Продолжение табл. 8

$\beta_p$	$\beta_0$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,52	15°	5,416	0,221	- 1,682	0,184
	30°	3,488	0,972	- 3,612	0,808
	45°	3,699	2,634	- 8,635	2,190
	60°	6,041	6,645	-24,091	5,524
0,53	15°	5,258	0,222	- 1,659	0,174
	30°	3,386	0,976	- 3,468	0,766
	45°	3,591	2,645	- 8,236	2,077
	60°	5,865	6,672	-22,927	5,241
0,54	15°	5,103	0,223	- 1,634	0,165
	30°	3,286	0,979	- 3,330	0,727
	45°	3,486	2,655	- 7,856	1,971
	60°	5,692	6,698	-21,824	4,973
0,55	15°	4,951	0,224	- 1,608	0,157
	30°	3,188	0,983	- 3,197	0,690
	45°	3,382	2,665	- 7,496	1,871
	60°	5,523	6,724	-20,778	4,720
0,56	15°	4,802	0,225	- 1,581	0,149
	30°	3,092	0,987	- 3,070	0,655
	45°	3,290	2,676	- 7,152	1,776
	60°	5,356	6,750	-19,784	4,481
0,57	15°	4,656	0,225	- 1,552	0,141
	30°	2,998	0,991	- 2,947	0,622
	45°	3,180	2,686	- 6,825	1,686
	60°	5,193	6,776	-18,839	4,254

Продолжение табл. 8

$\beta_p$	$\beta_c$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,58	15°	4,512	0,226	- 1,522	0,134
	30°	2,905	0,995	- 2,829	0,591
	45°	3,081	2,698	- 6,512	1,601
	60°	5,032	6,801	-17,939	4,038
0,59	15°	4,370	0,227	- 1,491	0,128
	30°	2,814	0,998	- 2,716	0,561
	45°	2,985	2,706	- 6,214	1,520
	60°	4,874	6,826	-17,082	3,834
0,60	15°	4,231	0,228	- 1,459	0,121
	30°	2,724	1,002	- 2,606	0,532
	45°	2,890	2,716	- 5,929	1,443
	60°	4,719	6,851	-16,264	3,639
0,61	15°	4,094	0,229	- 1,426	0,115
	30°	2,636	1,006	- 2,500	0,505
	45°	2,796	2,726	- 5,656	1,369
	60°	4,566	6,876	-15,484	3,454
0,62	15°	3,959	0,230	- 1,393	0,109
	30°	2,550	1,009	- 2,398	0,479
	45°	2,704	2,736	- 5,394	1,300
	60°	4,416	6,901	-14,739	3,278
0,63	15°	3,827	0,230	- 1,359	0,103
	30°	2,464	1,013	- 2,299	0,455
	45°	2,614	2,745	- 5,144	1,233
	60°	4,268	6,925	-14,026	3,111

Продолжение табл.8

$\beta_p$	$\beta_c$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,64	15°	3,696	0,231	- 1,324	0,098
	30°	2,380	1,016	- 2,204	0,431
	45°	2,525	2,755	- 4,903	1,170
	60°	4,123	6,950	-13,344	2,951
0,65	15°	3,568	0,232	- 1,289	0,093
	30°	2,298	1,020	- 2,111	0,409
	45°	2,437	2,764	- 4,672	1,109
	60°	3,979	6,974	-12,691	2,798
0,66	15°	3,441	0,233	- 1,253	0,088
	30°	2,216	1,023	- 2,021	0,388
	45°	2,351	2,774	- 4,451	1,051
	60°	3,838	6,997	-12,065	2,652
0,67	15°	3,317	0,234	- 1,217	0,084
	30°	2,136	1,027	- 1,935	0,367
	45°	2,265	2,783	- 4,237	0,996
	60°:	3,699	7,021	-11,465	2,513
0,68	15°	3,194	0,234	- 1,181	0,079
	30°	2,057	1,030	- 1,850	0,348
	45°	2,182	2,792	- 4,032	0,943
	60°	3,563	7,045	-10,889	2,380

Продолжение табл. 8

$\beta_p$	$\beta_c$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,69	15°	3,073	0,235	- 1,144	0,075
	30°	1,979	1,034	- 1,768	0,329
	45°	2,099	2,802	- 3,834	0,893
	60°	3,428	7,068	-10,336	2,253
0,70	15°	2,954	0,236	- 1,107	0,071
	30°	1,902	1,037	- 1,689	0,312
	45°	2,018	2,811	- 3,644	0,845
	60°	3,295	7,091	- 9,804	2,131
0,71	15°	2,837	0,237	- 1,070	0,067
	30°	1,827	1,040	- 1,611	0,294
	45°	1,937	2,820	- 3,460	0,798
	60°	3,164	7,114	- 9,293	2,014
0,72	15°	2,721	0,237	- 1,033	0,063
	30°	1,752	1,044	- 1,536	0,278
	45°	1,858	2,829	- 3,283	0,754
	60°	3,035	7,137	- 8,801	1,902
0,73	15°	2,606	0,238	- 0,995	0,060
	30°	1,678	1,047	- 1,463	0,262
	45°	1,780	2,838	- 3,112	0,711
	60°	2,907	7,160	- 8,327	1,794
0,74	15°	2,494	0,239	- 0,958	0,056
	30°	1,606	1,050	- 1,391	0,247
	45°	1,703	2,847	- 2,946	0,670
	60°	2,782	7,182	- 7,870	1,691

Продолжение табл. 8

$\beta_p$	$\beta_0$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,75	15°	2,383	0,240	- 0,920	0,053
	30°	1,534	1,054	- 1,322	0,233
	45°	1,627	2,856	- 2,786	0,631
	60°	2,658	7,204	- 7,430	1,592
0,76	15°	2,273	0,240	- 0,882	0,050
	30°	1,464	1,057	- 1,254	0,219
	45°	1,552	2,865	- 2,632	0,593
	60°	2,535	7,227	- 7,005	1,497
0,77	15°	2,165	0,241	- 0,845	0,047
	30°	1,394	1,060	- 1,188	0,206
	45°	1,479	2,873	- 2,482	0,557
	60°	2,414	7,249	- 6,595	1,406
0,78	15°	2,058	0,242	- 0,807	0,044
	30°	1,325	1,063	- 1,123	0,193
	45°	1,406	2,882	- 2,337	0,522
	60°	2,295	7,271	- 6,199	1,318
0,79	15°	1,952	0,243	- 0,769	0,041
	30°	1,257	1,066	- 1,060	0,180
	45°	1,333	2,891	- 2,197	0,489
	60°	2,178	7,292	- 5,817	1,233
0,80	15°	1,848	0,243	- 0,732	0,038
	30°	1,190	1,070	- 0,998	0,168
	45°	1,262	2,899	- 2,060	0,456
	60°	2,061	7,314	- 5,447	1,151

Продолжение табл. 8

$\beta_p$	$\beta_o$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,81	15°	1,745	0,244	- 0,694	0,036
	30°	1,124	1,073	- 0,938	0,157
	45°	1,192	2,908	- 1,928	0,425
	60°	1,947	7,336	- 5,090	1,073
0,82	15°	1,644	0,245	- 0,656	0,033
	30°	1,058	1,076	- 0,879	0,146
	45°	1,123	2,916	- 1,800	0,395
	60°	1,833	7,357	- 4,743	0,997
0,83	15°	1,543	0,245	- 0,619	0,031
	30°	0,994	1,079	- 0,822	0,135
	45°	1,054	2,925	- 1,676	0,366
	60°	1,721	7,378	- 4,408	0,924
0,84	15°	1,444	0,246	- 0,581	0,028
	30°	0,930	1,082	- 0,766	0,125
	45°	0,986	2,933	- 1,555	0,339
	60°	1,611	7,399	- 4,084	0,854
0,85	15°	1,346	0,247	- 0,544	0,026
	30°	0,867	1,085	- 0,710	0,115
	45°	0,919	2,941	- 1,437	0,312
	60°	1,501	7,420	- 3,769	0,786

Продолжение табл. 8

$\beta_p$	$\beta_o$	$A_{p1}$	$A_{p2}$	$B_{p1}$	$B_{p2}$
0,86	15°	1,249	0,248	-0,507	0,024
	30°	0,804	1,088	-0,656	0,108
	45°	0,853	2,950	-1,323	0,236
	60°	1,393	7,441	-3,464	0,721
0,87	15°	1,153	0,248	-0,470	0,022
	30°	0,743	1,091	-0,604	0,096
	45°	0,788	2,958	-1,212	0,261
	60°	1,286	7,462	-3,168	0,657

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

## Обязательное

Упрощенный расчет элементов теплообменных аппаратов  
с неподвижными трубными решетками, компенсатором или  
расширителем на кожухе.

Толщина трубной решетки:

$$S_p \geq S_p^p + C$$

где:

$$S_p^p = \frac{f_1^* S_k}{\eta_T - \eta_M}$$

$f_1^*$  - определяется по черт. І3 в зависимости от  $A^I$  и  $B^I$ :

$$A^I = \frac{|P_0|}{2[\sigma]_a K_q \Psi_p}$$

$$B^I = \frac{\Psi_0 l}{S_k}$$

Осевое усилие в кожухе:

$$F = \pi a^2 \left( P_T - \frac{P_0}{1 + \beta K_q} \right)$$

При  $F < 0$  кожух проверяется на устойчивость по ГОСТ І4249-80.

Осевое усилие в трубе:

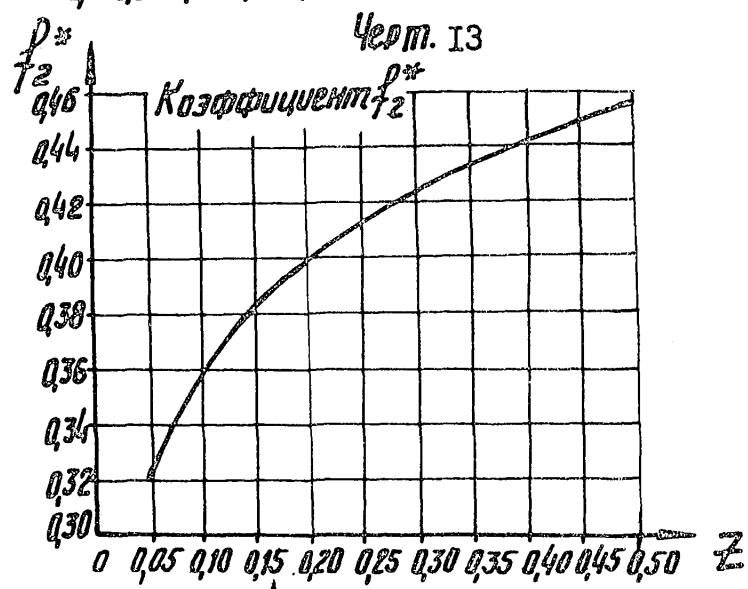
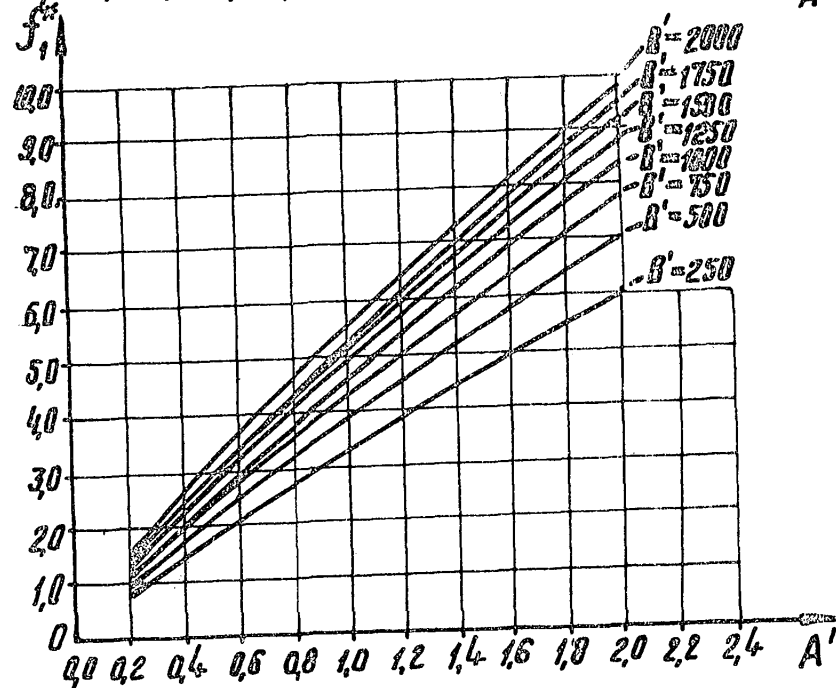
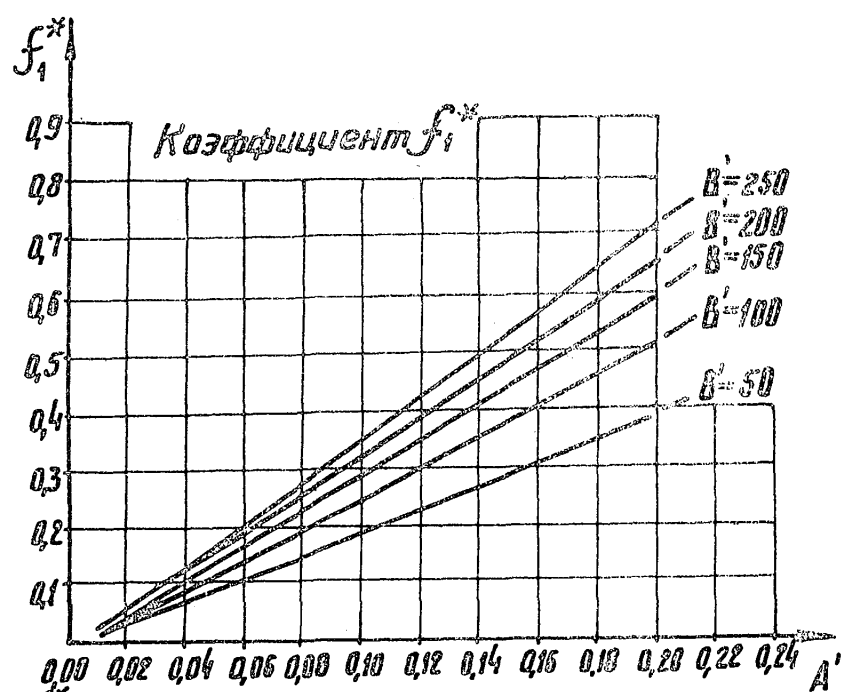
$$N_T = \frac{\pi d^2}{4} \left[ (\eta_M P_M - \eta_T P_T) + \frac{f_2^*}{f_2^* K_q^* + K_q} P_0 \right]$$

График  $f_2^*(Z)$  приведен на черт. І4 в зависимости от  $Z$ :

$$Z = \frac{43,7}{B} \left[ \frac{S_k}{S_p(\eta_T + \eta_M)} \right]^3$$

Проверка прочности труб и крепления их в решетке, а также  
устойчивости труб должны проводиться по формулам(50), (52) и  
п. 2.2.7.І., 2.2.7.3. и 2.2.7.5.





Черт. 14

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Обязательное

Определение допускаемой амплитуды условных упругих напряжений при работе материала в условиях ползучести.

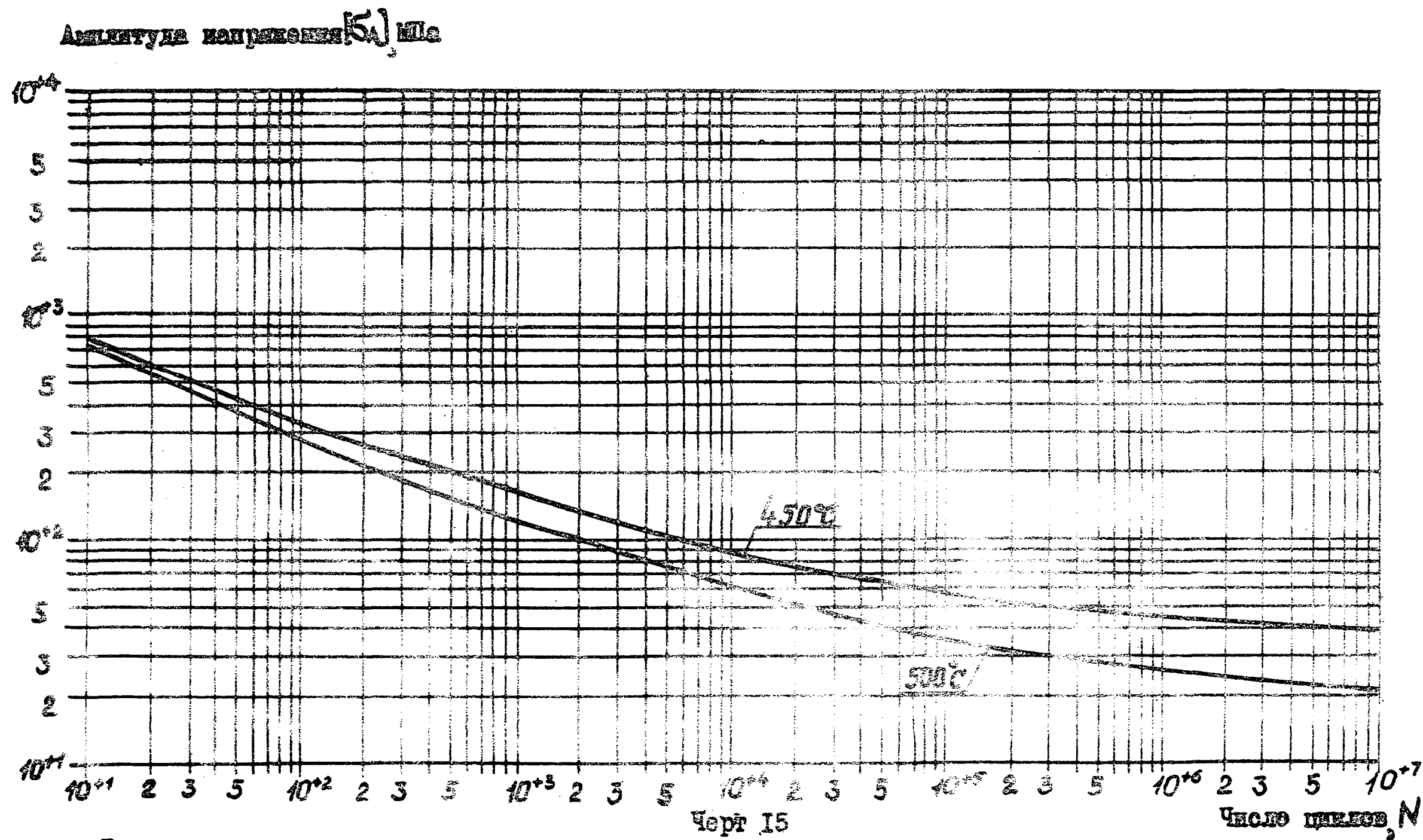
Если температура рассматриваемых элементов из углеродистых сталей превышает 380°C, из низколегированных коррозионностойких хромистых сталей - 500°C и из аустенитных сталей - 600°C, следует при выполнении расчета по ГОСТ 25859-83 принимать:

$$[\sigma_A] = 0,65 [\sigma],$$

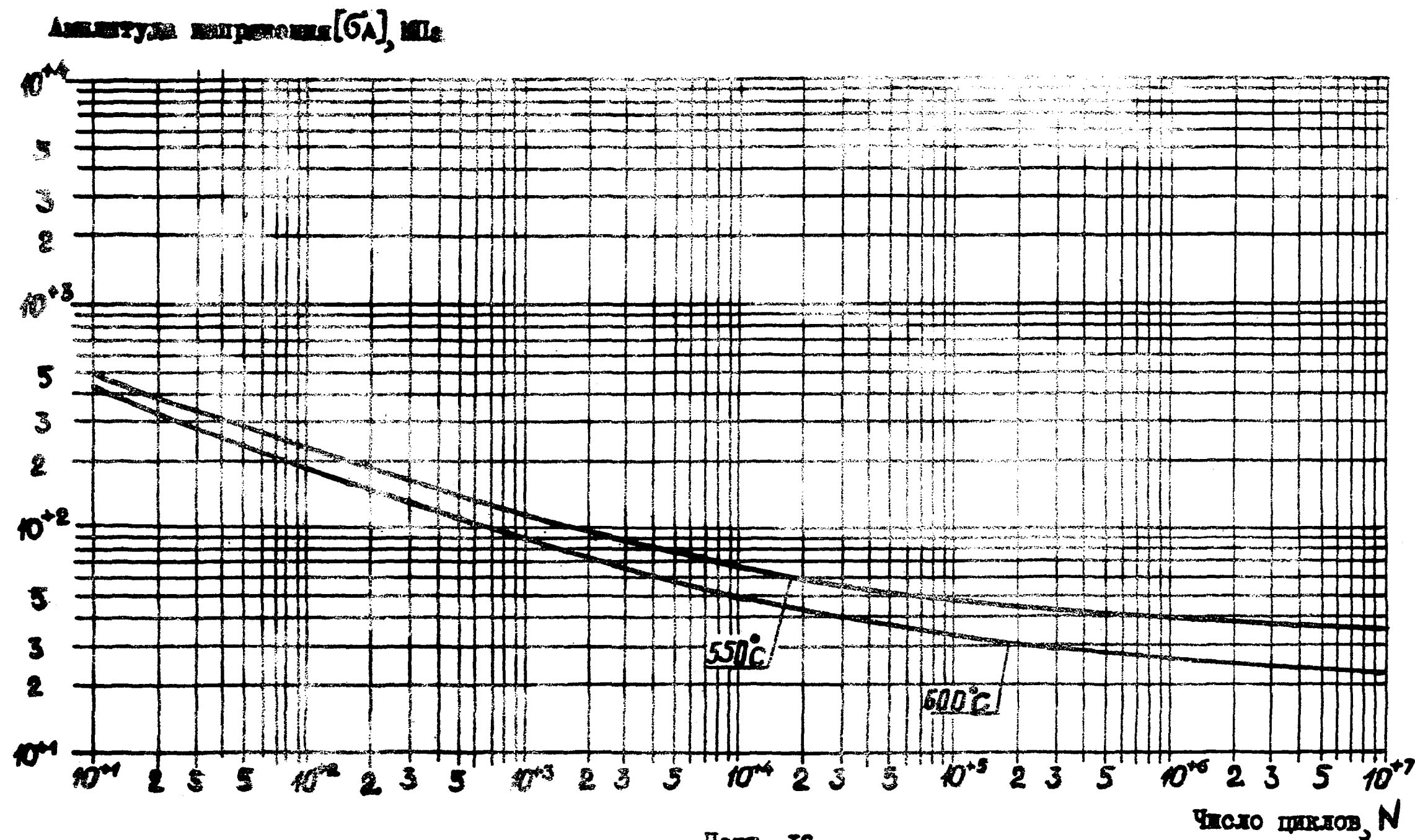
где  $[\sigma]$  - допускаемое напряжение по ГОСТ 14249-80 для рассматриваемого элемента при расчетной температуре

При температуре рассматриваемых элементов из низколегированных и коррозионностойких хромистых сталей от 420°C до 500°C допускается определять  $[\sigma_A]$  по графику черт. 15.

При температуре рассматриваемых элементов из аустенитных сталей от 525°C до 600°C допускается определять  $[\sigma_A]$  по графику черт. 16.



Расчетные кривые усталости для низколегированных и коррозионностойких хромистых сталей  
при длительности нагружения  $\sim 2 \cdot 10^5$  ч



Черт 16

Расчетные кривые усталости коррозионностойких сталей аустенитного класса при длительности нагружения  $2 \cdot 10^5$  ч

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

## Справочное

Величины  $m_{1,2}$ ;  $\beta_{1,2}$ ;  $K_{1,2}$ ;  $K_{\varphi 1,2}$  для стандартных фланцев.  
Фланцевые соединения под плоскую прокладку по ГОСТ 26-427-80.

Таблица 9

Д см	$P_y$ кгс/см <sup>2</sup>	$m_{1,2}$ см <sup>2</sup>	$\beta_{1,2}$ 1/см	$K_{1,2} \cdot 10^{-4}$ кгс.см/см	$K_{\varphi 1,2} \cdot 10^{-4}$ кгс.см/см
40	10	11,6	0,288	9,0	19,8
	16	12,4	0,275	11,5	23,2
	25	15,7	0,247	19,4	38,7
	40	22,4	0,211	47,8	56,9
	64	29,9	0,197	40,5	106
45	10	13,2	0,264	9,95	19,8
	16	14,0	0,254	12,2	22,7
	25	19,0	0,227	21,4	44,3
	40	26,0	0,191	48,1	91,7
	64	33,0	0,189	50,5	164,0
50	10	14,1	0,253	9,1	17,5
	16	15,2	0,242	11,5	20,6
	25	21,6	0,209	23,9	45,0
	40	30,8	0,182	45,1	102,0
	64	39,5	0,167	69,6	179,0
60	10	16,4	0,230	8,7	15,3
	16	18,7	0,212	13,2	20,9
	25	27,4	0,184	26,2	48,1
	40	39,1	0,160	51,9	109,0
	64	54,9	0,140	99,0	235,0
70	10	19,7	0,205	9,9	15,6
	16	24,5	0,192	13,6	25,0
	25	34,3	0,160	33,9	55,2
	40	48,4	0,145	53,1	118,0
	64	71,6	0,122	125,0	289,0
80	10	24,5	0,185	11,0	18,0
	16	28,8	0,173	15,5	25,9
	25	42,6	0,143	39,9	64,1
	40	59,9	0,126	72,6	136,0
	64	86,4	0,107	160,0	316,0

Продолжение табл.9

D см	$P_y$ кгс/см <sup>2</sup>	$m_{1,2}$ см <sup>2</sup>	$\beta_{1,2}$ 1/см	$K_{1,2} \cdot 10^{-4}$ кгс·см/см	$K_{\varphi_{1,2}} \cdot 10^{-4}$ кгс·см/см
90	10	29,3	0,171	11,6	19,5
	16	35,3	0,157	17,9	29,8
	25	48,2	0,132	41,5	64,0
	40	70,4	0,116	68,8	146,0
	64	109,0	0,095	207,0	398,0
100	10	35,7	0,156	13,6	22,9
	16	42,5	0,143	20,8	34,3
	25	57,8	0,121	48,0	73,7
	40	85,9	0,106	91,2	175,0
	64	128,0	0,088	226,0	443,0
110	10	38,0	0,150	12,6	21,9
	16	47,9	0,136	20,2	34,7
	25	67,7	0,112	53,4	82,2
	40	99,8	0,099	95,0	190,0
	64	151,0	0,080	266,0	497,0
120	10	43,4	0,138	14,8	22,6
	16	53,7	0,127	22,6	36,3
	25	78,3	0,104	58,8	91,2
	40	118,0	0,090	118,0	225,0
	64	170,0	0,074	306,0	531,0
130	10	49,7	0,130	15,7	24,7
	16	62,2	0,118	25,4	91,2
	25	85,3	0,099	60,7	40,9
	40	130,2	0,085	129,0	229,0
	64	197,0	0,069	343,0	605,0
140	10	52,5	0,125	15,0	23,0
	16	68,8	0,111	28,0	43,0
	25	95,2	0,094	62,7	96,0
	40	147,0	0,078	154,0	254,0
	64	227,0	0,065	369,0	679,0

Продолжение табл 9

D см	$P_y$ кгс/см <sup>2</sup>	$m_{1,2}$ см <sup>2</sup>	$\beta_{1,2}$ 1/см	$K_{1,2} \cdot 10^{-4}$ кгс·см/см	$K_{\varphi 1,2} \cdot 10^{-4}$ кгс·см/см
150	10	61,7	0,114	20,0	28,8
	16	76,9	0,103	32,0	47,9
	25	107,0	0,087	72,6	106,0
	40	176,0	0,072	192,0	322,0
	64	253,0	0,061	407,0	730,0
160	10	67,5	0,108	21,6	30,7
	16	84,4	0,097	35,3	51,1
	25	116,0	0,084	71,7	106,0
	40	196,0	0,068	199,0	344,0
	64	284,0	0,057	471,0	818,0
180	10	81,3	0,098	24,4	34,4
	16	100,0	0,089	38,7	55,3
	25	137,0	0,0785	72,8	111,0
200	10	93,3	0,092	24,8	35,3
	16	117,0	0,084	38,5	57,3
	25	167,0	0,072	82,1	131,0
220	10	105,0	0,087	25,0	35,7
	16	131,0	0,079	38,9	57,9
240	10	123,0	0,082	26,1	39,0
	16	163,0	0,074	41,9	72,1
260	10	140,0	0,076	28,5	42,5
	16	187,0	0,069	47,9	80,1
280	10	158,0	0,072	31,2	46,1
	16	213,0	0,065	51,2	87,0
300	10	175,0	0,069	30,7	47,9
	16	239,0	0,062	54,5	94,0
320	10	194,0	0,065	32,8	50,8
	16	269,0	0,058	58,9	102,0
340	6	169,0	0,066	26,3	34,7
	10	223,0	0,062	37,4	58,7

Продолжение табл. 9

$D$ см	$P_y$	$m_{1,2}$	$\beta_{1,2}$	$K_{1,2} \cdot 10^{-4}$	$K_{\varphi_{1,2}} \cdot 10^{-4}$
360	6	177,0	0,064	25,7	33,4
	10	250,0	0,059	40,8	65,0
380	6	197,0	0,062	26,3	35,6
	10	273,0	0,055	44,5	69,8
400	6	221,0	0,058	30,1	40,7
	10	294,0	0,053	49,2	73,3

Фланцевые соединения под плоскую прокладку аппаратов с наружным базовым диаметром по ОСТ 26-427-80

Таблица 10

Сортамент днища или трубы	$P_y$ кгс/см <sup>2</sup>	$m_{1,2}$ см <sup>2</sup>	$\beta_{1,2}$ 1/см	$K_{1,2} \cdot 10^{-4}$ кгс см/см	$K_{\varphi_{1,2}} \cdot 10^{-4}$ кгс см/см
426x10	25	15,7	0,246	19,0	37,6
	40	22,7	0,209	41,3	87,1
	64	30,4	0,196	57,7	172,0
480x12	25	19,2	0,225	21,7	43,6
	40	26,3	0,196	40,8	90,2
530x10	25	20,3	0,217	18,6	37,1
530x12	40	31,8	0,178	49,2	106,0
630x10	25	25,8	0,192	20,6	39,6
630x14	40	39,4	0,163	46,1	111,0
720x10	16	24,9	0,190	14,5	26,1
720x12	25	34,7	0,158	35,7	58,0



Фланцевые соединения под прокладку восьмиугольного сечения  
по ОСТ 26-428-80.

Таблица II

$\Phi$ (см)	$R_y$ кгс/см <sup>2</sup>	$m_{1,2}$ см <sup>2</sup>	$\beta_{1,2}$ кгс/см <sup>2</sup>	$K_{T,2} \cdot 10^{-4}$ кгс·см/см	$K_{\Phi 1,2} \cdot 10^{-4}$ кгс·см/см
40	64	29,9	0,197	57,0	172,0
	80	35,4	0,175	99,0	243,0
	100	42,1	0,161	153,0	353,0
	160	68,7	0,130	412,0	1020,0
45	64	33,0	0,189	50,5	164,0
	80	41,4	0,159	116,0	257,0
	100	51,7	0,145	182,0	420,0
	160	81,7	0,117	482,0	1140,0
50	64	39,5	0,167	69,5	179,0
	80	49,5	0,144	140,0	294,0
	100	61,7	0,131	224,0	479,0
	160	98,1	0,105	617,0	1340,0
60	64	54,9	0,140	99,0	235,0
	80	66,0	0,123	180,0	377,0
	100	84,6	0,111	292,0	619,0
	160	133,0	0,090	814,0	1700,0
70	64	71,6	0,122	125,0	288,0
	80	86,6	0,107	233,0	450,0
	100	111,0	0,097	366,0	774,0
	160	179,0	0,077	1060,0	2250,0
80	64	86,4	0,107	160,0	316,0
	80	109,0	0,095	285,0	544,0
	100	139,0	0,086	470,0	933,0
	160	235,0	0,068	1390,0	2970,0
90	64	109,0	0,095	207,0	398,0
	80	139,0	0,085	352,0	693,0
	100	176,0	0,077	553,0	1160,0
	160	288,0	0,061	1700,0	3510,0

Продолжение табл. II

D (см)	$P_y$ кгс/см <sup>2</sup>	$m_{1,2}$ см <sup>2</sup>	$\beta_{1,2}$ 1/см	$K_{I,2} \cdot 10^{-4}$ кгс·см/см	$K_{\varphi_{1,2}} \cdot 10^{-4}$ кгс·см/см
100	64	129,0	0,088	226	443
	80	167,0	0,077	423	798
	100	212,0	0,070	677	1360
	160	344,0	0,055	2080	4070
110	64	154,0	0,090	266	516
	80	199,0	0,071	490	932
	100	255,0	0,064	811	1620
	160	413,0	0,050	2430	4830
120	64	176,0	0,074	306	568
	80	228,0	0,065	559	1020
	100	289,0	0,060	877	1740
	160	488,0	0,046	2920	5700
130	64	200,0	0,069	343	624
	80	263,0	0,061	642	1170
	100	338,0	0,055	1020	2010
140	64	234,0	0,065	369	723
	80	302,0	0,057	703	1310
	100	386,0	0,051	1170	2270
150	64	257,0	0,061	407	751
	80	345,0	0,054	788	1490
	100	445,0	0,048	1340	2620
160	64	289,0	0,057	471	839
	80	389,0	0,050	886	1640

Величины  $K_{I,2}$ ;  $K_{\varphi_{1,2}}$  приведены в таблицах настоящего приложения, рассчитаны в предположении, что модуль продольной упругости материала фланцев равен:  $E = 1,99 \cdot 10^6 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

## Справочное

Допускаемая нагрузка на вальцовочное соединение  
трубы с решеткой

При отсутствии более точных данных, впредь, до разработки унифицированного нормативного метода расчета вальцовочных соединений, допускается определять допускаемую нагрузку на вальцовочное соединение трубы с решеткой по формуле:

$$[N]_{\text{тр}} = d \cdot l_{\text{в}} [q] \quad , \text{ Н (кгс)}$$

где:

$[q] = 14,7 \text{ МПа (150 кгс/см}^2\text{)}$  - для гладкозавальцованных труб

$[q] = 29,4 \text{ МПа (300 кгс/см}^2\text{)}$  - для труб завальцованных в пазы

$[q] = 39,2 \text{ МПа (400 кгс/см}^2\text{)}$  - для труб завальцованных с отбортовкой

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

## Справочное

Расчетные зависимости для определения величин,  
приведенных в таблицах или на графиках.

$$\Psi_0 = \eta_T^{7/3}$$

$$\Phi_1 = \frac{\omega}{T} [\text{ber}^2 \omega + \text{bei}^2 \omega + \frac{0.7}{\omega} (\text{ber}' \omega \cdot \text{bei} \omega - \text{bei}' \omega \cdot \text{ber} \omega)]$$

$$\Phi_2 = \frac{\omega}{T} (\text{ber} \omega \cdot \text{ber}' \omega + \text{bei} \omega \cdot \text{bei}' \omega)$$

$$\Phi_3 = \frac{\omega}{T} (\text{ber}'^2 \omega + \text{bei}'^2 \omega)$$

$$A = \frac{0.91}{T} \{ f_1(\omega) \text{bei}'' x - f_2(\omega) \text{ber}'' x + m (\text{ber}' \omega \text{ber}'' x + \text{bei}' \omega \text{bei}'' x) \}$$

$$B = \frac{0.91}{T} \{ n [f_1(\omega) \text{bei}'' x - f_2(\omega) \text{ber}'' x] + \text{ber}' \omega \text{ber}'' x + \text{bei}' \omega \text{bei}'' x \}$$

где:

$$T = -f_2(\omega) \text{bei}' \omega - f_1(\omega) \text{ber}' \omega$$

$$f_1(\omega) = \frac{0.7}{\omega} \text{ber}' \omega + \text{bei} \omega$$

$$f_2(\omega) = \frac{0.4}{\omega} \text{bei}' \omega - \text{ber} \omega$$

$\omega$  - величина, принадлежащая отрезку:

$$x \in [0, \omega] \quad \text{при } \omega \leq 3,$$

или отрезку

$$x \in [0, (\omega - 3)] \quad \text{при } \omega > 3,$$

выбираемое таким образом, чтобы коэффициенты А или В, соответственно, принимали максимальные значения.

$\text{ber}''$ ,  $\text{bei}''$ ,  $\text{ber}'$ ,  $\text{bei}'$ ,  $\text{ber}$ ,  $\text{bei}$  - функции Бесселе,

которые могут быть определены по формулам:

$$\text{ber}''y = -\text{bei}y - \frac{\text{ber}'y}{y}$$

$$\text{bei}''y = \text{ber}y - \frac{\text{bei}'y}{y}$$

$$\text{ber}'y = -\frac{1}{2!}\left(\frac{y}{2}\right)^3 + \frac{1}{3!4!}\left(\frac{y}{2}\right)^7 - \frac{1}{5!6!}\left(\frac{y}{2}\right)^{11} + \dots$$

$$\text{bei}'y = \frac{y}{2} - \frac{1}{2!3!}\left(\frac{y}{2}\right)^5 + \frac{1}{4!5!}\left(\frac{y}{2}\right)^9 - \dots$$

$$\text{ber}y = 1 - \frac{1}{(2!)^2}\left(\frac{y}{2}\right)^4 + \frac{1}{(4!)^2}\left(\frac{y}{2}\right)^8 - \dots$$

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

$$\varphi_r = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^4}}$$

$$A_y = \frac{1 - \cos\sqrt{\lambda_y}}{\cos\sqrt{\lambda_y}}$$

$$f_1^* = 1,29(A')^{4/5} (B')^{1/5} \left[ \frac{(A')^{3/5} (B')^{2/5} + 0,43}{(A')^{3/5} (B')^{2/5} + 0,85} \right]^4 ;$$

$$f_2^* = \frac{\sqrt[4]{Z}}{\sqrt[4]{Z} + 1} ;$$

$$A_{p1} = \frac{2}{\sin \beta_0 \cos^3 \beta_0} \ln \frac{1}{\beta_p} ;$$

$$A_{p2} = \frac{1,82 \sin^2 \beta_0}{(\cos \beta_0)^{3/2}} (1 + \sqrt{\beta_p}) ;$$

$$B_{p1} = \frac{-1,06}{\sin \beta_0 \cos^2 \beta_0} \left[ \ln \frac{1}{\beta_p} + \left( \frac{1}{\beta_p^2} - 1 \right) (0,3 \cos^4 \beta_0 + \right. \\ \left. + 1,5 \sin^2 \beta_0 - 0,5 \cos^2 \beta_0 + \sin^4 \beta_0) \right] ;$$

$$B_{p2} = \frac{0,965 \sin^2 \beta_0}{(\cos \beta_0)^{3/2}} \left( \frac{1}{\beta_p^2} - 1 \right)$$

$$A_p = 9,20 \frac{\beta_p^2 (1 - \beta_p^2)}{(1 - \beta_p^2)^2 - 4 \beta_p^2 \ln^2 \beta_p} \text{ при } \beta_p \leq 0,9$$

$$A_p \approx \frac{13,8}{(1 - \beta_p)^3} \left[ 1 - \frac{5}{2} (1 - \beta_p) + \frac{61}{30} (1 - \beta_p)^2 - \frac{11}{20} (1 - \beta_p)^3 \right] \\ \text{при } \beta_p > 0,9$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ  
ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

## Исходные данные

Внутренний радиус кожуха, см	$a = 140$
Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы, см	$a_1 = 134,75$
Диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную область, см	$D_E = 7,925$
Радиус отбортовки, см	$r = 3,0$
Внутренний диаметр кожуха, см	$D = 280$
Наружный диаметр трубы, см	$d_T = 2,5$
Диаметр отверстия в решетке, см	$d_o = 2,55$
Расчетная длина труб, см	$l_R = 300$
Шаг расположения отверстий в решетке, см	$t_p = 3,7$
Количество труб	$i = 4117$
Высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке, см	$\delta = 0,2$
Прибавка на коррозию, см	$C = 0,2$
Половина длины труб, см	$l = 150$
Толщина стенок кожуха	$S_K = 1,2$
труб	$S_T = 0,2$
Толщина трубной решетки, см	$S_p = 1,0$
Толщина стенок в месте соединения с решеткой, см	$S_1 = S_2 = 1,2$
$h_1 = h_2 = S_p$ см	$h_1 = h_2 = 1,0$
$b_1 = b_2 = r + S = 3,0 + 1,2 = 4,2$ см	$b_1 = b_2 = 4,2$
$R_1 = R_2 = a + \frac{S_2}{2} = 140 + \frac{1,2}{2} = 140,6$ см	$R_1 = R_2 = 140,6$
Средняя температура стенки, °C	
кожуха	$t_K = 115^\circ$
труб	$t_T = 132^\circ$
сборки	$t_o = 20^\circ$

Коэффициенты линейного расширения  
материалов, 1/град

кожуха

$$\alpha_k = 16,66 \cdot 10^{-6}$$

труб

$$\alpha_T = 16,73 \cdot 10^{-6}$$

Модули упругости материалов, кгс/см<sup>2</sup>

решетки

$$E_p = 1,9 \cdot 10^6$$

труб

$$E_T = 1,99 \cdot 10^6$$

кожуха

$$E_k = 1,99 \cdot 10^6$$

камеры

$$E_D = 1,9 \cdot 10^6$$

Допускаемое число циклов нагружения

$$[N] = 2000$$

Допускаемые напряжения для материала, кгс/см<sup>2</sup>

труб

$$[\sigma]_T = 1600$$

решеток, кожуха

$$[\sigma]_p = 1480 - [\sigma]_k$$

Давление в трубном пространстве, кгс/см<sup>2</sup>

$$P_T = 6$$

Давление в межтрубном пространстве, кгс/см<sup>2</sup>

$$P_M \neq 0,7$$

Модули упругости материалов фланцев, кгс/см<sup>2</sup>

кожуха

$$E_1 = 1,99 \cdot 10^6$$

камеры

$$E_2 = 1,9 \cdot 10^6$$

Толщина трубной решетки назначается конструктивно

$$S_p = 1,0 \text{ см}$$

Для решетки, выполненной засдно с фланцем, принятая толщина должна быть не менее толщины ответного фланца.

Принятая толщина трубной решетки должна удовлетворять условиям прочности беструбной зоны:

$$S_p \geq 0,5 D_e \sqrt{\frac{P_k}{[\sigma]_p}} + C = 0,5 \cdot 7,925 \sqrt{\frac{6}{1480}} + 0,2 = 0,45 \text{ см}$$

$$1,00 \text{ см} > 0,45 \text{ см}$$

**ТЕПЛООБМЕННИК АППАРАТ С НЕПОДВИЖНЫМИ ТРУБНЫМИ РЕШЕТКАМИ**

Вспомогательные величины.

Основные параметры трубной решетки.

Относительная характеристика беструбного края:

$$m_n = a/a_1 = 140/134,75 = 1,04$$

Коэффициенты влияния давления на трубную решетку:

$$\begin{aligned} h_m &= 1 - \frac{1 \cdot d_T^2}{4 a_1^2} = 1 - \frac{4117 \cdot 2,5^2}{4 \cdot 134,75^2} = 0,65 \\ &= 1 - \frac{1 \cdot (d_T - 23r)^2}{4 a_1^2} = 1 - \frac{4117(2,5 - 2 \cdot 0,2)^2}{4 \cdot 134,75^2} = 0,75 \end{aligned}$$



Коэффициент ослабления трубной решетки:

$$y_p = 1 - \frac{d_o}{t_p} = 1 - \frac{2,55}{3,7} = 0,311$$

Коэффициент жесткости перфорированной плиты по табл. I в зависимости от  $\eta_T$ :

$$\psi_0 = 0,51$$

Основные характеристики жесткости элементов теплообменного аппарата.

Модуль упругости основания (системы труб):

$$K_y = \frac{E_T(\eta_T - \eta_M)}{l} = \frac{1,99 \cdot 10^6 (0,75 - 0,65)}{150} = 1327$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости кожуха:

$$\rho = \frac{K_y a_1 l}{E_k S_k} = \frac{1327 \cdot 134,75 \cdot 150}{1,99 \cdot 10^6 \cdot 1,2} = 11,2$$

Коэффициенты изменения жесткости системы труб-кожух:

$$K_q = 1 + K_q^*$$

$$K_p = 1 + K_p^*$$

для аппаратов с неподвижными трубными решетками:

$$K_p^* = K_q^* = 0$$

$$K_q = 1$$

$$K_p = 1$$

Приведенное давление:

$$P_0 = [d_k(t_k - t_0) - \alpha_T(t_T - t_0)] K_y l + [h_T - 1 + m_{cp} + \\ + m_n(m_n + 0,5\rho K_q)] P_T - [h_M - 1 + m_{cp} + \\ + m_n(m_n + 0,3\rho K_p)] P_M, \text{ кгс/см}^2,$$

где

$$m_{cp} = 0,15 \frac{i(d_T - s_T)^2}{a_1^2} = 0,15 \frac{4117(2,5 - 0,2)^2}{134,75^2} = 0,18$$

$$P_0 = [16,66(115 - 20) - 16,73(132 - 20)] \cdot 1327 \cdot 150 \cdot 10^{-6} + \\ + [0,75 - 1 + 0,18 + 1,04(1,04 + 0,5 \cdot 11,2 \cdot 1)] 6 - \\ - [0,65 - 1 + 0,18 + 1,04(1,04 + 0,3 \cdot 11,2 \cdot 1)] \cdot 0,7 = -20.$$

Определение усилий в элементах аппаратов и расчет на прочность.

Характеристики жесткости элементов конструкции.

Коэффициент системы решетка-трубы:

$$\beta = \frac{1,82}{S_p} \sqrt[4]{\frac{K_y S_p}{\psi_0 E_p}} = \frac{1,82}{1,0} \sqrt[4]{\frac{1327 \cdot 1,0}{0,51 \cdot 1,9 \cdot 10^6}} = 0,346 \frac{1}{\text{см}}$$

Коэффициенты системы кожух-решетка и обечайка-фланец камеры:

$$\beta_1 = \frac{1,3}{\sqrt{a s_1}} = \frac{1,3}{\sqrt{140 \cdot 1,2}} = 0,1 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\beta_2 = \frac{1,3}{\sqrt{a \cdot s_2}} = \frac{1,3}{\sqrt{140 \cdot 1,2}} = 0,1 \frac{1}{\text{см}}$$

Жесткость фланцевого соединения при изгибе:

$$K_{\varphi} = K_{\varphi_1} + K_{\varphi_2} = (0,065 + 0,063) \cdot 10^6 = 0,128 \cdot 10^6 \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}}$$

$$K_{\varphi_1} = \frac{E_1 h_1^3 b_1}{12 R_1^2} + K_1 \left(1 + \frac{\beta_1 h_1}{2}\right) \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}},$$

где

$$K_1 = \frac{\beta_1 a E_k S_1^3}{5,5 R_1} = \frac{0,1 \cdot 140 \cdot 1,99 \cdot 10^6 \cdot 1,2^3}{5,5 \cdot 140,6} = 0,062 \cdot 10^6 \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}}$$

$$K_{\varphi_1} = \frac{1,99 \cdot 10^6 \cdot 1,0^3 \cdot 4,2}{12 \cdot 140,6^2} + 0,062 \left(1 + \frac{0,1 \cdot 1,0}{2}\right) \cdot 10^6 = 0,065 \cdot 10^6 \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}}$$

$$K_{\varphi_2} = \frac{E_2 h_2^3 b_2}{12 R_2^2} + K_2 \left(1 + \frac{\beta_2 h_2}{2}\right) \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}},$$

где

$$K_2 = \frac{\beta_2 a E_2 S_2^3}{5,5 R_2} = \frac{0,1 \cdot 140 \cdot 1,9 \cdot 10^6 \cdot 1,2^3}{5,5 \cdot 140,6} = 0,06 \cdot 10^6 \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}}$$

$$K_{\varphi_2} = \frac{1,9 \cdot 10^6 \cdot 1,0^3 \cdot 4,2}{12 \cdot 140,6^2} + 0,06 \left(1 + \frac{0,1 \cdot 1,0}{2}\right) \cdot 10^6 = 0,063 \cdot 10^6 \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}}$$

Коэффициенты влияния давления на изгиб фланцев:

$$m_1 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2 \beta_1^2} \text{ см}^2$$

$$m_2 = \frac{1 + \beta_2 h_2}{2 \beta_2^2} \text{ см}^2$$

$$m_1 = m_2 = \frac{1 + 0,1 \cdot 1,0}{2 \cdot 0,1^2} = 5,5 \text{ см}^2$$

Приведенное отношение жесткости труб к жесткости фланцевого соединения :

$$\beta_1 = \frac{K_y \cdot \alpha \cdot a_1}{\beta^2 \cdot K_{\phi} \cdot R_1} = \frac{1324 \cdot 140 \cdot 134,75}{0,346^2 \cdot 0,128 \cdot 10^6 \cdot 140,6} = 11,6$$

Коэффициент

$$\omega = \beta \cdot a_1 = 0,346 \cdot 134,75 = 46,6$$

Коэффициенты, учитывающие влияние беструбного края решетки и поддерживающее влияние труб:

$$\varphi_1 = \varphi_3 = \sqrt{2} \cdot \omega = \sqrt{2} \cdot 46,6 = 66$$

$$\varphi_2 = \omega = 46,6$$

Коэффициенты:

$$t = 1 + 1,4 \omega (m_n - 1) = 1 + 1,4 \cdot 46,6 (1,04 - 1) = 3,6$$

$$T_1 = \varphi_1 [m_n + 0,5(1 + m_n t)(t - 1)] =$$

$$= 66 [1,04 + 0,5(1 + 1,04 \cdot 3,6)(3,6 - 1)] = 476$$

$$T_2 = \varphi_2 t = 46,6 \cdot 3,6 = 168$$

$$T_3 = \varphi_3 m_n = 66 \cdot 1,04 = 68,6$$

Усилия в элементах конструкции.

Изгибающий момент и перерезывающая сила, распределенные по краю трубной решетки:

$$M = \left( \frac{a_1}{\beta} \right) \frac{P_1 (T_1 + \beta K_y) - P_0 T_2}{(T_1 + \beta K_y)(T_3 + \beta_1) - T_2^2},$$

где

$$P_1 = \frac{K_y}{\beta K_{\phi}} (m_1 P_M - m_2 P_T) = \frac{1324}{0,346 \cdot 0,128 \cdot 10^6} =$$

$$= (55 \cdot 0,7 - 55 \cdot 6) = -8,73 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

$$M = \frac{134,75}{0,346} \cdot \frac{(-8,73)(476 + 11,2 \cdot 1) - (-20) \cdot 168}{(476 + 11,2 \cdot 1)(68,6 + 11,6) - 168^2} = -30 \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}}$$

$$Q = a_1 \frac{P_0 (T_3 + \beta_1) - P_1 T_2}{(T_1 + \beta K_y)(T_3 + \beta_1) - T_2^2} = 134,75 \cdot$$

$$\cdot \frac{(-20)(68,6 + 11,6) - (-8,73) \cdot 168}{(476 + 11,2 \cdot 1)(68,6 + 11,6) - 168^2} = -1,7 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}$$

Изгибающий момент и перерезывающие силы, распределенные по периметру перфорированной зоны решетки:

$$M_a = M + (a - a_1) Q = -30 + (140 - 134,75) \cdot (-1,7) = -39 \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}}$$

$$Q_a = m_n Q = 1,04 \cdot (-1,7) = -1,77 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}$$

Осевая сила и изгибающий момент, действующие на трубу:

$$N_T = \frac{\pi a_1}{l} [(\eta_M P_M - \eta_T P_T) a_1 + \varphi_1 Q_a + \varphi_2 \beta M_a] =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 134,75}{4117} [(0,65 \cdot 0,7 - 0,75 \cdot 6) 134,75 + 66(-1,77) +$$

$$+ 46,6 \cdot 0,346 \cdot (-39)] = -133 \text{ кгс}.$$

$$M_T = \frac{E_T \gamma_T \beta}{K_y a_1 l_{np}} (\varphi_1 Q_a + \varphi_2 \beta M_a) =$$

$$\frac{199 \cdot 10^6 \cdot 0,962 \cdot 0,346}{1327 \cdot 134,75 \cdot 150} (46,6(-1,77) + 66 \cdot 0,346 \cdot (-39)) = -24 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

$$\gamma_T = \frac{\gamma_L}{64} (d_T^4 - (d_T - 2s_T)^4) = 0,962 \text{ см}^4$$

Усилия в кожухе:

$$Q_K = \frac{a}{2} P_T - Q = \frac{140}{2} \cdot 6 - (-1,7) = 422 \frac{\text{кгс}}{\text{см}}$$

$$M_K = \frac{K_1}{r_1 K_{\varphi} \beta} (T_2 Q + T_3 \beta M) - \frac{P_M}{2 \beta_1} =$$

$$= \frac{0,062 \cdot 10^6}{11,6 \cdot 0,128 \cdot 10^6 \cdot 0,346} (168(-1,7) + 68,6 \cdot 0,346(-30)) - \frac{0,7}{2 \cdot 0,12} =$$

$$= -155 \frac{\text{кгс} \cdot \text{см}}{\text{см}}$$

$$F = \pi D Q_K = 3,14 \cdot 280 \cdot 422 = 371022 \text{ кгс}.$$

Расчетные напряжения в элементах конструкции.

Расчетные напряжения в трубных решетках.

Напряжение в трубной решетке в месте соединения с кожухом:

- изгибные  $\sigma_{r1} = \frac{6|M|}{(s_{1p} - c)^2} = \frac{6 \cdot 30}{(1,0 - 0,2)^2} = 281 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$

- касательные  $\tau_{r1} = \frac{|Q|}{(s_{1p} - c)} = \frac{1,7}{1,0 - 0,2} = 2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$

Напряжение в перфорированной части трубной решетки:

$$\begin{aligned} \text{-- изгибные: } \sigma_{p2} &= \frac{6 M_{\max}}{y_p (s_p - c)^2} \\ \frac{y_p M_a}{Q_a} &= \frac{0,346 \cdot (-39)}{(-1,44)} = 9,6 \\ M_{\max} &= y_p |M_a| \\ n &= \frac{Q_a}{y_p M_a} = 0,1; \quad \omega = 46,6 > 10; \quad b = 0,882 \\ M_{\max} &= 0,882 \cdot 39 = 34 \text{ кгс} \cdot \text{см} \\ \sigma_{p2} &= \frac{6 \cdot 34}{0,341(1,0 - 0,2)^2} = 1025 \text{ кгс/см}^2 \end{aligned}$$

$$\text{-- касательные: } \tau_{p2} = \frac{|Q_a|}{y_p (s_p - c)} = \frac{1,44}{0,341(1,0 - 0,2)} = 4 \text{ кгс/см}^2$$

Расчетные напряжения в кожухе в месте присоединения к решетке.

-- в меридиональном направлении:

$$\text{-- мембранные} \\ \sigma_{mx} = \frac{|Q_k|}{(s_1 - c_k)} = \frac{422}{(1,2 - 0,2)} = 422 \text{ кгс/см}^2$$

$$\text{-- изгибные} \\ \sigma_{ux} = \frac{6 |M_k|}{(s_1 - c_k)^2} = 930 \text{ кгс/см}^2$$

-- в окружном направлении:

$$\text{-- мембранные:} \\ \sigma_{my} = \frac{|P_m| a}{(s_1 - c_k)} = \frac{0,4 \cdot 140}{1,2 - 0,2} = 98 \text{ кгс/см}^2$$

$$\text{-- изгибные:} \\ \sigma_{uy} = 0,3 \sigma_{ux} = 0,3 \cdot 930 = 279 \text{ кгс/см}^2$$

Расчетные напряжения в трубах:

-- в осевом направлении:

$$\sigma_{1T} = \frac{|N_T|}{\pi (d_T - s_T) s_T} = \frac{133}{3,14(2,5 - 0,2) 0,2} = 92 \text{ кгс/см}^2$$

$$\sigma_1 = \sigma_{1T} + \frac{d_T |M_T|}{2 s_T} = 92 + \frac{2,5 \cdot 2,4}{2 \cdot 0,962} = 123 \text{ кгс/см}^2$$

-- в окружном направлении:

$$\begin{aligned} \sigma_{2T} &= \frac{(d_T + s_T) \max\{|P_T|; |P_M|; |P_T - P_M|\}}{2 s_T} = \\ &= \frac{(2,5 + 0,2) \cdot 6}{2 \cdot 0,2} = 40,5 \text{ кгс/см}^2 \end{aligned}$$

Расчет трубных решеток на прочность и жесткость.

Условие статической прочности трубной решетки:

$$\max \{ \tau_{p1}; \tau_{p2} \} \leq 0,5 [\sigma]_p$$

$$7 < 740$$

Проверка трубной решетки на малоцикловую прочность производится по ГОСТ 25859-83;

- в месте соединения с кожухом:

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{p1} = 281 \text{ кгс/см}^2$$

$$\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = 0$$

по черт. 9  $K\sigma = 1,7$

$$\sigma_A = \frac{K\sigma}{2} \max \{ |\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2|; |\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3|; |\Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_1| \}$$

$$= \frac{1,7}{2} \cdot 281 = 239 \text{ кгс/см}^2 < [\sigma_A] = 4300 \text{ кгс/см}^2$$

- в перфорированной части:

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{p2} = 1025 \text{ кгс/см}^2$$

$$\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = 0$$

$$K\sigma = 1$$

$$\sigma_A = \frac{K\sigma}{2} \max \{ |\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2|; |\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3|; |\Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_1| \} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1025 = 513 \text{ кгс/см}^2 < [\sigma_A] = 4300 \text{ кгс/см}^2$$

Расчет кожуха на прочность и устойчивость.

Условие статической прочности кожуха в месте присоединения к решетке:

$$\sigma_{мк} \leq 1,3 [\sigma]_к$$

$$422 \text{ кгс/см}^2 < 1,3 \cdot 1480 = 1924 \text{ кгс/см}^2$$

Проверка кожуха в месте присоединения к решетке на малоцикловую прочность производится по ГОСТ 25859-83.

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{мк} + \sigma_{чк} = 422 + 930 = 1352 \text{ кгс/см}^2$$

$$\Delta \sigma_2 = \sigma_{м\psi} + \sigma_{ч\psi} = 98 + 249 = 347 \text{ кгс/см}^2$$

$$\Delta \sigma_3 = 0$$

$$K\sigma = 1,7 \text{ по черт. 9}$$

$$\sigma_A = \frac{K\sigma}{2} \max\{|\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2|; |\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3|; |\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1|\} = \\ = \frac{1,4}{2} \max\{975; 377; 1352\} = 1149 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} < [\sigma_A] = 4300 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Расчет труб на прочность, устойчивость и жесткость и расчет крепления труб в решетке.

Условие статической прочности труб:

$$\max\{\sigma_{1T}; \sigma_{2T}\} \leq [\sigma]_T; \quad 92 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} < 1600 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Проверка труб на малоцикловую прочность производится по

ГОСТ 25859-83:

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 = 12,3 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$K\sigma = 1$$

$$\sigma_A = \frac{K\sigma}{2} \max\{|\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2|; |\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3|; |\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1|\} = \\ = \frac{1}{2} \cdot 12,3 = 6,15 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} < [\sigma_A] = 4300 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Так как  $N_T = -133 \text{ кгс} < 0$ , проверяем трубы на устойчивость.

Условие устойчивости:

$$\sigma_{1T} \leq \varphi_T [\sigma]_T$$

$$\varphi_T = f(\lambda); \quad \lambda = 1,3 \sqrt{\frac{[\sigma]_T}{E_T}} \cdot \frac{l_R}{(d_T - s_T)} = \\ = 1,3 \sqrt{\frac{1600}{1,99 \cdot 10^6}} \cdot \frac{150}{(2,5 - 0,2)} = 2,4; \quad \varphi_T = 0,18 \\ 92 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} < 0,18 \cdot 1600 = 288 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

Проверка прочности крепления трубы в решетке.

В случае крепления труб к решетке методом приварки, должно выполняться условие:

$$\tau = \frac{N_T |d_T + 4| M_T |}{\pi d_T^2 \delta} \leq \varphi_c \min\{[\sigma]_T; [\sigma]_p\}$$

$$\tau = \frac{133 \cdot 2,5 + 4 \cdot 24}{3,14 \cdot 2,52 \cdot 0,2} = 109 < 0,29 \cdot 1480 = 429$$

$$\varphi_c = \min\{0,5; (0,95 - 0,2 \lg N)\} = 0,29.$$

$$109 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} < 429 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8

## Справочное

Термины, используемые в руководящем документе, и их условные обозначения

Термин	Условное обозначение
Внутренний радиус кожуха, мм (см)	$a$
Расстояние от оси пучка до оси наиболее удаленной трубы, мм (см)	$a_n$
Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удаленной трубы, мм (см)	$a_1$
Ширина канавки под прокладку в многоходовом аппарате, мм (см)	$b_m$
Ширина перегородки, мм (см)	$b_{пер.}$
Расчетная прибавка к толщине трубной решетки, мм (см)	$C$
При назначении величины "С" следует учитывать коррозию, как со стороны трубного, так и межтрубного пространства	
Расчетная прибавка к толщине перегородки, мм (см)	$C_n$
Расчетная <del>прибавка</del> к толщине стенки кожуха, мм (см)	$C_k$
Внутренний диаметр кожуха, мм (см)	$D$
Диаметр окружности, вписанной в максимальную беструбную площадь, мм (см)	$D_E$
Наружный диаметр компенсатора, мм (см)	$D_k$
Средний диаметр прокладки, мм (см)	$D_{cp}$
Внутренний диаметр расширителя, мм (см)	$D_1$
Внутренний диаметр компенсатора, мм (см)	$d_k$
Наружный диаметр труб, мм (см)	$d_T$
Диаметр отверстия в решетке, мм (см)	$d_o$
Модули продольной упругости материалов решетки, камеры, кожуха, труб и компенсатора, МПа ( $\text{кгс/см}^2$ )	$E_p, E_d, E_k, E_T, E_{ком.}$
Модули продольной упругости материалов фланцев кожуха и камеры, МПа ( $\text{кгс/см}^2$ )	$E_1, E_2$



Термин	Условное обозначение
Ширина тарелки фланца кожуха и камеры, мм (см)	$b_1, b_2$
Толщина тарелки фланца кожуха и камеры, мм (см)	$h_1, h_2$
Количество труб	$i$
Жесткость компенсатора, Н/мм (кгс/см)	$K_k$
Эффективный коэффициент концентрации напряжений	$K_\sigma$
Коэффициент жесткости фланцевого соединения при изгибе, Н.мм (кгс/см)	$K_\varphi$
Длина перегородки в трубном пространстве, мм (см)	$L_{пер.}$
Длина расширителя, мм (см)	$l_p$
Половина длины труб, мм (см)	$l$
Глубина развальцовки труб, мм (см)	$l_B$
Расчетная длина труб при продольном изгибе, мм (см),	$l_R$
Длина расширителя, мм (см)	$L_p$
Максимальный пролет труб между решеткой и перегородкой, мм (см)	$l_{1R}$
Максимальный пролет трубы между перегородками, мм (см)	$l_{2R}$
Максимальный изгибающий момент в перфорированной части трубной решетки, Н.мм/мм (кгс/см)	$M_{max}$
Изгибающий момент, распределенный по периметру трубной решетки, Н.мм/мм (кгс/см)	$M$
Изгибающий момент, распределенный по периметру перфорированной части трубной решетки, Н.мм/мм (кгс.см/см)	$M_a$
Изгибающий момент, распределенный по периметру кожуха, Н.мм/мм (кгс.см/см)	$M_k$
Количество циклов нагружения за расчетный срок службы (если количество циклов нагружения не оговорено, рекомендуется принимать $N = 2000$ )	$N$
Момент инерции поперечного сечения трубы, мм <sup>4</sup> (см <sup>4</sup> )	$J_T$
Изгибающий момент, действующий на трубу, Н.мм (кгс/см)	$M_T$
Осевая сила, действующая на трубу, Н (кгс)	$N_T$

Термин	Условное обозначение
Число вол линз (волн) компенсатора	$n$
Перепад давлений между ходами по трубному пространству МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	$\Delta P$
Расчетное давление в межтрубном пространстве, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	$P_m$
Расчетное давление в трубном пространстве, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	$P_t$
Расчетное давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ). Принимается равным максимально возможному перепаду давлений, действующий на решетку	$P_R$
Перерезывающая сила, распределенная по периметру перфорированной части трубной решетки, Н/мм (кгс/см)	$Q_a$
Усилие, распределенное по периметру кожуха, Н/мм (кгс/см)	$Q_x$
Допускаемая нагрузка на единицу условной поверхности соединения трубы с решеткой, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	$[q]$
Радиусы центров тяжести тарелок фланцев кожуха и камеры, мм (см)	$R_1, R_2$
Толщина стенки кожуха, мм (см)	$S_k$
Толщина трубной решетки в сечении канавки, мм (см)	$S_n$
Эквивалентная толщина втулки фланца, определяется по ОСТ 26-373-78, мм (см)	$S_3$
Толщина трубных решеток, мм (см)	$S_{p1}, S_{p2}$
Толщина стенки трубы, мм (см)	$S_T$
Толщина стенки кожуха и камеры в месте соединения с трубной решеткой или с фланцем, мм (см)	$S_1, S_2$
Толщина решетки в зоне кольцевой канавки, мм (см)	$S_{1p}$
Толщина перегородки по трубному пространству, мм (см)	$S_{пер}$
Осевая сила, действующая на кожух, Н (кгс)	$F$
Перерезывающая сила, распределенная по периметру трубной решетки, Н/мм (кгс/см)	$Q$

Термин	Условное обозначение
Расстояние между осями рядов отверстий, расположенных с двух сторон от паза, мм (см)	$t_n$
Шаг расположения отверстий в решетке, мм (см)	$t_p$
Средняя температура стенки кожуха, стенок труб и температура сборки аппарата, °C ( $t_o \approx 20^\circ\text{C}$ )	$t_k, t_r, t_o$
Коэффициенты линейного расширения материалов кожуха и труб, 1/°C при температурах $t_k$ и $t_r$ , соответственно	$\alpha_k, \alpha_r$
Высота сварного шва в месте приварки трубы к решетке, мм (см)	$\delta$
Толщина стенки компенсатора и расширителя, мм (см)	$\delta_k, \delta_p$
Допускаемая амплитуда упругих напряжений, МПа ( $\text{кгс/см}^2$ )	$[\sigma_A]$
Допускаемые напряжения для материалов кожуха, труб, решетки, перегородки соответственно, МПа ( $\text{кгс/см}^2$ )	$[\sigma]_k, [\sigma]_r,$ $[\sigma]_p, [\sigma]_n$

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

## 1. Разработан ВНИИнефтемашем, НИИхиммашем, УкрНИИхиммашем.

## Исполнители:

Г. В. Мамонтов, канд. техн. наук; В. П. Мишин; А. Г. Вихман, канд. техн. наук; А. М. Бубакин; С. И. Зусмановская; канд. техн. наук; Т. В. Булчинская; Б. С. Вольфсон ( отв. исполнитель ); В. А. Волошина; Л. П. Перцев, докт. техн. наук; В. Н. Стогий; П. С. Марченко, канд. техн. наук, (отв. исполнитель), В. И. Рачков, канд. техн. наук.

## 2. Утвержден Министерством химического и нефтяного машиностроения.

## 3. Взамен ОСТ 26-1185-81.

## 4. Ссылочные нормативно-технические документы

Обозначение НТД, на который дана ссылка	Номер пункта, подпункта, перечисления, приложения
ГОСТ 14249-80	Вводная часть, п 2.2.6.4.; приложение 7.
ГОСТ 25859-83	2.2.6.2; 2.2.7.2.
ОСТ 26-291-87	Вводная часть.
ОСТ 26-37 3-78	приложение 7.
ОСТ 26-427 -80	2.1.2.2.; 2.2.2.2. 4 2.2.2.3. 3 2.2.2.4. ; приложение 4.
ОСТ 26-428-80	приложение 4.
ОСТ 26-02-1015-85	1.2.
ОСТ 26-17-01-83	1.2.