РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

РЕЗЕРВУАРЫ ШАРОВЫЕ СТАЛЬНЫЕ СВАРНЫЕ.
МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ

РД РТМ 26-01-111-78

gost.e-ecolog.ru

С С С Р

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Резервуары шаровые стальные сварные. Методы расчета на прочность.

Р Д Р Т М 26-01-111-78

Издание официальное

2

УТВЕРЖДАЮ:

Начальник Всесоюзного промышленного объединения

И.Д.Григорьев

"03" авг 1978г.

Группа Г02

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Резервуары шаровые стальные сварные. Методы расчета на прочность.

РДРТМ 26-01-111-78

Введен впервые

Приказом по Всесоюзному промышленному объединению от "3" августа 1978 г.

срок действия с 01.01.1979г. до 01.01.1984г.

~~Срок действия продлен до 01.01.1989 г. (1)~~ (2)

Настоящий руководящий технический материал устанавливает методы расчета на прочность сферических резервуаров объемом 600 м^3 и 2000 м^3, находящихся под действием различного вида нагрузок: собственного веса и веса продукта, ветровой и снеговой нагрузок, сейсмического воздействия, внутреннего давления и вакуума. Расчетными элементами являются оболочка шарового резервуара и опорная конструкция, состоящая из отдельных вертикальных стоек, подкрепленных связями.

Методы расчета применимы для резервуаров, изготавливаемых в соответствии с ~~ОСТ 26-291-71~~ ОСТ 26-291-79 (1) "Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические требования" и ~~ТУ 26-01-150-75 "Резервуары и газгольдеры шаровые."~~ ТУ 26-01-150-80 "Резервуары шаровые" (1)

~~Проверен в 1983 г. (1)~~ (2)

4119

Издание официальное

Перепечатка воспрещена

УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ
ПРИКАЗОМ
по Всесоюзному промышленному объединению
"3" августа 1978г № 821

ИСПОЛНИТЕЛЬ Е.Н.Самойленко

СОГЛАСОВАН Управлением по котлонадзору и подъемным сооружениям Государственного Комитета по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору при Совете Министров СССР (Госгортехнадзором СССР)
Зам.начальника Управления
А.И.Мурачев

4119

I. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

I.I. Основные условные обозначения.

$D-2R$ – внутренний диаметр сферической оболочки; см;

D_1 – диаметр окружности, по которой установлены опоры, см;

$d_к$ – диаметр опорной колонны, см;

$d_т$ – диаметр поперечного сечения тяги, см;

d – расчетный диаметр подкладного листа, см;

S – толщина сферической оболочки, см;

S_1 – толщина подкладного листа, см;

$S_к$ – толщина стенки колонны, см;

c – прибавка на коррозию, см;

c_1 – технологическая прибавка, см;

b – ширина подкладного листа, см;

b_1 – длина подкладного листа, см;

h – высота уровня жидкости в резервуаре, см;

h_0 – относительная высота уровня жидкости в резервуаре, определяемая по черт.2;

$2\theta_0$ – угловой размер подкладного листа, рад;

$l_к$ – длина опорной колонны, см;

n – количество опор;

p – рабочее внутреннее или наружное давление, кгс/см2;

$p_р$ – расчетное давление в резервуаре, кгс/см2;

p_0 – внутреннее давление в области опоры с учетом гидростатического давления жидкости, кгс/см2;

$p_{доп}$ – допускаемое внутреннее или наружное давление, кгс/см2;

T_1, T_2 – меридиональное и кольцевое усилие в зоне краевого эффекта, кгс/см ;

4119

σ_1, σ_2 – меридиональные и кольцевые мембранные напряжения, кгс/см2;

$\sigma_{из_1}, \sigma_{из_2}$ – меридиональные и кольцевые изгибные напряжения, кгс/см2;

σ – эквивалентное мембранное напряжение, кгс/см2;

$\sigma_{из}$ – эквивалентное изгибное напряжение, кгс/см2;

$\sigma_{доп}$ – допускаемое напряжение для материала оболочки и опорной конструкции при расчетной температуре, кгс/см2;

$\sigma_т$ – предел текучести материала при расчетной температуре, кгс/см2;

E – модуль продольной упругости материала при расчетной температуре, кгс/см2;

T – период собственных колебаний шарового резервуара, сек;

K^* – суммарная жесткость опорной конструкции, кгс/см ;

$\gamma_ж$ – удельный вес жидкого продукта, кгс/см^3;

$\gamma_м$ – удельный вес металла, кгс/см^3;

g – ускорение свободного падения, см/сек2;

G_o – собственный вес шарового резервуара, кгс;

$G_ж$ – вес жидкого продукта, кгс;

$G_{оп}$ – вес опорной конструкции резервуара, кгс;

N_c – снеговая нагрузка, кгс;

$N_в$ – ветровая нагрузка, кгс;

N – горизонтальная составляющая сейсмической нагрузки, кгс;

$N_т$ – сила, растягивающая тягу, кгс;

$R_{оп}$ – реакция опоры от суммарной нагрузки, кгс;

$P_н$ – нормальная сосредоточенная составляющая опорной реакции, кгс;

$P_к$ – касательная составляющая опорной реакции, кгс;

M – расчетный сосредоточенный изгибающий момент, действующий на оболочку в зоне опирания, кгс·см;

4119

$M_к$ - расчетный изгибающий момент, действующий в зоне заделки опоры в фундамент, кгс·см;

M_1, M_2 - меридиональный и кольцевой моменты в зоне краевого эффекта, кгс·см/см;

I.2. Рабочее и расчетное давление, расчетную температуру, допускаемые напряжения, расчетные значения модуля упругости определяют в соответствии с ~~ГОСТ 14249-73~~ ГОСТ 14249-80 ④ "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность".

I.3. Коэффициенты прочности сварных соединений φ принимаются в соответствии с ~~ОСТ 26-01-291-71~~ ОСТ 26-01-291-79 ④ "Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические требования".

~~I.4. Поправочный коэффициент η при расчете шаровых резервуаров, в которых хранятся или обрабатываются взрыво-или пожароопасные продукты или сильнодействующие ядовитые вещества, устанавливается в соответствии с ОСТ 26-01-102-70 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Поправочные коэффициенты к нормативным допускаемым напряжениям".~~

I.4. Поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям следует принимать равным единице. ④

I.5. Прибавки к расчетным толщинам конструктивных элементов устанавливают в соответствии с ~~ГОСТ 14249-73.~~ ГОСТ 14249-80 ④

I.6. Материалы для шаровых резервуаров и газгольдеров выбираются в соответствии с ~~ТУ 26-01-150-75 "Резервуары и газгольдеры шаровые".~~ ТУ 26-01-150-80 "Резервуары шаровые". ④

I.7. Для резервуаров, работающих при многократных нагрузках с количеством циклов нагружения от давления, вакуума, веса продукта или других воздействий более 10^3 за весь срок эксплуатации, следует выполнять расчет на усталостную прочность по ГОСТ 25859-83.

Циклы нагружения от ветровых, сейсмических и снеговых нагрузок не учитывают. ②

4119

2. ПОРЯДОК И МЕТОД РАСЧЕТА

2.1. Расчет шаровых резервуаров и газгольдеров проводят в два этапа:

а) Определяют необходимую толщину стенки при действии внутреннего избыточного и гидростатического давления или вакуума.

б) Проводят поверочный расчет принятой толщины стенки с учетом местных напряжений в зоне опор, а также других факторов, не учтенных ранее.

(2) Расчет следует проводить как для режима эксплуатации, так и для режима гидроиспытаний. Расчет для режима гидроиспытаний производят без учета снеговой и ветровой нагрузок. 2.2. Расчет шарового резервуара от действия внутреннего давления.

Сферические оболочки, работающие под внутренним давлением, рассчитываются по одной из следующих формул:

а) исполнительная толщина стенки S

$$S = \frac{P_p \cdot D}{4\varphi\sigma_{доп} - P_p} + C + C_1$$

б) допускаемое давление $P_{доп}$

$$P_{доп} = \frac{4\varphi\sigma_{доп}(S-c)}{D+S-c}$$

2.3. Расчет шарового резервуара, находящегося под действием наружного давления.

2.3.1. Сферические оболочки, для которых выполняется условие

$$\frac{R}{S} > \frac{0{,}125E}{\sigma_т},$$

теряют устойчивость в области упругости и рассчитываются по следующим зависимостям:

а) исполнительная толщина стенки

$$S = \frac{R}{300}\sqrt{\frac{P_p}{10^{-6}E}} + C - C_1 .$$

При P_p = I кгс/см2 и $E = 2 \cdot 10^6$ кгс/см2

$$S = 0{,}00236R + C + C_1$$

б) допускаемое наружное давление

$$P_{доп} = \frac{9E}{10^6} \cdot \left[\frac{(S-c)\cdot 100}{R}\right]^2 .$$

При $E = 2 \cdot 10^6$ кгс/см2

$$P_{доп} = 18\left[\frac{100\,(S-c)}{R}\right]^2 .$$

2.3.2. Сферические оболочки, для которых выполняется условие

$$\frac{R}{S} < 0{,}125\,\frac{E}{\sigma_т} ,$$

теряют устойчивость за пределами упругости и рассчитываются по следующим формулам

а) исполнительная толщина стенки

$$S = \frac{P_p \cdot R}{2\sigma_{доп}} \cdot \beta'' + C + C_1 ,$$

где коэффициент $\beta'' = 0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + 12\,\frac{\sigma_т}{E} \cdot \frac{\sigma_{доп}}{P_p}}$;

б) допускаемое наружное давление

$$P_{доп} = \frac{2\sigma_{доп}(S-c)}{\beta' \cdot R} ,$$

где коэффициент $\beta' = 1 + 6\,\frac{\sigma_т}{E} \cdot \frac{R}{S-c}$.

2.3.3. Коэффициент запаса устойчивости по отношению к нижним значениям критических напряжений принят равным:

а) в формулах п.2.3.I.

$$n_{уст} = 2,6$$

б) в формулах п.2.3.2.

$$n_{уст} = I,5 \cdot \beta'$$

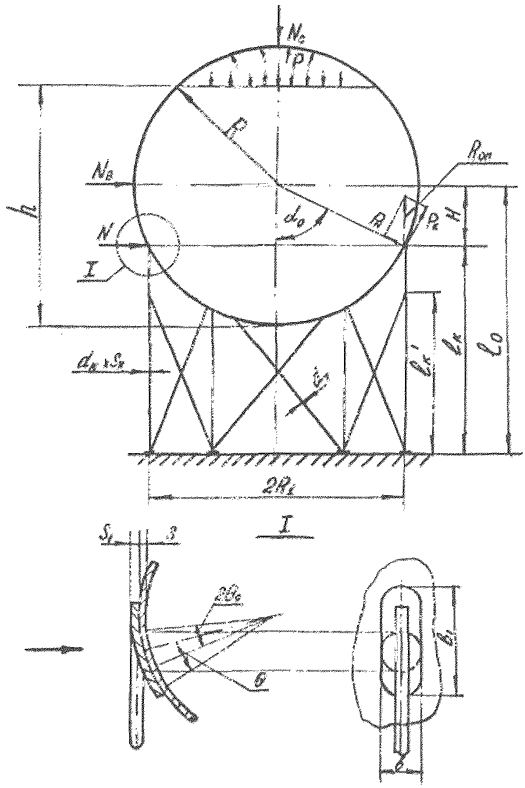
2.4. Расчет укрепления отверстий.

Расчет укрепления отверстий в сферической оболочке следует производить в соответствии с ~~ОСТ 26-771-73 "Сосуды и аппараты. Методы расчета укрепления отверстий в обечайках, переходах и днищах".~~ ГОСТ 24755-81 "Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий." ④

4119

2.5. Расчет шаровых резервуаров в местах опирания.

Расчетная схема резервуара.



Черт.I

2.5.I. Определение нагрузок, действующих на резервуар.

2.5.I.I. Собственный вес сферы G_0

$$G_0 = 4\pi R^2 \cdot S \cdot \gamma_м \cdot 1{,}05 = 4{,}2\pi R^2 \cdot S \cdot \gamma_м .$$

2.5.I.2. Вес опорной конструкции $G_{оп}$

$$G_{оп} = \gamma_м \cdot n\left[\pi (d_к - S_к) \cdot S_к \cdot l_к + 2\pi \frac{d_т^2}{4} \cdot l_т\right] =$$
$$= \pi \cdot n \cdot \gamma_м \left[(d_к - S_к) \cdot S_к \cdot l_к + 0{,}5\, d_т^2 l_т\right] .$$

2.5.I.3. Вес жидкого продукта $G_ж$

$$G_ж = 1{,}05\, \gamma_ж \cdot R^3 h_0^2 (3 - h_0) .$$

2.5.I.4. Вертикальная составляющая снеговой нагрузки N_c определяется по формуле

$$N_c = \frac{2}{3} \pi R^2 q_c ,$$

где

q_c – нормативная составляющая снеговой нагрузки в кгс/см2, принимается по табл.I.

Таблица I

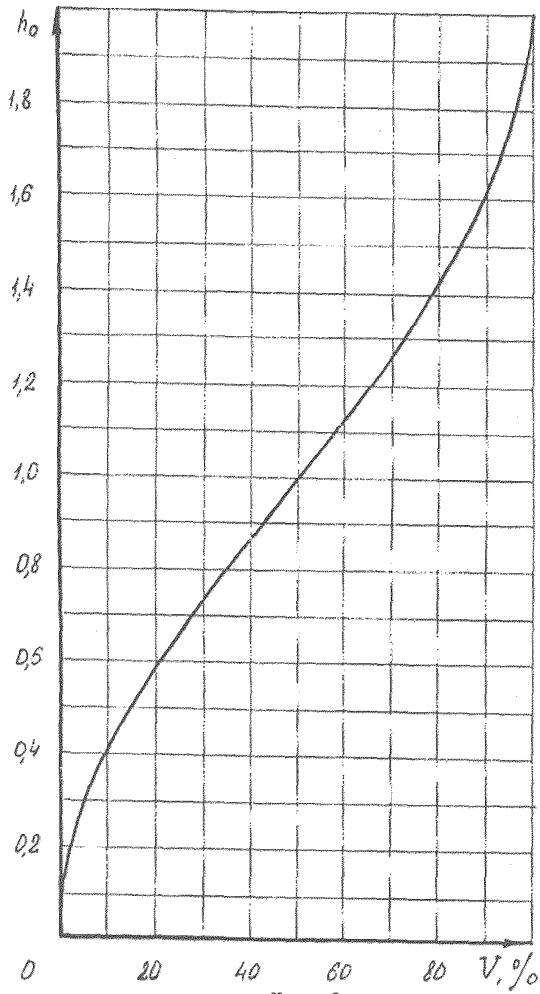
Районы СССР по СНиП П-6-74	I	II	III	IУ	У	УI
Вес снегового покрова, q_c кгс/см2	0,005	0,007	0,0I	0,0I5	0,02	0,025

4119

График заполнения сферы продуктом.

$h_0 = \frac{h}{R}$ - относительная высота заполнения;

V - объем в %.



Черт.2

2.5.I.5. Расчет ветровой нагрузки $N_в$, действующей на шаровой резервуар.

В расчет принимается проекция равнодействующей сил ветра в направлении горизонтального диаметра

$$N_в = I,05 \cdot D^2 \cdot q_в \cdot \xi \cdot \beta_1$$

Здесь

$q_в$ - нормативный скоростной напор ветра в районе установки резервура для высоты над поверхностью земли до I0 м, принимается по табл.2;

ξ - поправочный коэффициент на возрастание скоростного напора ветра для высот более I0 м, принимается по графику на черт.3;

$\beta_1 = I + 0,35 \cdot \delta$ - коэффициент увеличения скоростного напора по высоте ;

δ - коэффициент динамичности, зависящий от периода собственных колебаний конструкции Т, определяют по графику на черт.4

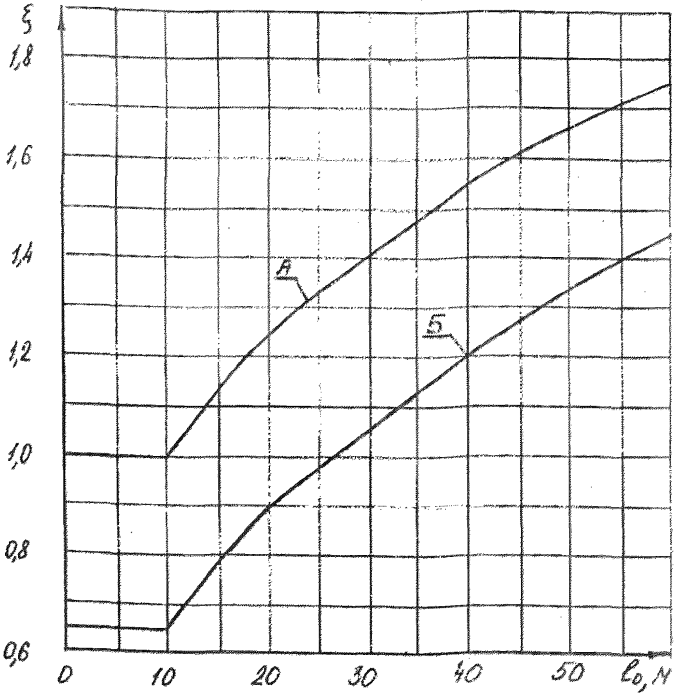
Таблица 2

Районы СССР по СНиП II-6-74	I	II	III	IУ	У	УI	УII
Скоростной напор $q_в$, кгс/см2	0,0027	0,0035	0,0045	0,0055	0,0070	0,0085	0,0I

График коэффициента скоростного напора ветра для высоты более 10 м от уровня земли.

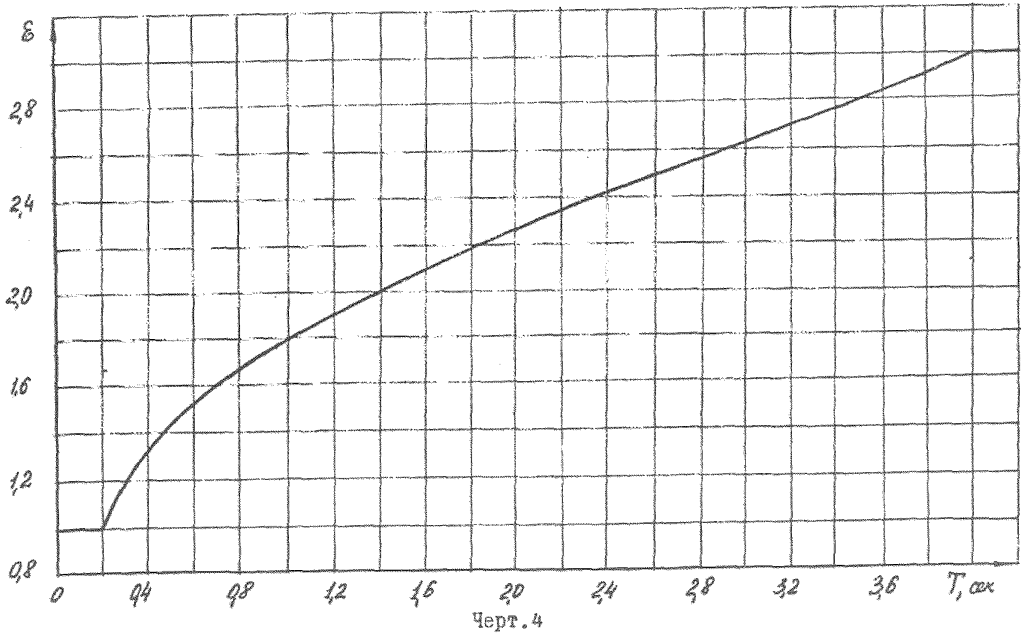
А - для открытой местности (степи, лесостепи, пустыни, побережья морей, водохранилищ).

Б - для местности, равномерно покрытой препятствиями высотой более 10 м (города с окраинами, лесные массивы и т.д.)



Черт.3

График коэффициента динамичности при действии ветровой нагрузки - ε



Черт.4

2.5.I.6. Расчет сейсмической нагрузки, действующей на резервуар.

В расчет принимается только горизонтальная составляющая сейсмической нагрузки, которая действует в плоскости установки сферы на споры и для частично заполненного сферического резервуара определяется по формуле

$$N = (G_к + \tilde{K}_1 G_ж)\,\beta\, K_c$$

Здесь

K_c – коэффициент сейсмичности, принимается по табл.3

Таблица 3

Расчетная сейсмичность, балл	7	8	9
Значения коэффициента сейсмичности, K_c	0,025	0,05	0,I

$\tilde{K}_1$ – коэффициент, зависящий от уровня заполнения h_0, определяется по черт.5

$$\beta = \beta_0 \cdot \tilde{K}_0 ,$$

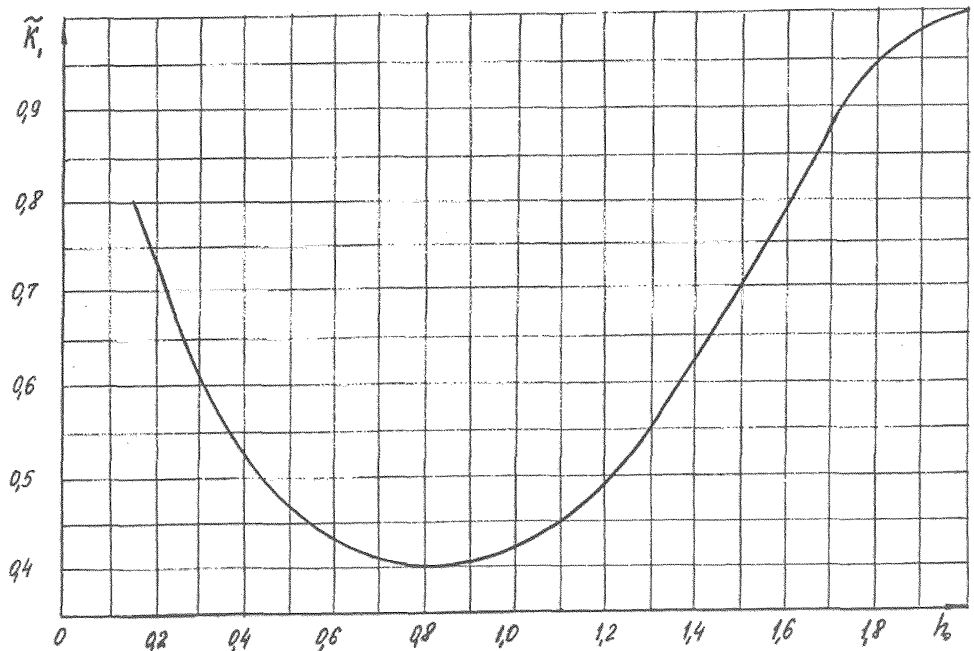
где $\tilde{K}_0$ – коэффициент, принимаемый в зависимости от отношения $\frac{l_к}{d_к}$:

а) при $\frac{l_к}{d_к} \leq I5$ $\quad \tilde{K}_0 = I$,

б) при $\frac{l_к}{d_к} \geq 25$ $\quad \tilde{K}_0 = I,5$;

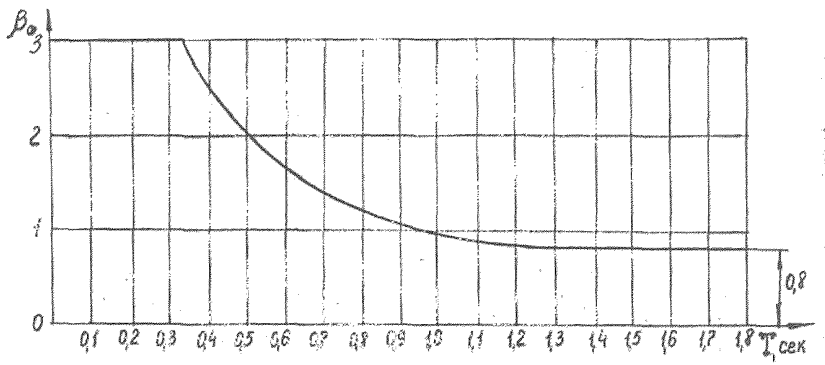
в) при $I5 < \frac{l_к}{d_к} < 25$ $\quad \tilde{K}_0 = I + 0{,}005\left(\frac{l_к}{d_к} - I5\right)$.

График коэффициента формы резервуара $\tilde{K}_1$



Черт.5

$\beta_0 = \frac{I}{T}$ – коэффициент динамичности, определяется по черт.6 в зависимости от периода собственных колебаний Т. Должно быть $0,8 \leq \beta_0 \leq 3$



Черт.6

Период собственных колебаний системы, определяется по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{G_к + K_1 \cdot G_ж}{K^* g}} .$$

Здесь

$G_к = G_0 + \frac{1}{2} G_{оп}$ - вес резервуара G_0 с учетом половины веса опорной конструкции $G_{оп}$.

$G_ж = 1{,}05 \gamma_ж R^3 h_0^2 (3 - h_0)$ - вес жидкости, кгс.

2.5.1.7. Жесткость конструкции определяется зависимостью

$$K^* = n K_1 + K_2 ;$$

$K_1 = \frac{12 E \mathcal{J}_к}{l_к^3}$ - жесткость одной колонны, кгс/см.

$\mathcal{J}_к = \frac{\pi}{64}\left[d_к^4 - (d_к - 2S_к)^4\right]$ - момент инерции поперечного сечения колонны, см^4;

При $\frac{d_к}{2S_к} \geq 10$ $\quad \mathcal{J}_к = 0{,}393\, d_{ср}^3 S_к$;

$K_2 = EF \sum_{j=1}^{n} \frac{\cos^2 \alpha_j}{l_j}$ - суммарная жесткость тяжей, рассчитывается в соответствии с табл.4

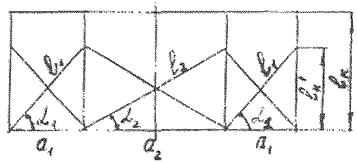
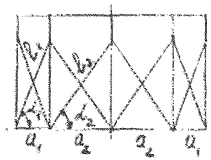
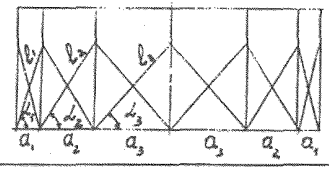
Здесь

$F = 0{,}785\, d_т^2$ - площадь поперечного сечения тяжа, см2;

$l_j = \sqrt{l_к^2 + a_j^2}$.

Таблица 4

К определению жесткости опорной конструкции

Кол-во опор	Схема опорной конструкции	Проекция тяжей на направление движения a_j, $\cos\alpha_j$	Суммарная жесткость тяжей, K_z
6		$a_1 = 0{,}5 \cdot R_1^*$ $a_2 = R$ $\cos\alpha_1 = \frac{a_1}{l_1}$ $\cos\alpha_2 = \frac{a_2}{l_2}$	$2EF\left[2\frac{\cos^2\alpha_1}{l_1} + \frac{\cos^2\alpha_2}{l_2}\right]$ $l_j = \sqrt{a_j^2 + l_K'^2}$ $j = 1,2$
8		$a_1 = 0{,}293 \cdot R_1$ $a_2 = 0{,}707 \cdot R_1$ $\cos\alpha_1 = \frac{a_1}{l_1}$ $\cos\alpha_2 = \frac{a_2}{l_2}$	$4EF\left[\frac{\cos^2\alpha_1}{l_1} + \frac{\cos^2\alpha_2}{l_2}\right]$ $l_j = \sqrt{a_j^2 + l_K'^2}$ $j = 1,2,3$
12		$a_1 = 0{,}134 \cdot R_1$ $a_2 = 0{,}366 \cdot R_1$ $a_3 = 0{,}5 \cdot R_1$ $\cos\alpha_j = \frac{a_j}{l_j}$	$4EF\left[\frac{\cos^2\alpha_1}{l_1} + \frac{\cos^2\alpha_2}{l_2} + \frac{\cos^2\alpha_3}{l_3}\right]$ $l_j = \sqrt{a_j^2 + l_K'^2}$ $j = 1,2,3$

* $R_1 = R \cdot \sin\alpha_0$ – радиус окружности установки опор; α_0 –см. черт.I.
При $\alpha_0 = 90^0$ $R_1 = R$.

a_j - проекция тяжей на горизонтальную плоскость, см;
принимается по табл.4

$l_к'$ - расчетная длина колонны, см (черт.I)

α_j - угол между направлением тяжа и его проекцией на горизонтальную плоскость, град;

$$\cos\alpha_j = \frac{a_j}{l_j}$$

2.5.2. Определение нагрузок в зоне опирания.

2.5.2.I. Максимальная опорная реакция определяется по формуле

$$R_{оп} = \frac{G_о + G_к + N_о}{n} + \frac{1}{R_1}\left[\frac{l_к \cdot K_1}{K^*}(N + N_б) + \frac{2H}{n} N_б\right]$$

Здесь

$$H = R\cos\alpha_о \quad \text{см, (черт.I)}$$

$\alpha_о$ - центральный угол середины опоры, град, (черт.I);

2.5.2.2. Внутреннее давление среды в области опоры

$$P_о = p + \gamma_ж R(h_о - 1 + \cos\alpha_о)$$

2.5.2.3. Сосредоточенная нормальная сила $P_н$

$$P_н = R_{оп} \cdot \cos\alpha_о$$

2.5.2.4. Сосредоточенный изгибающий момент $M_{из}$ от действия максимальной опорной реакции

$$M_{из} = R_{оп} \cdot S^* \cdot \sin\alpha_о$$

4119

Здесь $S^* = \frac{S}{2} + S_1$ - расчетная толщина стенки под опорой, см;

2.5.2.5. Сосредоточенный изгибающий момент $M_к$, возникающий на концах колонны от действия горизонтальных сил N и $N_б$,

$$M_к = 0{,}5\,\frac{K_1}{K^*}\,(N_б + N)\,\ell_к .$$

2.5.2.6. Расчетный изгибающий момент, действующий в зоне опирания сферической оболочки,

$$M = M_{из} + M_к .$$

2.5.3. Расчет напряжений в сферической оболочке в зоне опирания.

2.5.3.1. Меридиональные и кольцевые мембранные напряжения от каждого вида нагрузок определяются по формулам

$$\sigma_1^*(P_н) = -\frac{D \cdot P_н}{\pi d^* (S-c)};$$

$$\sigma_2^*(P_н) = \frac{D \cdot P_н}{\pi d^* (S-c)};$$

$$\sigma_1^*(M) = \frac{4DM}{\pi d^* (S-c)};$$

$$\sigma_2^*(M) = -\sigma_1^*(M);$$

$$\sigma_1^*(p_о) = \frac{D \cdot p_о}{4(S-c)};$$

$$\sigma_2^*(p_о) = \frac{D \cdot p_о}{4(S-c)}.$$

4119

Здесь
$d = b$ – ширина подкладного листа.

Суммарные меридиональные σ_1^* и кольцевые σ_2^* мембранные напряжения определяются по формулам

$$\sigma_1^* = \sigma_1^*(P_н) + \sigma_1^*(M) + \sigma_1^*(p_o)$$

$$\sigma_2^* = \sigma_2^*(P_н) + \sigma_2^*(M) + \sigma_2^*(p_o)$$

2.5.3.2. Определение напряжений краевого эффекта.

Расчет напряжений краевого эффекта выполняется в несколько этапов:

а) По графикам черт. 7÷30 в зависимости от S, d и единичных нагрузок $p_o = I$, $P_н = I$, $M = I$ определяется параметр $f(f_{P_н}, f_{p_o}, f_M)$ для сил T_1, T_2, и моментов M_1, M_2. В качестве d при определении параметров f от $p_н$ и M принимается ширина подкладного листа b, а при определении параметра f от p_o принимается половина длины подкладного листа b_1.

б) По таблице 5 в зависимости от величины полученных параметров $f_{P_н}$, f_{p_o}, f_M находят значения силовых факторов от каждого вида единичной нагрузки

$T_I(f_{P_н})$, $T_2(f_{P_н})$, $M_I(f_{P_н})$, $M_2(f_{P_н})$,
$T_I(f_{p_o})$, $T_2(f_{p_o})$, $M_I(f_{p_o})$, $M_2(f_{p_o})$,
$T_I(f_M)$, $T_2(f_M)$, $M_I(f_M)$, $M_2(f_M)$.

4119

в) Меридиональные и кольцевые усилия и моменты краевого эффекта определяются зависимостями:

$$T_I\ (Рн) = Рн \cdot T_I\ (f_{P_н}),$$

$$T_I\ (М) = М \cdot T_I\ (f_М),$$

$$T_I (Ро) = Ро \cdot T_I\ (f_{P_о}),$$

$$T_2\ (Рн) = Рн \cdot T_2\ (f_{P_н}),$$

$$T_2\ (М) = М \cdot T_2\ (f_М),$$

$$T_2\ (P_о) = P_н \cdot T_2\ (f_{P_о}),$$

$$M_I\ (Рн) = Рн \cdot M_I\ (f_{P_н}),$$

$$M_I\ (М) = М \cdot M_I\ (f_М), \quad M_I (Ро) = Ро \cdot M_I (f_{P_о}),$$

$$M_2\ (Рн) = Рн \cdot M_2\ (f_{P_н}),$$

$$M_2\ (М) = М \cdot M_2\ (f_М),$$

$$M_2\ (P_о) = P_н \cdot M_2\ (f_{P_о}),$$

г) Суммарные усилия и моменты краевого эффекта, действующие в опорной зоне, определяются зависимостями:

$$T_I = T_I\ (Рн) + T_I\ (М) + T_I\ (Ро),$$

$$T_2 = T_2\ (Рн) + T_2\ (М) + T_2\ (Ро),$$

$$M_I = M_I\ (Рн) + M_I (М) + M_I\ (Ро),$$

$$M_2 = M_2\ (Рн) + M_2\ (М) + M_2\ (Ро).$$

4119

д) Мембранные и изгибные напряжения в опорной зоне определяют по формулам:

$$\sigma_1 = \sigma_1^* + \frac{T_1}{S-c}$$

$$\sigma_2 = \sigma_2^* + \frac{T_2}{S-c}$$

$$\sigma_{из1} = \frac{6M_1}{(S-c)^2}$$

$$\sigma_{из2} = \frac{6M_2}{(S-c)^2}$$

е) Проверяется условие прочности оболочки в области опор

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_т}\right)^2 + \frac{0{,}8}{A}\,\frac{\sigma_{изг}}{\sigma_т} < 1, \qquad (2)$$

$$\cancel{\left(\frac{\sigma}{\sigma_т}\right)^2 + 0{,}8\,\frac{\sigma_{из}}{\sigma_т} \le 1}$$

где $A = \begin{cases} 1 - \text{для рабочих условий;} \\ 1{,}2 - \text{для условий гидроиспытания.} \end{cases}$

$$\sigma \le \sigma_{доп}$$

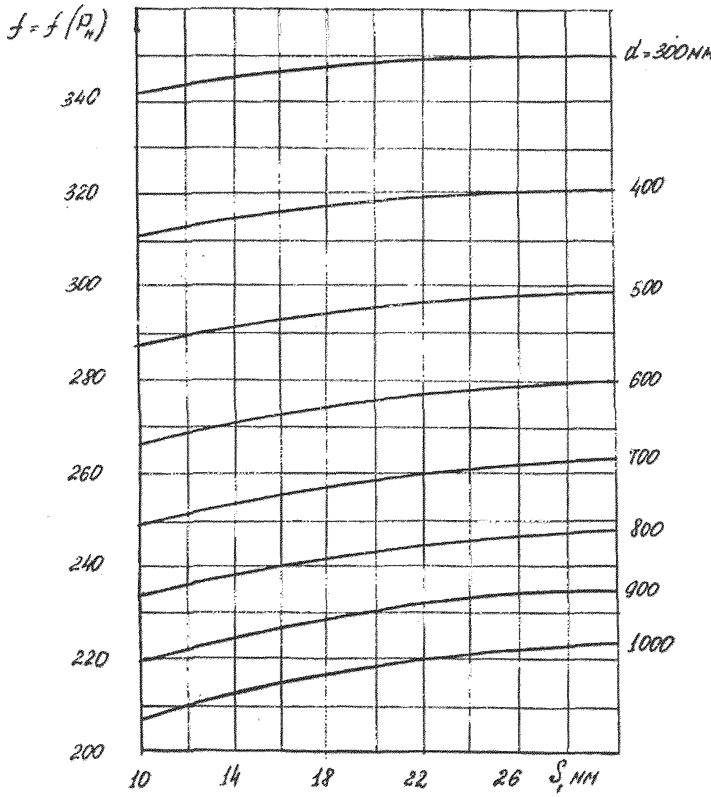
Здесь

$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2}$ – эквивалентное мембранное напряжение;

$\sigma_{из} = \sqrt{\sigma_{из1}^2 + \sigma_{из2}^2 - \sigma_{из1} \cdot \sigma_{из2}}$ – эквивалентное изгибное напряжение.

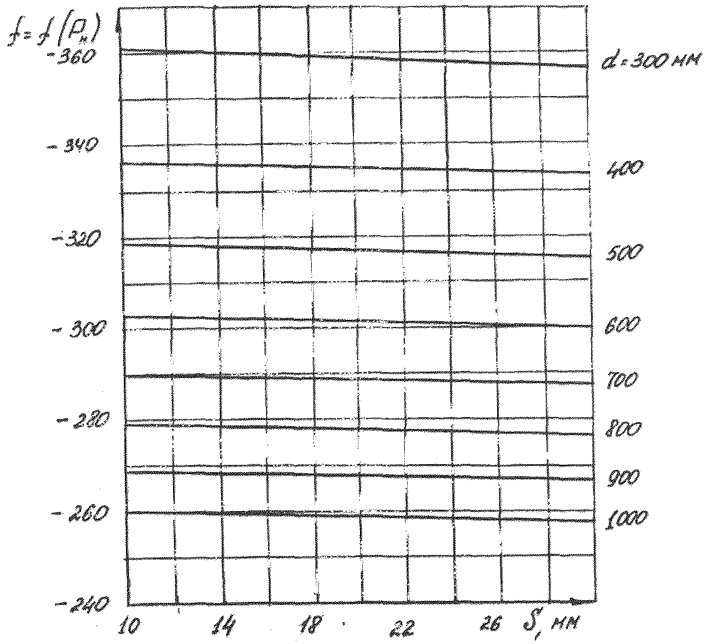
4119

Величина параметра $f=f(P_н)$ для определения усилия T_I от нагрузки Рн=I (Д=I0500 мм)



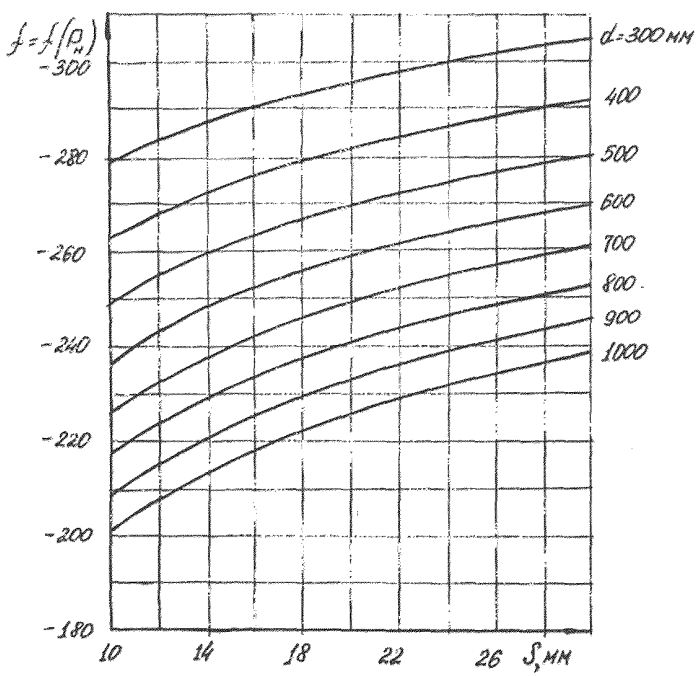
Черт. 7

Величина параметра $f=f(P_н)$ для определения усилия T_2 от нагрузки Рн=I (Д=I0500 мм)



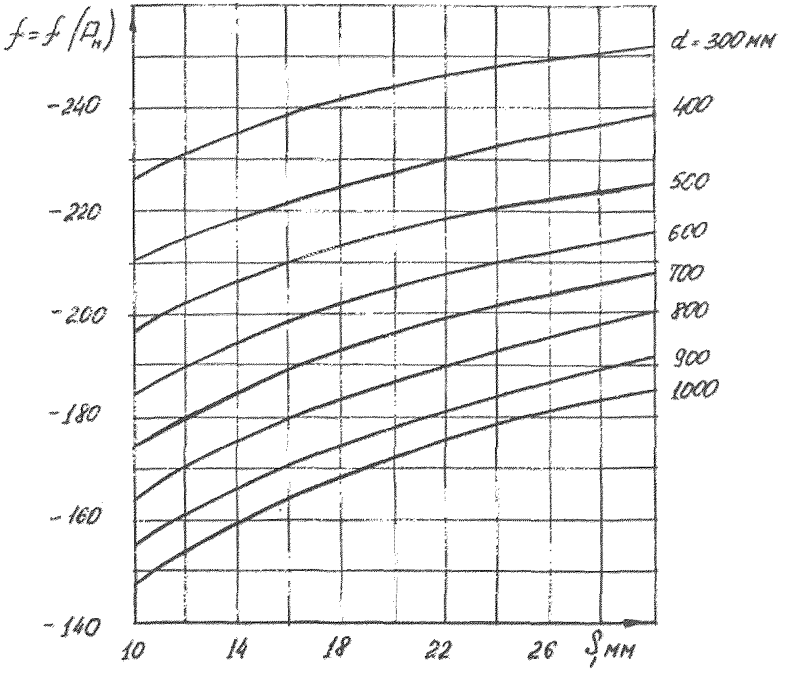
Черт. 8

Величина параметра $f=f(\rho_н)$ для определения момента $M_т$ от нагрузки Рн=I (Д=I0500 мм)



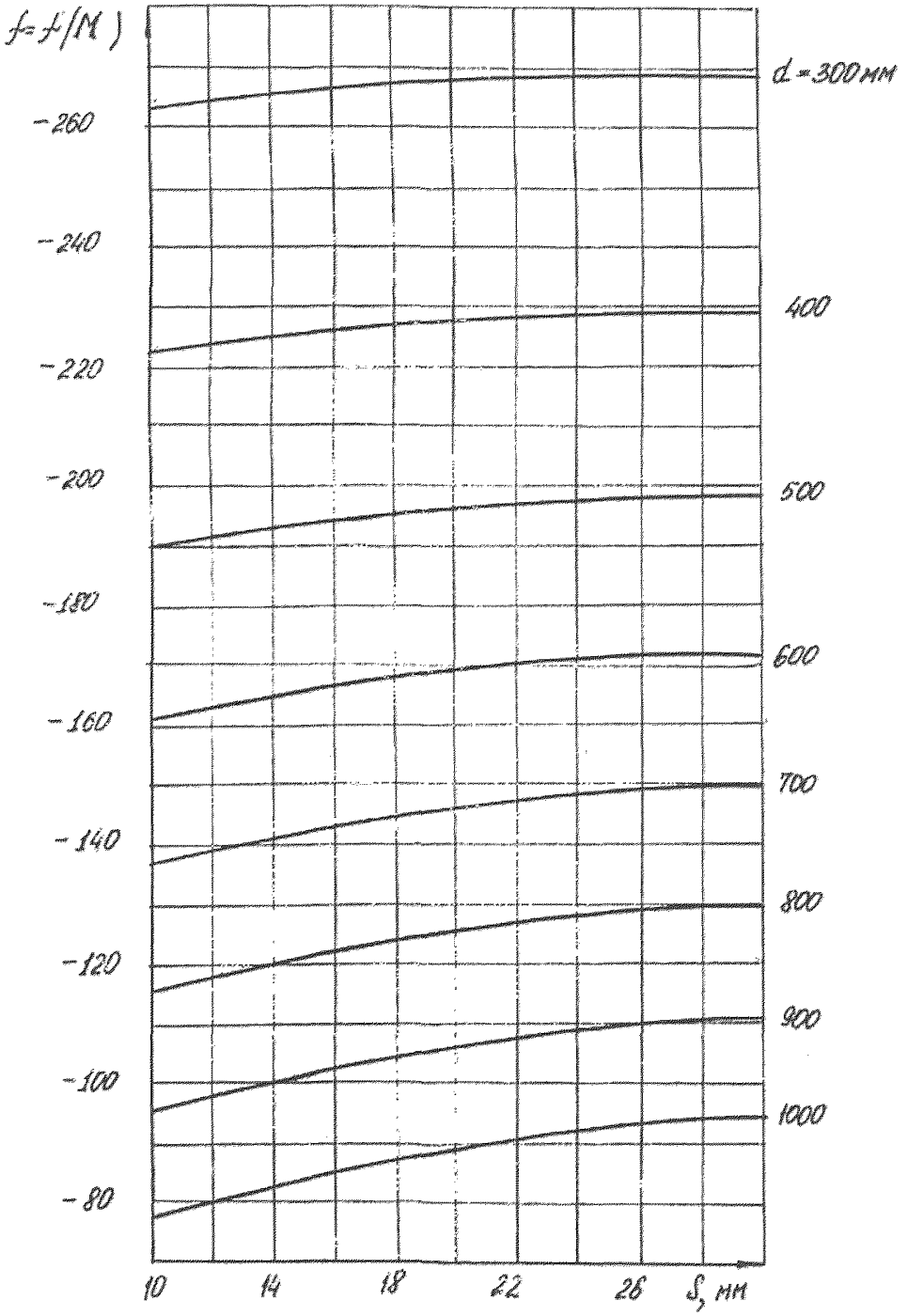
Черт. 9

Величина параметра $f=f(P_н)$ для определения кольцевого момента M_2 от нагрузки Рн=1 (Д=10500 мм)



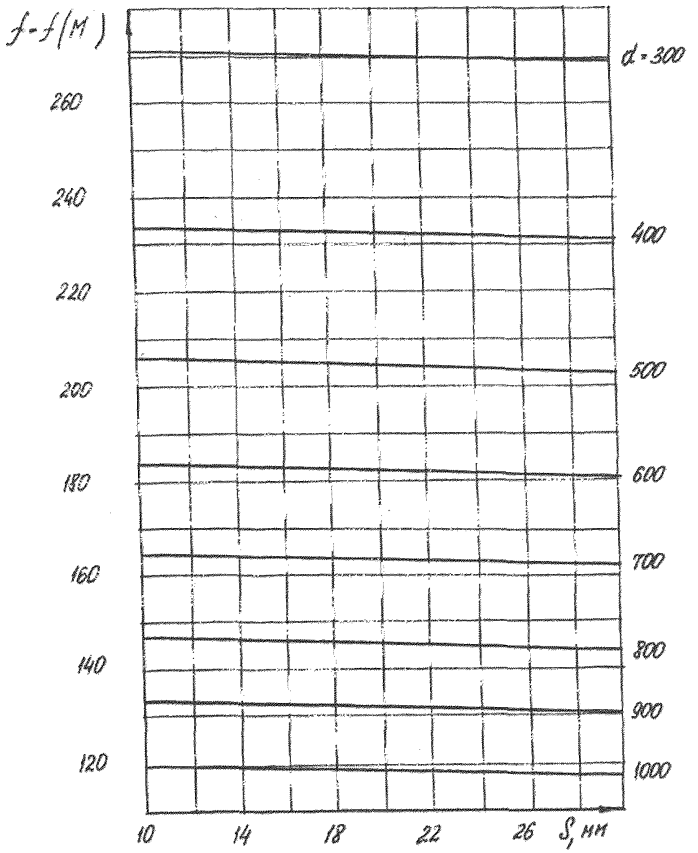
Черт.10

Величина параметра $f = f(M)$ для определения усилия T_I от нагрузки $M = 1$ ($Д$=10500 мм)



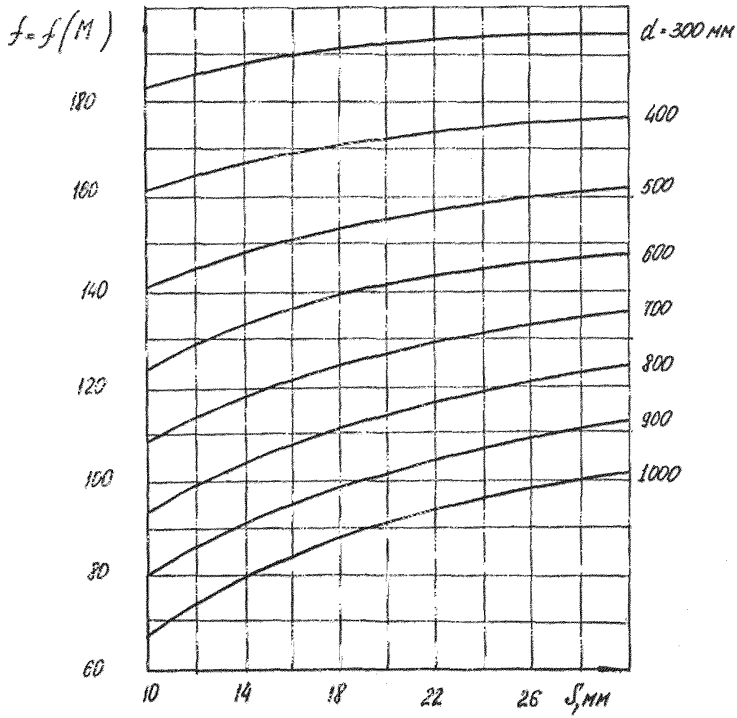
Черт.II

Величина параметра $f=f(M)$ для определения T_2 от нагрузки И =I (Д=I0500 мм)



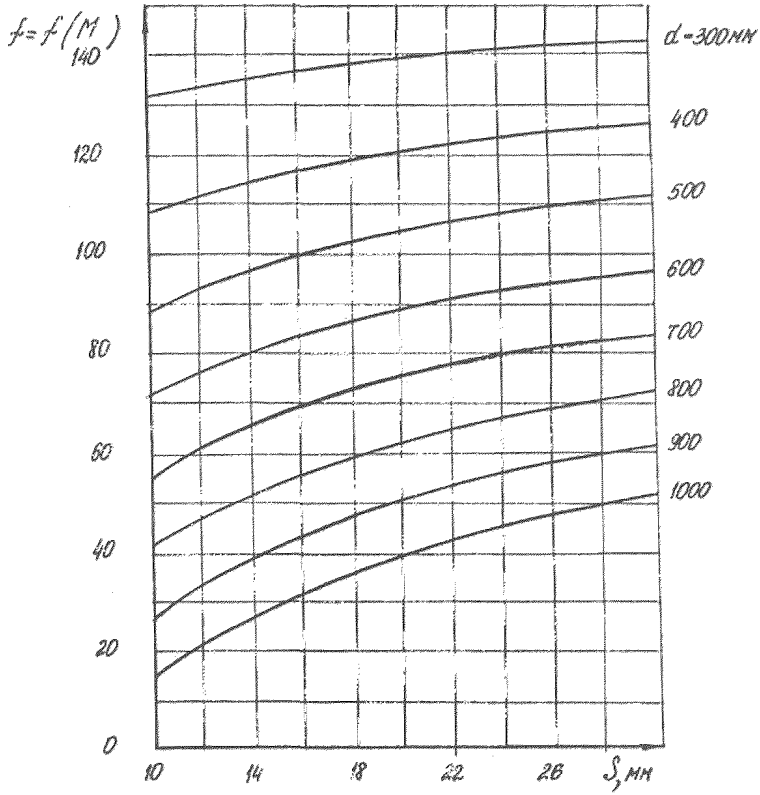
Черт. I2

Величина параметра $f=f(M)$ для определения момента M_I от нагрузки M =I (Д=10500 мм)



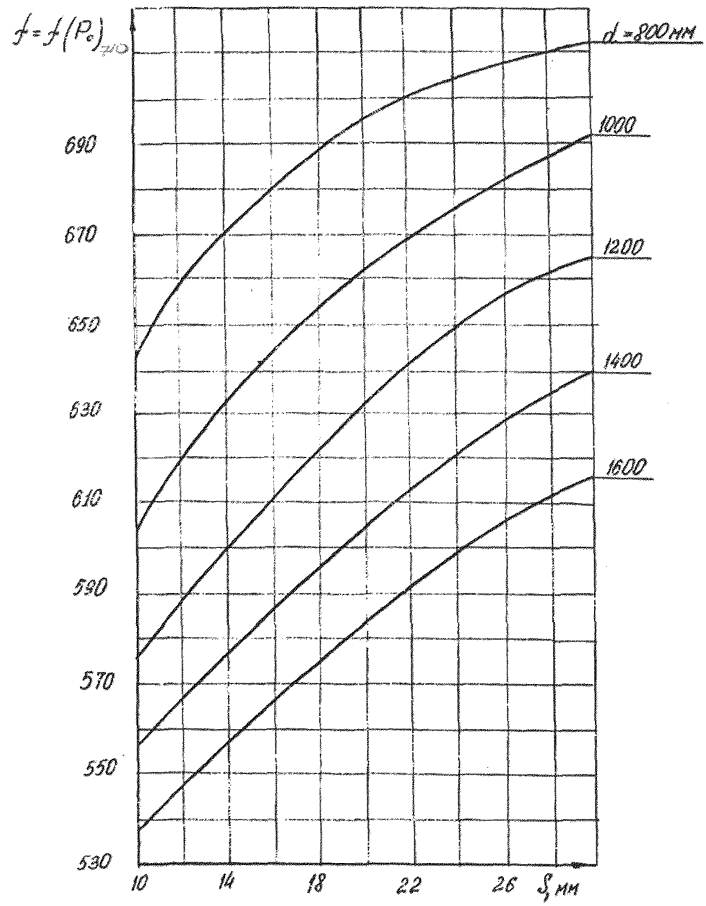
Черт. 13

Величина параметра $f=f(M)$ для определения кольцевого момента M_2 от нагрузки M =I
(Д = I0500 мм)



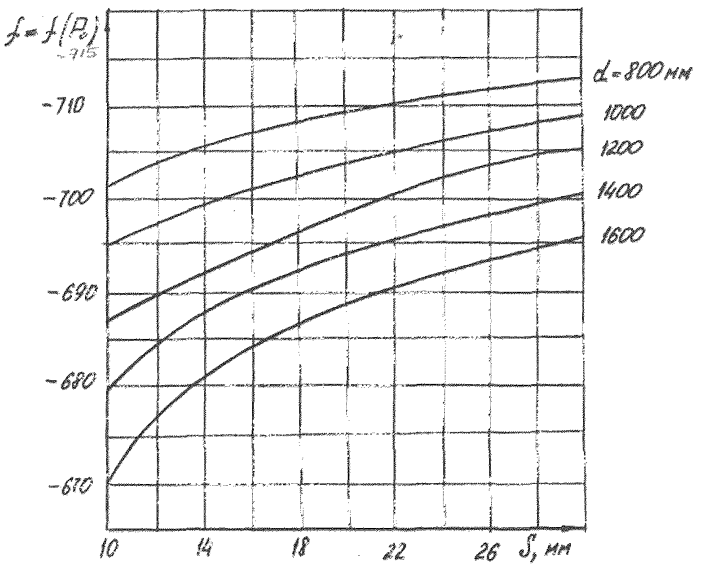
Черт. I4

Величина параметра $f = f(P_0)$ для определения меридионального усилия T_I от нагрузки Po=I
(Д = 10500 мм)



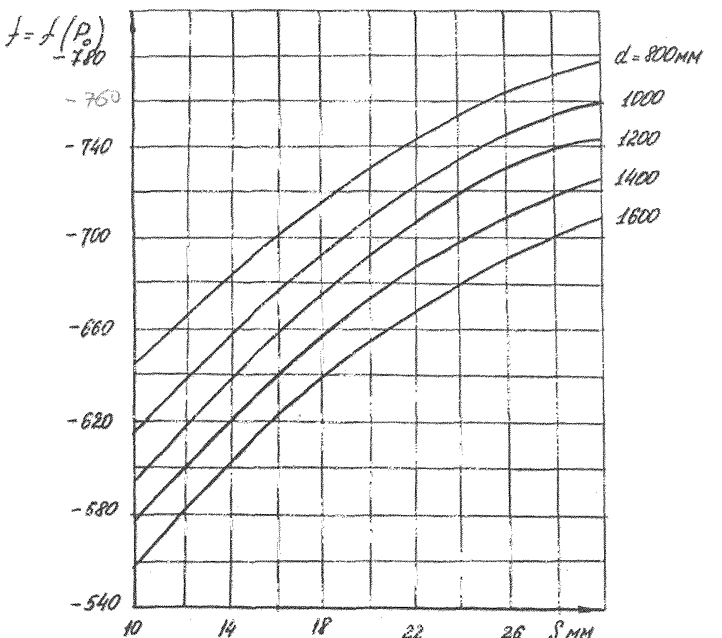
Черт.15

Величина параметра $f = f(P_0)$ для определения кольцевого усилия T_2 от нагрузки Po=I
($\bar{d}$ = 10500 мм)



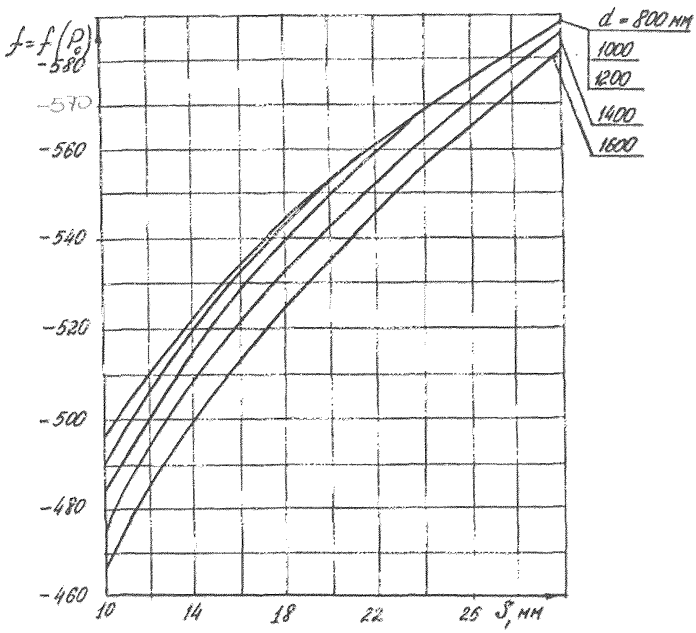
Черт.I6

Величина параметра $f = f(P_o)$ для определения меридионального момента M_I от нагрузки Po=I
(Д = I0500 мм)



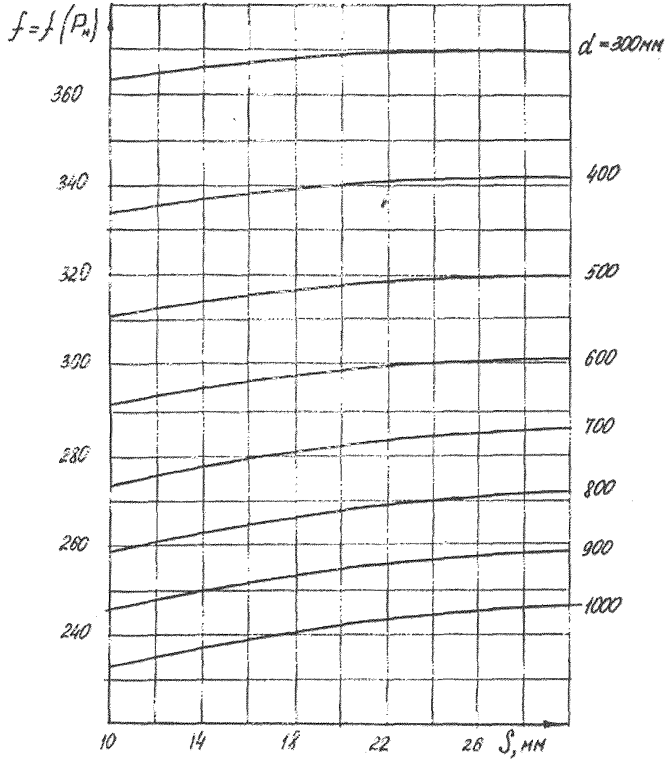
Черт.17

Величина параметра $f=f(P_0)$ для определения кольцевого момента M_2 от нагрузки Ро=I (Д = I0500 мм)



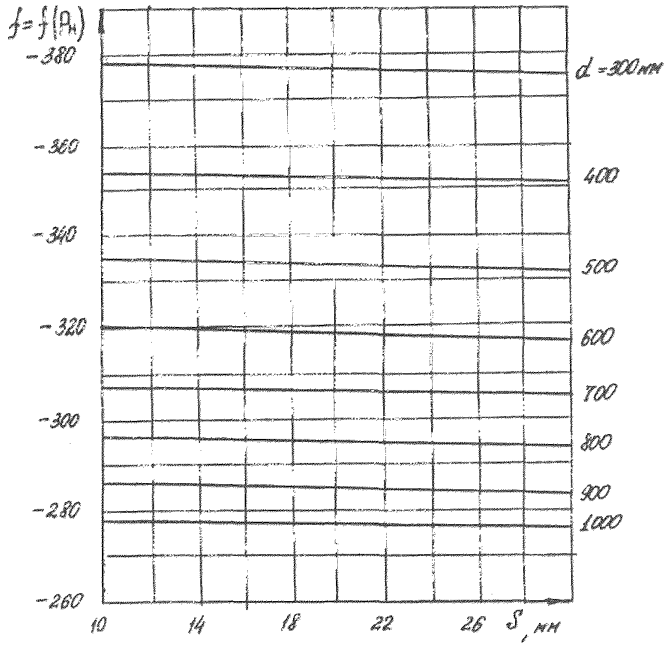
Черт.18

Величина параметра $f=f(P_н)$ для определения усилия T_I от нагрузки Рн=I (Д=I6000 мм)



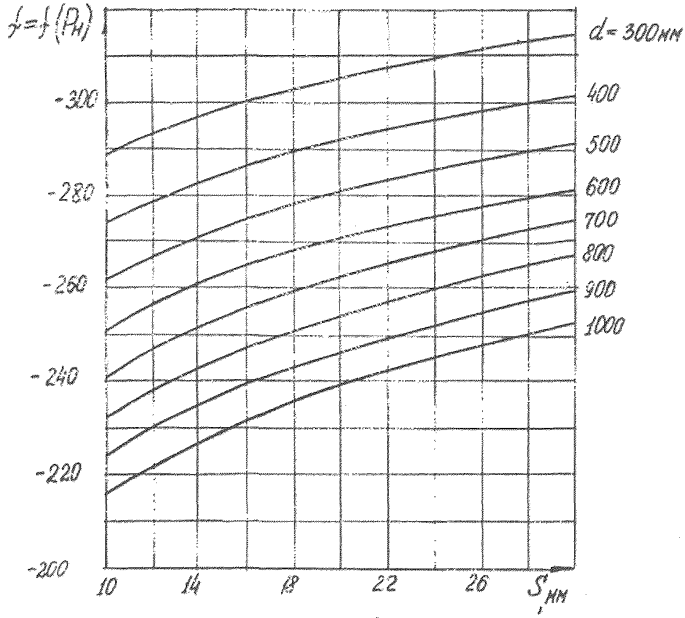
Черт.I9

Величина параметра $f = f(P_н)$ для определения усилия T_2 от нагрузки Рн=I (Д=I6000 мм)



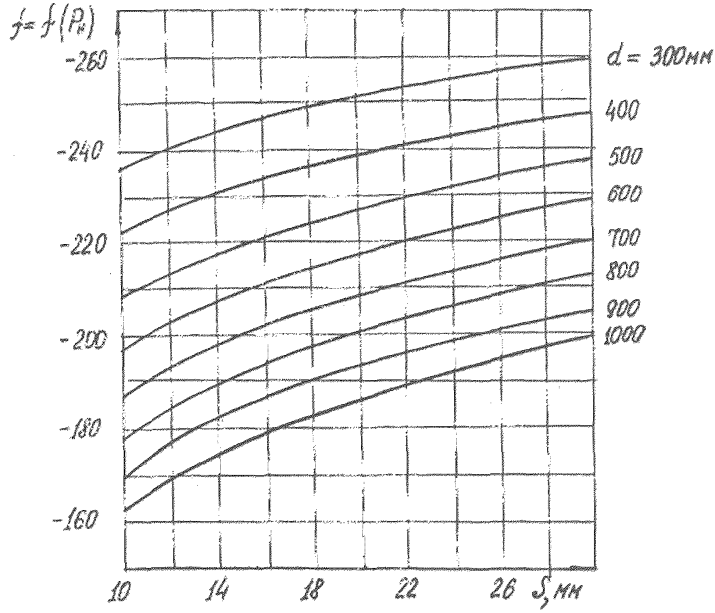
Черт.20

Величина параметра $f=f(P_н)$ для определения момента $M_т$ от нагрузки Рн=I (Д=I6000 мм)



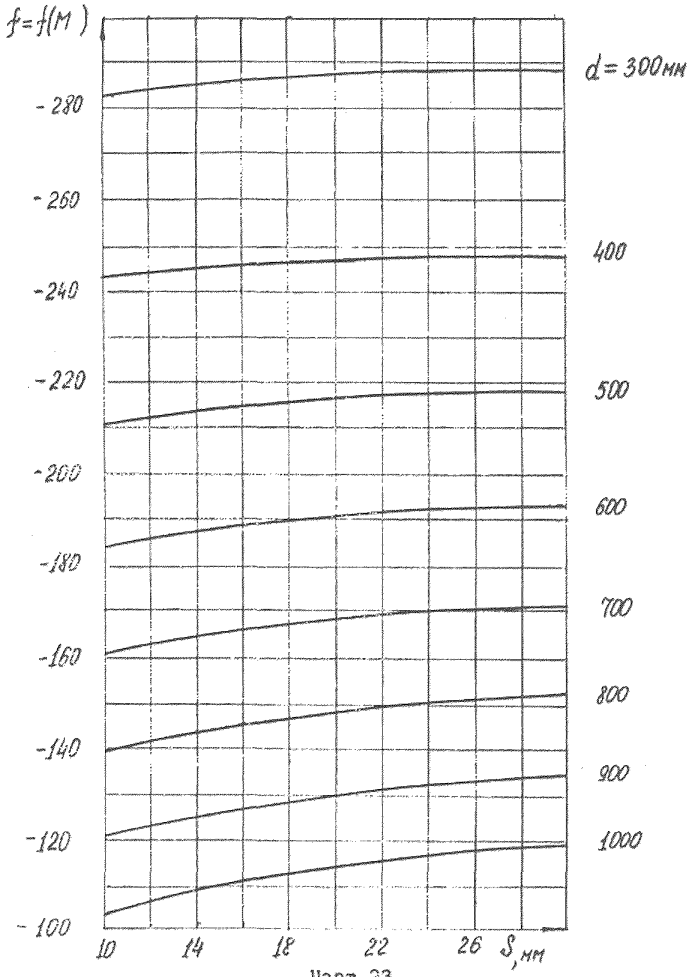
Черт.2I

Величина параметра $f = f(P_н)$ для определения момента M_2 от нагрузки Рн=1 (Д=16000 мм)



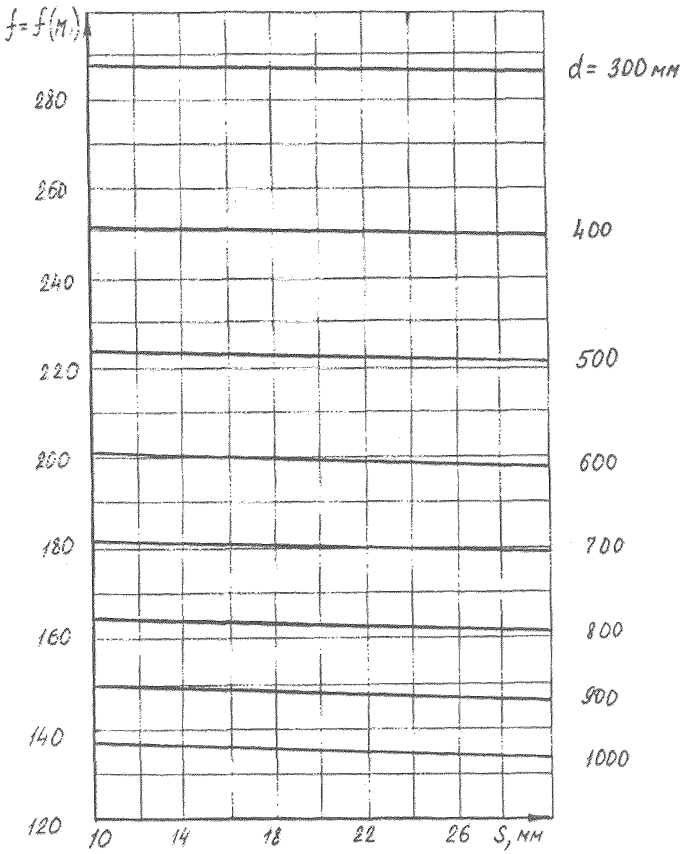
Черт.22

Величина параметра $f=f(M)$ для определения усилия T_I от нагрузки M =I (Д=I6000 мм)



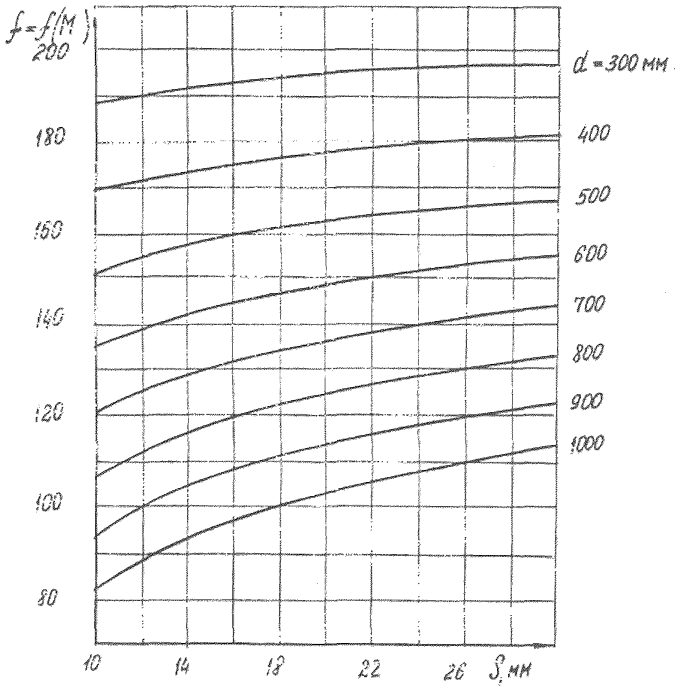
Черт.23

Величина параметра $f=f(M)$ для определения усилия T_2 от нагрузки M =I (Д=I6000 мм)



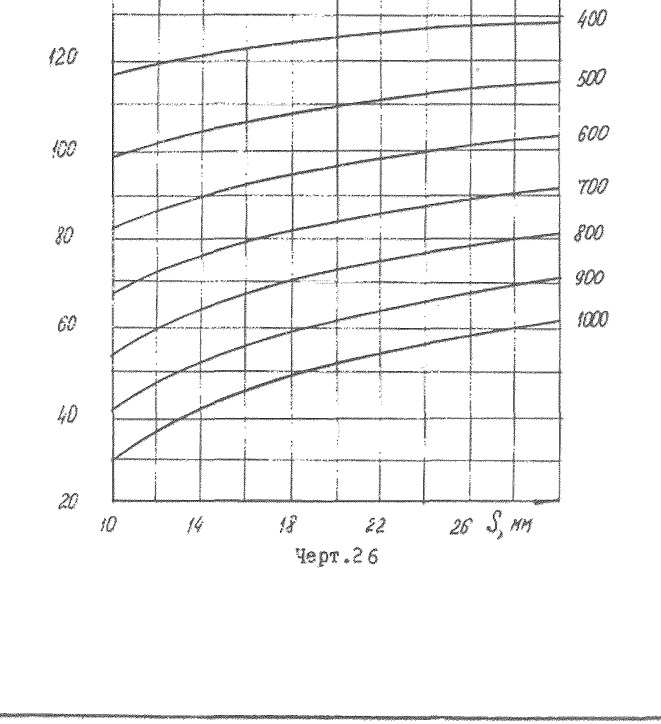
Черт.24

Величина параметра $f=f(M)$ для определения момента M_I от нагрузки $M_{..}=I$ (Д=16000 мм)



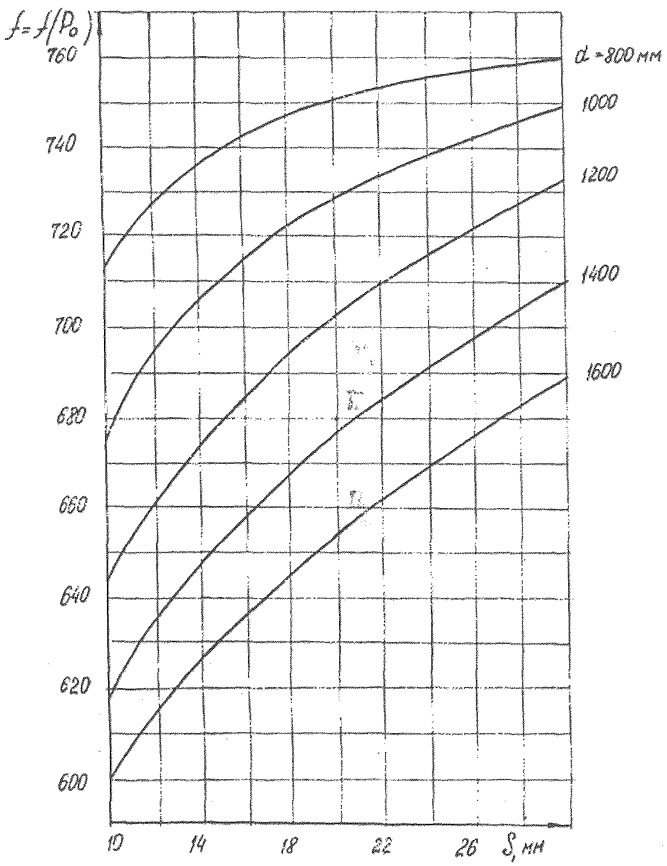
Черт.25

Величина параметра $f=f(M_1)$ для определения момента M_2 от нагрузки $M_1=1$ (Д=16000 мм)



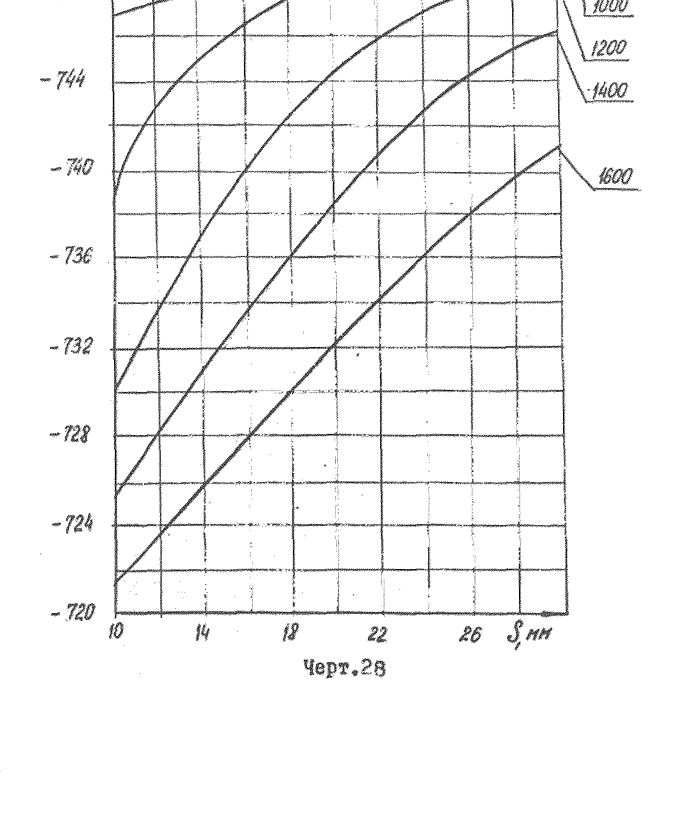
Черт.26

Величина параметра $f = f(P_o)$ для определения меридионального усилия T_I от нагрузки Po=I
(Д = I6000 мм)



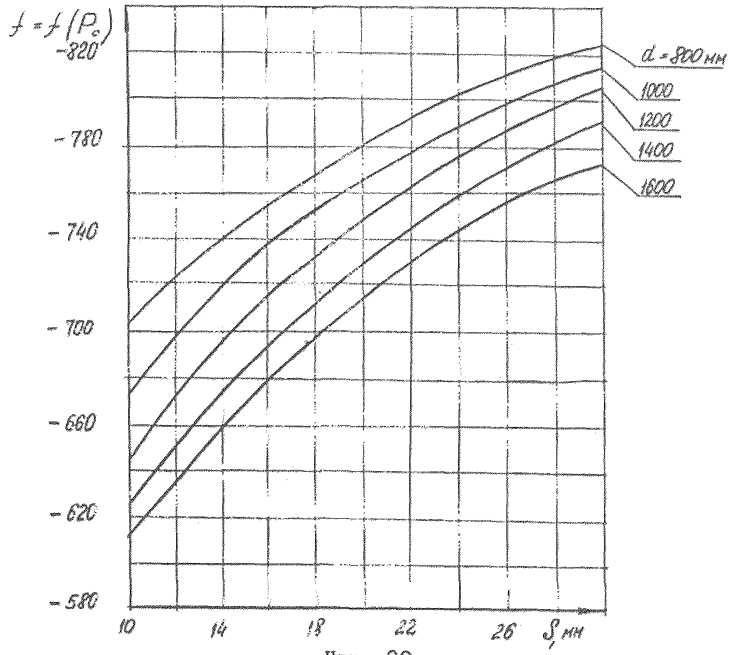
Черт.27

Величина параметра $f=f(P_0)$ для определения кольцевого усилия T_2 от нагрузки Ро=I (Д=I6000 мм)



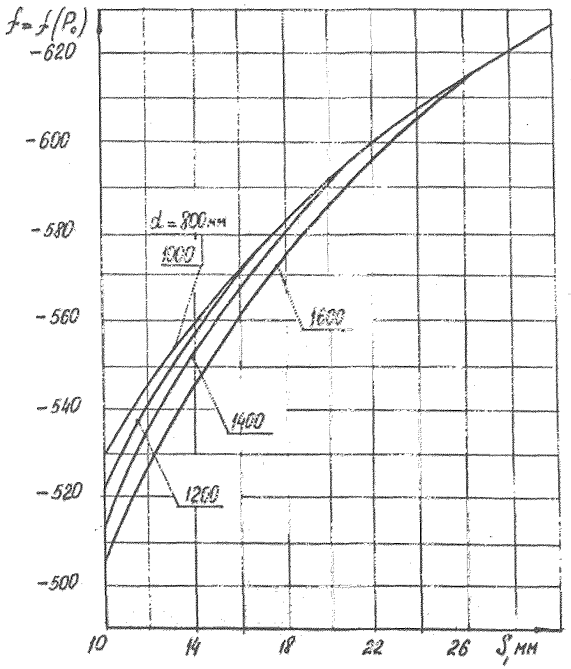
Черт.28

Величина параметра $f = f(P_c)$ для определения меридионального момента M_I от нагрузки Po=I
(Д = I6000 мм)



Черт.29

Величина параметра $f=f(P_0)$ для определения кольцевого момента M_2 от нагрузки Ро=I
(Д = I6000 мм)



Черт.30

Таблица 5.

Значения силовых факторов

f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$
I	0,I023	3I	0,2042	6I	0,4074	9I	0,8I28
2	0,I047	32	0,2089	62	0,4I69	92	0,83I8
3	0,I072	33	0,2I38	63	0,4266	93	0,85II
4	0,I096	34	0,2I88	64	0,4365	94	0,87I0
5	0,II22	35	0,2239	65	0,4467	95	0,89I3
6	0,II48	36	0,229I	66	0,457I	96	0,9I20
7	0,II75	37	0,2344	67	0,4677	97	0,9333
8	0,I202	38	0,2399	68	0,4786	98	0,9550
9	0,I230	39	0,2455	69	0,4898	99	0,9772
I0	0,I259	40	0,25I2	70	0,50I2	I00	I,000
II	0,I288	4I	0,2570	7I	0,5I29	I0I	I,023
I2	0,I3I8	42	0,2630	72	0,5248	I02	I,047
I3	0,I349	43	0,2692	73	0,5370	I03	I,072
I4	0,I380	44	0,2754	74	0,5495	I04	I,096
I5	0,I4I3	45	0,28I8	75	0,5623	I05	I,I22
I6	0,I445	46	0,2884	76	0,5754	I06	I,I48
I7	0,I449	47	0,295I	77	0,5888	I07	I,I75
I8	0,I5I4	48	0,3020	78	0,6026	I08	I,202
I9	0,I549	49	0,3090	79	0,6I66	I09	I,230
20	0,I585	50	0,3I62	80	0,63I0	II0	I,259
2I	0,I622	5I	0,3236	8I	0,6457	III	I,288
22	0,I660	52	0,33II	82	0,6607	II2	I,3I8
23	0,I698	53	0,3388	83	0,676I	II3	I,349
24	0,I738	54	0,3467	84	0,69I8	II4	I,380
25	0,I778	55	0,3548	85	0,7079	II5	I,4I3
26	0,I820	56	0,363I	86	0,7244	II6	I,445
27	0,I862	57	0,37I5	87	0,74I3	II7	I,479
28	0,I905	58	0,3802	88	0,7586	II8	I,5I4
29	0,I950	59	0,3890	89	0,7762	II9	I,549
30	0,I995	60	0,398I	90	0,7943	I20	I,585

4119

Продолжение таблицы 5.

f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$
I2I	I,622	I5I	3,236	I8I	6,457	2II	I2,88
I22	I,660	I52	3,3II	I82	6,607	2I2	I3,I8
I23	I,698	I53	3,388	I83	6,76I	2I3	I3,49
I24	I,738	I54	3,467	I84	6,9I8	2I4	I3,80
I25	I,778	I55	3,548	I85	7,079	2I5	I4,I3
I26	I,820	I56	3,63I	I86	7,244	2I6	I4,45
I27	I,862	I57	3,7I5	I87	7,4I3	2I7	I4,79
I28	I,905	I58	3,802	I88	7,586	2I8	I5,I4
I29	I,950	I59	3,890	I89	7,762	2I9	I5,49
I30	I,995	I60	3,98I	I90	7,943	220	I5,85
I3I	2,042	I6I	4,074	I9I	8,I28	22I	I6,22
I32	2,089	I62	4,I69	I92	8,3I8	222	I6,60
I33	2,I38	I63	4,266	I93	8,5II	223	I6,98
I34	2,I88	I64	4,365	I94	8,7I0	224	I7,38
I35	2,239	I65	4,467	I95	8,9I3	225	I7,78
I36	2,29I	I66	4,57I	I96	9,I20	226	I8,20
I37	2,344	I67	4,677	I97	9,333	227	I8,62
I38	2,399	I68	4,786	I98	9,550	228	I9,05
I39	2,455	I69	4,898	I99	9,772	229	I9;50
I40	2,5I2	I70	5,0I2	200	I0,00	230	I9,95
I4I	2,570	I7I	5,I29	20I	I0,23	23I	20,42
I42	2,630	I72	5,248	202	I0,47	232	20,89
I43	2,692	I73	5,370	203	I0,72	233	2I,38
I44	2,754	I74	5,495	204	I0,96	234	2I,88
I45	2,8I8	I75	5,623	205	II,22	235	22,39
I46	2,884	I76	5,754	206	II,48	236	22,9I
I47	2,95I	I77	5,888	207	II,75	237	23,44
I48	3,020	I78	6,026	208	I2,02	238	23,99
I49	3,090	I79	6,I66	209	I2,30	239	24,55
I50	3,I62	I80	6,3I0	2I0	I2,59	240	25,I2

Продолжение таблицы 5

f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$	f	Силовые факторы $\times 10^3$
241	25,70	271	51,29	301	102,3	331	204,2
242	26,30	272	52,48	302	104,7	332	208,9
243	26,92	273	53,70	303	107,2	333	213,8
244	27,54	274	54,95	304	109,6	334	218,8
245	28,18	275	56,23	305	112,2	335	223,9
246	28,84	276	57,54	306	114,8	336	229,1
247	29,51	277	58,88	307	117,5	337	234,4
248	30,20	278	60,26	308	120,2	338	239,9
249	30,90	279	61,66	309	123,0	339	245,5
250	31,62	280	63,10	310	125,9	340	251,2
251	32,36	281	64,57	311	128,8	341	257,0
252	33,11	282	66,07	312	131,8	342	263,0
253	33,88	283	67,61	313	134,9	343	269,2
254	34,67	284	69,18	314	138,0	344	275,4
255	35,48	285	70,79	315	141,3	345	281,8
256	36,31	286	72,44	316	144,5	346	288,4
257	37,15	287	74,13	317	147,9	347	295,1
258	38,02	288	75,86	318	151,4	348	302,0
259	38,90	289	77,62	319	154,9	349	309,0
260	39,81	290	79,43	320	158,5	350	316,2
261	40,74	291	81,28	321	162,2	351	323,6
262	41,69	292	83,18	322	166,0	352	331,1
263	42,66	293	85,11	323	169,8	353	338,8
264	43,65	294	87,10	324	173,8	354	346,7
265	44,67	295	89,13	325	177,8	355	354,8
266	45,71	296	91,20	326	182,0	356	363,1
267	46,77	297	93,33	327	186,2	357	371,5
268	47,86	298	95,50	328	190,5	358	380,2
269	48,98	299	97,72	329	195,0	359	389,0
270	50,12	300	100,0	330	199,5	360	398,1

Продолжение таблицы 5

f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы
361	0,4074	391	0,8128	421	1,622	451	3,236
362	0,4169	392	0,8318	422	1,660	452	3,311
363	0,4266	393	0,8511	423	1,698	453	3,388
364	0,4365	394	0,8710	424	1,738	454	3,467
365	0,4467	395	0,8913	425	1,778	455	3,548
366	0,4571	396	0,9120	426	1,820	456	3,631
367	0,4677	397	0,9333	427	1,862	457	3,715
368	0,4786	398	0,9550	428	1,905	458	3,802
369	0,4898	399	0,9772	429	1,950	459	3,890
370	0,5012	400	1,000	430	1,995	460	3,981
371	0,5129	401	1,023	431	2,042	461	4,074
372	0,5248	402	1,047	432	2,089	462	4,169
373	0,5370	403	1,072	433	2,138	463	4,266
374	0,5495	404	1,096	434	2,188	464	4,365
375	0,5623	405	1,122	435	2,239	465	4,467
376	0,5754	406	1,148	436	2,291	466	4,571
377	0,5888	407	1,175	437	2,344	467	4,677
378	0,6026	408	1,202	438	2,399	468	4,786
379	0,6166	409	1,230	439	2,455	469	4,898
380	0,6310	410	1,259	440	2,515	470	5,012
381	0,6457	411	1,288	441	2,570	471	5,129
382	0,6607	412	1,318	442	2,630	472	5,248
383	0,6761	413	1,349	443	2,692	473	5,370
384	0,6918	414	1,380	444	2,754	474	5,495
385	0,7079	415	1,413	445	2,818	475	5,623
386	0,7244	416	1,445	446	2,884	476	5,764
387	0,7413	417	1,479	447	2,951	477	5,888
388	0,7586	418	1,514	448	3,020	478	6,026
389	0,7762	419	1,549	449	3,090	479	6,166
390	0,7943	420	1,585	450	3,162	480	6,310

4119

Продолжение таблицы 5

f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы
481	6,383	511	9,016	541	12,74	571	17,99
482	6,457	512	9,120	542	12,88	572	18,20
483	6,531	513	9,226	543	13,03	573	18,41
484	6,607	514	9,333	544	13,18	574	18,62
485	6,683	515	9,441	545	13,34	575	18,84
486	6,761	516	9,550	546	13,49	576	19,05
487	6,839	517	9,661	547	13,65	577	19,28
488	6,918	518	9,772	548	13,80	578	19,50
489	6,998	519	9,886	549	13,96	579	19,72
490	7,079	520	10,00	550	14,13	580	19,95
491	7,161	521	10,12	551	14,29	581	20,18
492	7,244	522	10,23	552	14,45	582	20,42
493	7,328	523	10,35	553	14,62	583	20,65
494	7,413	524	10,47	554	14,79	584	20,89
495	7,499	525	10,59	555	14,96	585	21,13
496	7,586	526	10,72	556	15,14	586	21,38
497	7,674	527	10,84	557	15,31	587	21,63
498	7,762	528	10,96	558	15,49	588	21,88
499	7,852	529	11,09	559	15,67	589	22,13
500	7,943	530	11,22	560	15,85	590	22,39
501	8,035	531	11,35	561	16,03	591	22,65
502	8,128	532	11,48	562	16,22	592	22,91
503	8,222	533	11,61	563	16,41	593	23,17
504	8,318	534	11,75	564	16,60	594	23,44
505	8,414	535	11,89	565	16,79	595	23,71
506	8,511	536	12,02	566	16,98	596	23,99
507	8,610	537	12,16	567	17,18	597	24,27
508	8,710	538	12,30	568	17,38	598	24,55
509	8,810	539	12,45	569	17,58	599	24,83
510	8,913	540	12,59	570	17,78	600	25,12

Продолжение таблицы 5

f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы
601	25,41	631	35,89	661	50,70	691	71,61
602	25,70	632	36,31	662	51,29	692	72,44
603	26,00	633	36,73	663	51,88	693	73,28
604	26,30	634	37,15	664	52,48	694	74,13
605	26,61	635	37,58	665	53,09	695	74,99
606	26,92	636	38,02	666	53,70	696	75,86
607	27,23	637	38,46	667	54,33	697	76,74
608	27,54	638	38,90	668	54,95	698	77,62
609	27,86	639	39,36	669	55,59	699	78,52
610	28,18	640	39,81	670	56,23	700	79,43
611	28,51	641	40,27	671	56,89	701	80,35
612	28,84	642	40,74	672	57,54	702	81,28
613	29,17	643	41,21	673	58,21	703	82,22
614	29,51	644	41,69	674	58,88	704	83,18
615	29,65	645	42,17	675	59,57	705	84,14
616	30,20	646	42,66	676	60,26	706	85,11
617	30,55	647	43,15	677	60,95	707	86,10
618	30,90	648	43,65	678	61,66	708	87,10
619	31,26	649	44,16	679	62,37	709	88,10
620	31,62	650	44,67	680	63,10	710	89,13
621	31,99	651	45,19	681	63,83	711	90,16
622	32,36	652	45,71	682	64,57	712	91,20
623	32,73	653	46,24	683	65,31	713	92,26
624	33,11	654	46,77	684	66,07	714	93,33
625	33,50	655	47,32	685	66,83	715	94,41
626	33,88	656	47,86	686	67,61	716	95,50
627	34,28	657	48,42	687	68,39	717	96,61
628	34,67	658	48,98	688	69,18	718	97,72
629	35,08	659	49,55	689	69,98	719	98,86
630	35,48	660	50,12	690	70,79	720	100,0

Продолжение таблицы 5

f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы	f	Силовые факторы
721	101,2	751	142,9	781	201,8	811	285,1
722	102,3	752	144,5	782	204,2	812	288,4
723	103,5	753	146,2	783	206,5	813	291,7
724	104,7	754	147,9	784	208,9	814	295,1
725	105,9	755	149,6	785	211,3	815	298,5
726	107,2	756	151,4	786	213,8	816	302,0
727	108,4	757	153,1	787	216,3	817	305,5
728	109,6	758	154,9	788	218,8	818	309,0
729	110,9	759	156,7	789	221,3	819	312,6
730	112,2	760	158,5	790	223,9	820	316,2
731	113,5	761	160,3	791	226,5	821	319,9
732	114,8	762	162,2	792	229,1	822	323,6
733	116,1	763	164,1	793	231,7	823	327,3
734	117,5	764	166,0	794	234,4	824	331,1
735	118,9	765	167,9	795	237,1	825	335,0
736	120,2	766	169,8	796	239,9	826	338,8
737	121,6	767	171,8	797	242,7	827	342,8
738	123,0	768	173,8	798	245,5	828	346,7
739	124,5	769	175,8	799	248,3	829	350,8
740	125,9	770	177,8	800	251,2	830	354,8
741	127,4	771	179,9	801	254,1	831	358,9
742	128,8	772	182,0	802	257,0	832	363,1
743	130,3	773	184,1	803	260,0	833	367,3
744	131,8	774	186,2	804	263,0	834	371,5
745	133,4	775	188,4	805	266,1	835	375,8
746	134,9	776	190,5	806	269,2	836	380,2
747	136,5	777	192,8	807	272,3	837	384,6
748	138,0	778	195,0	808	275,4	838	389,6
749	139,6	779	197,2	809	278,6	839	383,6
750	141,3	780	199,5	810	281,8	840	398,1

4119

2.6. Расчет опорных колонн на прочность и устойчивость.

2.6.I. Расчет опорной колонны на прочность.

Максимальные напряжения в колонне:

$$\sigma_{max} = \frac{R_{оп}}{F_к} + \frac{M_к}{W_к} \leq \sigma_{доп} .$$

Здесь

$F_к = \pi \cdot d_{ср} \cdot S_к$ - площадь поперечного сечения колонны, см2;

$W_к = \frac{2 J_к}{d_к}$ - момент сопротивления поперечного сечения колонны, см^3;

$N_б, N, K_1, K^*, J_к, M_к$ - определяются по п.2.5.

2.6.2. Расчет опорной колонны на устойчивость.

При расчете на устойчивость напряжения определяются по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{R_{оп}}{F_к} \leq \varphi_к \cdot \sigma_{доп} .$$

Здесь

$\varphi_к$ - коэффициент, зависящий от гибкости сжатой колонны - λ, принимается по табл.6

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l_к}{i_к}$$

Для случая, когда один конец заделан, а на втором конце подвижная заделка

$$\mu = I$$

$i_к = \sqrt{\frac{J_к}{F_к}}$ - радиус инерции поперечного сечения колонны, см;

При $\frac{d_к}{2S_к} \geq 10$ $i_к \approx 0{,}354\, d_ф$

$\sigma_{доп}$ - допускаемое напряжение для материала колонны, принимается в соответствии с п.I.2.

Таблица 6

Значения коэффициентов гибкости

Гибкость элемента $\lambda = \mu l_к / i_к$	Марка стали	
	Ст.3, 20	09Г2С
60	0,820	0,792
70	0,770	0,730
80	0,715	0,660
90	0,655	0,592
100	0,582	0,515
110	0,512	0,440
120	0,448	0,383

4119

2.7. Расчет на прочность тяжей.

Растягивающие напряжения в тяжах определяются по формуле

$$\sigma = \frac{\Delta \cdot E}{l_j} \cdot \cos\alpha_j$$

Горизонтальное перемещение конца колонны

$$\Delta = \frac{N + N_6}{K^*}$$

$N, N_6, K^*, \alpha_j, l_j$ - определяются по п.2.5.

Максимальные напряжения возникают в тяжах, для которых $\cos\alpha_j$ является максимальным. $\cos\alpha_j$ принимается в соответствии с табл.4.

Условие прочности будет выполнено, если

$$\sigma < \sigma_{зап}$$

Приложение

Справочное

Пример расчета шарового резервуара номинальной емкостью 600 м^3

I. Исходные данные.

Геометрический объем резервуара - 606 м^3.

Место установки - г.Петропавловск-Камчатский, что соответствует по СНиП П-6-74 "Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия" и ~~СНиП П-А.12-69~~ СНиП П-7-81 ① "Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования" УI району по интенсивности снегового покрова, IУ району по скоростному напору ветра и 8-ми баллам сейсмичности.

Расчет выполнен только для режима эксплуатации. ②

По табл. I,2,3 имеем

q_0 = 0,0250 кгс/см2

$q_в$ = 0,0055 кгс/см2

K_c = 0,05

За расчетную температуру принимаем максимальную температуру среды, хранящейся в резервуаре.

$t_{расч.}$ = 20°С

D = I050 см - внутренний диаметр оболочки;

b = 60 см - ширина подкладного листа;

b_1 = I60 см - длина подкладного листа;

n = 8 - количество опор

4119

$d_к$ = 27,3 см - наружный диаметр колонны;

$S_к$ = I,2 см - толщина стенки колонны;

$l_к$ = 800 см - длина колонны;

$l'_к$ = 700 см - длина колонны до места крепления тяжей;

$l_о$ = 800 см - расстояние от земли до центра шара;

$d_т$ = 3,2 см - диаметр тяжа;

$\alpha_о$ = 90^0 - центральный угол середины опоры (опоры установлены в экваториальной зоне);

$\gamma_ж$ = 0,0007 кгс/см^3 - удельный вес жидкого продукта;

Коэффициент заполнения резервуара продуктом принимаем равным I

γ = 0,00785 кгс/см^3 - удельный вес стали;

$G_о$ = 50000 кгс - собственный вес резервуара;

p = 6 кгс/см2 - внутреннее давление;

E = $2 \cdot 10^6$ кгс/см2 - модуль упругости материала сферы и опорной конструкции при расчетной температуре;

ν = 0,3 - коэффициент Пуассона;

c = 0 - прибавка на коррозию;

$\varphi_с$ = I - коэффициент прочности сварных соединений;

g = 980 см/сек2 - ускорение земного тяготения;

Материал оболочки - сталь 09Г2С, для которой

$\sigma_{экп}$ = I700 кгс/см2

$\sigma_т$ = 2800 кгс/см2

4119

Материал колонны и тяжей - сталь 20. Для нее

$$\sigma_{доп} = 1470 \text{ кгс/см2}$$

$$\sigma_т = 2100 \text{ кгс/см2}$$

2. Определение толщины стенки резервура.

а) от действия внутреннего давления, равного

$$P_p = (P + 0{,}15P + 1 \cdot \gamma_ж \cdot D) \cdot 0{,}9 =$$

$$= (6 \cdot 1{,}15 + 1 \cdot 0{,}0007 \cdot 1050) \cdot 0{,}9 =$$

$$= 6{,}87 \text{ кгс/см2} \approx 6{,}9 \text{ кгс/см2}$$

Здесь

0,15 - коэффициент, учитывающий превышение рабочего давления на 15% в сфере при полном открытии предохранительных клапанов. Принят в соответствии с "Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением".

0,9 - коэффициент, принятый в соответствии с п.1.2.

$$S = \frac{P_p \cdot D}{4 \varphi_c \sigma_{доп} - P_p} + C + C_1 = \frac{6{,}9 \cdot 1050}{4 \cdot 1 \cdot 1700 - 6{,}9} + C + C_1 =$$

$$= 1{,}062 + C + C_1$$

С учетом дополнительной технологической прибавки принимаем толщину стенки резервуара и подкладного листа равной

$$S = S_1 = 1{,}6 \text{ см}$$

4119

б) проверка оболочки резервуара на устойчивость от возможного вакуума.

При условии

$$\frac{R}{S} > \frac{1{,}25 \cdot E}{\sigma_т}$$

$$\frac{525}{1{,}6} > \frac{0{,}125 \cdot 2 \cdot 10^6}{2800} \qquad (328 > 89{,}5)$$

Необходимая толщина стенки определяется по формуле

$$S = 0{,}00236 \cdot R + C + C_1 = 0{,}00236 \cdot 525 + 0{,}2 = 1{,}44 \text{ см}$$

Принятая толщина $S = 1{,}6$ см достаточна для сохранения устойчивости оболочки.

3. Расчет шарового резервуара в области опор.

Относительная высота уровня жидкости h_0 по графику на черт.2 при 100% заполнении равна 2.

Коэффициент формы резервуара $\widetilde{K}_1$ по черт.5

$$\widetilde{K}_1 = 1$$

Коэффициент гидростатического давления жидкости в области опоры

$$\widetilde{K}_0 = h_0 - 1 = 1$$

Толщина оболочки в опорной зоне

$$S_0 = S + S_1 = 3{,}2 \text{ см}$$

4119

Объем, занимаемый жидкостью

$$V = 606\ м^3 = 606 \cdot 10^6\ см^3$$

Расчет жесткости опорной конструкции производим в соответствии с п.2.5.1.7.

$$K^* = n \cdot K_1 + K_2 \ ;$$

$$K_1 = \frac{12 \cdot E \cdot J_к}{\ell_к^3} \ .$$

Т.к. $\frac{d_к}{2 \cdot \delta_к} = \frac{27,3}{2 \cdot 1,2} = 11,5 > 10$, то

$$J_к = 0,393\, d_{ср}^3 \cdot \delta_к = 0,393 \cdot 26,1^3 \cdot 1,2 = 8385\ см^4 \ ;$$

$$d_{ср} = d_к - \delta_к = 27,3 - 1,2 = 26,1\ см \ ;$$

$$K_1 = \frac{12 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 8385}{800^3} = \frac{3 \cdot 8385}{64} = 393\ кгс/см \ .$$

В соответствии с табл.4 суммарная жесткость тяжей K_2 при $n = 8$ равна

$$K_2 = 4 \cdot E F \left[\frac{\cos^2 \alpha_1}{\ell_1} + \frac{\cos^2 \alpha_2}{\ell_2}\right] \ ;$$

$$a_1 = 0,293 \cdot R_1 = 0,293 \cdot R = 0,293 \cdot 525 = 154\ см \ ;$$

$$a_2 = 0,707 \cdot R_1 = 0,707 \cdot R = 0,707 \cdot 525 = 371\ см \ ;$$

$$\ell_1 = \sqrt{a_1^2 + \ell_к^2} = \sqrt{154^2 + 700^2} = 10^2 \sqrt{2,36 + 49} = 716\ см \ ;$$

$$\ell_2 = \sqrt{a_2^2 + \ell_к^2} = \sqrt{371^2 + 700^2} = 10^2 \sqrt{13,8 + 49} = 797\ см \ ;$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{a_1}{\ell_1} = \frac{154}{716} = 0,215; \quad \cos^2 \alpha_1 = 0,0463; \quad \frac{\cos^2 \alpha_1}{\ell_1} = 0;645\ 10^{-4} \ ;$$

4119

$$\cos\alpha_2 = \frac{a_2}{\ell_2} = \frac{371}{791} = 0{,}469;\ \cos^2\alpha_2 = 0{,}22;\ \frac{\cos^2\alpha_2}{\ell_2} = 0{,}278\ 10^{-3};$$

$$F = 0{,}785 \cdot d_т^2 = 0{,}785 \cdot 3{,}2^2 = 8{,}05\ см^2;$$

$$K_2 = 4 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 8{,}05 \cdot \left[0{,}645 \cdot 10^{-4} + 2{,}78 \cdot 10^{-4}\right] =$$

$$= 8 \cdot 8{,}05 \cdot 10^6 \cdot 3{,}425 \cdot 10^{-4} = 220 \cdot 10^2 = 22057\ кгс/см;$$

$$K^* = 8 \cdot 393 + 22057 = 3144 + 22057 = 25200\ кгс/см.$$

Вес жидкого продукта

$$G_ж = \gamma_ж \cdot V = 0{,}0007 \cdot 506 \cdot 10^6 = 424200\ кгс.$$

Вес опорной конструкции

$$G_{оп} = 5860\ кгс.$$

Расчетный вес металлических конструкций

$$G_к = G_с + 0{,}5\,G_{оп} = 50000 + 0{,}5 \cdot 5860 = 53000\ кгс.$$

Период собственных колебаний шарового резервуара

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{G_к + K_1 G_ж}{K^* g}} = 2\pi\sqrt{\frac{53000 + 1 \cdot 424{,}2 \cdot 10^3}{25200 \cdot 980}} = 0{,}875\ сек$$

Коэффициент динамичности при действии сейсмической нагрузки β_0 определяется по формуле

$$\beta_0 = \frac{I}{T} = \frac{I}{0{,}875} = I{,}I43\ \frac{I}{сек}$$

При $\frac{\ell_к}{d_к} = \frac{800}{27{,}3} = 29{,}3 > 25$

$$K_0 = I{,}5$$

$$\beta = K_0 \cdot \beta_0 = I{,}5 \cdot I{,}I43 = I{,}7I4.$$

4179

Сейсмическая сила, действующая на резервуар, равняется

$$N = (G_к + \tilde{K}_1 \cdot G_ж)\,\beta \cdot K_c =$$

$$= (53000 + 424200) \cdot 1{,}714 \cdot 0{,}05 = 40900 \text{ кгс}.$$

Коэффициент динамичности при действии ветровой нагрузки определяется по графику на черт.4

$$\xi = 1{,}76$$

Тогда

$\beta_1 = 1 + 0{,}35 \cdot 1{,}76 = 1{,}616$ – коэффициент увеличения скоростного напора по высоте

Коэффициент возрастания скоростного напора ξ для высоты $l_0 = 8$ м определяется по графику на черт.3 и равен

$$\xi = 0{,}65$$

Горизонтальная составляющая ветровой нагрузки

$$N_в = \frac{4}{3}\,\pi \cdot R^2 \cdot q_c\,\beta_1 \cdot \xi =$$

$$= \frac{4}{3}\,\pi \cdot 525^2 \cdot 0{,}0055 \cdot 1{,}616 \cdot 0{,}65 = 6667 \text{ кгс}$$

Вертикальная составляющая снеговой нагрузки

$$N_c = \frac{2}{3}\,\pi \cdot R^2 \cdot q_c = \frac{2}{3}\,\pi \cdot 525^2 \cdot 0{,}025 = 14400 \text{ кгс}$$

Максимальная реакция опоры

4119

$$R_{on} = \frac{G_o + G_ж + N_a}{n} + \frac{l_к}{R} \cdot \frac{K_1}{K^*} (N + N_б)$$

$$= \frac{50000 + 424200 + 14400}{8} +$$

$$+ \frac{800}{525} \cdot \frac{393}{25200} \cdot (40900 + 6667) = 62208 \text{ кго}$$

Внутреннее давление в опорной области

$$p_o = p + (h_o - 1 + \cos \alpha_o) R \cdot \gamma_ж =$$

$$= 6 + (2 - 1) \cdot 525 \cdot 0,0007 = 6,4 \text{ кгс/см2}$$

Сосредоточенный изгибающий момент, действующий в узле сопряжения опоры со сферической оболочкой

$$M = M_{из} + Mк$$

$$M_{из} = \left(\frac{S}{2} + S_1 \right) R_{on} \cdot \sin \alpha_o = 2,4 \cdot 62208 = 149300 \text{ кго} \cdot \text{см}$$

$$Mк = 0,5 \frac{K_1}{K^*} l_к (N_б + N) = 0,5 \cdot \frac{393}{25200} \cdot 800 \ (6667 +$$

$$+ 40900) = 296727 \text{ кго} \cdot \text{см}$$

$$M = 149300 + 296727 = 446027 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

Сосредоточенная нормальная сила

$$P_н = R_{on} \cdot \cos \alpha_o = 0$$

Меридиональные и кольцевые мембранные напряжения от каждого вида нагрузки

$$\sigma_1^*(P_н) = -\frac{D \cdot P_н}{\pi \cdot d^2 (S-c)} = 0 \ ;$$

$$\sigma_2^*(P_н) = -\frac{D \cdot P_н}{\pi \cdot d^2 (S-c)} = 0 \ ;$$

$$\sigma_1^*(M) = \frac{4 \cdot D \cdot M}{\pi \cdot d^3 (S-c)} = \frac{4 \cdot 1050 \cdot 446027}{\pi \cdot 60^3 (1{,}6-0)} = 1726 \text{ кгс/см2} \ ;$$

$$\sigma_2^*(M) = -1726 \text{ кгс/см2} \ ;$$

$$\sigma_1^*(p_o) = \frac{D \cdot p_o}{4(S-c)} = \frac{1050 \cdot 6{,}4}{4 \cdot 1{,}6} = 1050 \text{ кгс/см2} \ ;$$

$$\sigma_2^*(p_o) = 1050 \text{ кгс/см2}.$$

Суммарные меридиональные и кольцевые мембранные напряжения

$$\sigma_1^* = \sigma_1^*(P_н) + \sigma_1^*(M) + \sigma_1^*(p_o) = 1726 + 1050 = 2776 \text{ кгс/см2}$$

$$\sigma_2^* = \sigma_2^*(P_н) + \sigma_2^*(M) + \sigma_2^*(p_o) = -1726 + 1050 = -676 \text{ кгс/см2}$$

По графикам черт.II÷I8 в соответствии с индексом M при $d = b = 600$ мм, а для p_o при $d = \varphi b_1 = 800$ мм и $S = 16$ мм определяются параметры $f(M)$, $f(p_o)$ для силовых факторов T_1, T_2, M_1, M_2.

Для

$T_I \rightarrow f = f(M) = -167$

$T_2 \rightarrow f = f(M) = 183$

$M_I \rightarrow f = f(M) = 136$

$M_2 \rightarrow f = f(M) = 84$

$T_I \rightarrow f = f(p_o) = 680$

$T_2 \rightarrow f = f(p_o) = -707$

$M_I \rightarrow f = f(p_o) = -700$

$M_2 \rightarrow f = f(p_o) = -535$

По полученным значениям параметра f из табл.5 определяем значения T_I, T_2, M_I, M_2 от единичных значений силовых факторов $M = 1$, $p_o = 1$ со знаком, соответствующим параметру f и после умножения табличного значения на величину нагрузки получаются действительные значения усилий и моментов.

В рассматриваемом случае

$T_I(P_н) = T_2(P_н) = M_I(P_н) = M_2(P_н) = 0$, так как $P_н = 0$

$T_I(M) = -0{,}004677 \cdot 446027 = -2130$ кгс/см;

$T_2(M) = 0{,}006761 \cdot 446027 = 3015$ кгс/см;

$M_I(M) = 0{,}002291 \cdot 446027 = 1022$ кгс·см/см;

$M_2(M) = 0{,}000691 \cdot 446027 = 308$ кгс·см/см;

$T_I(P_o) = 63{,}1 \cdot 6{,}4 = 404$ кгс/см;

$T_2(p_o) = -86{,}1 \cdot 6{,}4 = -551$ кгс/см;

4119

$M_I(p_o) = -79{,}43 \cdot 6{,}4 = -508$ кгс·см/см;

$M_2(p_o) = -11{,}89 \cdot 6{,}4 = -76$ кгс·см/см .

Меридиональные и кольцевые усилия краевого эффекта

$T_I = -2130 + 404 = -1726$ кгс/см;

$T_2 = 3015 - 551 = 2464$ кгс/см;

$M_I = 1022 - 508 = 514$ кгс·см/см;

$M_2 = 308 - 76 = 232$ кгс·см/см .

Меридиональные и кольцевые мембранные и изгибные напряжения

$$\sigma_1 = \sigma_1^* + \frac{T_1}{S-c} = 2776 - \frac{1726}{1{,}6} = 1697 \text{ кгс/см2}$$

$$\sigma_2 = \sigma_2^* + \frac{T_2}{S-c} = -676 + \frac{2464}{1{,}6} = 864 \text{ кгс/см2}$$

$$\sigma_{из1} = \frac{6M_1}{(S-c)^2} = \frac{6 \cdot 514}{1{,}6^2} = 1204 \text{ кгс/см2}$$

$$\sigma_{из2} = \frac{6M_2}{(S-c)^2} = \frac{6 \cdot 232}{1{,}6^2} = 544 \text{ кгс/см2}$$

Эквивалентные мембранные и изгибные напряжения:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} = \sqrt{1697^2 + 864^2 - 1697 \cdot 864} = 10^3\sqrt{2{,}16} =$$

$$= 1470 \text{ кгс/см}^2 ;$$

$$\sigma_{из} = \sqrt{\sigma_{из1}^2 + \sigma_{из2}^2 - \sigma_{из1} \cdot \sigma_{из2}} = \sqrt{1204^2 + 544^2 - 1204 \cdot 544} =$$

$$= 10^3\sqrt{1{,}090576} = 1044 \text{ кгс/см2}$$

Проверяем условие прочности в области максимально нагруженной опоры

$$1)\quad \left(\frac{\sigma}{\sigma_т}\right)^2 + 0{,}8\,\frac{\sigma_{из}}{\sigma_т} = \left(\frac{1470}{2800}\right)^2 + 0{,}8\,\frac{1044}{2800} =$$

$$= 0{,}2756 + 0{,}2983 = 0{,}574 < 1$$

$$2)\quad \sigma = 1470 < \sigma_{всп} = 1700 \text{ кгс/см}^2$$

Условия прочности выполняются.

4. Расчет на прочность и устойчивость опорных колонн.

а) Расчет колонны на прочность

$$F_к = \varphi \cdot a_{ср} \cdot \delta_к = \varphi\ (27{,}3 - 1{,}2)\cdot 1{,}2 =$$

$$= \varphi\ 26{,}1 \cdot 1{,}2 = 98{,}3 \text{ см}^2$$

$$J_к = 0{,}393\, a_{ср}^3 \cdot \delta_к = 0{,}393 \cdot 26{,}1^3 \cdot 1{,}2 = 8385 \text{ см}^4$$

$$W_к = \frac{J_к}{0{,}5\, a_к} = 642{,}5 \text{ см}^3$$

$$i_к = 0{,}354 \cdot a_{ср} = 0{,}354 \cdot 26{,}1 = 9{,}24 \text{ см}$$

Изгибающий момент в колонне

$$M_к = 0{,}5\,\frac{K_1}{K^*}\,l_к\,(N_б + N) = 0{,}5 \cdot \frac{393}{25200} \cdot 800 \cdot (6667 +$$

$$+ 40900) = 296727 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Максимальные напряжения в колонне

$$\sigma_{max} = \frac{R_{оп}}{F_к} + \frac{M_к}{W_к} = \frac{62208}{98,3} + \frac{296727}{642,5} =$$

$$= 633 + 462 = 1095 \text{ кгс/см2} ;$$

$$\sigma_{доп} = 1470 \text{ кгс/см2} .$$

б) Расчет на устойчивость

Приведенная длина колонны

$$l_{пр} = \mu \cdot l_к = 1 \cdot 800 = 800 \text{ см};$$

Гибкость колонны

$$\lambda_к = \frac{l_{пр}}{i_к} = \frac{800}{9,24} = 86,5$$

По табл.6 для гибкости $\lambda = 86,6$ коэффициент $\varphi_к = 0,6831$

Условие устойчивости

$$\sigma_{уст} = \frac{R_{оп}}{F_к} \leq \varphi_к \sigma_{доп}$$

$$\frac{62208}{98,3} = 633 < 0,6831 \cdot 1470 = 1004$$

выполняется.

5. Расчет на прочность тяжей .

Согласно табл.4 максимальное напряжение растяжения испытывают тяжи, у которых $\angle\alpha_i = min$, т.е. $\angle\alpha_i = \angle\alpha_2$.

4119

$$\cos\alpha_2 = \frac{a_2}{\ell_2} = 0{,}469$$

$$\sigma = \frac{\Delta \cdot E}{\ell_2} \cdot \cos\alpha_2 \;;$$

$$\Delta = \frac{N + N_8}{K^*} = \frac{47567}{25200} = 1{,}888 \text{ см}$$

$$\ell_2 = 791 \text{ см}$$

Тогда

$$\sigma = \frac{1{,}888 \cdot 2 \cdot 10^6}{791} \cdot 0{,}469 = 2238 \text{ кгс/см2} .$$

Условие прочности не выполняется, так как

$$\sigma = 2238 > \sigma_{доп} = 1470 \text{ (кгс/см2)}$$

Увеличиваем диаметр тяжей до $d_т = 53$ мм

Пересчитываем величины, связанные с размерами тяжей, которые изменяются при изменении их диаметров

$$F_т = 0{,}785 \cdot 5{,}3^2 = 22 \text{ см2}$$

$$G_{оп} = n \cdot \ell_к \cdot F_к \cdot \gamma + 2n\ell_т F_т \gamma = 8 \cdot 800 \cdot 98{,}3 \cdot 0{,}785 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ 16 \cdot 22 \cdot 7{,}85 \cdot 10^{-3} \cdot 810 = 4920 + 2470 = 7390 \text{ кгс}$$

$$G_к = 50000 + 0{,}5 \cdot 7390 = 53700 \text{ кгс}; \qquad \ell_т = 810 \text{ см}$$

$$K_2 = 4EF\left[\frac{\cos^2\alpha_1}{\ell_1} + \frac{\cos^2\alpha_2}{\ell_2}\right] =$$

$$= 4 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 22 \cdot 3{,}425 \cdot 10^{-4} = 60000 \text{ кгс/см}$$

$$K^* = 3144 + 60000 = 63144 \text{ кгс/см}$$

4119

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{53700+1\cdot 424{,}2\cdot 10^3}{63144\cdot 980}} = \frac{2\pi}{10}\cdot 0{,}88 = 0{,}553 \text{ сек}$$

По черт.4 коэффициент динамичности ε при действии ветровой нагрузки равен $\varepsilon = 1{,}48$.

Тогда

$$\beta_1 = 1 + 0{,}35\cdot 1{,}48 = 1{,}52 \quad ;$$

$$N_b = \frac{4}{3}\pi\cdot 525^2\cdot 0{,}0055\cdot 1{,}52\cdot 0{,}65 = 6270 \text{ кгс} \; ;$$

$$\beta_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}553} = 1{,}81 \quad ;$$

$$\beta = \beta_0\cdot K_0 = 1{,}5\cdot 1{,}81 = 2{,}71 \quad ;$$

$$N = (53700 + 424200)\cdot 2{,}71\cdot 0{,}05 = 64815 \text{ кгс} \; ;$$

$$R_{оп} = \frac{G_0 + G_* + N_c}{8} + \frac{\ell_к}{R}\cdot\frac{K_1}{K^*}(N+N_b) =$$

$$= \frac{53700 + 424200 + 14400}{8} + \frac{800}{525}\cdot\frac{393}{63144}(64815+$$

$$+ 6270) = 61712 + 674 = 62386 \text{ кгс} \; ;$$

$$M_к = 0{,}5\,\frac{K_1}{K^*}\cdot\ell_к(N_b+N) = 0{,}5\,\frac{393}{63144}\cdot 800\,(6270 +$$

$$+ 64815) = 176970 \text{ кгс}\cdot\text{см}.$$

4119

Максимальные напряжения в колонне

$$\sigma_{max} = \frac{63386}{98,3} + \frac{176970}{642} = 644 + 276 = 920 < 1470 \text{ кгс/см2}$$

Условие прочности выполняется

Перемещение конца колонны

$$\Delta = \frac{N + N_1}{K^*} = \frac{71085}{63144} = 1,126 \text{ см}$$

Максимальное напряжение в тяже

$$\sigma = \frac{1,126 \cdot 2 \cdot 10^6}{791} \cdot 0,469 = 1335 \text{ кгс/см}^2 < 1470 \text{ кгс/см}^2.$$

Проверим, удовлетворяют ли принятые первоначально размеры тяжей $d_т = 32$ мм условиям прочности, если резервуар будет установлен в несейсмичном районе.

Положив $N = 0$, пересчитаем величины, необходимые для расчета опорной конструкции

$$\Delta = \frac{N_1}{K^*} = \frac{6607}{25200} = 0,265 \text{ см}$$

$$\sigma = \frac{\Delta \cdot E}{\ell_2} \cos\alpha_2 = \frac{0,265 \cdot 2 \cdot 10^6}{791} \cdot 0,469 = 314 \text{ кгс/см2}$$

Прочность тяжей достаточна, так как

$$\sigma = 314 \text{ кгс/см2} < [\sigma] = 1470 \text{ кгс/см2}$$

4119

Таким образом, при установке шарового резервуара в несейсмичном районе достаточно принять тяги с поперечным размером $d_т$ = 32 мм.

Зам.директора Северодонецкого филиала НИИХИММАШ — В.А.Пименов

Зав.отделом стандартизации — И.Н.Пономаренко

Зав.лабораторией № 10 — С.В.Степанов

Зав.сектором прочности химоборудования — Р.В.Модестова

Руководитель темы — Е.Н.Самойленко

СОГЛАСОВАНО:

Управлением по котлонадзору и подъемным сооружениям Государственного Комитета по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и горному надзору при Совете Министров СССР (Госгортехнадзором СССР)

Зам.начальника Управления — письмом №13-22/826 от 28.08.1978г. — А.И.Мурачев

Директор НИИХИММАШ — И.И.Румянцев

Начальник сектора научно-исследовательского отдела стандартизации — В.В.Дюкин

Продолжение см. на следующем листе

4119

Зам.главного инженера
ПО "Уралхиммаш"
тов. Пермяков Г.Н.
письмом № 44а-747
20.07.1978г

Зам.главного инженера
института ЦНИИПроектстальконструкция
тов. Павлов Б.Г.
письмом № 10-352/17
11.07.1978г.

П О Я С Н И Т Е Л Ь Н А Я З А П И С К А.

Настоящая редакция проекта руководящего технического материала "Резервуары паровые стальные сварные. Методы расчета на прочность" разработана на основе I редакции с учетом замечаний организаций.

I редакция РТМ выслана на отзыв двадцати двум организациям 24 февраля с.г. с письмом № I53-IO-I674. Ответ прислали I9 организаций.

Замечания и предложения, присланные до IO мая, вошли в сводку отзывов и, в соответствии с принятым решением, учтены в настоящей редакции.

Зав.лабораторией IO С.В.Степанов

Зав.сектором прочности химоборудования Р.В.Модестова

4119

77

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ РД РТМ 26-01-III-78
(обозначение стандарта)

Изм.	Номер листов (страниц)				Номер документа	Подпись	Дата	Срок введения изменения
	измененных	замененных	новых	аннулированных				
Изм. 1	1					Пирог		01.01.1984г.
	4					Пирог		01.01.1984г.
	7					Пирог		01.01.1984г.
	58					Пирог		01.01.1984г.
Изм. 2	2					Дуб-		01.01.1989г.
	4					Дуб-		01.01.1989г.
	5					Дуб-		01.01.1989г.
	23					Дуб-		01.01.1989г.
	58					Дуб-		01.01.1989г.

19

gost.e-ecolog.ru